BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Science



2025
12/1

e-ISSN: 2458-7575

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Sahibi / Publisher

Prof. Dr. Zafer Asım KAPLANCIKLI

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Rektörü / Rector of Bilecik Seyh Edebali University

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Cenk KARAKURT

https://orcid.org/0000-0002-4204-5341

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

cenk.karakurt@bilecik.edu.tr

Editör / Editor

Doç. Dr. Aslı AKDENİZ KUDUBEŞ

https://orcid.org/ 0000-0002-0911-8182

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

asli.akdeniz@bilecik.edu.tr

Sekretarya / Secretariat

Arş. Gör. Dr. Ezgi GÜLER

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

ezgi.guler@bilecik.edu.tr

Arş. Gör. Damla KILIÇ ERİKGENOĞLU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

damla.kilic@bilecik.edu.tr

Arş. Gör. Kadriye Nurdanay ÖZTÜRK

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

kadriye.ozturk@bilecik.edu.tr

Dil Editörü / Language Editor

Öğr. Gör. Dr. Ayça BAKINER

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

ayca.bakiner@bilecik.edu.tr

İstatistik Editörü / Statistical Editor

Öğr. Gör. Saide Nur ALLAHVERDİ

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)

nur.allahverdi@bilecik.edu.tr

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Bilim Kurulu / Science Committee

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI
https://orcid.org/0000-0001-7148-0855
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
bahadir.sayinci@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Bülent ÇETİN
https://orcid.org/0000-0002-4679-2555
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
bcetin@atauni.edu.tr

Prof. Dr. Cenk KARAKURT
https://orcid.org/0000-0002-4204-5341
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
cenk.karakurt@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Oğuz ARSLAN
https://orcid.org/ 0000-0001-8233-831X
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
oguz.arslan@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Sıddıka ÖZKALDI KARAKUŞ
https://orcid.org/ 0000-0002-2699-4109
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
siddika.karakus@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Uğur YÜZGEÇ
https://orcid.org/0000-0002-5364-6265
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
ugur.yuzgec@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Adem KOÇYİĞİT
https://orcid.org/0000-0002-8502-2860
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
adem.kocyigit@bilecik.edu.tr

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Arslan ÜNAL
https://orcid.org/0000-0002-5857-7318
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
arslan.unal@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Bahadır SAYINCI
https://orcid.org/0000-0001-7148-0855
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
bahadir.sayinci@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Bülent ÇETİN
https://orcid.org/0000-0002-4679-2555
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
bcetin@atauni.edu.tr

Prof. Dr. Cihan KARAKUZU
https://orcid.org/0000-0003-0569-098X
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
cihan.karakuzu@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Nazile URAL
https://orcid.org/0000-0002-2268-842X
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
nazile.ural@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Süheyla YEREL KANDEMİR
https://orcid.org/0000-0003-4056-5383
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
suheyla.yerel@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Ülküye Dudu GÜL
https://orcid.org/0000-0001-6443-1633
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
ulkuyedudu.gul@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Adem KOÇYİĞİT
https://orcid.org/0000-0002-8502-2860
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
adem.kocyigit@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. Fatih APAYDIN
https://orcid.org/0000-0002-6905-7465
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
fatih.apaydin@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Miraç ALAF
https://orcid.org/0000-0002-4807-3909
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
mirac.alaf@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Osman Zeki OKUYUCU
https://orcid.org/0000-0003-4379-0252
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
osman.okuyucu@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. Şenay BALBAY
https://orcid.org/0000-0002-0016-7973
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
senay.balbay@bilecik.edu.tr

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Tuğba YURDAKADİM
https://orcid.org/0000-0003-2522-6092
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
tugba.yurdakadim@bilecik.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Eralp ŞENER
https://orcid.org/0000-0003-4876-6964
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
eralp.sener@bilecik.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Gülçin AKGÖREN PALABIYIK
https://orcid.org/0000-0001-5354-2346
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
gulcin.akgoren@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. İsa ARDAHANLI
https://orcid.org/0000-0002-9309-803X
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
isa.ardahanli@bilecik.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Meryem GÖKTAŞ
https://orcid.org/0000-0003-1583-8300
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
meryem.goktas@bilecik.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin SAMAV
https://orcid.org/0000-0001-8844-2513
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
yasemin.samav@bilecik.edu.tr

Öğr. Gör. Dr. Abdullah BİÇER
https://orcid.org/0000-0003-4648-1834
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
abdullah.bicer@bilecik.edu.tr

Prof. Dr. Burak DİKİCİ
https://orcid.org/0000-0002-7249-923X
Atatürk Üniversitesi (Türkiye)
burakdikici@atauni.edu.tr

Prof. Dr. Ali GÜROL
https://orcid.org/0000-0001-9494-3533
Atatürk Üniversitesi (Türkiye)
agurol@atauni.edu.tr

Prof. Dr. Serpil TÜRKYILMAZ
https://orcid.org/0000-0002-7193-4148
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
serpil.turkyilmaz@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL
https://orcid.org/0000-0001-6066-611X
Konya Teknik Üniversitesi (Türkiye)
sbulbul@ktun.edu.tr

Doç. Dr. Veysel ÇOBAN
https://orcid.org/0000-0002-7885-1935
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
veysel.coban@bilecik.edu.tr

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Alan Editörleri / Field Editors

Doç. Dr. Deniz TÜRKÖZ ALTUĞ
https://orcid.org/0000-0002-1861-6263
Süleyman Demirel Üniversitesi (Türkiye)
denizturkoz@sdu.edu.tr

Dr. Öğr. Üyesi Nurcan VARDAR YEL
https://orcid.org/0000-0003-0994-5871
Altınbaş Üniversitesi (Türkiye)
nurcan.vardar@altinbas.edu.tr

Doç. Dr. Nihal ŞİMŞEK ÖZEK
https://orcid.org/0000-0002-7326-5670
Atatürk Üniversitesi (Türkiye)
nihal.ozek@atauni.edu.tr

Doç. Dr. Rafig GURBANOV
https://orcid.org/0000-0002-5293-6447
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
rafig.gurbanov@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. Sinan TEMEL
https://orcid.org/0000-0002-0889-9490
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
sinan.temel@bilecik.edu.tr

Doç. Dr. Emre DANDIL
https://orcid.org/0000-0001-6559-1399
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (Türkiye)
emre.dandil@bilecik.edu.tr

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 12, Sayı 1, 2025 / Volume 12, Number 1, 2025 **ISSN 2458-7575**

Hakemli bir dergi olan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi yılda iki kez yayımlanır ve yayımlanan tüm eserlerin yayın hakkı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi'ne aittir. Dergimiz, Mühendislik ve Fen Bilimleri alanlarında Türkçe ve İngilizce özgün araştırma makalelerini yayınlayarak ulusal ve uluslararası düzeyde bilgi paylaşımına katkıda bulunmayı amaçlar. Makale değerlendirme ve yayın süreci için herhangi bir ücret talep etmez. Gönderilen makaleleren az üç hakem tarafından çift taraflı kör hakemlik değerlendirmesine tabi tutulur. Hakem isimleri gizli tutulmakta ve yayımlanmamaktadır. Dergide yayınlanan tüm yazıların, dil, bilim ve hukuki açıdan bütün sorumluluğu yazarlarına aittir.

The Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Science is a peer-reviewed journal published twice a year, and all published works are the property of Bilecik Şeyh Edebali University. Our journal aims to contribute to the sharing of knowledge at the national and international levels by publishing original research articles in Turkish and English in the fields of Engineering and Science. No fees are charged for the article review and publication process. Submitted articles are subject to double-blind peer review by at least three referees. The names of the referees are kept confidential and are not published. The authors are solely responsible for the content of all articles published in the journal, including language, scientific accuracy, and legal compliance.

Dizinlenme Bilgileri / Indexing

Dergimiz, TR Dizin (2018), EBSCO (2020) ve Eurasian Scientific Journal Index tarafından taranmaktadır.
Dizin bilgileri için bakınız: https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd/page/12131
Our journal is indexed by TR Dizin (2018), EBSCO (2020), and Eurasian Scientific Journal Index.
For index information, please visit: https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd/page/12131

İletişim Bilgileri / Contact Informations

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 11230 Bilecik, Türkiye
Bilecik Seyh Edebali University, School of Graduate Studies, 11230 Bilecik, Turkey
Web: http://dergipark.org.tr/pub/bseufbd
0228 214 11 11
0228 214 11 32 (fax)
lisansustu@bilecik.edu.tr

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12. Cilt − 1. Sayı, 2025 Volume 12 − Issue 1, 2025

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

1	**Betonarme Bir Yapının İnşaat Mühendisliğinde Kullanılan Paket Programlar İle Analizi Ve Karşılaştırılması** *Eşref Gençay*	**1-8**
2	**Sızıntı Sıvıları ile Yıllandırılmış Geomembranların Ara Yüzey Kayma Dayanımı Davranışları** *İnci Develioğlu, Hasan Fırat Pulat*	**9-26**
3	**Konya Meyil Obruk Gölü'nün Karakteristik Özellikleri, Bazı Siyanobakteri ve Diyatom Taksonlarının İzolasyonu, Onların Moleküler-Morfolojik Teşhisleri** *Zeliha Demirel, Şeyda Parlar, Berkant Coşkuner, Arzu Yıldırım, Meltem Conk Dalay, Yaşar Eren*	**27-46**
4	**Investigation of the Flow Characteristics of the Compression Ring Groove Cavity in the Expansion Time of a Compression Ignition Engine** *Emrah Kantaroğlu*	**47-59**
5	**Kılçadır Köyü (Merkez-Bingöl) Çayır Alanlarının Ot Verimi ve Bazı Kalite Özellikleri Açısından İncelenmesi** *Hamza Balkan, Erdal Çaçan*	**60-69**
6	**Application of Monitoring and Controlling of Water Storage Tanks, Pumps, and pH Value in Industrial Areas Based on Industrial Internet of Things** *Hayati Mamur, Harun Şentürk, Mohammad Ruhul Amin Bhuiyan*	**70-80**
7	**Dinamik Titreşim Emici Sistem Tasarımı ve Enerji Hasadı Uygulaması** *Sinan Başaran*	**81-92**
8	**Effects of Building Slenderness on the Behaviour of Shear Wall-Frame System Buildings for Various Soil Classes** *İsmail Tozlu, Erhan Eren, Şenol Gürsoy*	**93-107**
9	**Real-Time Control and Performance Analysis of PLC-SCADA Supervised Stand-Alone Solar Tracking Systems** *Faysil Alfirjani, Hüseyin Altınkaya*	**108-136**
10	**Z-Skor ve Kutu Grafiğiyle Sapan Değer Belirleme** *Ahu Dede, Necati Ağıralioğlu*	**137-159**
11	**Radiological Doses Assessment of NORM Waste for Soil Samples in Some of the Oil Fields** *Marwan M. A. Al-Tameei, Kareem K. Mohammed, İlyas İnci*	**160-166**
12	**Investigation of Intermolecular Interactions of 2-Acetoxybenzoic Acid with Hirshfeld Surfaces** *Mehmet Hanifi Kebiroğlu, Mücahit Yılmaz*	**167-174**
13	**Asenkron Motor İç Bilezik ve Dış Bilezik Rulman Arızalarının Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Entropi Analizleri** *Ahmet Kabul*	**175-195**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12. Cilt − 1. Sayı, 2025 Volume 12 − Issue 1, 2025

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

14	**Chaotic Image Encryption with Normal Sinus Rhythm ECG Signal and Chaoticity in ECG Signal** *Zehra Gülru Çam Taşkıran, Ramazan Cenker*	**196-205**
15	**Hipertansiyon Tedavisi İçin Yeni Ace İnhibitörlerinin Tasarımı, Sentezi, Moleküler Doking-Dinamik Çalışmaları** *Derya Osmaniye, Bedriye Çelik*	**206-223**
16	**Fonksiyonel Derecelendirilmiş İki Boyutlu Plakın Isıl Analizi** *Oğuzhan Demirel, Durmuş Yarımpabuç*	**224-232**
17	**Enhancing Hotel Recommendations through Feature- based Clustering** *Ömer Arifoğulları, Gülfem Işıklar Alptekin, Günce Keziban Orman*	**233-241**
18	**İstanbul'da Bulunan Ahşap Evlerin Kullanıcı Memnuniyeti Açısından Değerlendirilmesi** *Özkan Avit, Halil Anaç*	**242-256**
19	**Sezgisel Bulanık Tek-Yönlü ANOVA Modeli ve Bir Uygulama** *Zeynep Gökkuş, Sevil Şentürk*	**257-265**
20	**Maya Bazlı Çinko Oksitlerin Gıda Boyası Gideriminde Kullanımı** *Şennur Merve Yakut, Hüseyin Avcı, Şahlan Öztürk*	**266-273**
21	**Makine Öğrenimi Yaklaşımları Kullanarak El Hareketi Tabanlı Biyometrik Kimlik Doğrulama** *Zekeriya Katılmış*	**274-289**
22	**Tane Boyutunun Polikristal NiAl Nano Telinin Mekanik Özelliklerine Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması** *Sefa Kazanç*	**290-300**
23	**Surface Disinfection of Bread Wheat Seeds for in vitro Germination** *Begüm Terzi Aksoy*	**301-310**
24	**MAG Gazaltı Kaynağı ile Birleştirilen Farklı Otomotiv Çeliklerinin (SPH270-C/SPH440-OD) Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** *Çağrı Ertürk, Muhammed Elitaş*	**311-320**
25	**Bilişsel Kablosuz Algılayıcı Ağlar için IEEE 802.22 tabanlı Düğüm Yerleştirme Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi** *Hüseyin Ekici, Muhammed Enes Bayrakdar*	**321-332**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12. Cilt − 1. Sayı, 2025 Volume 12 − Issue 1, 2025

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makaleleri / Review Articles

26	**Mikroplastik Kirliliği: Sağlık Riskleri ve Sürdürülebilir Çözüm Önerileri** *Burcu Sarı Gençağ*	**333-343**
27	**Meyve Bazlı Probiyotiklere Genel Bir Bakış** *Gizem Tiryaki, Emine Nakilcioğlu*	**344-353**
28	**Research in Applications of Eggshell in Different Industries** *Deniz Türköz Altuğ, Taner Kalaycı, Neslihan Kaya Kınaytürk, Belgin Tunalı*	**354-366**
29	**Altınotu (Helichrysum italicum Mill.): Yetiştiriciliği ve Kullanım Alanları** *Selim Taşgın, Zehra Aytaç*	**367-375**
30	**Siyanobakterilerin Gıda ve Gıda Bileşeni Olarak Kullanımı** *Merve Karakurluk, Tuğba Demiriz Yücer*	**376-383**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 01-08, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1363036
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Betonarme Bir Yapının İnşaat Mühendisliğinde Kullanılan Paket Programlar İle Analizi Ve Karşılaştırılması

Analysis and Comparison of a Reinforced Concrete Building with Package Programs Used in Civil Engineering

Eşref Gençay[1*]

Geliş / Received: 19/09/2023 ***Revize / Revised: 17/04/2024*** ***Kabul / Accepted: 17/04/2024***

ÖZ

Bu çalışma kapsamında inşaat sektöründe yapı tasarımı ve analizinde sıkça kullanılan STA4-CAD, SAP2000 ve İdeCAD paket programlarıyla 5 katlı bir betonarme yapı analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda kat ağırlıkları, deprem kütleleri, yumuşak kat düzensizlikleri, titreşim periyotları gibi verilerin değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken TBDY 2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) esas alınmış ve paket programlarda tasarım yapılırken aynı boyutlarda ve bölgede olduğu varsayılmıştır. Analiz çalışmasına ait sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler- SAP2000, STA4-CAD, İdeCAD. Dinamik analiz

ABSTRACT

Within the scope of this study, a 5-storey reinforced concrete structure was analysed with STA4-CAD, SAP2000 and İdeCAD package programs, which are frequently used in building design and analysis in the construction industry. As a result of the analysis, the values of data such as storey weights, earthquake masses, soft storey irregularities, vibration periods were compared. While making this comparison, TBDY 2018 (Turkey Building Earthquake Regulation) was taken as a basis, and it was assumed that they were in the same dimensions and region while designing in package programs. The results of the analysis study were examined.

Keywords- SAP2000, STA4-CAD, İdeCAD, Dynamic Analysis

[1]*Sorumlu yazar iletişim: gencayesref@gmail.com(https://orcid.org/0000-0003-2596-1134)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Karaman, Türkiye

I. GİRİŞ

Barınma ihtiyacı ilk çağlardan bu yana insanların temel yaşam gereksinimleri arasında yer almakta, Bu temel gereksinim ilk çağlarda ağaç kovukları ve mağaralar iken zamanla teknoloji ve bilimin artması ile daha kaliteli, dayanıklı ve güvenli olan yapılara dönüşmeye başlanmıştır. Yapı tasarımları yapılırken çevresel ve dinamik faktörler göz önünde bulundurularak yapıların uzun ömürlü ve güvenilir olması için Dünyada ve ülkemizde belli yönetmelikler ve standartlar yayınlanmıştır.

Ülkemizde depremler genellikle fay kuşakları boyunca meydana gelmektedir. Oluşan bu depremlerden yola çıkıldığında ülkemiz aktif fay kuşağında bulunduğu ve çok sayıda tektonik kökenli deprem olduğunu ve oluşacağını göstermektedir.

Ülkemizin fay haritasını göz önüne aldığımızda ülkenin yaklaşık %90'nı aktif deprem bölgelerinde bulunmaktadır. Bu bölgelerdeki nüfus ve yapılar göz önüne alındığında ülke nüfusunun yaklaşık %98'ü sanayi tesislerinin %98'si ve barajların yaklaşık %95'nı aktif deprem bölgelerinde bulunmaktadır. [10] Son dönemlerde ülkemizde oluşan ve acılarının daha yeni sarmaya başladığımız 06 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin acı tecrübeleri bize mevcut yapıların yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ve yeni yapılacak yapı stoklarının projelendirilmesinin ne kadar değerli ve titizlikle yapılması konusunda büyük bir uyarı niteliğinde olduğu görülmüştür.

Türkiye'de son yüz yılda 6 ve üzeri büyüklüğe sahip çok sayıda yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Meydana gelen bu depremlerde can kaybı ve ülke ekonomisine ağır faturalar yüklemiştir. Türkiye'de meydana gelen bu ağır tabloların gelecekte tekrar yaşanmaması dayanıklı ve kaliteli yapı stoku oluşturmak için belli yönetmelikler yayınlamıştır. İlki 1939 Erzincan depreminden sonra yayınlanan Zelzele Mıntıkalarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesinden (1940) yönetmeliğinin ardından 1953, 1962, 1968, 1975, 1998, 2007 ve son olarak yayınlanan ve halen yürüklükte olan 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğidir (TBDY)

İ.S. Gelibolu 2007 DBYBHY ve 2018 TBDY tasarımı yapılacak yapılar için yönetmeliğin **4.5.1.1.** maddesinde bina taşıyıcı sistemleri daima üç boyutlu olarak modellenecektir ibaresinden dolayı yapı tasarımı yapılırken; tasarımın hızlı, ekonomik ve güvenli olarak gerçekleşmesi için son yıllarda paket yazılım programları önem kazanmıştır. Fakat kamu kumları ve belediyelerde incelenmesi titizlikle yapıldığı halde piyasada kullanılan paket programların yapı analiz sonuçlarında hangi programın daha güvenli olduğu genellikle tartışma konusu olmuştur. [1] Bu bölümde bu tartışmaları ortadan kaldırmak için yapılan araştırma ve tartışmalara değinilmiştir.

İ.S. Gelibolu yapmış olduğu çalışmada 2007 yılı Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmeliği analiz hesapları bakımından irdelenmesini yapmış. İlk olarak Sta4-Cad paket programında tasarlanan yapılardan elde edilen kat yükleri referans alınarak SAP2000 programında aynı veriler uygulanıp Mod birleştirme yöntemine göre karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmayla aynı veriler altında binalara etki eden deprem kuvvetleri ile yönetmelik çerçevesinde istenilen düzensizlik ve deprem kontrolleri yapılmıştır. Bu karşılaştırmada sonuçların birbirine yakın çıktığını dile getirmiştir. [1]

Deprem yönetmeliğinde yer alan yapı düzensizliklerine sahip bir binanın, deprem yükü karşısındaki tepkilerini Probina, İdeCAD, STA4CAD ve BABALİOĞLU programlarıyla çözdükten sonra dünyaca kabul gören SAP2000 programı referans alınıp karşılaştırılmış aradaki farklılıklar, benzerlikler ve yanlışlıklar ortaya koymuştur yapılan bu çalışmaya göre yapısal düzensizlikleri içinde barındıran ya da sınırda olan yapıların piyasada sıklıkla kullanılan paket programlar tarafından birbirinden farklı sonuçlar verdiğini göstermiştir.[2]

Sta4-Cad ve SAP2000 programlarının DBYBHY-2007 ışığında çözdüğümüz örneklerdeki betonarme yapılara verdiği düşey ve yatay deprem yüklerine göre deprem hesabı karşılaştırılması yapılmış yaptığı çalışmada zemin koşulları, mimari alanı, deprem parametreleri ve yük değerleri aynı olan farklı taşıyıcı sistem kriterlerine sahip betonarme sistemleri analizleri yapılmış ve veriler karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada söz konusu iki paket programın analiz verilerinin birbirine yakın olduğu dile getirilmiştir.[3]

TBDY 2018'de yapılan güncellemeler ışığında ülkemizde proje bürolarında sıklıkla kullanılan STA4CAD ve SAP2000 yapı analiz programları ile modellenen 5 ve 10 katlı betonarme binaların Eşdeğer Deprem Yükü, Mod Birleştirme ve Zaman Tanım Alanında Doğrusal Analiz yöntemleri ile analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan tasarımlar doğrultusunda Mod Birleştirme yönteminin daha uygun olduğu ve SAP2000 programının kullanımının zahmetli ama analiz yorumlamasında daha kaliteli olduğu dile getirilmiştir.[4]

STA4CAD, SAP2000 ve İdeCAD paket programları ile on beş katlı, iki farklı tip betonarme yapı modeli analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilmiş olan kat ağırlıkları, doğal titreşim periyotları, etkin kütle katılım oranları, deprem kuvvetleri, yumuşak kat düzensizlikleri ve ikinci mertebe etkileri bakımından elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırmalar o dönemde yürüklükte olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) esas alınmıştır. Yapılan çalışmada on beş katlı betonarme çerçeveli bir yapı ile perdeli-çerçeveli bir yapı tasarlanarak paket programlarda analiz edilip örnekler incelenmiştir.

SAP2000 programında elde edilen veriler referans alınıp İdeCAD ile STA4CAD paket programlarına göre sonuçlar irdelenmiştir.[5]

Benzer çalışmalar belirtilen paket programlar haricinde kalan programlarda da yapılmış STA4-CAD ve ETABS arasında farklı perde tilerine göre analiz değerleri yapılmış taşıyıcı sistemi sistematik olan yapılarda analiz sonuçları yakın çıkarken taşıyıcı sistemi sistematik düzensiz olan yapılarda farklılıklar bulunmaktadır. Taşıyıcı yapısı düzensiz ve yüksek katlı betonarme yapılarda ETABS programının daha az metraj ve daha ekonomik olduğu dile getirilmiştir.[6]

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde tasarımı yapılan yapı kesit boyutları düzensizlikler gibi etkenlere göre programlar kendi aralarında farklı çalışabildiği dile getirilmiş olsa da bazı çalışmalara göre herhangi bir farklılığın olmadığına değinilmiştir. Yapılan çalışmalar göz önüne alınarak STA4CAD, İdeCAD ve SAP2000 programları ile ve TBDY 2018'e göre 5 katlı bir yapı tasarlanıp eşdeğer deprem kuvveti ve mod birleştirme yöntemleri kullanılarak analiz yapıldığında kat kütleleri, kat kütle ve rijitlik merkezleri, yapı periyotları deprem kuvvetleri, burulma düzensizliği ve yumuşak kat düzensizliği bakımından karşılaştırılması yapılacaktır. Yapılan çalışmalarda genellikle veriler düzeltilip benzer verilerle programlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma yapılan araştırmalardan farkı dışarıdan farklı veri girişi ve veri düzeltilmesi olmadan her programda analiz yapıldıktan sonra karşılaştırma yapılmayacaktır.

II. MATERYAL METOT

Paket programlar hakkında kısa bilgi, tasarımı yapılacak yapı modeli kullanılacak metot ve yapı bilgisi aşağıda belirtilmiştir.

A. İdeCAD Paket Programı

İdeCAD Statik, yapı sistemlerinin modellenmesi, sonlu elemanlar analizlerini TBDY2018'e tam uyumlu tasarımı, performans değerlendirmesi ve güçlendirilmesi için geliştirilmiş paket programdır. Betonarme çelik ve kompozit yapı elemanlarını tek bir model üzerinde birlikte kullanarak, tasarım sürecinizi kolaylaştırır. İdeCAD Statik ile katları olan veya olmayan, katlarda rijit diyaframlı, kısmen rijit diyaframlı veya tamamen rijit diyaframsız yapıların hesabı yapılabilir. Betonarme, çelik veya karma çok katlı yapılar, endüstriyel yapılar ve bina türü olmayan gelişigüzel yapılar, deprem yönetmeliğine belirtilen koşullara uyarak modellenebilir. Çubuklar ile birlikte, aynı sistem içine entegre edilmiş kabuk elemanlar kullanılabilir. Döşemelerin, perdelerin, çubukların, temellerin hepsi bir arada analiz edilebilen ve 3 boyutlu görünümü tasarım ile eş zamanlı yapan bir paket programdır.[7]

B. STA4CAD (V14) Paket Programı

STA4CAD programı; çok katlı betonarme yapıların statik, deprem, rüzgâr ve betonarme analizini entegre olarak yapan bir paket programdır. Program; tasarımı yapılan yapının yürüklükte bulunan standart ve yönetmelikleri esas alarak analiz yapabilmektedir. Program, statik analiz yaparken rijit kat diyaframını dikkate alarak, her düğüm noktasında 6 serbestlikle 3 boyutlu stifness metodu ile kullanarak çözmektedir. Plan aplikasyon olarak tasarım yapıldığı andan itibaren yapılan yapı bilgileri, aynı zamanlı olarak planda ve 3 boyutlu görüntüde işlenmektedir. Veri girişinde, akıllı menülerle; kesit, boyut ve yük gibi verileri standartlar ve yönetmeliklere göre bilgiler kolaylıkla düzenlenebilmektedir. Program otomatik olarak yapısal 3D modelleme yapmakta, analiz yaparken tüm opsiyonlara göre tek seferde çözmektedir. Analiz sonrası tüm çizimler hazır duruma gelmektedir ve eleman optimizasyonu, yapı maliyet analizleri ve deprem yönetmeliğinin tüm kontrolleri yapılabilmektedir. Betonarme kesit ve performans hesapları; TS500, TBDY2018, ACI318 ve UBC97'ye uygun olarak yapılabilmektedir. [8]

C. SAP2000 Paket Programı

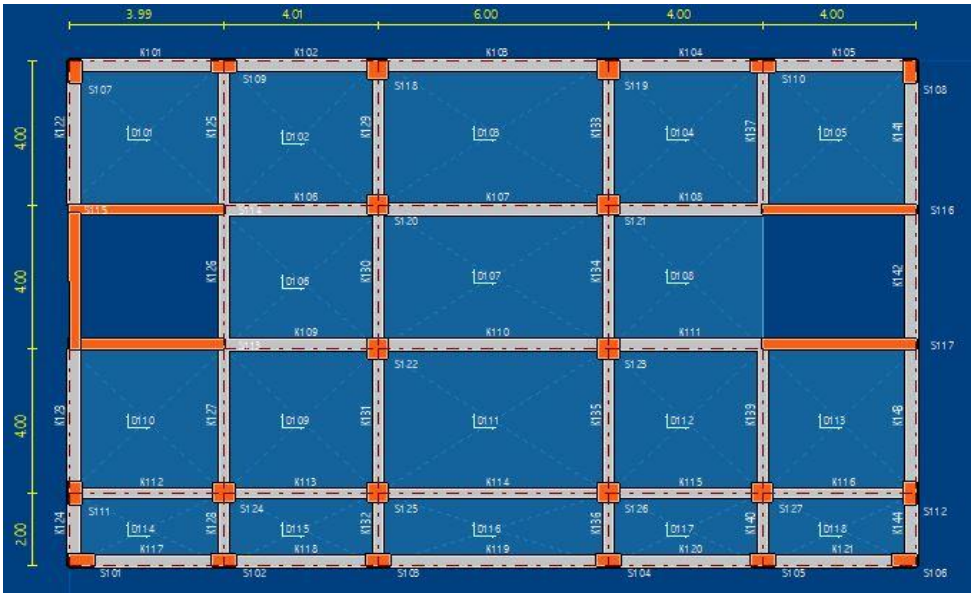
SAP2000 programı; Dünya geneli çok kullanılan doğrusal ya da doğrusal olmayan her türlü yapısal sistemin tasarım ve analizi için uygun olan paket programdır. 2D'den 3D'ye, basit şekillerden karmaşık geometrilere kadar karmaşık yapısal tarımların tasarım pratik ve sezgisel nesne tabanlı modellenme ortamı kullanılarak modellenmesi basitleştirerek basit statik, doğrusal elastikten daha karmaşık dinamik, doğrusal olmayan elastik olmayana kadar her türlü analiz türü için pratik ve üretken bir paket programdır.[9]

D. Yapı Bilgisi

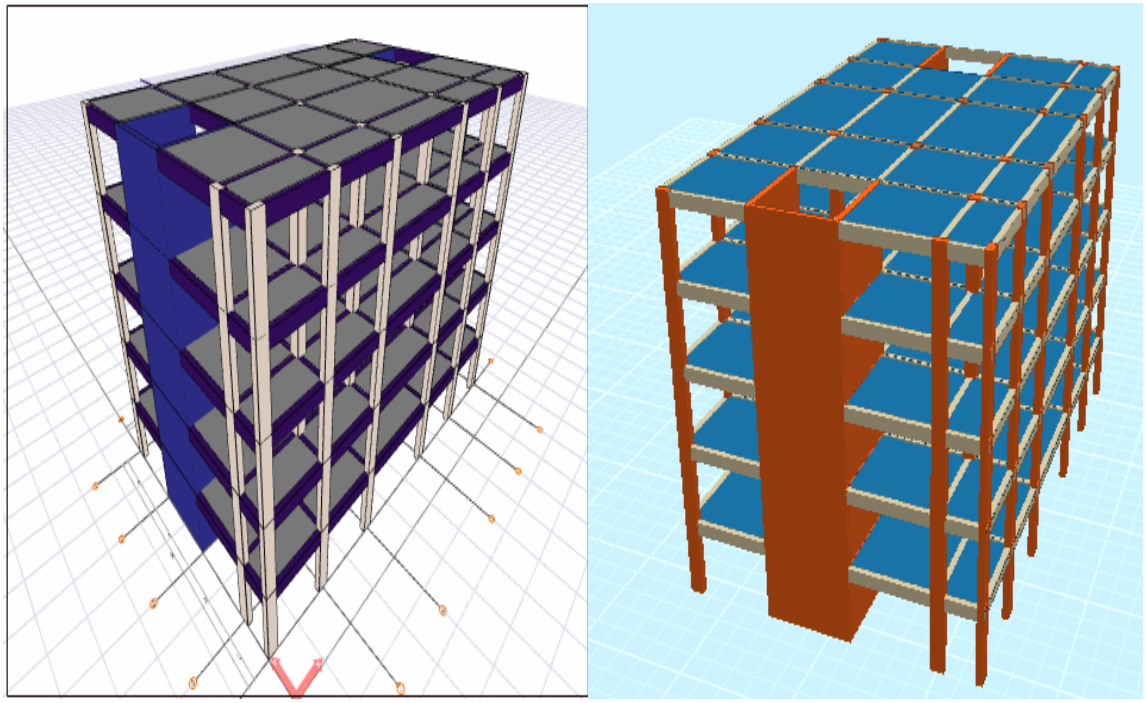
Yapı taşıyıcı sitemi kolon, kiriş ve perdelerden oluşan perde çerçeveli 5 katlı olarak tasarlanmış yapıya ait malzeme ve tasarım bilgileri Tablo-1 de gösterilmiştir. Yapıya ait normal kat planı ve 3 boyutlu görünüm Şekil-1 ve Şekil-2 verilmiştir.

Tablo 1. Yapı Bilgisi

Bina Kat Adedi	5
Bina Kullanım Amacı	Konut
Taşıyıcı Sistem Türü	Betonarme Karma Sistem
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	7
Yapıya ait Enlem	37.910621°
Yapıya ait Boylam	41.133772°
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Yapı Önem Katsayısı	1
Deprem Eksantirisitesi	±%5
Beton ve Çelik Sınıfı	C30/S420
Beton ve Çelik Güvenlik Katsayısı	1.5/1.15
Spektrum Karakteristik Periyotları	0.15/0.40
Kiriş Duvar Yükü (t/m)	0.5
Hareketli Yük Azaltma Katsayısı	0.3
İlave Döşeme Ölü Yükü (G)	0.148 t/m2
Döşeme Hareketli Yükü (Q)	0.15 t/m2
Kiriş Boyutları (cm)	25/50
Döşeme Kalınlığı (cm)	15
Kolon Boyutlar (cm)	30x60-60x30-50x50
Perde Boyutları (cm)	25/400



Şekil 1. Yapı Planı



Şekil 2. Yapının 3D Görünümü

Yapının Batman ilinde 37,910621 enlem, 41,133772 boylamda yapıldığı var sayılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bölüm 2'de ayrıntıları verilen yapı ile ilgili SAP2000, STA4CAD ve İdeCAD programları kullanılarak aynı plan, konum ve malzemeye göre tasarımı yapılan yapı Eşdeğer Deprem kuvveti ve Mod birleştirme yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda; kat kütleri, etkin periyotları, kütle ve rijitlik merkezleri, deprem kuvvetleri, burulma düzensizlikleri ve yumuşak kat kontrolleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

E. Kat Kütleleri (ton)

2018 TBDY'ne göre tasarımı yapılan ve çözülen yapı ait kat kütleleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Yapılan analiz değerlendirildiğinde SAP2000 ve İdeCAD programlarının sonuçları birbirine oldukça yakınken STA4CAD programında elde edilen sonuçlar oldukça düşük çıkmıştır.

Tablo 2. Yapı Kütlesi

KAT	SAP2000	STA4CAD	İdeCAD
5. KAT	374,94	258,23	375,26
4. KAT	374,94	258,23	375,26
3. KAT	374,94	258,23	375,26
2. KAT	374,94	258,23	375,26
1. KAT	374,94	258,23	375,26
TOPLAM (ton)	1874,68	1291,15	1876,31

F. Kütle ve Rijitlik Merkezleri

Yapılara ait kütle merkezleri Tablo 3'te rijitlik merkezleri ise Tablo 4' te verilmiştir. Değerler karşılaştırıldığında kütle merkezleri birbirine yakınken rijitlik merkezleri birbirine oldukça uzaktır. İdeCAD ile SAP2000 programlarından elde edilen sonuçlar birbirine yakınken STA4CAD programında elde edilen değerler bunlara uzaktır.

Kütle merkezleri;

Tablo 3. Kütle Merkezleri

	SAP2000		STA4CAD		İdeCAD	
KAT/YÖN	X	Y	X	Y	X	Y
5. KAT	10,98	6,73	10,76	7,12	11,14	8,69
4. KAT	10,87	6,76	10,76	7,12	11,12	8,67
3. KAT	10,87	6,76	10,76	7,12	11,1	8,65
2. KAT	10,87	6,76	10,76	7,12	11,08	8,63
1. KAT	10,87	6,76	10,76	7,12	11,06	8,61

Rijitlik merkezleri;

Tablo 4. Rijitlik Merkezleri

	SAP2000		STA4CAD		İdeCAD	
KAT/YÖN	X	Y	X	Y	X	Y
5. KAT	10,92	6,82	6,15	6,55	13,15	8,78
4. KAT	10,89	6,80	5,26	6,45	13,83	9,22
3. KAT	10,88	6,78	4,41	6,35	13,96	9,31
2. KAT	10,88	6,78	3,76	6,29	14,16	9,42
1. KAT	10,87	6,76	3,84	6,31	13,84	9,47

G. Periyot Değerleri

Yapı Eşdeğer deprem yöntemi ve mod birleştirme yöntemlerine göre analiz yapıldığında binaya etkiyen periyotlar Tablo 5'te gösterilmiştir. Eşdeğer deprem yöntemi kullanıldığında bulunan periyotlarda SAP2000 ile STA4CAD programlarının hesapladığı değerler birbirine yakınken mod birleştirme yöntemine göre analiz yapıldığında İdeCAD ile SAP2000 programlarında elde edilen periyotlar birbirine yakın değerleri bulunmuştur.

Tablo 5. Etkin Periyotlar

YÖNTEM	SAP2000		STA4CAD		İdeCAD	
	X	Y	X	Y	X	Y
EŞDEĞER DEPREM YÖNTEMİ	0,279	0,599	0,395	0,549	0,39	0,75
MOD BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ	0,740	0,740	0,548	0,548	0,7492	0,7492

H. Deprem Kuvvetleri

Eşdeğer deprem kuvveti yöntemi ve mod birleştirme yöntemleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda yapıya etkiyen deprem kuvvetleri hesaplanmış ve Tablo 6'da verilmiştir. Hesaplanan değerler karşılaştırıldığında Eşdeğer deprem yöntemi kullanıldığında bulunan deprem kuvvetleri SAP2000 ile İdeCAD programlarının hesapladığı değerler birbirine yakınken mod birleştirme yöntemine göre analiz yapıldığında STA4CAD ile SAP2000 programları birbirine yakın deprem kuvveti hesaplamıştır.

Tablo 6. Deprem Kuvveti (t)

YÖNTEM	SAP2000		STA4CAD		İdeCAD	
	X	Y	X	Y	X	Y
EŞDEĞER DEPREM YÖNTEMİ	201,03	131,45	133,09	96,02	176,94	108,32
MOD BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ	70,00	90,55	96,92	68,92	132,65	81,52

İ. Burulma Düzensizliği Kontrolü (A1 Düzensizliği)

Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük göreli kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama göreli ötelemesine oranını ifade eden Burulma Düzensizliği (A1 Türü Düzensizlik) katsayısı ηbi'nin 1,2'den büyük olması durumudur. [11] Yapılan hesaplamalarda SAP2000 ve STA4CAD burulma düzensizlikleri aynı iken İdeCAD programı küçükte olsa farklı hesaplanmıştır.

Tablo 7. Burulma Düzensizliği (A1 Düzensizliği)

A1-Burulma Düzensizliği		X yönü			Y yönü		
Program	Katlar	+%5	-%5	ηbi kontrolü	+%5	-%5	ηbi kontrolü
SAP2000	5	0,99	1,06	Yok	1,69	1,60	Var
	4	1,01	1,18	Yok	1,73	1,66	Var
	3	1,03	1,28	Var	1,76	1,70	Var
	2	1,06	1,28	Var	1,78	1,73	Var
	1	1,10	1,63	Var	1,79	1,74	Var
STA4CAD	5	1,11	1,04	Yok	1,30	1,11	Var
	4	1,16	1,03	Yok	1,44	1,27	Var
	3	1,21	1,01	Var	1,54	1,38	Var
	2	1,27	1,01	Var	1,62	1,48	Var
	1	1,32	1,02	Var	1,67	1,54	Var
İdeCAD	5	1,07	1,05	Yok	1,64	1,53	Var
	4	1,13	1,02	Yok	1,69	1,59	Var
	3	1,19	1,00	Yok	1,72	1,64	Var
	2	1,26	1,02	Var	1,74	1,67	Var
	1	1,34	1,05	Var	1,74	1,66	Var

J. Yumuşak Kat Kontrolü (B2 Düzensizliği)

Rijitlik düzensizliği katsayısı (**ηki**) : Bir kattaki ortalama göreceli kat ötelemesinin bir üst ya da bir alt katındaki ortalama kat ötelemesine oranına rijitlik düzensizliği katsayısı denilmektedir. Bu oran 2'den büyük olması durumunda yumuşak kat durumu ortaya çıkmaktadır. [11]

Tablo 8. Yumuşak Kat Kontrolü (B2 Düzensizliği)

B2-Yumuşak Kat		X yönü			Y yönü		
Program	Katlar	+%5	-%5	ηki kontrolü	+%5	-%5	ηki kontrolü
SAP2000	5	0,00	0,00	Yok	0,00	0,00	Yok
	4	1,05	1,05	Yok	1,37	1,34	Yok
	3	0,96	0,95	Yok	1,17	1,16	Yok
	2	0,82	0,82	Yok	1,02	1,01	Yok
	1	0,55	0,54	Yok	0,63	0,64	Yok
STA4CAD	5	0,00	0,00	Yok	0,00	0,00	Yok
	4	1,06	1,05	Yok	1,34	1,30	Yok
	3	0,96	0,95	Yok	1,16	1,14	Yok
	2	0,83	0,83	Yok	1,02	1,00	Yok
	1	0,56	0,56	Yok	0,65	0,65	Yok
İdeCAD	5	0,00	0,00	Yok	0,00	0,00	Yok
	4	1,05	1,05	Yok	1,39	1,37	Yok
	3	0,96	0,95	Yok	1,19	1,18	Yok
	2	0,82	0,81	Yok	1,02	1,01	Yok
	1	0,52	0,51	Yok	0,63	0,63	Yok

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada 5 katlı taşıyıcı sistemi kolon, perde, kiriş ve döşemelerden oluşan betonarme çerçeveli karma sistem yapı örneği SAP200, STA4CAD ve İdeCAD programlarında modellenmiştir. Tasarımı yapılan yapı TBDY (2018) kriterlerine göre eşdeğer deprem kuvveti yöntemi ile mod birleştirme yöntemlerine göre analiz edilmiştir. Yapılan analizde elde edilen kat kütleleri, kat kütle ve rijitlik merkezleri, yapı etkin periyotları, deprem kuvvetleri, burulma düzensizlik kontrolü (A1 düzensizlikleri), yumuşak kat kontrolleri (B2 düzensizliği) bakımından karşılaştırılması yapılmıştır.

Bina kütle karşılaştırması yapılırken SAP2000 ile İdeCAD programı kat kütleleri yakın çıkarken STA4CAD programı daha düşük çıkmıştır. Bu durumun sebebi temel sebeplerinden biri STA4CAD programı kolon kiriş birleşim noktalarını tek çözüp alırken diğer iki program düğüm noktalarını iki kez çözüldüğünden dolayı daha yüksek oluşmaktadır.

Yapı düzensizlikleri bakımında incelenirken rijitlik merkezlerinin kütle merkezine çakışık ya da yakın olması istenmektedir. Yapılan çalışmada yapının kat kütle merkezleri bakımında karşılaştırıldığında SAP2000 programı ile STA4CAD programları birbirine yakın değerler verirken İdeCAD programı bu programlardan uzak bir değer vermiştir. Kat rijitlik merkezleri 3 program da birbirinden farklı değerler hesaplamıştır. Fakat yapılan çalışmada yapının kütle ve rijitlik noktaları düşünüldüğünde en iyi sonuç SAP2000 programında elde edilmiştir.

Yapı doğal periyotları değerlendirildiğinde eş değer deprem kuvveti yöntemine göre analiz yapıldığında etkili titreşim periyotlarda SAP2000 ile STA4CAD programlarının hesapladığı değerler birbirine yakınken mod birleştirme yöntemine göre analiz yapıldığında İdeCAD ile SAP2000 programları birbirine yakın periyot değerleri hesaplamıştır.

Yapıya etkiyen deprem kuvvetleri eş değer deprem kuvveti ve mod birleştirme yöntemleri ile ayrı ayrı hesaplandığında birbirlerine göre farklı ama uzak olmayan değerler hesaplanmıştır. Eş değer deprem yöntemine göre İdeCAD ile SAP2000 yakın değerler vermiş mod birleştirme yönteminde STA4CAD ile SAP2000 programları yakın değerler hesaplamıştır.

Yapı düzensizlikler olarak karşılaştırıldığında yapı 3 programdaki veriler incelendiğinde değerler farklı çıksa bile sonuçları etkilemediği ve yapıda oluşan düzensizlikler 3 programda da benzer sonuçlar hesaplamıştır.

Sonuç olarak aynı bölgede aynı yapı malzemeleri ve aynı şartlar göz önüne alınarak tasarlanan yapıda kullanılan 3 paket program birbirinden farklı ya da benzer değerler hesaplamış olsa da yapının düzensizlikler deplasmanlar gibi kritik değerler yapılan çalışmada benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Programlar kullanım bakımından SAP2000 programı karışık ve değerleri elle girildiğinden dolayı zaman alması ve sadece statik analiz için uygunken, İdeCAD ve STA4CAD paket programları yönetmeliğe uygun tasarım yapmayı kolaylaştıran entegre menüleriyle ve analiz, metraj gibi istenen verileri çok kısa sürede hesaplayıp sunmasından dolayı SAP2000 programına göre daha kullanışlı kolay ve pratiktir.

KAYNAKLAR

[1] Gelibolu, İ. S. (2008). *Sta4-Cad Paket Programı Ile Sap2000 Analiz Programının Mod Birleştirme Yöntemi Kullanarak Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[2] Serimer, G. (2008). *Yapi Analiz Programlarinin Modelleme Tekniklerinin Sonuçlarina Göre Kaşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[3] Çöktü, L. (2010). *İnşaat Mühendisliğinde Kullanilan Ticari Programlarin (Sap2000 Ve Sta4-Cad) Deprem Bölgelerinde Yapilacak Binalar Hakkinda Yönetmelik-2007 Işiğinda Karşilaştirilmasi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[4] Duran, İ. (2021). *Binaların Dinamik Analizinde Kullanılan Doğrusal Hesap Yöntemlerinin Farklı Bilgisayar Programları İle Karşılaştırılması*. Y. Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

[5] Karayer, M. H., Severcan, A. (2018). Farklı Tip Betonarme Yapıların Paket Programlar İle Analizi Ve Karşılaştırılması. *Black Sea Journal of Engineering and Science 1*(2), 41–50.

[6] Sirlibaş, C. (2013). *Farklı Tipteki Betonarme Yapıların Sta4cad ve Etabs Programları İle Çözümleri Ve Sonuçların Karşılaştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[7] *Ideyapi Ltd. İdecad V10,* www.İdecad.com.tr (14.07.2023)

[8] Sta4cad - V14, 45(1) 3265757 (2023), www.sta4.net/staproperty.aspx (16.07.2023)

[9] Sap2000 V19, www.csiamerica.com/products/sap2000 (20.07.20223)

[10] Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY), https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm (21.07.2023)

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 09-26, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1375370
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi-Research Article

Sızıntı Sıvıları ile Yıllandırılmış Geomembranların Ara Yüzey Kayma Dayanımı Davranışları

Interface Shear Strength Behaviors of Geomembranes Aged with Leachates

İnci Develioğlu[1], Hasan Fırat Pulat[2*]

Geliş / Received: 13/10/2023 ***Revize / Revised: 06/02/2024*** ***Kabul / Accepted: 30/04/2024***

ÖZ

Sızdırmazlık, koruma ve ayırma gibi çeşitli mühendislik fonksiyonlarıyla kullanılan geomembranlar (GM), uzun vadede farklı sıvıların etkilerine maruz kalabilirler. Bu süreçte kimyasal yapılarında önemli ölçüde bir değişiklik olmazken, fiziksel ve mekanik özelliklerinde farklılıklar gözlenebilir. Bu değişiklikler kısa vadede göz ardı edilebilir ancak uzun vadede göz ardı edilmemelidir. Bu çalışmada, farklı sızıntı sıvılarında yıllandırılan GM ve zemin arasında oluşan ara yüzeylerin kayma dayanımı davranışları incelemiştir. Zemin olarak kum-bentonit (KB) karışımı kullanılırken, GM olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve termoplastik poliolefin (TPO) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, zeminin geoteknik indeks ve kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, zemin – GM ara yüzeylerinin kayma mukavemeti davranışları hem yıllandırılmış hem de yıllandırılmamış GM'ler için belirlenmiştir. Saha koşullarını yansıtabilmek için laboratuvar koşullarında farklı sentetik atık sızıntı sıvıları (asidik maden drenaj sızıntı suyu (AMD), kömür yanma ürünü sızıntı suyu (CCP) ve kentsel katı atık sızıntı suyu (MSW)) hazırlanmıştır. GM'ler bu sızıntı sıvılarında 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış ve ardından ara yüzey kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ara yüzey sürtünme açılarının tüm yıllandırma sıvılarından önemli ölçüde olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. AMD'nin GM'lerin arayüzey sürtünme açıları üzerinde en olumsuz etkiye sahip olduğu, CCP'nin ise en az hasara neden olduğu görülmüştür. Bu çalışma, tasarımlarda kullanılan ara yüzey sürtünme katsayılarının uzun vadede kimyasallara maruz kalan GM'ler için yeterli olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler- Ara Yüzey Kayma Dayanımı, Geomembran, Sızıntı Sıvısı, Yıllandırma

ABSTRACT

Geomembranes (GM), used in various engineering functions, such as sealing, protection and separation, may be exposed to the effects of various liquids in the long term. In this process, while there is no significant change in their chemical structure, changes in their physical and mechanical properties can be observed. These changes can be ignored in the short term but not in the long term. In this study, the shear strength behaviors of the interfaces between GM and soil aged in different leachates was investigated. A sand-bentonite mixture was used as soil, while high density polyethylene (HDPE) and thermoplastic polyolefin (TPO) were used as GM. In the first stage

[1]İletişim: inci.develioglu@ikcu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-6594-8095)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 35620, Balatçık, Çiğli, İzmir-Türkiye
[2]*Sorumlu yazar iletişim: hfirat.pulat@ikcu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8298-7106)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 35620, Balatçık, Çiğli, İzmir-Türkiye

of the study, the geotechnical index and shear strength parameters of the soil were determined. In the second stage, the shear strength behavior of the soil–GM interfaces was determined for both unaged and aged GMs. Different synthetic waste leachates (acidic mine drainage leachate (AMD), coal combustion product leachate (CCP) and municipal solid waste leachate (MSW)) were prepared under laboratory conditions to simulate field conditions. The GMs were aged in these leachates for 4 and 16 months and interface direct shear tests were performed. The interface friction angles were found to be significantly adversely affected by all aging liquids. AMD was found to have the most detrimental effect on the interface friction angles of GMs, while CCP caused the least damage. This study has shown that the interface coefficients used in the designs are not sufficient for GMs exposed to chemicals in the long term.

Keywords- Aging, Geomembrane, Interface Shear Strength, Leachate

I. GİRİŞ

En yaygın termoplastik grubu olan poliolefinler, sık sık tercih edilen polipropilen ve polietilen türleriyle çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Poliolefinler, etilen, propilen, büten, izopren veya penten gibi basit olefinlerden, kopolimerlerden veya türev modifikasyonlarından meydana gelen polimerlerdir. Bu poliolefin türlerinden biri olan HDPE GM'ler, düzenli depolama sahalarındaki kompozit yalıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler tipik olarak bir çakıl sızıntı suyu toplama katmanı, bir geotekstil (GTX) koruma – drenaj katmanı ve bir geosentetik kil örtü (GCL) veya sıkıştırılmış kil örtü (CCL) içerir. HDPE GM'ler inorganik kirleticilere karşı etkili difüzyon bariyerleri oluşturur ve advektif akışı en aza indirir. Tipik olarak düzenli depolama sahası sızıntı suyunda bulunan çeşitli kirleticilere karşı mükemmel kimyasal direnç gösterirler. Gösterilen bu kimyasal direncin uzun vadede devam edip etmeyeceği sorusunun cevabı ise belirsizdir. Uzun vadede, HDPE GM'lerin atık depolama sahası taban kaplamalarındaki performansı öncelikle antioksidanların tükenmesinden etkilenir. Bu süreç, GM yüzeyindeki antioksidanların kimyasal reaksiyonunu veya çözünmesini ve ardından konsantrasyon gradyanları nedeniyle çekirdek yapıdan yüzeye difüzyonunu içerir. Antioksidanların kademeli kaybı GM'yi ikinci önemli bozunma olan oksidatif bozunma mekanizmasına karşı savunmasız hale getirir [1-4]. Literatürdeki çok sayıda çalışma, yaşlanmanın HDPE GM'ler üzerindeki etkilerini incelemeye odaklanmıştır. Ancak bu çalışmalar, GM'leri belirli süreler boyunca çeşitli kimyasallara maruz bırakarak oksidatif indüksiyon süresini (OIT) belirlemek ve bunun sonucunda mekanik özelliklerinde meydana gelen azalmayı değerlendirmekle sınırlı kalmıştır [5-8]. Sun vd. (2019) [9], HDPE GM'lerin saha ortamlarındaki uzun vadeli davranışlarını incelemek amacıyla analitik, mekanik ve geoelektrik sızıntı yeri testlerini kullanan kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, yıllandırılan GM'lerin deney sonuçlarını değerlendirmek amacıyla LandSim ve HELP gibi modeller kullanılmıştır. Bulgular, HDPE GM'lerin yaklaşık 8 yıllık depolama sahası işletiminden sonra faydalı ömürlerinin sonuna ulaştığını ve ardından hidrolik performanslarının hızla bozulduğunu ortaya koymuştur. Bu bozulma, sızıntı sıvısının sızmasında artışa yol açmış ve başlangıçtaki 0.05 ile 0.6 m^3/gün aralığında olan sızıntı miktarı uzun vadede 27.4 ile 37.6 m^3/gün aralığına yükselmiştir. Ayrıca, yeraltı suyu üzerindeki etkisinin bu değişikliklerden önemli ölçüde etkilendiği de tespit edilmiştir. Etkilenen alan 50 metreden 1000 metreye genişlemiş ve kirlilik olasılığı "neredeyse imkânsızdan" "neredeyse kesine" yükselmiştir. Bu bulgular, düzenli depolama sahalarının uzun vadeli çevresel etkilerini değerlendirirken HDPE GM'lerin yıllanmasını ve bozulmasını göz önünde bulundurulmasının hayati önemini vurgulamıştır. Bu araştırmalar her ne kadar değerli bilgiler barındırsa da düzenli depolama sahalarında, GM'ler ile kullanılan zeminler arasında bir kayma yüzeyi oluştuğunu unutmamak önemlidir. Sonuç olarak, sadece GM'lerin mekanik özelliklerinde değil, aynı zamanda yıllanmaya bağlı olarak ara yüzey kayma mukavemeti özelliklerinde de meydana gelen değişikliklerin araştırılması büyük önem taşımaktadır. Rowe vd. (2010) [10], bir HDPE'nin antioksidan kapasitesini kaybedip kaybetmediğini belirlemek için hızlandırılmış yıllandırma deneyleri (kentsel katı atık sızıntı sıvısında) gerçekleştirmişlerdir. Kompozit örtü sistemlerindeki GM'lerin yüksek basınç, sıcaklık ve sürekli sızıntı sıvısı sirkülasyonu altında yıllanmasını araştırarak antioksidan tükenme oranlarını incelemişlerdir. Çalışmada, 250 kPa'lık normal gerilmede simüle edilen düzenli depolama sahası örtüsü için antioksidan tükenme oranlarının 55, 70 ve 85°C sıcaklıklarda sırasıyla 0.05, 0.19 ve 0.41 ay^{-1} olduğu belirlenmiştir. Bu oranlar, aynı sıcaklıklarda 0.12, 0.39 ve 1.10 ay^{-1} olan aynı GM üzerinde geleneksel sızıntı sıvısında yıllandırma testlerinden elde edilenlerden daha düşüktür. Yıllandırma deneyleri sırasında, GM'nin kristalinitesi ve akma çekme gerilmesi başlangıçta artmış ve daha sonra çalışma boyunca çoğunlukla sabit kalırmıştır, ayrıca diğer GM özelliklerinde de önemli değişiklikler görülmemiştir. Li vd. (2021) [11] sızıntı sıvısına maruz bırakılan beş farklı tür ve 4 farklı kalınlıkta (1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 mm) HDPE GM'nin antioksidan tükenme aşaması ömrünü araştırmışlardır. Antioksidan tükenme hızı (ADR) ve antioksidan tükenme süresi (ADT), toplanan verilerin Arrhenius modeline dayandırılarak elde edilen yaşlanma parametrelerine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, sızıntı sıvısı 15, 20, 25, 30, 35 ve 40°C'lere ısıtılarak, maruz kalma koşullarının HDPE'nin bozunma performansı üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Sonuçlar, HDPE GM kalınlığının ADT süresi üzerinde en az etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Marka/malzeme, sızıntı suyu bileşenleri ve maruz kalma ortamına karşı ADR duyarlılığı artan sıcaklıkla birlikte azalmıştır; sadece kalınlığa karşı duyarlılık

artan sıcaklıkla birlikte hafif bir artış eğilimi göstermiştir. HDPE farklı maruz kalma koşulları altındaki ADT'leri 6 yıl ile 900 yıl arasında değişmektedir, bu da HDPE GM'lerin makul maruz kalma koşulları altında düzenli depolama sahalarının hizmet süresini tamamlayabileceğini göstermektedir.

Çok sayıda araştırmacı zemin ve GM'ler arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti davranışını incelemiş olsa da [12-16], yıllandırmanın ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Chai ve Saito (2016) [12], büyük ölçekli bir kesme kutusu cihazı kullanarak GM ile killi bir zeminin ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini incelemişlerdir. Kuvars ve bentonit tozu, 30/70 oranında killi bir zemin ile karıştırılmıştır. Üç farklı GM türü kullanılmıştır, bunlar; polivinil klorür (PVC), polietilen (PE) ve HDPE'dir. Büyük ölçekli kesme kutusu aparatının üst çenesinin boyutu 200x450x100 mm ve alt çenesinin boyutu 200x200x70 mm'dir. Deneylerde 50, 80 ve 100 kPa normal gerilmeler kullanılmıştır. Deney sonuçları maksimum ara yüzey kayma mukavemetinin kuvars/bentonit karışımı ile PVC GM ara yüzeyinde elde edildiğini göstermiştir. Bentonit ile GM ara yüzey sürtünme açıları oldukça düşük (3º - 4º) elde edilmiştir. Kesme kutusu deneyi sırasında bentonitten su çıkışı olduğu ve GM ile bentonit partikülleri arasında bir su membranı oluştuğu, bu nedenle ara yüzey sürtünme açısının düşük elde edildiği varsayılmıştır. Tüm numuneler için ara yüzey kayma mukavemeti, zeminin kayma mukavemetinden yaklaşık %55 daha küçük elde edilmiştir. Stark ve Santoyo (2017) [13], on GM ve iki zemin arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti davranışlarını araştırmışlardır. Yedi GM'nin yüzeyi pürüzsüz, üçünün ise pürüzlüdür ve kalınlıkları 0.75 ile 1.5 mm arasında değişmektedir. Kullanılan GM türleri PVC, HDPE, lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), kaplamalı dokuma polietilen ve TPO'dur. Kullanılan zemin türleri killi buzul zemini ve Ottawa ince kumudur. Ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri burulmalı halka kesme aparatı ile ölçülmüş ve kesme hızı 0.015 mm/dak olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, pürüzlü GM'lerin pürüzsüz GM'lerden daha büyük bir ara yüzey sürtünme açısına sahip olduğunu göstermiştir. Killi buzul zemini deneylerine göre, maksimum ara yüzey sürtünme açısı (46º) GM10'da (pürüzlü, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Minimum ara yüzey sürtünme açısı ise (14º) GM9'da (pürüzsüz, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Ottawa ince kumu üzerinde yapılan deneylere göre, maksimum ara yüzey sürtünme açısı (31º) yine GM10'da (pürüzlü, 1.5 mm, HDPE) elde edilmiştir. Minimum ara yüzey sürtünme açısı ise (15º) GM2'de (pürüzsüz, 1.5 mm, LLDPE) elde edilmiştir. Ayrıca, killi buzul zemin ile GM ara yüzeylerinin Ottawa kumu ile GM ara yüzeylerinden daha yüksek ara yüzey sürtünme açılarına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada ise, zemin ve GM arasında oluşan ara yüzeyin sürtünme açısını belirlemek amacıyla orta ölçekli bir kesme kutusu cihazı kullanılmıştır. Kullanılan GM türleri pürüzsüz yüzeye sahip 1.5 mm kalınlığında TPO ve HDPE'dir. Bu GM türlerinin kullanılmasının nedeni, HDPE'nin tehlikeli atık depolama sahalarında en çok tercih edilen GM olması, TPO'nun ise sınırlı kullanıma sahip olmasına rağmen HDPE'ye kıyasla düşük maliyetli ve çevreci olmasıdır. Kum-bentonit karışımı (80/20) düzenli depolama sahalarında en yaygın olarak kullanılan zemin türü olduğu için çalışmaya dahil edilmiştir. Katı atık depolama sahalarında bulunan koşulları daha iyi simüle etmek için, GM'ler laboratuvar ortamında 4 ve 16 aylık bir süre boyunca sentetik olarak hazırlanmış üç farklı sentetik sızıntı sıvıları içinde yıllandırılmıştır. Bu sıvılar kentsel katı atık depolama, kömür arama ya da kömür atığı depolama ve maden arama ya da maden atıkları depolama tesislerinin sızıntı sıvılarını temsil etmektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, zeminlerin geoteknik indeks parametreleri ve içsel sürtünme açıları (ϕ) belirlenmiştir. Daha sonra, yıllandırılmamış ve yıllandırılmış GM'ler ile zemin arasındaki ara yüzeylerin ara yüzey sürtünme açıları (δ) belirlenmiştir.

II. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu bölümde, çalışmada kullanılan malzemeler ve deney yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

A. Malzemeler

Ara yüzey kesme kutusu deneylerinde zemin olarak %20 bentonit ve %80 kırma kum karışımı kullanılmıştır. Kullanılan bentonit türü Sodyum bentonittir. Bu zemin türünün kullanılma nedeni atık depolama sahalarında GM altında ya da üstünde en sık tercih edilen zemin türü olmasıdır. Kullanılan KB karışımının fiziksel görünüşü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. KB zemin fiziksel görünüşü

Tablo 1'de laboratuvar deneyleriyle elde edilen, KB'nin geoteknik indeks özellikleri sunulmaktadır. Ayrıca, ASTM D2487 [17] standardına uygun olarak Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) kullanılarak tanımlanan zemin sınıfı da Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. KB zeminin geoteknik indeks özellikleri

Özellik	**KB**
Özgül ağırlık, G_s	2.46
İnce dane oranı, FC (%)	23.1
Silt içeriği (%)	7.5
Kil içeriği (%)	15.6
Likit limit, LL (%)	60.7
Plastik limit, PL (%)	30.2
Maks. kuru birim hacim ağırlık, $\gamma_{kuru,maks}$ (kN/m^3)	17.5
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	13.2
Maksimum dane çapı (mm)	2.0
D_{10}	-
D_{30}	0.20
D_{60}	1.50
USCS	SC
pH	9.3

Bu çalışmada iki farklı GM türü kullanılmıştır, bunlar TPO ve HDPE'dir. Her iki GM'nin de yüzeyi pürüzsüzdür ve 1.5 mm kalınlığa sahiplerdir. Farklı GM türlerinin kullanılmasının amacı, GM türünün ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmaktır. Ayrıca, tüm dünyada katı atık depolama tesislerinde en çok kullanılan GM türü olan HDPE'ye alternatif başka bir GM kullanılabilir mi sorusuna da cevap vermektedir. Bu nedenle HDPE gibi yalıtım amacıyla kullanılan ancak HDPE'ye göre hem daha ekonomik hem de daha çevreci olan TPO tercih edilmiştir.

HDPE, yüksek yoğunluklu polietilenin ekstrüzyon işlemiyle üretilen ve düzgün bir biçimde homojen olarak şekillendirildikten sonra geosentetik sistemlerde astar görevi gören bir GM türüdür. Polietilen (PE) adını, polietilen oluşturmak için çeşitli yöntemlerle polimerizasyona uğrayan monomer etilenden alır. HDPE kendine, kentsel katı atık depolama sahaları, maden atık depolama sahaları, asit tankları, göletler ve sulama kanalları gibi geçirimsizliğin çok önemli olduğu projelerde uygulama alanı bulmaktadır. Bu çalışmada kullanılan HDPE, Geoplas firmasından temin edilmiş ve teknik özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. HDPE'nin temel özellikleri

Temel Özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	mm	1.5
Kırılma anında çekme gerilmesi	N/mm^2	>26
Akma uzaması	%	>12
Akma dayanımı	%	>700
Statik zımbalama dayanımı	N/mm^2	>16
Oksidasyon dayanımı	%	<25
Gerilme çatlağı dayanımı	h	>200
Su geçirimsizliği	m^3/m^2d	$<10^{-6}$

TPO bileşikleri; polipropilen (PP), çapraz bağlanmamış etilen propilen dien monomer (EPDM) kauçuk ve polietilen karışımından oluşur. TPO GM'ler mükemmel darbe direnci, düşük yoğunluk ve güçlü kimyasal direnci ile bilinirler. 1980'lerde geliştirilen TPO, çatı kaplama ve su yalıtım endüstrisinde en hızlı büyüyen GM olarak ortaya çıkmıştır. Diğer GM'lerin aksine, TPO toksik veya zararlı maddeler içermez, bu da onu çevre dostu bir ürün haline getirir. Yüksek enerji verimliliğini destekleyen mükemmel ısı direnci de dahil olmak üzere birçok avantajlı özelliğe sahiptir. Ayrıca, TPO geri dönüştürülebilir olduğundan çevreye etkisi minimum düzeydedir. Özellikle, TPO esneklik için plastikleştiricilere ihtiyaç duymaz, bu da poliolefin yapısı sayesinde kullanım ömrü boyunca dayanıklılığını ve elastikiyetini artırır. Bu çalışmada kullanılan TPO GM, BTM Yalıtım şirketi tarafından sağlanmış ve teknik özellikleri Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. TPO'nun temel özellikleri

Temel Özellikler	Birim	Değer
Kalınlık	-	1.5
Geçirimsizlik	-	Geçirimsiz
Yangına karşı direnç	-	E sınıfı
Birleşim yeri soyulma dayanımı	N/50 mm	≥ 300
Birleşim yeri kayma dayanımı	N/50 mm	≥ 800
Çekme gerilmesi	N/50 mm	≥ 1100
Kopma uzaması	%	≥ 20
Darbe dayanımı	mm	≥ 700
Statik yükleme direnci	kg	≥ 20
Yırtılma direnci	N	≥ 300
UV dayanımı	-	Dayanıklı
Su ve kimyasallara karşı direnç	-	Dayanıklı

GM'ler kullanım ömürleri boyunca, örneğin atık depolama tesislerinde sızıntı sıvıları nedeniyle, birçok farklı kimyasallara maruz kalmaktadır. Uzun yıllar maruz kalınan ve yüksek oranda asidik kimyasallar içeren bu sızıntı sıvıları nedeniyle, GM'lerin fiziksel ve kimyasal yapılarında bozulma meydana gelebilir. Bu bozulmanın GM'ler ile zeminler arasındaki ara yüzey kayma davranışında bir azalmaya neden olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, bu çalışma kapsamında GM'ler farklı sızıntı sıvılarında yıllandırılmıştır. Bu sızıntı sıvıları doğrudan doğal ortamdan elde edilmemiş, laboratuvarda sentetik olarak hazırlanmıştır. Sızıntı sıvılarının doğal ortamdan alınmayıp, sentetik olarak hazırlanmasının nedeni, deneylerin tutarlı özelliklere sahip yapılmasını sağlamak, güvenilir ve kontrollü deney koşullarına olanak tanımaktır. Bu çalışmada kullanılan sızıntı sıvıları; maden arama veya maden depolama tesislerinin sızıntı sıvıları olan asidik maden drenajı sızıntı sıvısı (AMD), kömür çıkarma veya kömür atığı depolama tesislerinin sızıntı sıvıları olan kömür yanma ürünü sızıntı sıvısı (CCP) ve kentsel katı atık depolama sahalarının sızıntı sıvıları olan kentsel katı atık sızıntı sıvısıdır (MSW).

AMD ağır metaller içeren yüksek asitli bir sızıntı sıvısıdır. Maden arama sahaları ya da maden atıkları depolama sahalarında yağmur suyu drenajı ile oluşurlar. Sonuçlanan sıvılar son derece zehirli olabilir ve yeraltı suyu, yüzey suyu ve zeminle karıştırıldığında insanlar, hayvanlar ve bitkiler üzerinde zararlı etkilere sahip olabilirler. Çalışmada kullanılan AMD, Tablo 4'te belirtildiği gibi çeşitli kimyasal bileşiklerin damıtılmış su ile karıştırılmasıyla laboratuvarda sentetik olarak üretilmiştir. AMD sıvısının bileşimi, Gulec vd. (2005) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir. Bu karışım içerisinde metallerin (Fe, Zn, Cu ve Ca) seçimi, göreceli konsantrasyonları ve türleri belirlenmiştir [6]. Ek olarak pH ölçümleri sızıntı sıvısının hazırlandığı gün, 4, 8 ve 16 aylık aralıklarla kaydedilmiş ve sırasıyla 0.95, 0.97, 1.12 ve 1.29 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, elektriksel potansiyeli ve viskozite değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 308 mV ve 2.02 yüzde poise (cP) sonuçları elde edilmiştir.

Tablo 4. AMD'nin kimyasal içeriği [6]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Bakır (II) sülfat	$CuSO_4$	88
Çinko sülfat heptahidrat	$ZnSO_4.7H_2O$	864
Sülfirik asit	H_2SO_4	886
Demir (II) sülfat heptahidrat	$FeSO_4.H_2O$	4076
Kalsiyum sülfat	$CaSO_4$	681

Kömür yakma ürünleri (CCPs), aynı zamanda kömür yakma kalıntıları (CCR) veya kömür yanma atıkları (CCW) olarak da adlandırılırlar. Bunlar genellikle çimento, yapısal dolgu, zemin iyileştirme, grout ve ahşap ürünü için bağlayıcı olarak kullanılırken, kullanılmayan kısmı katı depolama tesislerinde bertaraf edilir. CCP sızıntı sıvısı ise bu atık depolama tesislerinde oluşan sızıntı sıvılarıdır. Çalışmada kullanılan CCP sızıntı sıvıları, Benson vd. (2018) tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir [8]. Bu veri tabanı, ana katyon ve anyonların konsantrasyonları, iyonik güç, tek değerlikli ve çok değerlikli katyonların nispi bolluğu, pH ve elektriksel iletkenlik (EC) hakkında bilgi sağlamıştır. Ek olarak pH ölçümleri CCP sızıntı suyunun hafif alkali bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir (pH 7.67). Sonraki pH ölçümleri 4., 8. ve 16. aylarda sırasıyla 7.67, 7.70 ve 7.81 değerlerini vermiştir. Ayrıca, elektriksel potansiyeli ve viskozite ölçümleri yapılmış ve sırasıyla 26 mV ve 1.68 cP değerleri elde edilmiştir. CCP sızıntı sıvısının kimyasal bileşimi Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 5. CCP'nin kimyasal içeriği [8]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Potasyum sülfat	K_2SO_4	161
Sodyum klorit	NaCl	51
Kalsiyum klorit	$CaCl_2$	58
Sodyum sülfat	Na_2SO_4	722
Kalsiyum sülfat	$CaSO_4$	987
Magnezyum sülfat	$MgSO_4$	146

Kentsel katı atıklar (MSW), yaygın olarak çöp olarak bilinirler, ambalajlar, giysiler, ev artıkları, mobilyalar, aletler, şişeler, boyalar, gazeteler, piller ve benzeri gibi kullandığımız ve daha sonra atılan günlük eşyaları içerirler. MSW sızıntı sıvısı ise bu atıkların depolandığı kentsel katı atık depolama tesislerinin sızıntı sıvılarıdır. Bu çalışmada kullanılan MSW sızıntı sıvısı, Hrapovic ve Rowe (2002) tarafından yapılan çalışmadan elde edilen çeşitli kimyasal bileşikler (Tablo 6) kullanılarak laboratuvarda sentetik olarak üretilmiştir. Hazırlanan MSW sızıntı sıvısının, anaerobik bozulmanın mineralizasyon aşamasında yer alan asetojenik, metanojenik ve sülfidojenik bakterilerin büyümesi ve sürdürülmesi için elverişli olduğu bulunmuştur [18]. Sızıntı sıvısının pH değeri hazırlandığı gün, 4, 8 ve 16 ay sonra ölçülmüş ve sırasıyla 1.73, 1.76, 1.77 ve 1.82 değerleri elde edilmiştir. Elektriksel potansiyeli ve viskozite değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 280 mV ve 1.89 cP sonuçları elde edilmiştir.

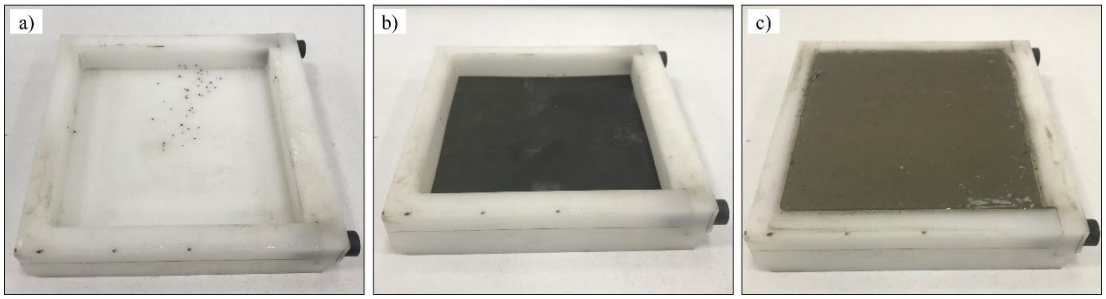
Tablo 6. MSW'nin kimyasal içeriği [18]

Bileşik adı	Kimyasal formül	Miktar (mg/l)
Asetik asit	CH_3COOH	7 mL
Propiyonik asit	$CH_3CH_2CO_2H$	5 mL
Bütirik asit	$C_4H_8O_2$	1 mL
Dipotasyum fosfat	K_2HPO_4	30 mg
Potasyum bikarbonat	$KHCO_3$	312 mg
Potasyum karbonat	K_2CO_3	324 mg
Sodyum klorit	NaCl	1440 mg
Sodyum nitrat	$NaNO_3$	50 mg
Soda bikarbonatı	$NaHCO_3$	3012 mg
Kalsiyum klorit	$CaCl_2$	2882 mg
Magnezyum klorür hekzahidrat	$MgCl_2.6H_2O$	3114 mg
Magnezyum sülfat	$MgSO_4$	156 mg
Amonyum bikarbonat	NH_4HCO_3	2439 mg
Üre	$CO(NH_2)_2$	695 mg
Eser metal çözeltisi*	-	1 mL
Sodyum sülfat nanohidrat	$Na_2S.9H_2O$	E_h-120-180 mV
Sodyum hidroksit	NaOH	pH 5.8-6.0
Saf su	H_2O	1 L için
*Eser metal çözeltisinin kimyasal içeriği		
Demir sülfat	$FeSO_4.7H_2O$	2000
Borik asit	H_3BO_3	50
Çinko sülfat heptahidrat	$ZnSO_4.7H_2O$	50
Bakır sülfat pentahidrat	$CuSO_4.5H_2O$	40

B. Yöntem

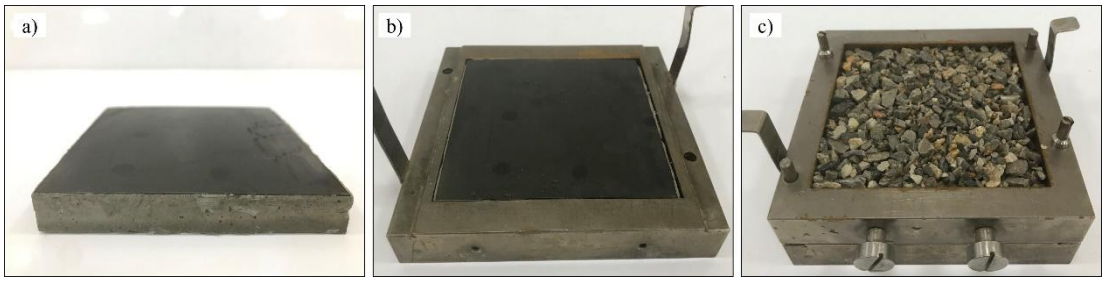
Zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı değerleri, ASTM D3080'e uygun olarak gerçekleştirilen geleneksel kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir [19]. Deneyler 100x100x40 mm boyutlarında orta ölçekli bir kesme kutusu kullanılarak yapılmıştır. "Orta ölçekli" terimi, literatürde kesme kutuları için benzer boyutlar kullanan önceki çalışmalara dayanarak kullanılmıştır [20-23]. Kesme kutusu deneyleri, bilgisayar kontrollü tam otomatik bir kesme kutusu cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunun önlenmesi amacıyla 0.1 mm/dk'lık bir kesme hızı ayarlanmıştır. Ayrıca, konsolidasyon deneyleri yapılarak da kesme hızları belirlenmiş ve seçilen kesme hızına oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Zemin numuneleri optimum su içeriğinde hazırlanmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlık sıkılığında kesme kutusuna yerleştirilmiştir. Numune hazırlandıktan sonra, direk kesme kutusu içerisinde doygunluğa ulaşması için 24 saat boyunca suda bekletilmiştir. Doygunluğa ulaştığını teyit etmek için, birkaç farklı numunenin su içeriği belirlenmiş ve minimum %97 doygunluğa ulaştıkları tespit edildikten sonra kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler literatürde de önerildiği şekilde 49, 98 ve 196 kPa'lık normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir [24-26].

GM'ler ve zemin arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için ara yüzey kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Ara yüzey kayma parametreleri belirlenirken kesme kutusu deneyinin tercih edilmesinin nedeni, aşırı yük basıncı altında GM yüzeyinde oluşacak kayma gerilmelerini belirlemek ve bu kayma gerilmelerinin yüzeyde neden olabileceği deformasyonları tespit etmektir. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri için öncelikle, kesme kutusunun alt kısmının boyutlarına uyacak şekilde Derlin malzemesi kullanılarak kalıp imal edilmiştir (Şekil 2a). GM, kalıbın alt kısmına yerleştirilmiş (Şekil 2b) ve ardından C30 reçetesine göre hazırlanan beton kalıba dökülmüştür (Şekil 2c). Betonun 24 saat boyunca priz almasına izin verilmiştir.



Şekil 2. GM yapıştırılmış beton blok üretim adımları

Daha sonra, üst yüzeyine GM yapıştırılmış beton blok (Şekil 3a) kesme kutusunun altına yerleştirilirken (Şekil 3b), zemin kesme kutusunun üst kısmına yerleştirilmiştir (Şekil 3c). Altta beton blok kullanılmasının nedeni, GM ve alttaki zeminin genellikle temeller, istinat duvarları ve tüneller gibi çeşitli inşaat mühendisliği yapılarıyla birlikte çalışmasıdır. Ek olarak, altta rijit bir malzemenin kullanılmasının bir diğer nedeni üstten uygulanan normal gerilme nedeniyle alt kısımda deformasyonların oluşmasını önleyerek deney boyunca GM'nin hep ara yüzeyde kalmasını sağlamaktır. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri ASTM D5321'e göre gerçekleştirilmiştir [27]. Tüm deneylerde, zemin optimum su içeriğinde hazırlanmış ve zemin – zemin ara yüzey kesme kutusu deneylerinde olduğu gibi maksimum kuru birim ağırlıkta kutunun içine yerleştirilmiştir. Ayrıca, %100 doygunluk elde etmek için numuneler her deneyden önce 24 saat boyunca su içine bekletilmiştir. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri 49, 98 ve 196 kPa normal gerilme değerleri altında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile yıllandırılmamış GM – zemin ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açısı (δ) değerleri belirlenmiştir. Ardından 4 ve 16 ay boyunca kür tanklarında çeşitli sızıntı sıvılarında yıllandırılmış GM'ler ile birebir aynı prosedürler izlenerek ara yüzey kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile yıllandırılmış GM – zemin ara yüzeylerinin ara yüzey sürtünme açısı (δ) değerleri belirlenmiştir.



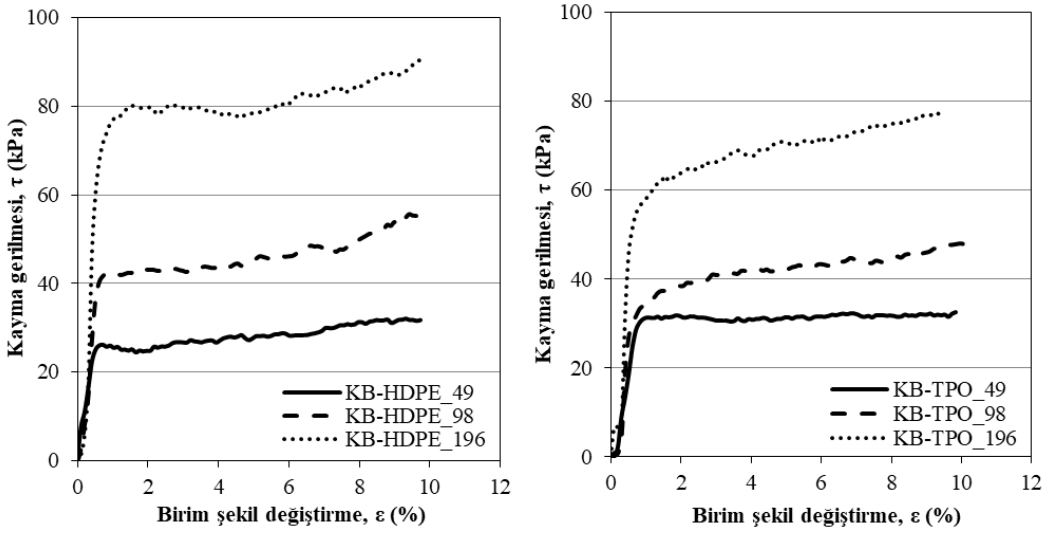
Şekil 3. Ara yüzey kesme kutusu deneyleri numune hazırlama adımları

III. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

A. Yıllandırılmamış GM – Zemin Kesme Kutusu Deney Sonuçları

İlk olarak kıyaslama yapılabilmesi amacıyla KB zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) belirlenmiş ve 22.8° elde edilmiştir. Yıllandırmanın, zemin ve GM arasındaki ara yüzey kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılan kesme kutusu deneylerinin ilk aşaması, yıllandırılmamış numuneler ile ara yüzey kesme kutusu deneyleridir. Yıllandırılmamış HDPE – KB ve yıllandırılmamış TPO – KB ara yüzeylerinin kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, KB – HDPE ara yüzeylerinin kayma gerilmelerinin çok küçük deformasyon değerlerinde pik yaptığı, ardından ya hafif bir artış yaptığı ya da sabit kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanmaktadır: düşük normal gerilmelerde zemin – GM ara yüzeyinde öncelikle hâkim olan mekanizma kaymadır. Daha yüksek normal gerilmelerde, kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri dik bir başlangıç eğimi sergiler, ardından zirveye ulaşana kadar eğimde bir azalma olur. Daha sonra, kayma gerilmesinde bir düşüş meydana gelir ve sonunda sabit bir değere ulaşır. Bunun nedeni ise zemin danelerinin GM yüzeyine tutunması ve kayma yerine danelerin yuvarlanma ve gömülme hareketi yapmasıdır [27]. KB – TPO ara yüzlerinde ise başlangıçtaki dik eğim, daneler ve GM arasındaki sürtünmenin harekete geçmesinin yanı sıra GM yüzeyinde parçacıkların neden olduğu plastik deformasyonlara da bağlanmaktadır. Normal gerilme arttıkça, ara yüzeydeki her bir parçacık üzerindeki gerilme artar ve sonunda polimerin akma gerilmesini aşar [29]. Normal gerilmedeki bu artış polimerin yüzeyinde bir oyulmaya neden olur. Bu oyulma nedeniyle, GM yüzeyini kesmek ve gömülen zemin danesini yerinden çıkarmak için önemli miktarda

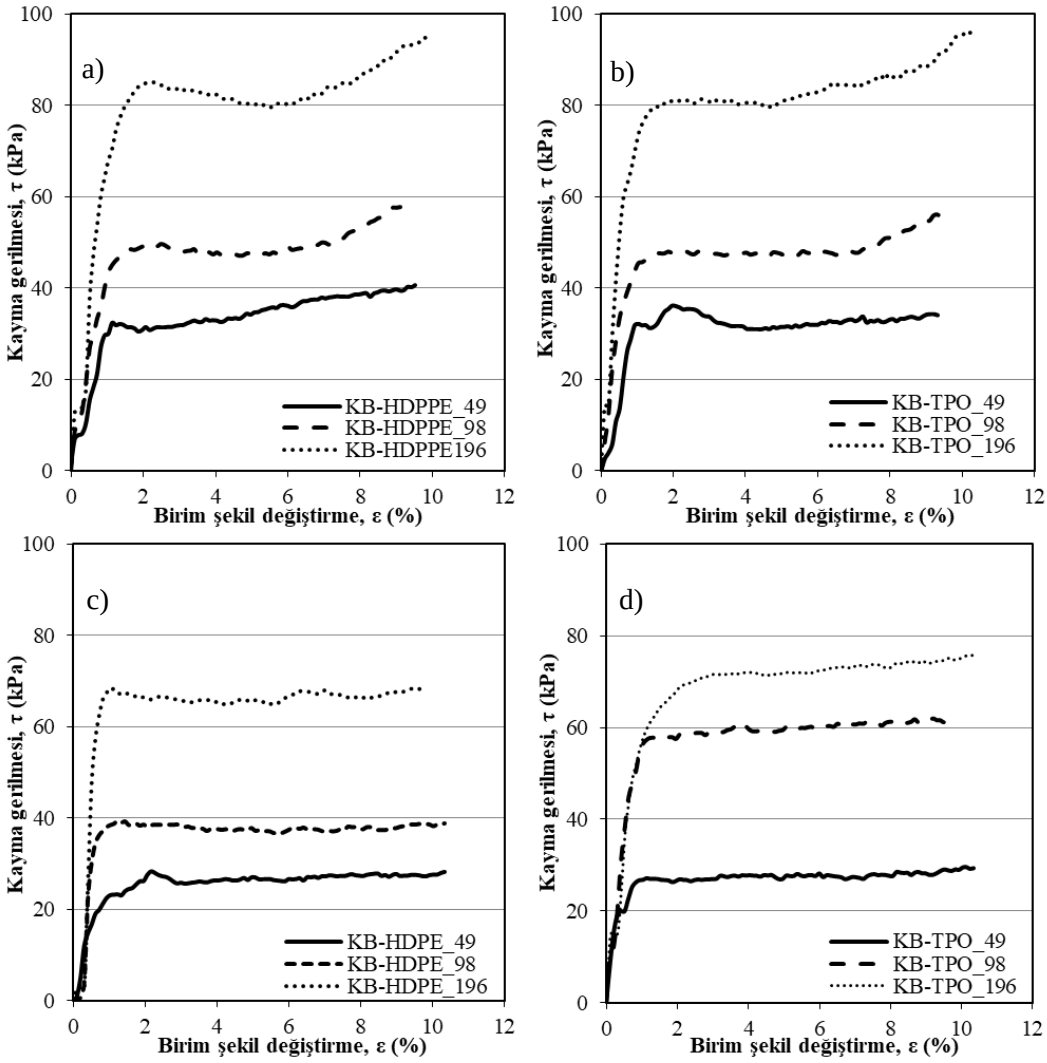
kayma kuvveti gerekir. Bu mekanizmanın TPO'da daha belirgin olma nedeni ise TPO'nun HDPE'ye göre daha yumuşak bir yapıda olmasıdır.



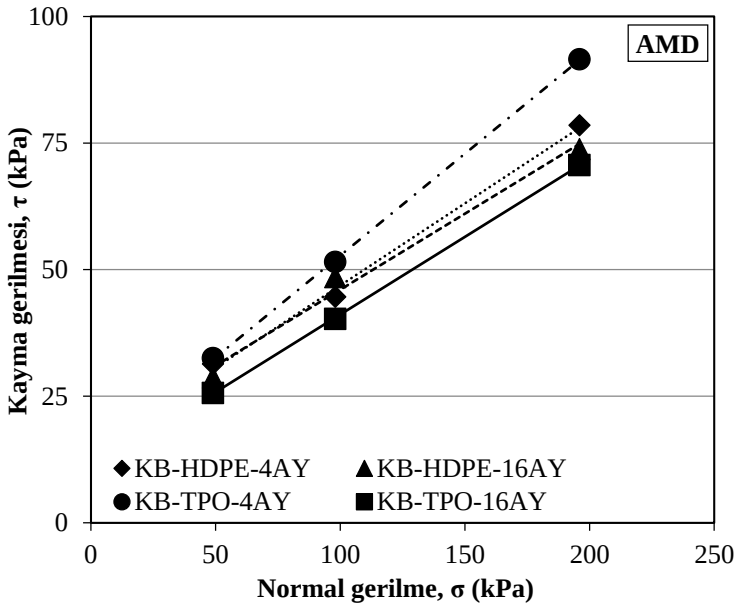
Şekil 4. Yıllandırılmamış GM – zemin ara yüzeylerinin kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ε) eğrileri

B. Yıllandırılmış GM – Zemin Kesme Kutusu Deney Sonuçları

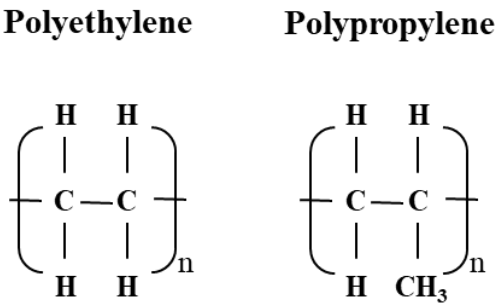
Şekil 5'te AMD'de 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış GM'lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6'da ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde davranış olarak yıllandırılmamış numuneler ile benzer davranışlar sergilediği gözlenmektedir. 4 aylık yıllandırma sonucunda kayma mukavemetlerinde kayda değer bir azalma olmazken, 16 ay sonundan özellikle TPO'da kayda değer bir azalma olmuştur. TPO'nun kayma mukavemetinde HDPE'ye göre daha fazla azalma meydana gelmesinin nedeni ise, polipropilenin kimyasal bağ yapısındaki negatif yüklü (-1) CH_3 metil grubunun, AMD'de bulunan diğer bileşiklerle elektron alışverişi yaparak kimyasal yapısının bozulabilmesidir. Aynı durumun polietilende meydana gelme olasılığı daha düşüktür çünkü kimyasal yapısı sadece C ve H içerir (Şekil 7). Ara yüzey kayma mukavemetlerinde meydana gelen azalmaların diğer nedenleri ise GM'lerin AMD'ye maruz kaldığında tipik olarak polimer yapısının değişmesi ve kimyasal bozulmanın başlamasıdır. Sonuçta GM'lerin mühendislik özelliklerinde değişikliklere yol açar [30]. Polimer, moleküler ağırlıkta dalgalanmalar, gevrekleşme, katkı maddelerinin ve plastikleştiricilerin kaybı, serbest radikallerin oluşumu ve şeffaflıkta azalma gibi çeşitli yaygın değişikliklere uğrar [31]. Bu değişiklikler AMD'de bulunan asidik koşullardan ve yüksek metal konsantrasyondan kaynaklanmaktadır. Literatürdeki araştırmalar asidik koşulların GM'lerin polimer bileşenlerinde küçük mukavemet azalmalarına yol açtığını göstermiştir [32-34].



Şekil 5. AMD'de yıllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ε) eğrileri; a) 4 ay yıllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yıllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yıllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yıllandırılmış TPO-KB

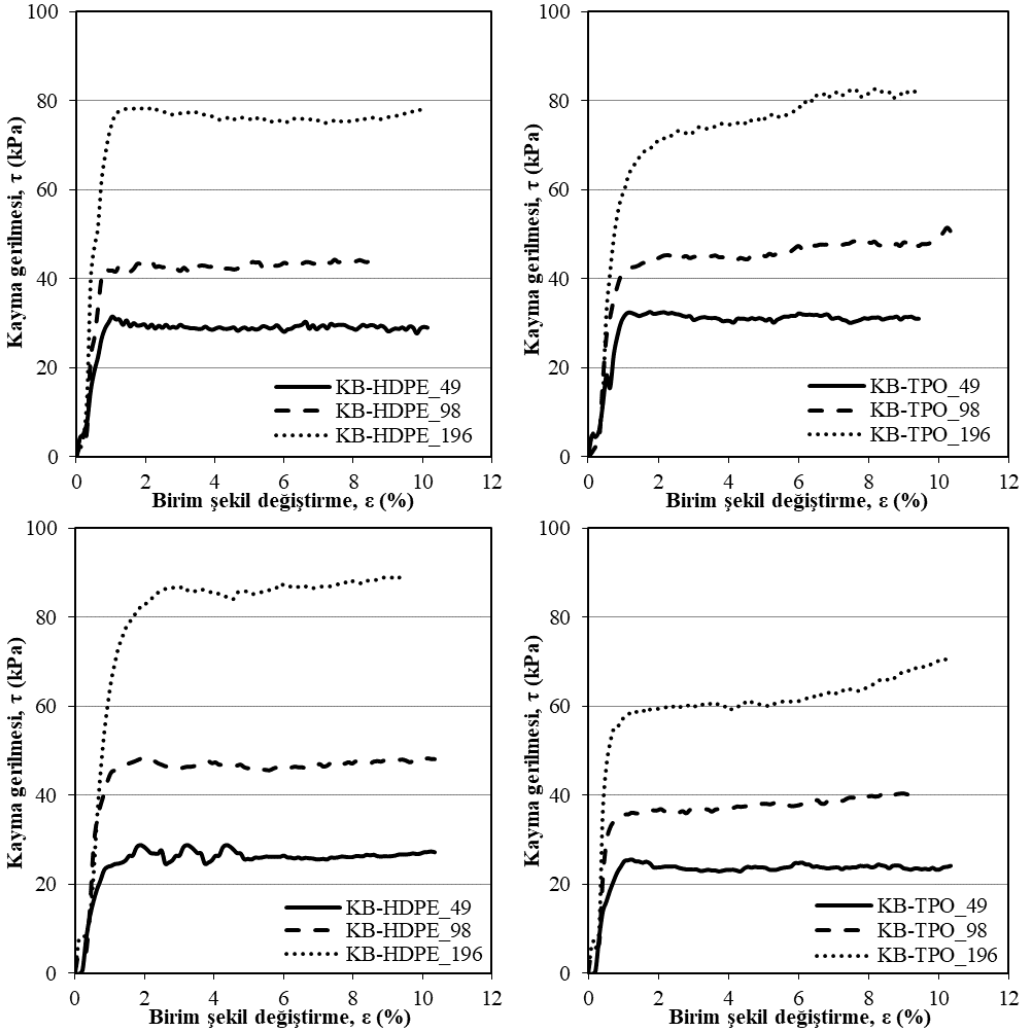


Şekil 6. AMD'de yıllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

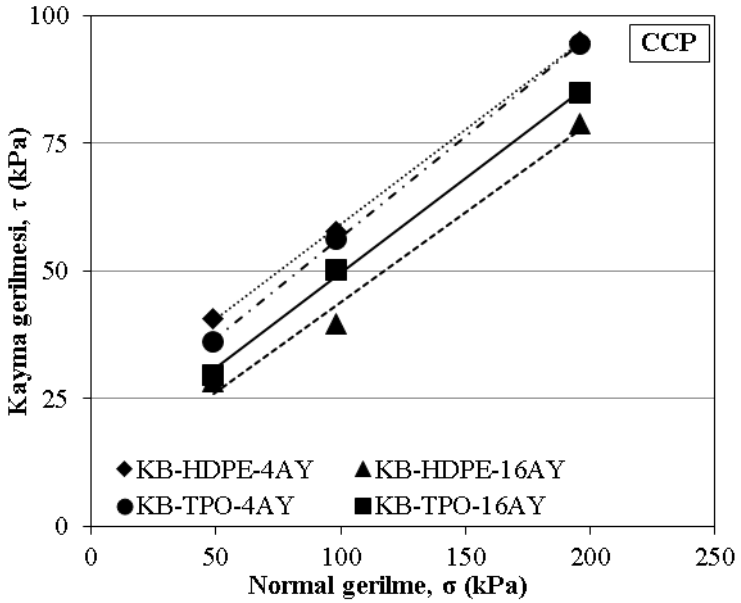


Şekil 7. Polietilen ve polipropilenin kimyasal bağ yapısı

Şekil 8'de CCP'de 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış GM'lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 9'da ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Genel olarak eğriler incelendiğinden CCP'nin AMD'ye göre zarar verici etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir. CCP, elektrik veya buhar üretmek için kömürün yakılmasından elde edilen kalıntılardır. Uçucu kül, taban külü, baca gazı kükürt giderme malzemeleri, püskürtmeli kurutucu külü ve diğerleri gibi çeşitli malzemeleri kapsarlar [35]. CCP'lerden kaynaklanan sızıntı sıvıları ağırlıklı olarak inorganiktir ve genellikle daha yüksek konsantrasyonda çok değerlikli katyon içerir ve AMD'deye kıyasla daha yüksek iyonik bağ sergiler [36-37]. Ayrıca, CCP sızıntı sıvılarının pH değeri AMD'ninkinden önemli ölçüde daha yüksektir. Sonuç olarak, bu nedenlerden ötürü CCP'nin GM'lerin mekanik özelliklerine zarar verme potansiyeli AMD'ye kıyasla düşüktür.

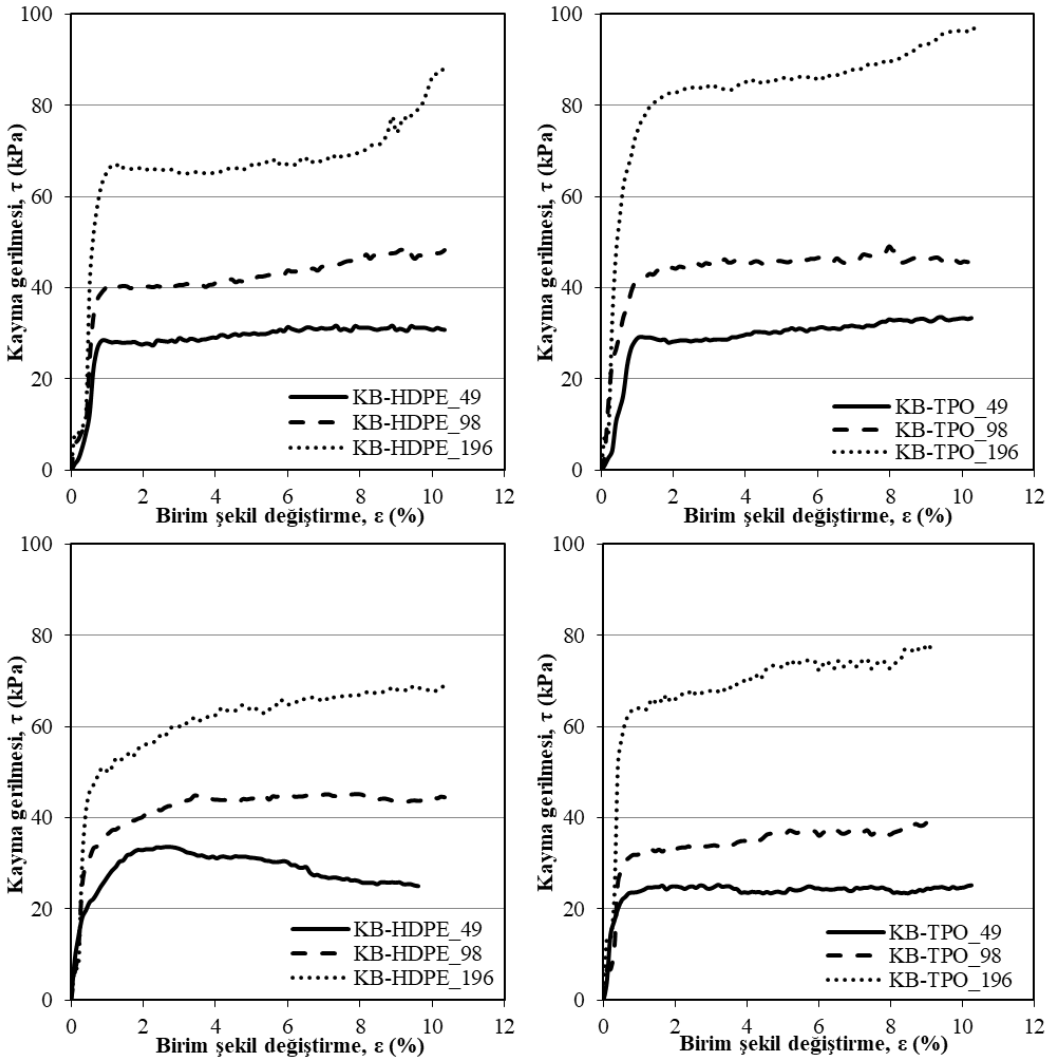


Şekil 8. CCP'de yıllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ε) eğrileri; a) 4 ay yıllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yıllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yıllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yıllandırılmış TPO-KB

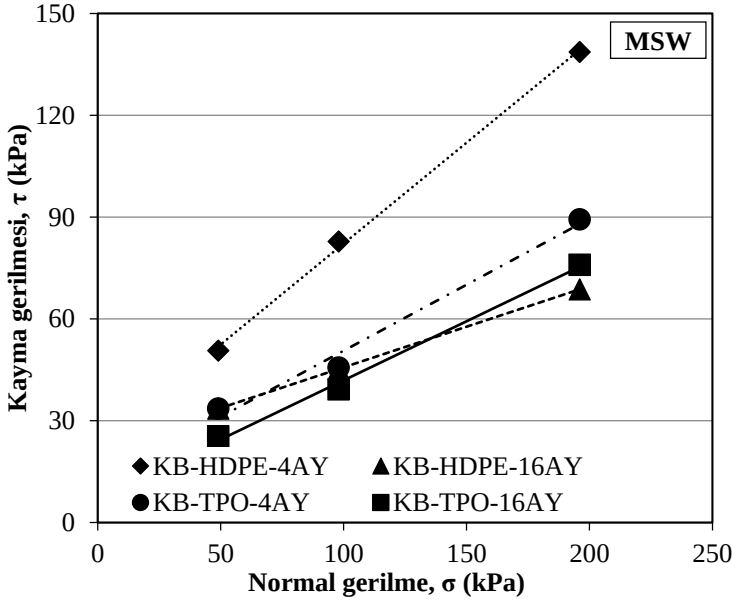


Şekil 9. CCP'de yıllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Şekil 10'da MSW'de 4 ve 16 ay boyunca yıllandırılmış GM'lerin ara yüzey kayma gerilmesi – birim şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 11'de ise bu eğrilerden elde edilen Mohr-Coulomb yenilme zarfları gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde genel olarak MSW'nin zarar verici etkisinin AMD'den daha az CCP'den ise daha fazla olduğu belirlenmiştir. MSW'nin zarar verme nedeni ise, GM'lerin uzun bir süre boyunca MSW'ye maruz kaldığında, oksidatif bozunmasının başlamasıdır. Oksidatif bozunma süreci Viebke ve diğerleri (1994) [38] ve Hsuan ve Koerner (1998) [30] tarafından üç aşamalı bir ilerleme olarak tanımlanmıştır. Aşama I'de GM'lerin mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde bir değişiklik gözlenmez. Aşama II, antioksidanların tükenmesinden sonra başlayan oksidatif indüksiyon dönemini temsil eder. İkinci aşamanın sonu oksidasyonun başlangıcı ile aynı zamana denk gelir. Aşama III'de GM'lerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde kayda değer değişiklikler meydana gelir ve nihayetinde yenilmelerine yol açar. Bu bağlamda yenilme, gerilme-çatlama direnci ve çekme-kopma gerilmesi gibi belirli mühendislik özelliklerinin önceden tanımlanmış bir eşik değerine düşmesi anlamına gelmektedir [10].

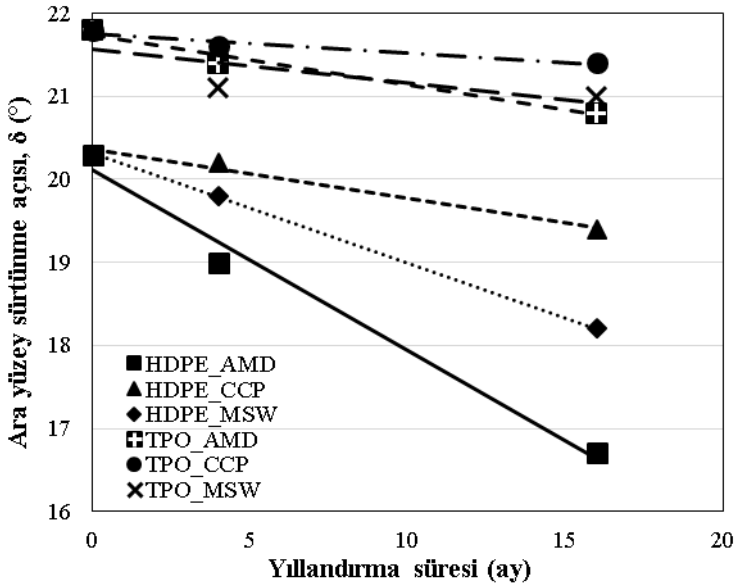


Şekil 10. MSW'de yıllandırılmış ara yüzey kayma gerilmesi (τ)-birim şekil değiştirme (ε) eğrileri; a) 4 ay yıllandırılmış HDPE-KB, b) 4 ay yıllandırılmış TPO-KB, c) 16 ay yıllandırılmış HDPE-KB, d) 16 ay yıllandırılmış TPO-KB



Şekil 11. MSW'de yıllandırılmış ara yüzeylerin Mohr-Coulomb yenilme zarfları

Ara yüzey sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla Mohr-Coulomb yenilme zarfları [39-40] çizilmiş ve her bir ara yüzey için açılar belirlenmiştir. Yıllandırma süresi ile ara yüzey kayma açıları arasındaki ilişkiyi gösteren doğrular Şekil 12'de verilmiştir. Yıllandırma süresi ile ara yüzey sürtünme açısı arasında bir korelasyonun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla her bir doğrunun R^2 değeri ve eğimleri elde edilmiş ve Tablo 7'de sunulmuştur. Şekil 12 incelendiğinde, Yıllandırma süresi arttıkça ara yüzey sürtünme açısındaki azalma net bir şekilde görülmektedir. Eğim değerleri irdelendiğinde, HDPE'nin eğim değerlerinin TPO'dan daha büyük olduğu görülmektedir, bu da daha önce nedenlerinin de açıklandığı şekilde, HDPE'nin yıllandırmadan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca sızıntı sıvılarının eğim değerleri büyükten küçüğe sıralandığında hem TPO hem HDPE için AMD, MSW ve CCP şeklindedir. Yine aynı şekilde bunun anlamı AMD'nin en zarar verici etkiye, CCP'nin en az zarar verici etkiye sahip olduğunun göstergesidir. Öte yandan R^2 değerleri incelendiğinde, bir ara yüzey hariç (TPO_MSW), değerlerin 1'e oldukça yakın olduğu görülmektedir. Yani bu çalışma sonucu elde edilen Yıllandırma sıvısı ile ara yüzey sürtünme açısı arasındaki korelasyonlar oldukça tutarlı bir sonuç vermiştir.



Şekil 12. Ara yüzey sürtünme açısı-yıllandırma süresi ilişkisi

Tablo 7. Ara yüzey sürtünme açısı-yıllandırma süresi korelasyonlarının R^2 ve eğim değerleri

Ara yüzey	R^2	Eğim
HDPE_AMD	0.99	0.22
HDPE_MSW	1.00	0.13
HDPE_CCP	0.98	0.06
TPO_AMD	0.97	0.06
TPO_MSW	0.60	0.04
TPO_CCP	0.92	0.02

C. Literatür Çalışmaları ile Karşılaştırma

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların doğruluğunun, tutarlılığının ve uyumluluğunun kontrolu amacıyla zemin – GM ara yüzey sürtünme açılarının tespiti ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar taranmış ve kapsamlı bir özet oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan zemin kum ve bentonit karışımı olduğu için literatür çalışmalarından kum ve kil zemin ile çalışmış araştırmalar seçilmiştir. Ayrıca bu çalışmada pürüzsüz HDPE ve TPO ile deneyler gerçekleştirildiği için yine literatürde pürüzsüz HDPE ve TPO ile yapılmış deney sonuçları derlenmiş ve Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3'te bu çalışmadan yalnızca yıllandırılmamış ara yüzey sürtünme açıları eklenmiştir çünkü literatürde yıllandırılıp ardından ara yüzey sürtünme açılarının elde edildiği çalışma bulunmamaktadır. Tablo 3 incelendiğinde, ilk göze çarpan en çok kullanılan GM HDPE olurken, TPO'nun kullanımı oldukça sınırlı olduğudur. Ancak mevcut çalışma göstermiştir ki hem TPO'nun ara yüzey sürtünme açısı daha yüksektir hem de

kimyasal ile yıllandırmaya daha dayanıklıdır. Ayrıca daha önce bahsedildiği gibi hem daha ekonomik hem de daha çevrecidir. Bu sebeple hem Türkiye'de hem de dünyada TPO GM'nin kullanılması araştırmacılar tarafından teşvik edilmelidir. Bir diğer husus ise mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürden elde edilen sonuçların uyumlu olduğu, ara yüzey sürtünme açılarında afaki bir fark olmadığıdır.

Tablo 2. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Çalışma	Ara yüzey	Ara yüzey sürtünme açısı, δ (°)
Mevcut çalışma	HDPE – Kum-Bentonit	20.3
	TPO – Kum-Bentonit	21.8
Welker ve Josten, 2005 [41]	HDPE – Killi kum	19.0
Fleming vd., 2006 [42]	HDPE – Ottawa kumu	21.0
	HDPE – Siltli kum	15.4
	HDPE – Kum/bentonit	21.1
Sharma vd., 2007 [43]	HDPE – Kum	14.1
Effendi, 2012 [44]	HDPE – Ottawa kumu	13.6
Frost vd., 2012 [45]	HDPE – Ottawa kumu	24.5
Monteiro vd., 2013 [46]	HDPE – Kum	29.6
Vangla ve Gali, 2016 [47]	HDPE – Köşeli kum	27.1
	HDPE – Yuvarlak kum	18.7
Punetha vd., 2017 [48]	HDPE – Dere kumu	23.7
	HDPE – Dere kumu	20.8
	HDPE – Ottawa kumu	20.0
	TPO – Ottawa kumu	25.0
Cen vd., 2018 [49]	HDPE – İnce kum	29.0
Markou ve Evangelou, 2018 [50]	HDPE – Yuvarlak kum	17.0
	HDPE – Köşeli kum	32.5
	TPO – Yuvarlak kum	26.3
	TPO – Köşeli kum	33.8
Ari, 2020 [51]	HDPE – Dere kumu	22.0
	HDPE – Kırma kum	25.0
Zhou vd., 2020 [14]	HDPE – Kum	24.2
	HDPE – Kil	18.8

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin – GM ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri araştırılmıştır. Zemin – GM arayüzey sürtünme açıları orta ölçekli bir kesme kutusu cihazı ile elde edilmiştir. Testlerde tek tür zemin (kum/bentonit karışımı) ve iki tür pürüzsüz GM (HDPE ve TPO) kullanılmıştır. Ayrıca, sızıntı sıvılarının (AMD, CCP, MSW) GM'lerin ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkilerinin irdelenmesi amacıyla 4 ve 16 ay yıllandırılmış GM numuneleri ile ara yüzey kesme kutusu deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda:

- HDPE – zemin ara yüzeylerinde kayma gerilmesinin belirli bir yatay yer değiştirmeye kadar arttığı ve daha sonra sabit kaldığı tespit edilmiştir.
- Genel olarak, GM'lerin ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerini en olumsuz etkileyen sızıntı sıvısının AMD, en az etkileyen sızıntı sıvısının ise CCP olduğu tespit edilmiştir.
- Ara yüzey kayma mukavemeti parametreleri açısından, TPO'nun kimyasal yıllandırmadan HDPE'ye göre daha az etkilendiği tespit edilmiştir.

- Kullanım alanı oldukça sınırlı, ekonomik ve çevreci olan TPO'nun atık depolama tesislerinde en çok tercih edilen, pahalı ve çevreye zarar veren HDPE'den daha yüksek ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerine sahip olması bu çalışmadan çıkarılabilecek en önemli sonuç olmuştur.
- Sonuç olarak 16 ay gibi kısa bir sürede dahi hem HDPE'nin hem de TPO'nun ara yüzey kayma mukavemeti parametrelerinde kayda değer bir düşüş gözlenmiştir. Yapılacak atık depolama sahaları tasarımlarında bu durumun göz önünde bulundurulması hem maddi açıdan hem de can kaybı açısından oldukça önem arz etmektedir.

TEŞEKKÜR

Katkıları ve desteklerinden ötürü BTM Yalıtım'a ve GEOPLAS Geosynthetics'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] Grassie, N., & Scott, G. (1985). *Polymer Degradation and Stabilization*. Cambridge University Press, Cambridge.
[2] Barroso, M., Touze-Foltz, N., Maubeuge, K., & Pierson, P. (2006). Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. *Geotextiles and Geomembranes, 24,* 139-155.
[3] Rowe, R. K., Quigley, R. M., Brachman, R. W. I., & Booker, J. R. (2004). *Barrier systems for waste disposal facilities 2nd Ed*. E&FN Spon, London, UK.
[4] Rowe, R. K., Islam, M. Z., & Hsuan, Y. G. (2008). Leachate chemical composition effects on OIT depletion in an HDPE geomembrane. *Geosynthetics International, 15(2),* 136–51.
[5] Mueller, W., & Jakob, I. (2003). Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. *Polymer Degradation and Stability, 79,* 161–172.
[6] Gulec, S. B., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2005). Effect of acidic mine drainage on the mechanical and hydraulic properties of three geosynthetics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(8),* 937–950.
[7] Rowe, R. K., Rimal, S., & Sangam, H. (2009). Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures. *Geotextiles and Geomembranes, 27(2),* 137–151.
[8] Benson, C. H., Chen, J. N., Edil, T. B., & Likos, W. J. (2018). Hydraulic conductivity of compacted soil liners permeated with coal combustion product leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 144(4).*
[9] Sun, X., Xu, Y., Liu, Y., Nai, C., Dong, L., & Liu, J. (2019). Evolution of geomembrane degradation and defects in a landfill: Impacts on long-term leachate leakage and groundwater quality. *Journal of Clean Productions, 224,* 335–345.
[10] Rowe, R. K., Islam, M. Z., & Hsuan, Y. G. (2010). Effects of thickness on the aging of HDPE geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(2),* 299–309.
[11] Li, W., Xu, Y., Huang, Q., Liu, Y., & Liu, J. (2021). Antioxidant depletion patterns of high-density polyethylene geomembranes in landfills under different exposure conditions. *Waste Management, 121,* 365-372.
[12] Chai, J. C., & Saito, A. (2016). Interface shear strengths between geosynthetics and clayey soils. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2,* 1–9.
[13] Stark, T. D., & Santoyo, R. F. (2017). Soil/geosynthetic interface strengths from torsional ring shear tests. *Geotechnical Frontiers, GSP 280,* 260 – 268.
[14] Zhou, L., Zhu, Z., Yu, Z., & Zhang, C. (2020). Shear Testing of the Interfacial Friction Between an HDPE Geomembrane and Solid Waste. *Materials, 13,* 1-16.
[15] Chen, W., Xu, T., & Zhou, W. (2021). Microanalysis of smooth Geomembrane–Sand interface using FDM–DEM coupling simulation. *Geotextiles and Geomembranes, 49,* 276-288.
[16] Develioglu I., & Pulat H. F. (2022). Effect of Grain Size, Angularity and Curing on Interfacial Shear Behavior Between Soil and Geomembrane. *4th International Göbeklitepe Scientific Research Congress*, 7-8 Ekim, Şanlıurfa.
[17] ASTMD2487-17 (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
[18] Hrapovic, L., & Rowe, R. K. (2002). Intrinsic degradation of volatile fatty acids in laboratory-compacted clayey soil. *Journal of Contamination Hydrology, 58,* 221-242.
[19] ASTMD3080-04 (2012). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.

[20] Dadkhah, R., Ghafoori, M., Ajalloeian, R., & Lashkaripour, G. R. (2010). The effect of scale direct shear test on the strength parameters of clayey sand in Isfahan City, Iran. *Journal of Applied Science, 10(18),* 2027-2033.
[21] Sobol, E., Sas, W., & Szymanski, A. (2015). Scale effect in direct shear tests on recycled concrete aggregate. *Studia Geotechnica et Mechanica, 37(2),* 45-49.
[22] Mohapatra, S. R., Mishra, S. R., Nithin, S., & Rajagobal, K. (2016). Effect of Box Size on Dilative Behaviour of Sand in Direct Shear Test. *India Geotechnical Conference,* Chennai, 16, 111-118.
[23] Zahran, K., & El Naggar, H. (2020). Effect of Sample Size on TDA Shear Strength Parameters in Direct Shear Tests. *Transportation Research Record, 2674(9),* 1110-1119.
[24] Yano, K., Usuki, A., & Okada, A. (1997). Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid films. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry, 35,* 2289-2294.
[25] Shah, K., & Shah, D. L. (2015). Interface friction between soil and geosynthetics. *5th Indian Young Geotechnical Engineers Conference, Vadodara,* 81-82.
[26] Angelim, R. R., Cunha, R. P., & Sales, M. M. (2016). Determining the elastic deformation modulus from a compacted earth embankment via laboratory and Ménard pressuremeter tests. *Soils and Rock, 9(3),* 285-300.
[27] ASTMD5321-12 (2021). Standard Test Method for Determining the Shear Strength of Soil-Geosynthetic and Geosynthetic-Geosynthetic Interfaces by Direct Shear. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
[28] O'Rourke, T. D., Druschel, S. J., & Netravali, A. N. (1990). Shear strength characteristics of sand-polymer interfaces. *Journal of Geotechnical Engineering, 116(3),* 451-469.
[29] Dove, J. E., & Frost, J. D. (1999). Peak friction behavior of smooth geomembrane-particle interfaces. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(7),* 544-555.
[30] Hsuan, Y. G., & Koerner, R. M. (1998). Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(6),* 532–541.
[31] Kulshreshtha, A. K. (1992). Chemical degradation. *Handbook of Polymer Degradation Marcel Dekker,* New York, USA, 55–94.
[32] Risseuw, P., & Schmidt, H. M. (1990). *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*. Rotterdam, The Netherlands.
[33] Jailloux, J. M., Anderson, P. L., & Thomas, R. W. (1992). Chemical-compatibility studies of polyester filaments and yarns to be used in geocomposites. Phase 1: Tests at 95° C. *Geotextiles and Geomembranes., 11(3),* 277–290.
[34] Salman, A., Elias, V., Juran, I., Lu, S., & Pearce, E. (1997). Durability of geosynthetics based on accelerated laboratory testing.
[35] Zainab, B., Wireko, C., Li, D., Tian, K., & Abichou, T. (2021). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners to coal combustion product leachates. *Geotextiles and Geomembranes, 49(5),* 1129–1138.
[36] Salihoglu, H., Chen, J. N., Likos, W. J., & Benson, C. H. (2016). Hydraulic conductivity of bentonite-polymer geosynthetic clay liners in coal combustion product leachates. *Geo-Chicago,* 438–447.
[37] Benson, C., Chen, J., & Edil, T. (2014). Engineering properties of geosynthetic clay liners permeated with coal combustion product leachates. *Report No: 3002003770, Electric Power Research Institute*, Palo Alto, CA.
[38] Viebke, J., Elble, E., Ifwarson, M., & Gedde, U. W. (1994). Degradation of unstabilized medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering Science, 34(17),* 1354-1361.
[39] Coulomb, C. A. (1774). Sur une application des regles maximis et minimis a quelques problems de statique, relatives a l'architecture. *Acad Sci Paris Mem Math Phys*, 7, 343-382.
[40] Mohr, O. (1900). Welche Umstande bedingen die Elastizitatsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeit des Ver Deut Ing*, 44, 1524-1530.[41] Welker, A. L., & Josten, N. (2005). Interface friction of a geomembrane with a fiber reinforced soil. Slopes and retaining structures under seismic and static conditions. *Geo-Frontiers Congress*, Austin, Texas, USA, 1-8.
[42] Fleming, I. R., Sharma, J. S., & Jogi, M. B. (2006). Shear strength of geomembrane-soil interface under unsaturated conditions. *Geotextiles and Geomembranes, 24*, 274-284.
[43] Sharma, J. S., Fleming, I. R., & Jogi, M. B. (2007) Measurement of unsaturated soil–geomembrane interface shear-strength parameters. *Canadian Geotechnical Journal, 44(1),* 78-88.
[44] Effendi, R. (2011). Interface friction of smooth geomembranes and Ottawa sand. *INFO-TEKNIK, 12(1),* 61-72.
[45] Frost, J D., Evans, T. M., Hebeler, G. L., & Giroud, J. P. (2012). Influence of wear mechanisms on geosynthetic interface strengths. *Geosynthetics: state of the art-recent developments proceedings of the seventh international conference on geosynthetics,* Nice, France.
[46] Monteiro, C. B., Araújo, G. L. S., Palmeira, E. M., & Cordão Neto, M. P. (2013). Soil-geosynthetic interface strength on smooth and texturized geomembranes under different test conditions. *Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 3053-3056.

[47] Vangla, P., & Gali, M. L. (2016). Shear behavior of sand – smooth geomembrane interfaces through micro – topographical analysis. *Geotextiles and Geomembranes, 44,* 592-603.
[48] Punetha, P., Mohanty, P., & Samanta, M. (2017). Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test. *Geotextiles and Geomembranes, 45(3),* 197-210.
[49] Cen, W. J., Wang, H., & Fe, Y. J. (2018). Laboratory investigation of shear behavior of high – density polyethylene geomembrane interfaces. *Polymers, 10,* 1-14.
[50] Markou, I. N., & Evangelou, E. D. (2018). Shear Resistance Characteristics of Soil–Geomembrane Interfaces. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 4(4),* 29-39.
[51] Ari, A. (2020). Kum-geosentetik arayüzeyi kayma direncine fraktal boyutun etkisinin araştirilmasi. *Yıldız Teknik University Natural and Applied Science,* Istanbul, Turkey.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi

Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 27-46, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1409558

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Konya Meyil Obruk Gölü'nün Karakteristik Özellikleri, Bazı Siyanobakteri ve Diyatom Taksonlarının İzolasyonu, Onların Moleküler-Morfolojik Teşhisleri

Characteristic Features of Konya Meyil Sinkhole Lake, As Well As The Isolation and Molecular-Morphological Species Identification of Some Cyanobacteria and Diatoms In Lake

Zeliha Demirel[1*], Şeyda Parlar[2], Berkant Coşkuner[3], Arzu Yıldırım[4], Meltem Conk Dalay[5], Yaşar Eren[6]

Geliş / Received: 25/12/2023 ***Revize / Revised: 06/05/2024*** ***Kabul / Accepted: 11/06/2024***

ÖZ

Bu çalışmada, Obruk Platosunda (Karapınar-Konya) bulunan Meyil Obruk gölünün fiziksel ve jeolojik özelliklerinin araştırılması ve iklim değişikliği nedeniyle gölün suyundaki renk değişimine neden olan mikroorganizmaların belirlenmesi amaçlanmıştır. Meyil Gölü'nün uzun ekseni 650 m, kısa ekseni ise 540 m'dir. 2020 yılı itibariyle obruğun suya kadar olan derinliği 80 m ve ağız alanı 0,3 km^2' dir. Obruğun ağız kesiminin en üst seviyedeki kotu 1050 m'dir. Meyil Obruğu Miyosen-Pliyosen yaşlı gölsel kireçtaşı-marn-çamurtaşı-kiltaşı ardalanması şeklindeki kayaçlar içinde oluşmuştur. Küresel ısınma ve aşırı su kullanımı nedeniyle su seviyesi düşmüş ve gölün alanı oldukça küçülmüştür. Ayrıca obruk içinde günümüzde tekrar hareketlenmeyi gösteren dairesel yarıklar bulunmaktadır. Çalışma kapsamında gönderilen su örneğinden siyanobakteri taksonlarından *Phormidium* sp., *Toxifilum* sp., *Geitlerinema* sp. (1, 2), *Leptolyngbya* sp. (1, 2) ve diyatom taksonlarından *Pseudostaurosira* sp. ve *Nitzschia amphibia* izole edilerek morfolojik ve moleküler tanımlamaları gerçekleştirilmiştir. İzole edilen taksonları muhafaza etmek için Ege Üniversitesi Biyomühendislik Bölümünde bulunan mikroalg kültür koleksiyonuna (EGE-MACC) taksonların eklenmesi ve korunması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Meyil Obruk Gölü, Siyanobakteri; Diyatom, İzolasyon, Moleküler-Morfolojik Tanımlama

[1]*Corresponding Author Contact: zeliha.demirel@ege.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-3675-7315)
Department of Bioengineering, Faculty of Engineering, Ege University, İzmir, Türkiye
[2]Contact: sparlar@ktun.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-1048-0100)
Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye
[3]Contact: bcoskuner@ktun.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-9798-8793)
Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye
[4]Contact: arzu.yildirim@ege.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-9836-3181)
Department of Bioengineering, Faculty of Engineering, Ege University, İzmir, Türkiye
[5]Contact: meltemconkdalay@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-1718-7292)
Department of Bioengineering, Faculty of Engineering, Ege University, İzmir, Türkiye
[6]Contact: yeren@ktun.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-7899-8507)
Department of Geological Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye

ABSTRACT

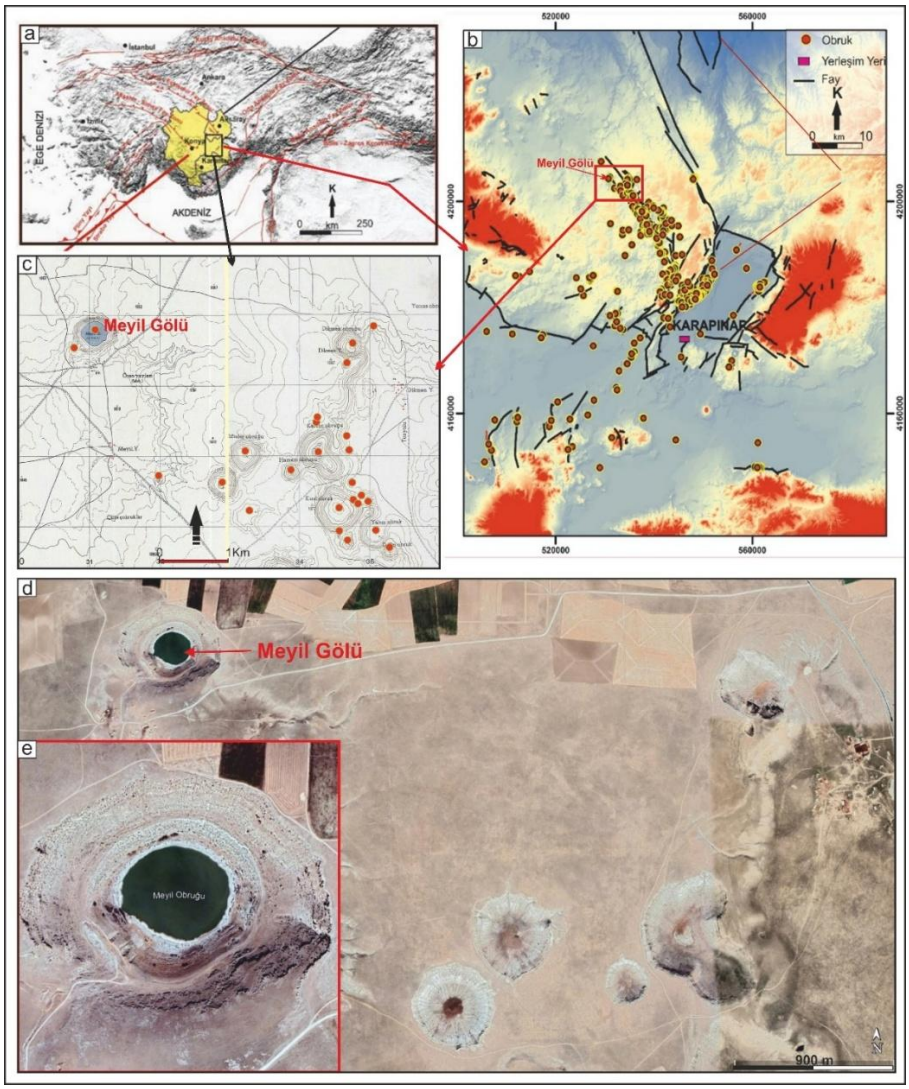
This study aims to investigate the physical and geological properties of Meyil Sinkhole Lake located on the Sinhkhole Plateau (Karapınar-Konya), and to determine the microorganisms that cause color change in the lake's water due to climate change. The long axis of Meyil Lake is 650 m and the short axis is 540 m. As of 2020, the sinkhole up to the water is depth 80 m and the mouth area is 0.3 km^2. The highest level of the mouth of the sinkhole is 1050 m. The Meyil Sinkhole was formed within Miocene-Pliocene aged lacustrine limestone-marl-mudstone-claystone alternation rocks. Due to global warming and excessive water use, the water level has decreased, and the area of the lake has shrunk considerably. In addition, there are circular fissures in the sinkhole, which indicate that there is activity again today. Within the scope of the study, the water sample sent from Lake Sinkhole was isolated, and then their morphological and molecular identifications were carried out. Afterward, microalgae species were detected from cyanobacteria species *Phormidium* sp., *Toxifilum* sp., *Geitlerinima* sp. (1, 2), *Leptolyngbya* sp. (1, 2), and diatom species *Pseudostaurosira* sp. and *Nitzschia amphibia*. To preserve the isolated species, the species were added and preserved to the microalgae culture collection (EGE-MACC) in the Department of Bioengineering at Ege University.

Keywords- Meyil Sinkhole Lake, Cyanobacteria, Diatom, Isolation, Molecular-Morphological Identification

I. GİRİŞ

Obruklar (sinkholes, dolins), karstik bölgelerdeki küçük ve kapalı çöküntülerdir [1, 2]. Ana kayanın çözünmesi, çökmesi, aşağıya doğru yıkanması, örtü çökmesi vb. süreçlerle oluşurlar ve buna göre sınıflandırılırlar [2-4]. Karst genellikle kireçtaşı, dolomit, jips gibi karbonatlı ve evaporitik kayaçlarda gelişir ve dünyanın hemen her ülkesinde olduğu gibi Türkiye'de de yaygın olarak görülür.

Toros karstlarında ve Konya ilinin doğusunda Karapınar ve çevresinde Obruk Platosu içinde değişik boyutlarda, farklı yapısal özelliklerde ve farklı oluşum mekanizmalarına sahip çok sayıda obruk (yerel halk dili:opan) bulunmaktadır (Şekil 1a ve b).



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası, a. Türkiye'nin ana faylarını b. Karapınar çevresindeki fayları ve obrukları, c. Meyil Gölü ve çevresinin topoğrafik haritasını ve d-e. Meyil Gölü ve çevresinin Google Earth uydu görüntüsünü gösteren haritalar.

Obruk Platosu içinde yer alan bu bölgede her biri birer doğa harikası olan ve farklı oluşum yaşlarına sahip eski oluşumlu obruklar bulunmaktadır (Şekil 1b). Obruk Platosu, çevredeki Kuvaterner yaşlı havzalara göre ortalama 100 m'yi aşan yükselti sunan bir zondur. Obruk Platosu'nda, her biri birer doğal anıt olan çeşitli boyutlarda 205 obruk tanımlanmıştır [5, 6] (Şekil 1b). Plato üzerinde çapı 800 m' ye, derinliği görünürde 130 m'ye varan çok sayıda obruk bulunmaktadır. Kızören, Meyil, Çıralı, Dikmen, Potur, Cehennem, Karain, Akviran, Akobruk, Kangallı, Hamam yöredeki önemli ve büyük çaplı obruklardandır. Bu obruklar 3-12 milyon yıl yaşlı kireçtaşlarında binlerce hatta milyonlarca yıl içinde gelişen ve bölgede insan yerleşimlerinden önce oluşan, yani oluşumunda insan etkisinin olmadığı obruklardır. Obruklar ortalama 13,2 m derinliğe sahiptirler ve çevre uzunlukları 4,4 m–2296 m, alanları ise 1,3 m^2 ile 413267,35 m^2 arasında değişmektedir. Karapınar-Konya bölgesinde eski oluşumlu obruklar bulunduğu gibi, güncel obruk oluşumları da sık sık gözlenmektedir. Ayrıca bölgedeki güncel düşey çökmelere bağlı olarak eski oluşumlu obrukların bir kısmında tekrar hareketlenmeyi gösteren dairesel yarıklar, bir kısmında da daha küçük çaplı güncel obruklar oluşmaya başlamıştır.

Obruğun tabanı su tablasının altındaysa, sıklıkla bir göl oluşmaktadır (Örn. Kızören, Çıralı, Meyil, Timraş, Apa). Son yıllarda küresel ısınma ve aşırı su kullanımı sonucu yer altı suyu seviyesinin düşmesi nedeniyle sulu obruklardan Çıralı gölü tamamen kurumuş, Timraş ve Meyil obruk gölleri ise kurumak üzeredir.

Meyil Obruk Gölü (Şekil 1c, 1d, 1e ve 2a, 2b), Konya-Karapınar Obruk Platosu üzerindeki en göz alıcı ve ilginç obruklardan biridir. Bölgede geçmiş yıllarda farklı konularda çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [6-34].

Göçmez (2011) [26] ve KOP (2012) [34] raporu obrukların oluşumu ve morfolojik özellikleri, Erol (1986) [35] jeomorfolojik gelişimi, Yılmaz (2010) [36] yeraltı suyu seviye değişimlerine bağlı çevre sorunları, Bozyiğit

ve Tapur (2009) [37] turizm potansiyeli, Fikirdeşici Ergen (2021) [38] Meyil Obruk Gölü sedimentlerinin kirlilik analizleri, Akdemir (2008) [39] Meyil Obruk Gölü'ndeki ostrakodlar hakkında çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca Akdemir (2004) [40] Acıgöl, Meke ve Meyil Gölleri'nin ostrakod faunası ve Durmaz (2019)[41] Meyil ve Kızören Obruk Gölleri'nin zooplankton faunası konularında yüksek lisans tezleri hazırlamışlardır.

Yöredeki obrukların çok büyük bir bölümü su bulundurmamaktadır. Yörede 2023 yılı itibariyle sadece Kızören ve iyice azalsa da Meyil Obruğu su bulundurmaktadır. Genelde yeşil ve gri renk tonlarında gözlenen (Şekil 2a) Meyil Gölü'nün rengi yöre halkının ifadesi ile ilk defa 19.08.2020 tarihinde pembe-mor renge dönüşmüştür (Şekil 2b). 02.09.2020 tarihinde tekrar gidildiğinde gölün eski rengine döndüğü görülmüş ve sadece kenarlarında 0,5 m-1 m genişliğindeki bir zonda göle pembe mor renk veren kalıntıların kaldığı görülmüştür. 2021 ve 2022 yıllarında gölün su seviyesi biraz düşse de normal özelliğini korumuştur. 28.10.2023 tarihinde gidildiğinde ise gölün suyunun büyük oranda çekildiği (Şekil 2c) ve 14.11.2023 tarihinde göl suyunda tekrar renklenme olduğu gözlenmiştir (Şekil 2d).



Şekil 2. Meyil Gölü'nün a. normal göl suyu rengi b. e. 26.08.2020 tarihinde göl suyunda pembe renklenme c. 28.10. 2023 tarihinde gölün suyunun çekilmesi d. 14.11.2023 tarihinde göl suyunda tekrar mor-alacalı renklenme f. Meyil Gölü içindeki dairesel yarıklar g-i. 26.08.2020 tarihinde Meyil Gölü'nde gerçekleştirilen su örnekleme çalışmaları

Bu renk değişimlerine neden olabilecek mikrobiyal yaşam formları bu çalışma ile araştırılmıştır. Farklı haber kaynaklarında, pembe renk oluşumunun *Dunaliella salina* nedeniyle olduğu bildirilmesine rağmen Meyil Obruğunda tuz konsantrasyonu düşüktür [42]. Gölde oluşan rengi siyanobakterilerde bulunan protein pigment kompleksi olan fikobiliproteinlerin gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Fikobiliproteinler (PBP'ler), fuşya, mor-mavi ve camgöbeği dahil olmak üzere çeşitli renklerde floresan proteinlerdir ve fikobilizomlar (PBS) adı verilen yardımcı fotosentetik komplekslerde ışık enerjisinin yakalanmasına olanak tanır [43]. Elektron mikroskobu deneylerinde, PBS'nin açıkça tanımlanmış 2 alt yapıya (çubuklar ve çekirdek) sahip olduğunu belirtilmiştir. Çubuklar, fikoeritrin (PE-kırmızı/pembe) ve fikoeritrosiyanin (PEC-menekşe/viyolet) olmak üzere iki veya üç PBP'den oluşur; bunlar çekirdekten en uzak PBP'lerdir. Çubuklar ayrıca çekirdeğe en yakın fikobiliprotein olan fikosiyaninden (PC-mavi) oluşur. Ancak PE ve PEC her zaman fikobilizomların çubuklarının bir parçası olmayabilir [44].

Siyanobakteriler, taksonomik açıdan fotootrofik prokaryotlardandır. Bu algler tüm göllerde bulunabilir ve göl ekosisteminin doğal bir parçasını oluşturur. Siyanobakteriler, yeryüzündeki tüm sucul ortamlarda yaygın olarak görülebilmektedir. Ortamdaki yüksek besin konsantrasyonu ve sıcaklık onların aşırı çoğalmalarına neden olabilir [45]. Taksonomik kategorizasyonda algaebase.org veri tabanı kullanılmıştır [46].

Bu çalışmanın amacı, Konya-Karapınar Obruk Platosunda bulunan Meyil Obruk gölünün karakteristik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin araştırılması ve iklim değişikliği nedeniyle gölün su kütlesindeki renk değişimine sebep olabilecek mikroorganizmaların belirlenmesidir. Obruk Göl suyu içerisinde bulunan alg taksonlarının laboratuvar koşullarında izolasyonu ve tanımlamasını içermektedir.

II. MATERYALVE METOT

A. Örnek Transferi

Gölün pembe-mor rengini sergilediği 26.08.2020 tarihinde tek bir istasyondan steril pet şişelerde pelajik su örnekleri alınmış, uygun olarak paketlenmiş (Şekil 2g-2i) ve aynı gün hızlı kargo ile Ege Üniversitesi Biyomühendislik Bölümüne gönderilmiştir.

Laboratuvara gönderilen su örneği önceden hazırlanan farklı pH'lar da (6,5-7-8,5) BG-11, CHU-10, Basal, N-free BG-11 kültür ortamlarına ekilerek 50 µmol/m^2s ışık şiddetinde 37±2ºC sıcaklıktaki inkübatörde inkübasyona bırakılmıştır.

1. Taksonların İzolasyon ve Saflaştırma Yöntemleri

Filtrasyon; Düşük vakum altında kaba filtre kullanılarak filamentli taksonların ortamdan ayrılması sağlanarak ayrım yapılmaya çalışılmıştır.

Seri dilüsyon (seyreltme); 15 mL tüplere 9 mL seçilen kültür ortamı ilave edilerek yaklaşık 1mL stoktan ilave edilerek 10^3 -10^4 dilüsyonlar hazırlanarak inkübasyona bırakılmıştır.

Agarlı petri kaplarına ekimi; Dilüsyon örnekleri agarlı petri kutularına yayma ve çizgi ekim teknikleri kullanılarak ekilip inkübasyona bırakılarak petri yüzeyinde gelişen farklı kolonilerden ayırma saflaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bazı hızlı gelişen mikroalg türlerinin baskılanmasında bazı kimyasallar özellikle germanyum dioksit (diyatomların uzaklaştırılmasında); NaOCl epifit türlerin eliminasyonunda ve akinetlerin yok edilmesinde kullanılmıştır [47].

2. İzole Edilen Taksonların Morfolojik ve Moleküler Yöntemlerle Tanımlanması

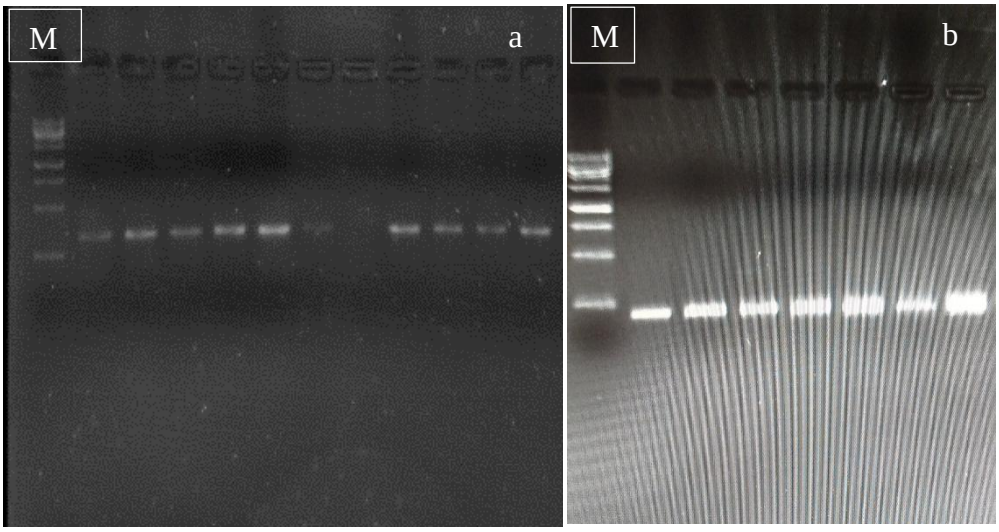
Taksonların teşhisleri morfolojik olarak ışık, faz-kontrast ve taramalı elektron mikroskopta (SEM) teşhis edilmiş, teşhiste ilgili veri tabanları ve kaynaklardan yararlanılmıştır [46, 48-52].

Morfolojik ışık mikroskobu için örnek hazırlama; mikroalg ve siyanobakteri örnekleri sıvı ortamdan santrifüj tüpüne alınarak 3500 rpm de 5 dakika santrifüjlendikten sonra süpernatant uzaklaştırılmıştır. Pellette bulunan hücreler lam ve lamel arasında ışık ve faz-kontrast mikroskopta bakılarak incelenmiştir. Kalan hücre yığını liyofilize edilerek kuru şekilde SEM analizi için nem almayacak biçimde paketlenerek karanlıkta muhafaza edilmiştir. Diyatomların çeper süsleri içerisindeki protoplastlarından uzaklaştırılması için ticari olarak kullanılan sodyum hipoklorit (% 5,25) çözeltisi kullanılmıştır. Kalan organik materyalin uzaklaştırılması için H_2SO_4 (% 98 h/h) içerisinde 50ºC lik su banyosunda 15 dakika tutulduktan sonra, santrifügasyon ile pellet elde edilmiştir. Silis çeper süsleri (früstüller), kenar ve rafe çizgi bağlantıları gözlemlenerek sistematikleri belirlenmiştir. Olympus BX53 ışık mikroskobu ve Olympus XC30 kamera, cellSens Entery programı kullanılarak fotoğraflar çekilmiştir. SEM görüntülenmesi için, temizlenen çeper süsleri liyofilizasyon ile kurutulduktan sonra EGE-MATAL

bünyesinde bulunan SEM mikroskobu tablaları üzerine yapıştırılan çift yönlü bantların üzerine aktarılan örnekler, vakum altında 10 dakika altın kaplaması yapıldıktan sonra taramalı elektron mikroskobunda görüntülenmiştir.

SEM analizi Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nden (EGE-MATAL) hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

Moleküler tanımlamada taksonların DNA izolasyonu Ege Üniveristesi Biyomühendislik Bölümünde: Saflaştırılan taksonlar 10^6 hücre/mL olacak şekilde yoğunlaştırıldıktan sonra Zymo Research Fungal/Bacterial DNA Kiti kullanılarak DNA'ları elde edilmiştir. DNA'lar jel elektroforezinde yürütülmüş ve UV görüntüleme cihazı kullanılarak saptanmıştır. Agaroz jel üzerinde görüntülenen DNA'lar daha sonra polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) yöntemi ile istenilen gen bölgeleri çoğaltılmıştır. Kullanılan primerler çiftleri Tablo 1 de gösterilmektedir. 16S DNA gen bölgeleri çoğaltılarak (94°C de 4 dakika, 35 döngü 94°C 1 dakika, Tablo 1 ve Tablo 2'de belirtilen bağlanma zamanında 1 dakika ve 72°C de 1 dakika, final 72°C de 10 dakika) elde edilen PCR ürünleri %1'lik agaroz jel elektroforezinde görüntülenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. PCR ürünlerinin agaroz jelde görüntüsü (M: 1kb DNA ladder ve a,b: siyanobakterilerin farklı 16S gen bölgeleri)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan primer çiftleri [53-56]

	Primer dizisi (5'-3')	**PCR Bağlanma Isısı**
16S-F	CGG ACG GGT GAG TAA CGC GTG A	
16S-R1	GAC TAC TGG GGT ATC TAA TCCCAT T	60 ºC
16S-R2	GAC TAC AGG GGT ATC TAA TCCCTT T	
18S-F	YACCTGGTTGATCCTGCCAGTAG	55 ºC
18S-R	GCTTGATCCTTCTGCAGGTTCACC	

Diyatom örneklerinin DNA' ları için SSU (Kısa alt birim) 18S ribozomal RNA üzerinden belirlenen primer çifti (18S F 5'YACCTGGTTGATCCTGCCAGTAG 3'; 18S R 5'GCTTGATCCTTCTGCAGGTTCACC 3') Gene Mark (2X PCR Dye Master Mix II) marka PCR kiti kullanılarak PCR ürünleri her bir DNA örneği için hazırlanmıştır. Hazırlanan PCR ürünleri ve Tablo 2 bağlanma ısısı 56°C ve 35 döngü çoğaltılmıştır.

Siyanobakteri taksonları için DNA'lar elde edildikten sonra,16S ribozomal RNA dan hazırlanan primerler 16S-F 5'CGGACGGGTGAGTAACGCGTGA 3' ve 2 adet 16S-R1 5'GACTACTGGGGTATCTAATCCCATT 3'; 16S-R2 5'GACTACAGGGGTATCTAATCCCTTT 3'primerleri kullanılarak Tablo 2 deki bağlanma ısısı 61°C olarak belirlenmiş ve 35 döngü de çoğaltılmıştır.

Tablo 2. Mikroorganizmalar için PCR da çoğaltılan primerlerinin döngü parametreleri

	PCR döngü parametreleri		
Adım	**Sıcaklık (°C)**	**Zaman (Dakika)**	**Döngü**
Başlangıç Denatürasyon	94	4	1
Denatürasyon	94	1	35
Bağlanma	56 ve 61	1	
Uzama	72	1	
Son Uzama	72	10	1

PCR sonuçları %1 lik TBE (Tris-Borik asit- EDTA) tamponu ile hazırlanan jele SYBR jel boyası eklenerek uygun voltta ürünler yürütülmüştür. Daha sonra jel UV görüntüleme sitemi ile görüntülenmiştir. Çoğaltılan ve jelde görüntülenen PCR ürünler MEDSANTEK tarafından genetik analiz cihazında nükleotid sekanslanma işlemleri tamamlanıştır. Sekans sonuçları NCBI-Blast nükleotid (NCBI-Standard Nucleotide BLAST) programı ile örneklerin gen dizileri karşılaştırılarak araştırılmıştır.

Elektroforez üzerinde çoğalan temiz bant bölgeleri sekans analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla Medsantek Şirketine dizi analizine gönderilmiş ve elde edilen kromatogramlar NCBI, PhycoBank genebase gibi sistemlerle eşleştirilerek genetik olarak taksonlar tanımlanmıştır [53].

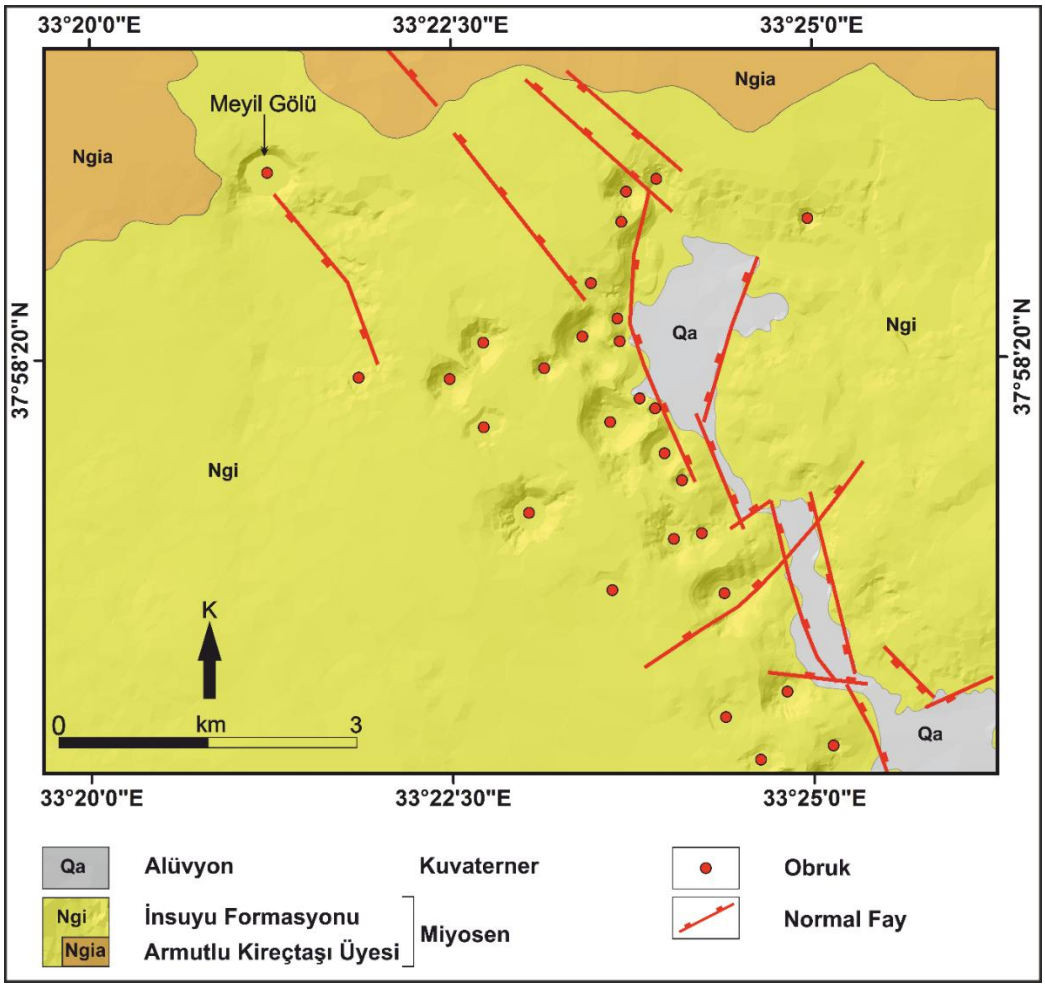
3. Göle Ait Ölçüm Parametrelerin Belirlenmesinde Kullanılan Cihaz ve Yöntemler

Arazi çalışmaları esnasında tablete yüklü uydu görüntüleri kullanılarak obruğun uzun ve kısa eksenleri yerinde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar gerektiğinde çelik şerit metre ölçümleri ile arazi çalışmalarıyla denetlenmiştir. Bunun yanı sıra Meyil gölünün morfolojik özelliklerini belirlemede bölgeye ait 1/25,000 ölçekli sayısallaştırılmış topoğrafik haritalardan elde edilen 10 m çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli (DEM-SYM) kullanılmıştır. Oluşturulan SYM ArcGIS ortamında değerlendirilerek Meyil gölüne ait uzunluk, derinlik, alan, eğim ve eğim yönleri gibi özellikleri saptanmıştır. Meyil Göl suyunun pH, tuzluluk, çözünmüş oksijen ve iletkenlik ölçümü AZ86555 ve AZ86031 (Accuracy, Zenith of Measuring Instruments) cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Meyil Gölü ve Çevresinin Jeolojik Özellikleri

Meyil Gölü'nün de içinde bulunduğu bölgede yüzeyleyen kayaçlar dört ana gruba ayrılabilir [30]. Bölgede Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı metamorfik, sedimanter ve ofiyolitik kayaçlar yörenin temelini oluşturan en yaşlı kayaçlarıdır. Temel kayaçları Orta Miyosen – Geç Pliyosen yaşlı gölsel kireçtaşları-marn-kiltaşı-çamurtaşı ve karasal kırıntılı kayaçlar açılı uyumsuz olarak örter. Yörenin 3. kayaç topluluğunu gölsel ve karasal kayaçlarla ardalanma sunan ve bazen bunları kesen Miyosen - Pleyistosen yaşlı volkanik ve volkano-klastik kayaçlar oluşturur. Yörenin en genç kayaçları ise Pliyosen – Kuvaterner yaşlıalüvyal kayaçlardır. Meyil Gölü'nün yer aldığı kesimde ise egemen olarak Miyosen-Pliyosen yaşlı gölsel İnsuyu Formasyonu [24] yüzeylemektedir (Şekil 4). Obrukların büyük bir bölümü İnsuyu formasyonunu oluşturan genelde beyaz-gri yer yer sarımsı-krem renkli kireçtaşı-marn-kiltaşı ve çamurtaşı ardalanması içinde bulunmaktadır. Kireçtaşı tabakalarının kalınlıkları 20 cm - 1,5 m arasında değişmekte ve karstik yapılar içermektedir. Bu birimle yanal ve düşey geçişli olarak Armutlu Kiltaşı üyesi alanın kuzey kesimlerinde yaygınlık sunmaktadır. İnceleme alanının en genç birimlerini Pliyo-Kuvaterner yaşlı, genelde fayların oluşturduğu küçük grabenlerde çökelmiş karasal kırıntılılar oluşturur. Bu kırıntılılar çakıltaşı, kumtaşı, breş, kiltaşı ve çamur taşlarından oluşmuştur.



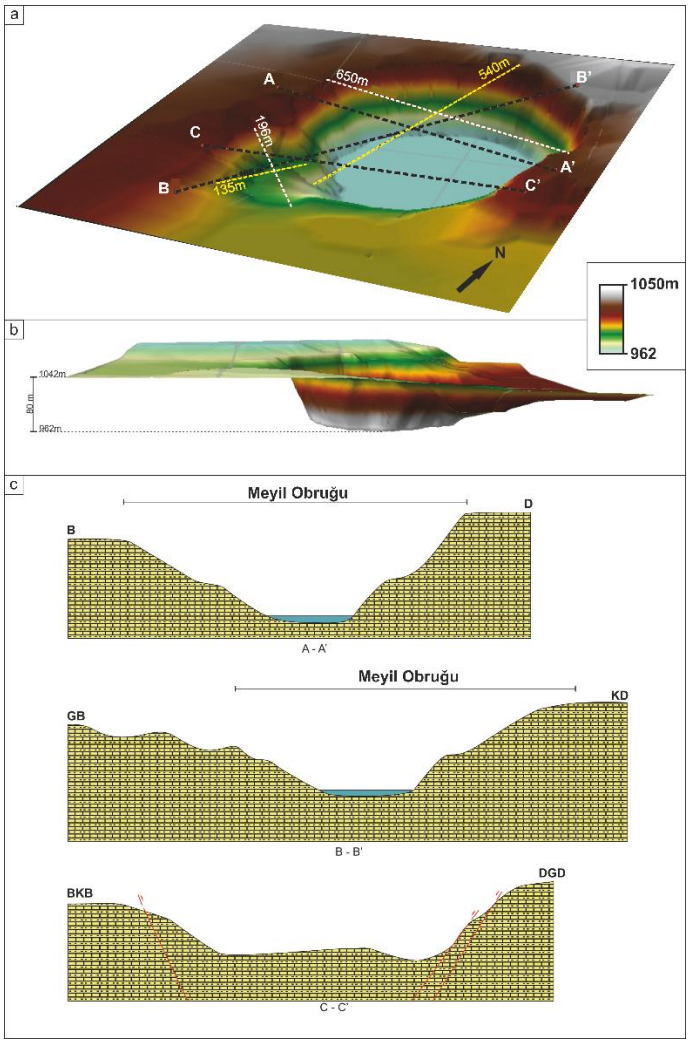
Şekil 4. Meyil Gölü ve çevresinin basitleştirilmiş Jeoloji Haritası (Törk ve diğ. 2019'dan [24] değiştirilerek alınmıştır)

Obruk platosu, doğuda Seyithacı fay zonu, batıda Ortakuyu fay zonu, kuzeyde Başaran, güneyde Merdivenli fayı ile sınırlıdır [30, 33]. Bu yükselti zonunun ortasında, Sekizli fay zonu yer almaktadır. İnceleme alanında da Sekizli Fay Zonu'nun KKB-GGD gidişli farklı uzunluklardaki bölümleri bulunmaktadır (Şekil 4).

Bu kesimde Zona ait faylar toplam 7 km uzunluğunda ve 1 km genişliğindedir. Zonun içindeki küçük ölçekli çöküntülerde Pliyo-Kuvaterner yaşlı karasal çökeller izlenir. Zonu kesen KD-GB gidişli daha küçük ölçekli faylar da bulunur. Bu kesimdeki obruklar Sekizli Fay Zonu'na paralel bir gidiş sunmaktadır [30, 6] (Şekil 1b, Şekil 4).

B. Meyil Obruğunun Fiziksel ve Jeolojik Özellikleri

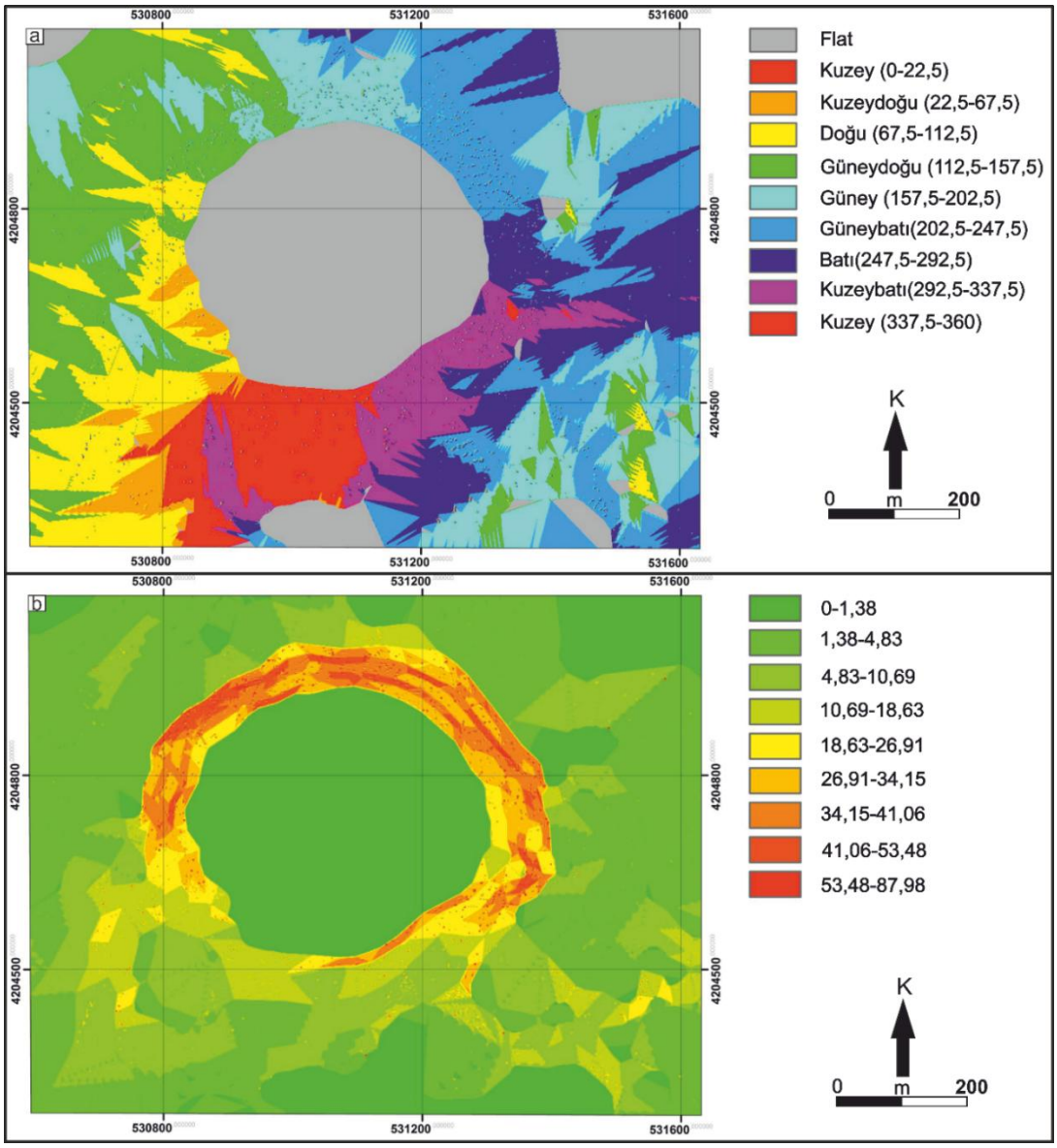
Meyil Obruğu'na ait Sayısal Yükseklik modeline göre inceleme alanındaki yükseklikler 962 m ile 1050 m arasında değişiklik göstermektedir Bölgenin en alçak kesimini açık mavi renk ile gösterilen Meyil Obruğu'nun göl seviyesi oluştururken, en yüksek kesimi ise obruğun çevresindeki alanlar meydana getirmektedir. Meyil Obruğu'nun hemen GB kenarında küçük ölçekli başka bir obruk daha bulunmaktadır. Meyil Obruğu'nun kapladığı alan 0,3 km^2 olup GB kenarındaki obruğun kapladığı alan ise 0,04 km^2 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5a ve 5b).



Şekil 5. Meyil obruğunun **a.** Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) ve **b.** Profil kesiti, Meyil Obruğu'nun **c.** B-D, GB-KD, BKB-DGD doğrultusundaki Jeoloji Kesitleri (Kesit doğrultuları Şekil 5a'da gösterilmiştir)

Obruğun profili incelendiğinde en alt kesiminin kotunun 962 m olduğu, en yüksek kotunun ise 1050 m olduğu belirlenmiştir (Şekil 5c). Buna göre obruğun suya kadar olan derinliği 80 m olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında obruğun uzun ekseni 650 m iken, kısa ekseni 540 m olarak belirlenmiştir. Obruğun GB kesimindeki küçük obruğun ise uzun ekseni 196 m iken kısa ekseni ise 185 m ölçülmüştür.

Meyil Obruğu ve çevresine ait bakı haritası incelendiğinde bölgede düz alanların yanı sıra, farklı yönleri gösteren yamaçlar bulunmaktadır (Şekil 6a). Oluşturulan bakı haritasına göre bölgedeki yamaçların büyük bir kısmı G ve GB doğru bakan yamaçlar olarak bulunmaktadır. Bu alanlar obruğun genellikle KD kesiminde ve GD kesiminde gözlenmektedir. Obruğun D kenarında ise batıya bakan yamaçlar bulunurken B ve GB kenarında ise D ya bakan yamaçlar yer almaktadır. Obruğun KB kenarında ise GD ya bakan yamaçlar ağırlık kazanmaktadır. Kuzeye bakan yamaçların neredeyse tamamı G kenarında bulunurken KB ya eğimli yamaçları ise G ve GD tarafında gözlenmektedir.



Şekil 6. Meyil Obruğu ve yakın çevresinin **a.** Bakı haritası, **b.** Eğim değişimi haritası

Meyil Obruğu ve çevresine ait eğim haritası (Şekil 6b) incelendiğinde bölgedeki eğimlerin 0^0 ile 87^0 arasında değiştiği gözlenmektedir. Eğim miktarının en az olduğu yerler Meyil Obruğu'nun dışında kalan KB ve G bölgelerde olup, buralarda eğim miktarı yaklaşık olarak 0^0 dir ve yataya yakın bir morfolojiye sahiptir. Bölgedeki en yüksek eğime sahip alanları ise obruğun K, KB, KD ve GD yamacının bir kısmı oluşturmaktadır, buradaki eğim miktarı 18^0 ile 87^0 arasında değişmektedir. Obruğun GB kenarında ise küçük bir obruk daha yer almaktadır. Bu nedenden dolayı Meyil Obruğu'nun bu yamacı diğer yamaçlara göre daha az eğimlidir. Bu küçük obruğun çevresinde ise eğim miktarı 10^0 ile 26^0 arasında değişiklik göstermektedir.

Obruğun farklı yönlerdeki jeolojik kesitleri incelendiğinde obruk profilinde üç eğim kırıklığı görülmektedir (Şekil 5c).

Göl seviyesinden 2. obruğun ağız kesimine kadar eğim oldukça diktir. Bu dikliğin üst kesimlerinde dikliği dairesel olarak çevreleyen yarıklar bulunmakta ve yarıkların genişliği 30-50 cm arasında değişmektedir (Şekil 2f). Bu kesimde güncel göçmeler gözlenmekte, bu da eski oluşumlu obruğun günümüzde tekrar aktive olduğunu göstermektedir. Yaklaşık 20-30 m yüksekliğindeki bu yamaç tutturulmamış yığıntı kayaç kırıntıları ile örtülüdür. Bu kesimden sonra eğimin oldukça düşük olduğu 20-50 m genişliğindeki bir zon bulunmaktadır. Bu zon kısmen ayrışmış malzeme, kısmende gölsel kireçtaşı-kiltaşı ve çamurtaşı ardalanması ile temsil edilir. Bu kesimden sonra yüzey topoğrafyasına kadar yaklaşık 50-60 m yüksekliğinde eğimin yine yüksek olduğu 3. yüzey bulunmaktadır (Şekil 5c ve 6b). Bu bölüm farklı kalınlıklarda kireçtaşı ve kireçtaşı-kiltaşı-çamurtaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Yine bu kesimde küçük ölçekli mağara ve diğer karstik yapılar izlenmektedir. Obruğun GB bölümü

hariç çepeçevre yüzeye kadar bu diklik izlenmektedir. Ancak obruğun GB kesiminde bu diklik faylarla ve çökmelerle kesintiye uğramaktadır (Şekil 5c).

C. Meyil Obruk Gölü'nün Fizikokimyasal ve Jeokimyasal Özellikleri

Akdemir (2004, 2008) [39, 40] Acı ve Meke Maar Gölleri ile Meyil Obruk Gölü'ndeki ostrakod tür çeşitliğini ve popülasyon yoğunluğunu karşılaştırmış, sonuçta Meyil Obruk Gölü'nün daha zengin olduğunu belirleyerek, bunu düşük tuzluluk ve yüksek oksijen miktarına bağlamıştır. Akdemir (2004, 2008) [39,40] Meyil Obruk Gölü'nün fizikokimyasal özelliklerinden çözünmüş oksijeni 22,8 mg/L, Su sıcaklığını 23,3 °C, pH 8,8, tuzluluğu ‰o 1,0, iletkenliği 1723 mS/cm, toplam sertliği 15,84 ml/Eq, Nitrat 0,251 mg/L, Nitrit 0,0047 mg/L olarak belirlemiştir (Tablo 3).

Durmaz (2019) [41], Meyil ve Kızören Obruk Gölleri'nden aldığı örneklerde zooplankton türlerini ve mevsimsel dağılımlarını, ayrıca göllerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemiştir. Durmaz (2019) Meyil Obruk Gölü'nde su sıcaklığının 16-26 C° arasında (ortalama 21,16 C°), hidrojen iyon konsantrasyonunun (pH) 9,0-9,3 arasında (ortalama 9,16), elektriksel iletkenlik (EC) değerlerinin 920-1000 µS/cm arasında (ortalama 950 µS/cm), çözünmüş oksijen değerinin 3,30-10,48 mg/L arasında (ortalama 6,49 mg/L) olduğunu belirlemiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Meyil Gölü'ne ait bazı fizikokimyasal özellikler

	Akdemir (2004) [40]	**Durmaz (2019) [41]**	**Gönderilen suyun ölçüm değerleri (26.08.2020)**
Yapısı	Karstik	-	-
Derinlik (m)	22 m	-	-
Çözünmüş Oksijen	22,8 mg/L	3,30-10,48 mg/L arasında (ortalama 6,49 mg/L)	15,5 mg/L
Sıcaklık (ºC)	23,3ºC	16-26 C°(ortalama 21,16 °C)	22 °C
pH	8,8	9,0-9,3 arasında(ortalama 9,16)	8,79
Tuzluluk (‰ S, ppt)	‰1	-	‰ 0,385
İletkenlik (mS/cm)	1723 mS/cm	920-1000 µS/cm (ortalama 950 µS/cm)	734 µS/cm
Toplam sertlik (ml/Eq)	15,84 ml/Eq	-	-
Nitrat (NO_3)	0,251 mg/L	-	-
Nitrit (NO_2)	0,0047 mg/L	-	-

KOP (2012) [34] raporunda Meyil Gölü suyunda sülfat ve tuz gibi minerallerin bulunmamasından dolayı tatlı su olduğu, bundan dolayı göl içinde balık, su yılanı, kurbağa gibi su canlılarının yaşayabildiği belirtilmiştir. Tablo 3 te belirtiği gibi gönderilen Meyil Göl suyunun tuzluğunun 3,85 ppm olduğu ölçümlenmiştir. Tuzlu göl sınıflandırmaları büyük farklılık göstermektedir. Örneğin; subsalin: ‰ 0,5–3 (%0,05-0,3); hiposalin: ‰ 3–20 (% 0,3-2); mezosalin: ‰ 20–50 (%2-5) ve hipersalin: ‰ 50'den büyük (%5) olarak kabul edilirken, Fan 1981 yılında Xizang Platosunda (Çin) yer alan gölleri 3 kategori altında (tatlı su (freshwater) gölü <‰ 1; tuz (salt) gölü ‰ 1-35 ve tuzlu-acı (saline) > ‰ 35) sınıflandırmıştır [57]. Tablo 3' de ölçümlediğimiz tuzluluk değerinin <‰ 1 altında olduğu için Meyil Göl suyunun tatlı su olduğu belirlenmesine rağmen pH değerinin nötr olmadığı ve iletkenliğinin de yüksek olduğu belirlenmiştir. Durmaz (2019)'ın verilerine yakın veriler elde edilmiştir.

Fikirdeşici Ergen (2021) [38] Meyil Obruk Gölü sedimentlerinin kirlilik analizlerini gerçekleştirmiş, metal (Cu, Pb, Zn, Ni, Mn, Fe, Cr, Al) ve metalloid (As) konsantrasyon değerlerinin sınır değerlerin altında olduğunu ve sedimentlerin meta(loid)ler bakımından temiz olduğunu belirlemiştir.

D. Obruk Gölünden Alınan Su Örneklerinde Siyanobakteri ve Diyatom Taksonlarının Belirlenmesi

Siyanobakteriler deniz ve tatlı sularda yaygın olarak bulunur ve çoğu ökaryottan daha güçlü bir adaptasyon kabiliyetine sahiptir. Ekstrem ortamlarda (buz ve kar, kaplıcalar, alkali soda gölleri, tuzlu su havuzları, çöller ve kutup bölgeleri) büyüme ve çoğalma yetenekleri vardır. Organik madde, N (Azot), P (Fosfor) ve diğer besinler suda zenginleştiğinde siyanobakteriler çoğalır ve baskın gruplar halinde birikirler. Tatlı su veya denizde yeşil, kırmızı-kahverengi ve kırmızı oluşturan siyanobakteri çoğalmaları, besin zenginleşmesinin veya ötrifikasyonun en dikkate değer semptomlarından biridir [58].

Siyanobakteriler, değişen ışık yoğunluklarının olduğu çok çeşitli habitatlarda yaşayabilir, okyanuslar, göller ve topraklardaki mikrobiyal yaşamın büyük bir bölümünü oluşturur [59]. Genellikle kalıcı buzla kaplı göllerden termal kaplıcalara kadar ekstrem ortamların sakinleridirler [60]. Gezegen genelinde farklı farklı ekolojik alanlarda bu kadar büyük çeşitlilikle siyanobakteriler, hem morfolojik hem de genetik olarak çeşitlilik sergilemektedir [61].

İlk Dünya'ya çok benzer şekilde Amerika'nın Huron Gölü'ndeki Middle Island Obruğu'nda mikroorganizmalar yoğun şekilde bulunmaktadır. DNA analizinde mor mat mikroorganizmaların çoğunun, fotosentetik bir siyanobakteri olan *Phormidium autumnale* olduğunu belirlenmiştir. Bu uzun, filamentli organizmalar ışık enerjisini toplar ve yeraltı suyundaki çözünmüş karbondioksitten organik karbon oluşturur. *Phormidium* türleri aynı zamanda Yellowstone Milli Parkı (Wyoming, ABD) gibi coğrafi alanlardan, buzla kaplı Antartica göllerine kadar farklı alanlarda yaşamını sürdürmektedir [62].

İtalya'nın Roma kentine birkaç kilometre uzaklıktaki Pozzo del Merro (Merro Obruğu), Dünya da bilinen en derin su basmış karstik oyuktur. *Salvinia molesta*'nın uzaklaştırılmasından sonra toplanan örneklerde, pigmentsiz formlar ve bol miktardaki çökelti parçacıkları arasında fotosentetik mikroorganizmalar ayırt edilmiştir. Fotosentetik prokaryotlardan filamentli siyanobakteriler, simetrik tek hücreli mikroalgler, daha spesifik olarak pennat diyatomlar belirlenmiştir. Filamentli siyanobakterilerden *Phormidium* sp. ve *Leptolyngbya* sp. tanımlandı, heterosist bulunmayan yapıdaki hücrelerin genişliği 3 mm'den az olduğu saptanmış, yaklaşık olarak izodiametrik veya uzunlamasına olan filamentli yapıya sahip fototroflarının taksonomik karakterizasyonu sağlamıştır [63].

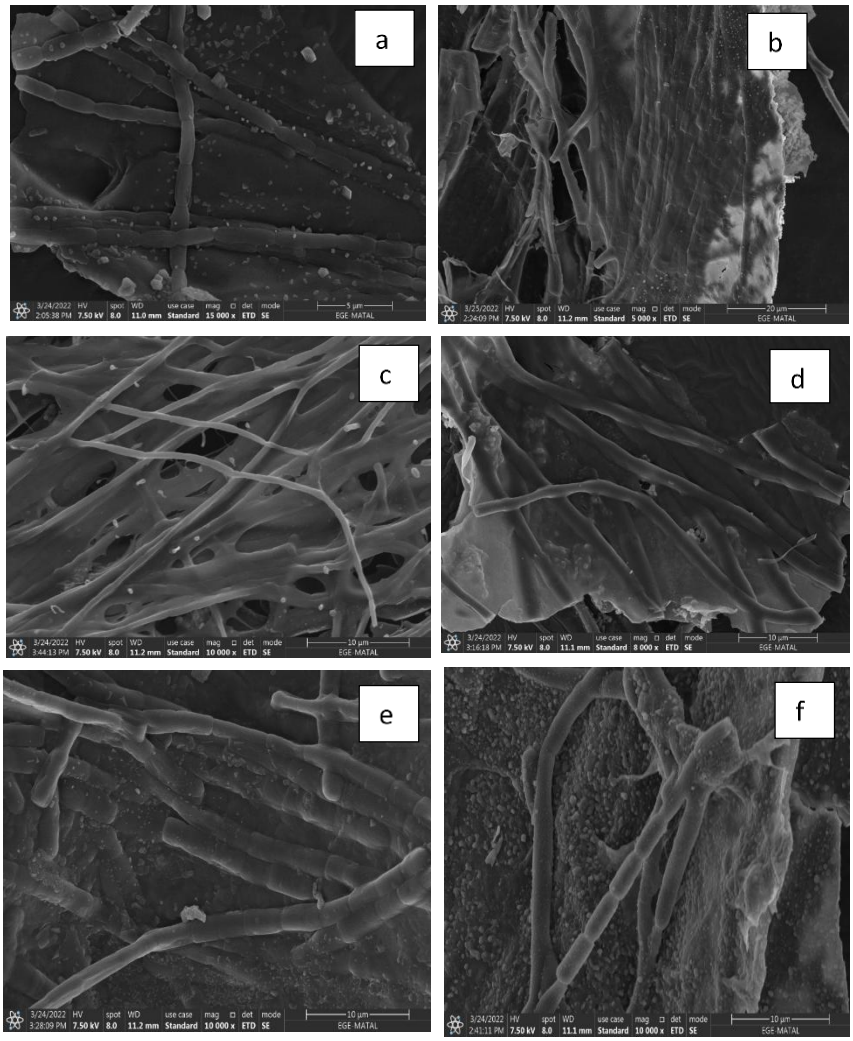
Águila ve arkadaşları (2022) coğrafi olarak yakın olan iki farklı sistemden (Meksika'nın Quintana Roo kentindeki Bacalar Lagünü (BL) ve Cenote Azul Obruğundan (CA)) gelen mikrobiyalitlerin siyanobakteriyel bileşenlerini karakterize etmiştir. Siyanobakterileri karakterize etmek için mikroskobik gözlemler, 16S rRNA amplikon dizilimi ve shotgun metagenomikleri kullanılmıştır. Her iki sistem de benzer metabolik/fonksiyonel profiller göstermiş olmasına rağmen tamamen farklı siyanobakteriyel taksonları barındırdığı anlaşılmıştır. BL'de, daha önce tanımlanmamış *Chakia* sp. popülasyonu da dahil olmak üzere Nostocales baskınken, CA'da tüm derinliklerinin %70'ini oluşturan bilinmeyen bir Chroococcales taksonu hakimdi. İlginç bir şekilde, mikrobiyalitlerdeki siyanobakteriyel topluluklar, BL bölgelerinin çoğunda filogenetik aşırı dağılım sergilerken, CA bölgeleri filogenetik kümelenme sergilerken, bu farklılıkların BL ve CA sistemleri için derinlik/ışık koşullarına ve muhtemelen farklı jeolojik oluşum zamanlarından kaynaklandığı düşünülmüştür [64].

Siyanobakteriler ve ökaryotik algler fotosentetik organizmalardır ve enerji, ürün, gıda ve hayvan yemi gereksinimlerinin önemli bir kısmını karşılama potansiyeline sahiptir. Mikroalgler kara bitkileriyle karşılaştırıldığında çok daha hızlı çoğalır ve daha fazla fotosentetik verimlilik göstermektedir [65]. Siyanobakteri çoğalmaları küresel bir sulu ortam sorunudur. Son yıllarda küresel ısınma ve sudaki ötrofikasyon nedeniyle yüzeydeki siyanobakteriler belli bir bölgede birikerek siyanobakteri çoğalmaları oluşturuyor [58]. Mavi-yeşil alglerin veya alg çoğalmalarının tümü zehirli değildir. Alglerin herhangi bir zamanda toksin üretmesinin nedenleri tam olarak anlaşılamamıştır. Standart izleme teknikleri ile ani çoğalmaların ne zaman toksin içerdiği tahmin edilemez. Bir siyanobakteri türün içinde bireysel suşları toksik veya toksik olmayabilir. Dünya'nın farklı yerlerinde yapılan araştırmalarda, siyanobakteriyel çoğalmaların %75'e kadarının toksik olmadığını gösterilmiştir [66]. Tablo 4 de izole edilen siyanobakteri çeşitliliğine sahip Meyil Gölündeki renk değişiminin siyanobakterilerin ani çoğalması nedeniyle gerçekleştiği kanısındayız [67].

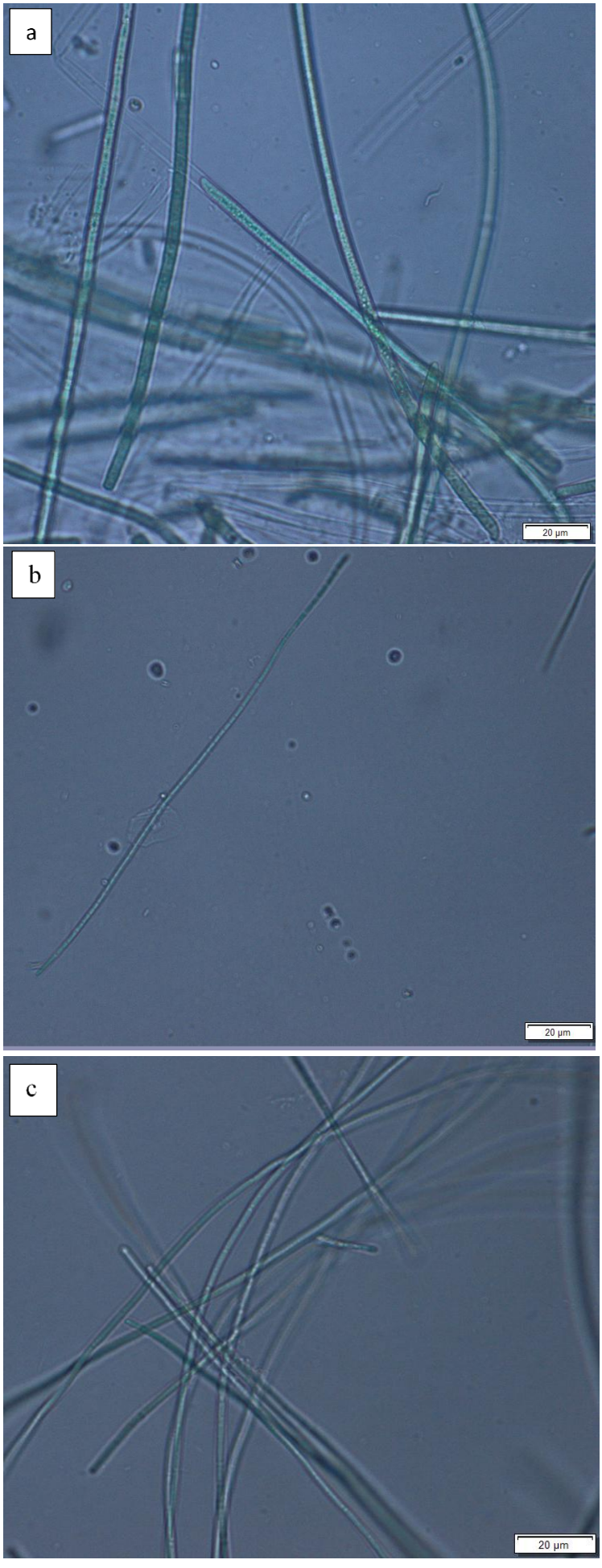
Tablo 4'de izole edilen diyatom ve siyanobakteri taksonlarının morfolojik ve moleküler tanımlama sonuçları gösterilmektedir.

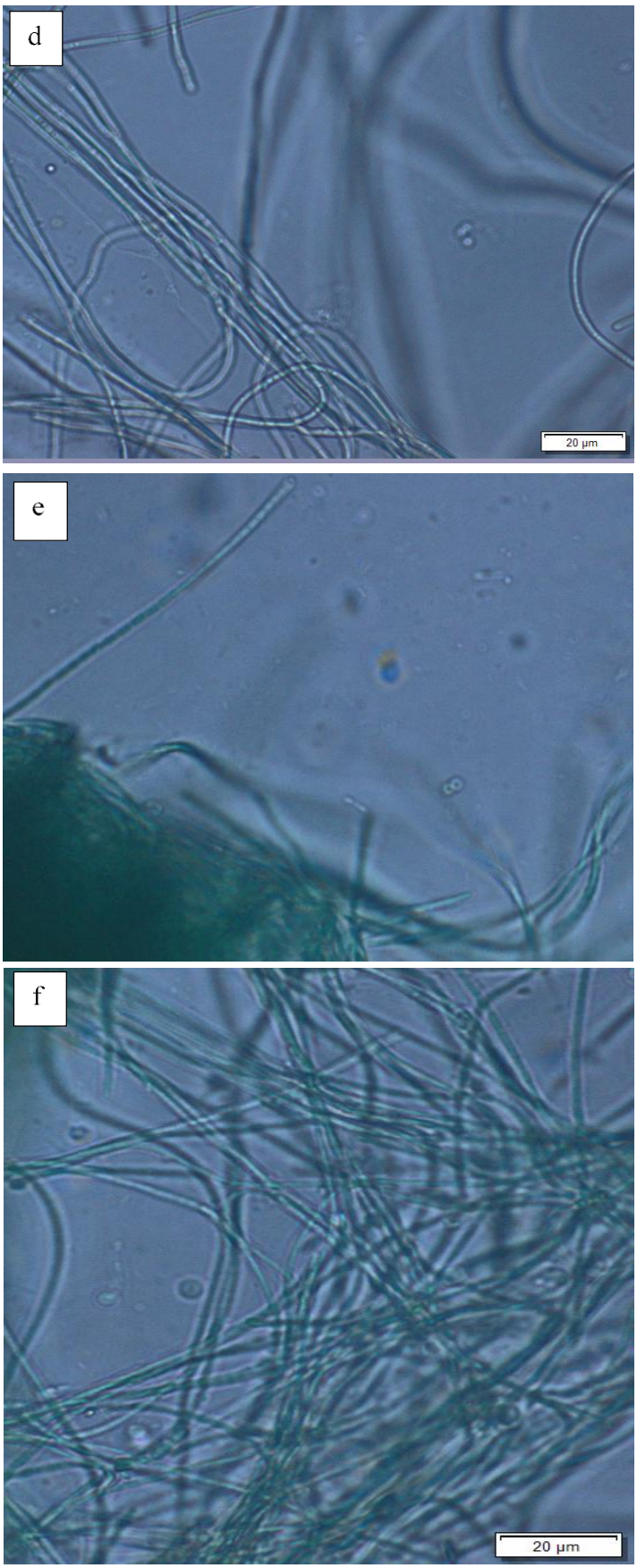
Tablo 4. İzole edilen diyatom ve siyanobakteri taksonlarının tanımlanması

	Morfolojik tanımlama	**Moleküler tanımlama**	**Koleksiyon Numarası**
Diyatom 1	*Pseudostriatella* sp.	*Pseudostaurosira* sp.	EGE MACC Y7
Diyatom 2	*Nitzschia* sp.	*Nitzschia amphibia*	EGE MACC Y8
Siyanobakteri 1	*Phormidium* sp.	*Phormidium* sp.	EGE MACC Y23
Siyanobakteri 2	*Leptolyngbya* sp.	*Toxifilum* sp.	EGE MACC Y24
Siyanobakteri 3	*Geitlerinema* sp.	*Geitlerinema* sp.	EGE MACC Y25
Siyanobakteri 4	*Phormidium* sp.	*Leptolyngbya* sp. 1	EGE MACC Y26
Siyanobakteri 5	*Geitlerinema* sp.	*Geitlerinema* sp. 1	EGE MACC Y27
Siyanobakteri 6	*Phormidium* sp.	*Geitlerinema* sp. 2	EGE MACC Y28
Siyanobakteri 7	*Leptolyngbya* sp.	*Leptolyngbya* sp. 2	EGE MACC Y29



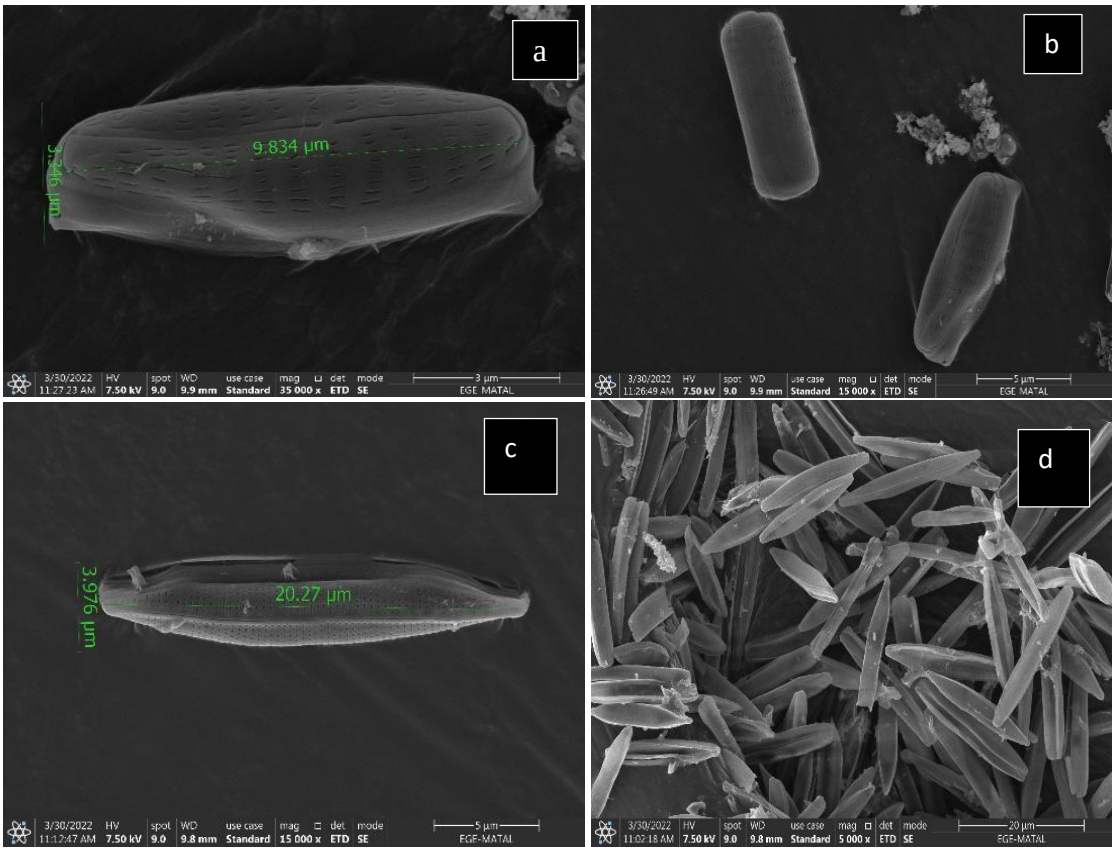
Şekil 7. Siyanobakteri türleri **a.** *Phormidium* sp.; **b.** *Geitlerinema* sp.; **c.** *Leptolyngbya* sp.; **d.** *Geitlerinema* sp.; **e.** *Geitlerinema* sp. 2; **f.** *Leptolyngbya* sp. 1 in SEM görüntüsü


a
20 µm
b
20 µm
c
20 µm



Şekil 8. İpliksi siyanobakteri türlerinin ışık mikroskobu fotoğrafları **a.** *Phormidium* sp.; **b.** *Toxifillum* sp.; **c.** *Leptolyngbya* sp.; **d.** *Geitlerinema* sp.; **e.** *Geitlerinema* sp. 2; **f.** *Leptolyngbya* sp. 1

İpliksi siyanobakteri suşlarının tanımlanması ve izolasyonları gerçekleştirilirken SEM elektron mikroskobu ve ışık mikroskobundan yararlanılarak türlerin morfolojileri karşılaştırılmıştır (Şekil 7, 8). Bu işlemlerde faz kontrast mikroskobu ile de hücre bağlantıları ve yapıları incelenmiştir. Moleküler tanımlamalarda hücrelerin standart gen bölgeleri çalışılarak elde edilen sekans sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 9. Diyatom türleri **a.**ve **b.** *Pseudostaurosira* sp.*; c. ve d. Nitzschia* sp.

Şekil 9a ve 9b'de taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünün morfolojik olarak taranmasında *Pseudostaurosira* sp. olarak belirlenen türün, moleküler tanımlanmasında %97 *Pseudostaurosira madagascariensis* olabileceği belirlenmiştir. *Nitzschia* sp.'nin SEM görüntüsü ile morfolojik belirlenen diyatomun moleküler çalışmaları doğrultusunda *Nitzschia amphibia* %98 olarak tanımlanmıştır (Şekil 9c ve 9d).

Algler çoklu doymamış yağ asitleri, proteinler, pigmentler, antioksidanlar, vitaminler ve minerallerin yanı sıra karbonhidratlar gibi değerli biyolojik maddeleri içermektedir. Geleneksel tarım ürünlerine göre daha yüksek verimliliğe sahiptirler ve çöller veya yüksek tuzlu ortamlar gibi verimsiz alanlarda (diğer mahsullerin yetiştirilemediği) yetiştirilebilirler. Mikroalgler ve siyanobakteriler insan ve hayvanların beslenmesinde, takviye edici ürün olarak kullanılmaktadır. İnsan ve hayvan tüketiminde ham madde olarak mikroalglerin tüm biyokütlesinin veya protein/lipitlerinin biyoteknolojik kullanımları günümüzde kullanılmaktadır. Mikroalgler, farklı ürünlere hammadde olabilecek şekilde yüksek miktarda protein, lipit ve karbonhidrat içeriğine sahip organizmalar olmasına rağmen metabolit içerikleri türden türe ve yetiştirilme koşullarına göre değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Gıda, sağlık, kozmetik, çevre, yakıt, materyal bilimi gibi pek çok alanda kullanım alanı bulunan bu canlılar, yüksek lipit içerikleriyle biyodizel hammaddesi, anaerobik çürüme ile biyogaz hammaddesi olarak yakıt alanında, karotenoid, klorofil, fikobiliprotein gibi pigment, esansiyel vitamin, protein ve sağlık açısından pek çok faydası olduğu bilinen omega-3 ve omega-6 yağ asitleri başta olmak üzere uzun zincirli yağ asidi içerikleriyle gıda ve kozmetik alanlarında kullanım alanı bulmaktadır [51]. Ek olarak, siyanobakteri ve diyatomlar değerli biyoaktif moleküllere de sahiptir. Siyanobakteriler antibiyotikler, sitotoksik, immünsüpresif ve enzim inhibe edici maddeler gibi çeşitli ikincil metabolitler üreten inanılmaz derecede eski bir prokaryotik organizma grubudur [68]. Bu biyoaktif moleküller farmakoloji, kozmetoloji, tarım ve diğer spesifik ilgi alanlardaki potansiyel kullanımlarının önü açılmaktadır. İleri farklı bilimsel çalışmalar ve araştırmalarda kullanılmak üzere izole edilen siyanobakteri ve diyatom taksonları Ege Üniversite bünyesinde bulunan mikroalg kültür koleksiyonunda (EGE-MACC) saklanmaktadır.

Farklı disiplinlerdeki araştırmacıların bir araya gelerek gerçekleştirdiği çalışmalar ile hem biyolojik materyallerin izolasyonu ve tanımlanması hem de Obruk bölgesindeki Meyil Obruk Gölünün Jeoloji Kesitleri, bakı ve çevresine ait eğim haritası belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir bölümünüm verileri Konya Teknik Üniversitesi ve Konya İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD) arasında 2020 yılında obruk alanlarının tespitine yönelik proje kapsamında gerçekleştirilmiştir (Proje Sözleşme No: 2020K14-138637-2). Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne kapsamında "Mikroalg ve siyanobakteri türlerinin yerel kaynaklardan izolasyonu morfolojik ve moleküler tanımlanması EGEMACC kültür koleksiyona kazandırılması" BAP Projesinin desteği ile türlerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir (Proje Numarası: FGA-2020-21818).

KAYNAKLAR

[1] Cvijić, J. (1893). Das Karstphanomen. Versuch einer morphologischen Monographie. *Geographischen Abhandlung*, 3: 218-329.
[2] Waltham, T., Bell, F. G., Culshaw, M. G., Knez, M., & Slabe, T. (2005). Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction (Vol. 382). Berlin: Springer.
[3] Ford, D.C., & Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons Wiley, Chichester, 562 p
[4] Gutiérrez, F., Guerrero, J., & Lucha, P. (2008). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, 53, 993-1006.
[5] Eren, Y., Parlar, Ş., & Coşkuner, B. (2020). Karapınar çevresinde obruk alanlarının belirlenmesi projesi, Yer hareketleri grubu final raporu, Konya, İl Afet Ve Acil Durum Müdürlüğü, 193 s.
[6] Parlar, Ş., Coşkuner, B., & Eren, Y. (2021). The Statistical Analysis Of Dimension Data For All Observed Sinkholes In Karapınar And Surroundings (Konya, Central Anatolia-Turkey), 5. Uluslararası Zeugma Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 8-9 Ocak 2021, Online, Abstract book, 88-89, Gaziantep.
[7] Lahn, E. (1940). Konya mıntıkasındaki karst hadiseleri ve bunların ziraat bakımından ehemmiyeti. *MTA Enstitüsü Mecmuası*, Sayı 4 (21), 620-626.
[8] Erinç, S. (1960). Karst forms in the Konya Section and the Inner Taurus ranges. *Turkish Journal of Geograph*, 20: 83-106 (in Turkish).
[9] Eroskay, S.O. (1976). The factors influencing the Konya Obruks and their groundwater potentials evaluation. *İstanbul Üniversitesi, Fen. Fak. Mec. Seri. B*, 41 (1-4), 5-14.
[10] Eroskay, O., & Gunay, G. (1980). Tectonic classification and hydrogeological properties of the karst regions in Turkey. International Seminar on Karst Hydrogeology Antalya, 1979. Publ. by SHW, 1-41.
[11] Güldalı, N., & Şaroğlu, F. (1983). Konya Yöresi Obrukları, T.J.KAnkara,7 (4), 44-55.
[12] Canik, B.,& Çörekçioğlu, İ. (1985). The Formation Of Sınkholes (Obruk) Between Karapınar and Kızören – Konya, Karst Water Resources (Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985). IAHS Publ. no. 161, 193-105.
[13] Selçuk Biricik, A. (1992). Obruk Platosu ve Çevresinin Jeomorfolojisi, Marmara Üniv. Yay. no.531. İstanbul.
[14] Çörekçioğlu, İ. (1994). Konya Karapınar-Kızören arasındaki obrukların oluşumu ile ilgili hidrojeolojik etüt raporu. Konya, DSİ 4. Bölge Müdürlüğü.
[15] Canik, B. (1997). Konya dolaylarında suların oluşturduğu doğal anıtlar ve bunların korunması, *20.Yıl Jeoloji Sempozyumu Bildiriler*, Konya, 159-166.
[16] Canik, B., & Arıgün, Z. (2001). Karapınar-Kızören (Konya) dolayındaki obrukların oluşumu ve Karapınar volkanizmasının bu olaya etkisi, *Karapınar Sempozyumu Bildiri Kitabı*, Konya, 295-303.
[17] Karadoğan, S. (2001). Karapınar çevresindeki farklı jeomorfolojik şekiller, özellikleri ve turizm potansiyelleri. *Karapınar Sempozyumu*, Bildiri Kitabı: 26-27 Ekim 2000, Konya, Karapınar, 339-358.
[18] Bayarı, S., Özyurt, N., & Kilani, S. (2005). Konya Kapalı Havzası Yeraltı suyunda Karbon-14 Yaş Dağılımı, II. Ulusal Hidrolojide İzotop Teknikleri Sempozyumu, Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, 26-30 Eylül 2005,s. 147-168, İzmir.
[19] Arslan, V., & Göçmez, G. (2007). Tuzgölü havzasında yeraltı suyunun yok oluşu (Eşmekaya-Sultan hanı örneği). Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, Cilt 22 (Sayı 1), 153-164.
[20] Doğdu, M.Ş., Toklu, M.M., & Sağnak. C. (2007). Konya Kapalı Havzası'nda yağış ve yeraltı suyu değerlerinin irdelenmesi, *I. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi Bildiri Kitabı*, 11-12 Nisan 2007, İstanbul, 394-402.
[21] Gürler, G., & Timur, E. (2007). Determination of conservation & usage methods of geoparks-a critical assessment for Karapinar potential geopark site, Turkey. *Second International Symposium on Development*

Within Geoparks-Environmental Protection and Education, 12- 15 June, 2007, Lushan-Jiangxi Province-China.

[22] Göçmez, G., Genç, A., & Karakoca, A. (2008). Konya Kapalı Havzası yeraltısuyu seviye değişiminin İstatistiksel değerlendirilmesi. *Konya Kapalı Havzası Yeraltı Suyu ve Kuraklık Konferansı*, Bidiri Kitabı 11-12 Eylül 2008, Konya, 98-107.

[23] Tapur, T., & Bozyiğit, R. (2009). Konya Ovası ve Çevresinde Yeraltı Sularının Obruk Oluşumlarına Etkisi, *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21,137-155, Konya.

[24] Törk, K., Yılmaz, N.P., Sülükçü, S., Keleş, S., Köklü, Ş., Yeleser, L., S., Aykaç, Özerk, Z.R., Acar, C., Savaş, F., Çakır, K., & Avcı, K. (2019). Konya Ovası Projesi (KOP) bölgesinde (Konya, Karaman, Aksaray, Niğde) karstik çöküntü alanlarının belirlenmesi ve tehlike değerlendirmesi projesi (Final Raporu), Ankara: MTA Genel Müdürlüğü, 263 s.

[25] Doğan U., &Yılmaz M. (2011). Natural and induced sinkholes of the Obruk Plateau and Karapınar-Hotamış Plain, Turkey. *J. Asian Earth Sci.*, 40, 496–508.

[26] Göçmez, G. (2011). Konya ilindeki obruklar ve traverten konileri. I. Konya Kent Sempozyumu, Konya İl Koordinasyon Kurulu, 26-27 Kasım 2011, 459-464.

[27] Maleki, R. (2013). Acı Göl, Kozanlı Saz ve Meke gölleri rotifera türleri üzerine çalışmalar / The studies on the Rotifera species of Aci Lake, Kozanli Saz and Meke lakes, Yüksek lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Biyoloji Bölümü / Biyoloji Ana Bilim Dalı / Hidrobiyoloji, 67 s.

[28] Özdemir, A. (2015a). Sinkhole Susceptibility Mapping Using a Frequency Ratio Method and GIS Technology Near Karapınar. Konya-Turkey. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15: 502-506.

[29] Özdemir, A. (2015b) Investigation of sinkholes spatial distribution using the weights of evidence method and GIS in the vicinity of Karapinar (Konya, Turkey). *Geomorphology*, 245: 40-50.

[30] Eren, Y., Parlar, Ş. & Coşkuner, B. (2020). Karapınar çevresinde obruk alanlarının belirlenmesi projesi, Yer hareketleri grubu final raporu, Konya, İl Afet Ve Acil Durum Müdürlüğü, 193 s.

[31] Eren, Y., Coşkuner, B., Parlar, Ş., & Arslan, Ş. (2021). Present-Day Surface Deformation On The Southeastern Edge Of The Karapınar (Sultaniye) Graben (Siyeklik-Karapınar/Konya), *III. International Istanbul Scientific Research Congress*, January, 8-10, 2021, Online, Abstract book, pp. 38.

[32] Orhan, O., Yakar, Y., & Ekercin, S. (2020). An application on sinkhole susceptibility mapping by integrating remote sensing and geographic information system. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 886.

[33] Coşkuner, B., Parlar, Ş., & Eren, Y. (2021). Karapınar (Konya) Bölgesinin Neo-Tektonik Özellikleri, 1. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi, 23-24 Şubat 2021, Online, Bildiri Kitabı, s. 535, Istanbul.

[34] KOP, (2012). KOP bölgesi gölleri, depolamaları ve sulak alanları. Kalkınma Bakanlığı Konya Ovası Projeleri Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı Raporu, 32 s, Konya, http://www.kop.gov.tr/upload/dokumanlar/32.pdf.

[35] Erol, O. (1986). The relationship between the phases of the development of the Konya- Karapınar obruks and the Pleistocene Tuzgolu and Konya pluvial Lakes. Karst Water Resources (Proceedings of Ankara-Antalya Symposium, July1985). IAHS Publ. No. 161, 207-213.

[36] Yılmaz, M. (2010). Karapınar Çevresinde Yeraltı Suyu Seviye Değişimlerinin Yaratmış Olduğu Çevre Sorunları. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi*, 2 (2): 145-163.

[37] Bozyiğit, R., & Tapur, T. (2009). Konya Ovası ve çevresinde yeraltı sularının obruk oluşumlarına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (21), 137-155.

[38] Fikirdeşici Ergen, Ş., (2021). Assessment of Metal(loid) Accumulation in the Surficial Sediment of Meyil Lake. *Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences*, 7 (2) , 95-103.

[39] Akdemir, D. (2008). Differences in Ostracoda (Crustacea) Assemblages between Two Maar Lakes and One Sinkhole Lake in the Konya Region of Turkey. Turkish Journal of Zoology, 32 (2): 07-113.

[40] Akdemir, D. (2004). Konya-Karapınar krater göllerinin ostrakot faunası / Ostracoda fauna of the crater lakes of Konya-Karapınar, Yüksek lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Çevre Bilimleri Ana Bilim Dalı, 47 s.

[41] Durmaz, O. (2019). Meyil ve Kızören obruk göllerinin zooplankton faunası ve mevsimsel değişimi (Konya/Türkiye)/ Zooplankton fauna and seasonal changes of Meyil and Kızören Sinkhole Lakes (Konya/Turkey), Yüksek lisans Tezi, Ankara Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Biyoloji Ana Bilim Dalı, 64 s.

[42] Dönmez, H., & Büyüksamancı, S. (2021) *Meyil Obruk Gölü'nün rengi bu yıl pembeye dönmedi.* Demirören Haber Ajansı, https://www.dha.com.tr/gundem/meyil-obruk-golunun-rengi-bu-yil-pembeye-donmedi-1843833, (20.08.2021).

[43] Dagnino-Leone, J., Figueroa, C. P., Castañeda, M. L., Youlton, A. D., Vallejos-Almirall, A., Agurto-Muñoz, A., Pérez, J. P. & Agurto-Muñoz, C. (2022). Phycobiliproteins: Structural aspects, functional characteristics, and biotechnological perspectives. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 20, 1506-1527.

[44] Morya, S., Kumar Chattu, V., Khalid, W., Zubair Khalid, M., & Siddeeg, A. (2023). Potential protein phycocyanin: an overview on its properties, extraction, and utilization. *International Journal of Food Properties*, 26(2), 3160-3176.
[45] Dep, M. (2019). *Cyanobacteria (Blue-Green Algae)*. Maine Department of Environmental Protection, https://www.maine.gov/dep/water/lakes/cyanobacteria.html.
[46] M.D. Guiry in Guiry, M.D. & Guiry, G.M., (2024). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. https://www.algaebase.org.
[47] Guillard, R.R.L. (2005). *Purification Methods for Microalgae*. In Algal Culturing Techniques, Andersen RA (ed). Elsevier Academic Press, pp 117-132.
[48] Bourrelly, P. C. (1970). Les algues d'eau douce: initiation à la systematique, 3: les algues bleues et rouges, les Eugleniens. Peridiniens et Cryptomonadines. Éditions N. Boubée & Cie, Paris.
[49] Hendey, N.I., 1964. An Introductory Account of the Smaller Algae of British Coastal Waters. Part V. Bacillariophyceae (Diatoms), Fishery Investigations, Series IV, Her Majesty's Stationery Office, London. 1964. Pp. xxii + 317.
[50] Dworkin, M. (2006). The prokaryotes: a handbook on the biology of bacteria (Vol. 4 Bacteria: Firmicutes, Cyanobacteria). S. Falkow, E. Rosenberg, K. H. Schleifer & E. Stackebrandt (Eds.). New York: Springer. Pp. 1053-1072.
[51] Cinar, S., Özçimen, D., & Yilmaz, M. (2019). Marine diatom isolation, identification and investigation of nutrient effects on the diatom growth. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34.
[52] Komárek, J. (2016). A polyphasic approach for the taxonomy of cyanobacteria: principles and applications. *European Journal of Phycology*, 51(3), 346-353.
[53] Demirel, Z. (2016). Identification and Fatty Acid Composition of Coccolithophore and Diatom Species Isolated from Aegean Sea. *Romanian Biotechnological Letters*, 21(4), 11746-11753.
[54] Demirel, Z., & Sukatar, A. (2019). Purification of phycocyanin from isolated and identified hot spring cyanobacteria. *Indian Journal of Experimental Biology*, 57(5), 338-345.
[55] Nübel, U., Garcia-Pichel, F., & Muyzer, G. (1997). PCR primers to amplify 16S rRNA genes from cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 63(8), 3327-3332.
[56] Xu, Y., Lu, A., Chen, X., Su, D., Wang, W., & Zhang, Y. (2018). Isolation, identification and growth optimisation of freshwater microalgae. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18 (11), 1293-1302.
[57] Hammer, U. T. (1986). Saline Lake Ecosystems of the World. Springer. pp. 14–15. ISBN 90-6193-535-0.
[58] Zhang, W., Jing L., Yunxing X., Yumiao Z., Yangjinzhi Y., Zheng Z., Yafeng L., & Qi L. (2022). The impact of cyanobacteria blooms on the aquatic environment and human health. *Toxins*, 14(10), 658.
[59] Garcia-Pichel, F., Belnap, J., Neuer, S., & Schanz, F. (2003). Estimates of global cyanobacterial biomass and its distribution. *Algological Studies*, 109(1), 213.
[60] Olsson-Francis, K., & Cockell, C. S. (2010). Experimental methods for studying microbial survival in extraterrestrial environments. *Journal of microbiological methods*, 80(1), 1-13.
[61] Castenholz, R. W., & Garcia-Pichel, F. (2012). Cyanobacterial responses to UV radiation. In Ecology of cyanobacteria II: Their diversity in space and time (pp. 481-499). Dordrecht: Springer Netherlands.
[62] Biddanda, B. A., Nold, S. C., Dick, G. J., Kendall, S. T., Vail, J. H., Ruberg, S. A. & Green, C. M. (2012). Rock, Water, Microbes: Underwater Sinkholes in Lake Huron are Habitats for Ancient Microbial Life. *Nature Education Knowledge*, 3(10):13.
[63] Palozzi, R., Caramanna, G., Albertano, P., Congestri, R., Bruno, L., Romano, A., Giganti, M., Zenobi, R., Costanzo, C., Valente, G., Polani, D., Vecchio, M., Vinci, M., & Sbordoni, V. (2010). The underwater exploration of the Merro sinkhole and the associated diving physiological and psychological effects. Underwater Technology, 29(3), 125-134.
[64] Águila, B., Yanez-Montalvo, A., Mercado-Juárez, R. A., Montejano, G. A., Becerra-Absalón, I., & Falcón, L. I. (2022). Microbialites show a distinct cyanobacterial phylogenetic structure and functional redundancy in Bacalar lagoon and Cenote Azul sinkhole, Yucatan Peninsula, Mexico. FEMS Microbiology Ecology, 98(5), 1–13.
[65] Varshney, P., Mikulic, P., Vonshak, A., Beardall, J., & Wangikar, P. P. (2015). Extremophilic micro-algae and their potential contribution in biotechnology. *Bioresource Technology*, 184, 363-372.
[66] Groendahl, S., & Fink, P. (2017). High dietary quality of non-toxic cyanobacteria for a benthic grazer and its implications for the control of cyanobacterial biofilms. *BMC Ecology*, 17, 1-10.
[67] Patiño, R., Christensen, V. G., Graham, J. L., Rogosch, J. S., & Rosen, B. H. (2023). Toxic algae in inland waters of the conterminous United States—A review and synthesis. *Water*, 15(15), 2808.

[68] Bhuyar, P., Rahim, M. H. A., Maniam, G. P., Ramaraj, R., & Govindan, N. (2020). Exploration of bioactive compounds and antibacterial activity of marine blue-green microalgae (*Oscillatoria* sp.) isolated from coastal region of west Malaysia. *SN Applied Sciences*, 2, 1-10.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 47-59, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1433327
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi – Research Article

Investigation of the Flow Characteristics of the Compression Ring Groove Cavity in the Expansion Time of a Compression Ignition Engine

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorun Genişleme Zamanında Kompresyon Segman Yuvası Boşluğunun Akış Karakteristiklerinin İncelenmesi

Emrah Kantaroğlu[1*]

Geliş / Received: 07/02/2024 ***Revize / Revised: 13/03/2024*** ***Kabul / Accepted: 20/03/2024***

ABSTRACT

In the expansion stroke of reciprocating engines, it is desired that the pressure generated after combustion acts on the piston surface without any losses. However, there are some losses during this process. One of these is the pressure losses in the ring grooves and gaps. In this study, the flow characteristics of the peak compression ring gaps of the Renault F8Q706 engine were examined. Investigations were carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) at 2500 rpm, full load and at the beginning of the piston expansion stroke after a crankshaft angle of 15 from the top dead center. Combustion products were used as fluids in the investigations. In the study, firstly, a 1D engine model was created and verified with the same engine tests in the literature. In-cylinder characteristics taken from the 1D model are defined as boundary conditions in 2-Dimensional (2D) CFD analyses. As a result, in response to the ring cavity inlet pressures of 6.5MPa, 5MPa, 3MPa, the leakage flow rates in the cavity were calculated as 2.97E-05, 1.66E-05, 3.41E-6 kg/s, respectively. For 6.5 MPa inlet pressure, the net pressure was calculated as 6.49941 MPa as a result of the pressure losses in the ring gap.

Keywords- CFD, piston Ring, Sealing

ÖZ

Pistonlu motorların güç strokunda, yanma sonu oluşan basıncın kayıpsız olarak piston yüzeyine etkimesi istenir. Ancak yaşanan kayıplardan bir tanesi segman yuvalarındaki ve boşluklarındaki basınç kayıplarıdır. Bu çalışmada, Renault F8Q706 motorunun tepe kompresyon segmanı boşluğunun akış özellikleri incelenmiştir. İncelemeler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi kullanılarak 2500 d/dk'de, tam yükte ve üst ölü noktadan 15° krank mili açısı sonrasındaki güç strokunda yapılmıştır. Akışkan olarak yanma sonu ürünleri kullanılmıştır. Öncelikle 1-Boyutlu (1B) motor modeli oluşturulmuş ve literatür testleri ile doğrulanmıştır. 1B modelden alınan silindir içi karakteristikler 2-Boyutlu (2B) HAD modelinde tanımlanmıştır. Sonuçta, 6,5MPa, 5MPa, 3MPa giriş basınçlarında, kaçak debiler sırasıyla 2,97E-05, 1,66E-05, 3,41E-6 kg/s olarak hesaplanmıştır. 6,5 MPa giriş basıncı için, segman boşluğunda oluşan basınç kayıpları sonunda net basınç 6.49941 MPa olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler- HAD, Segman, Sızdırmazlık

[1]*Corresponding Author Contact: emrahkantaroglu@kku.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-6127-4318)
Kırıkkale University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Kırıkkale

I. INTRODUCTION

While internal combustion engines are still advantageous in terms of high power and range, their usage is decreasing due to growing environmental concerns. The environmental issues primarily stem from toxic emissions and greenhouse gas effects resulting from the combustion of hydrocarbon fuels. In addition to these environmental issues, rising costs due to decreasing oil reserves are also a factor. Therefore, in engine development, the primary focus is on achieving the highest efficiency and minimizing emissions.

Efficiency is an evolving concept in internal combustion engines. Combustion losses, heat transfer losses, friction losses, and pumping losses reduce the efficiency of these engines to around 30%. Despite ongoing fuel searches to overcome these efficiency losses, the existing mechanics of engines continue to contribute to these losses. Due to the disadvantages associated with power generation in internal combustion engines, the advancement of digital technologies and electric infrastructure has shifted the trend towards electric motors in transportation. This has begun to restrict the use of internal combustion engines in transportation, and electric motor technologies providing an alternative means of transportation have become widespread.

Many developed countries worldwide have announced their intentions to phase out diesel fuel usage and ban the sale of vehicles with internal combustion engines by 2035. Türkiye, through the Paris Agreement, has declared its commitment to complete this transition between 2030 and 2050 [1]. According to the September 2024 data from the Turkish Statistical Institute (TÜİK), 1.3% of the 14,967,044 automobiles in Turkey are hybrid, and 0.3% are fully electric. There are still 14,727,572 automobiles equipped with internal combustion engines [2]. While the origin of this trend appears to be high efficiency and emission constraints, current battery technologies and stable power delivery are still considered limiting factors for electric motors. Compression Ignition (CI) engines continue to play a crucial role in heavy-duty transportation services and electricity generation transformations, where electric motors are not yet able to respond. Therefore, the use of compression-ignition engines persists with new fuel and engine technologies that mitigate emission releases [3-4]. The effective achievement of compression end pressure without loss and the preservation of the reached pressure during the power period are crucial for preventing efficiency losses. In engines, internal losses within the cylinder can be attributed to fuel, combustion, and flow, as well as thermal loads. In the literature, the efficiency losses caused by thermal loads in engines have been investigated both experimentally and numerically [5]. Piston rings are used to prevent losses in the cylinder and balance the movement of the piston [6]. These rings, located in the upper section of the piston during compression and expansion stroke, ensure that high-pressure air does not escape to the lower section, thus preventing pressure loss. Simultaneously, these rings also function as sealing elements. Comas et al. [7] emphasized the significance of sealing efficiency and developed analyses incorporating the dynamic behaviors, tribological characteristics, and gas leakage conditions of the compression ring. Lozano et al. [8] investigated flow losses in compression rings using CFD simulations and mathematical models. Koszalka [9] simulated the effects of selected dimensions of the rings and piston of a diesel engine on performance. The results have shown that with restrictions imposed by the engine manufacturer regarding the scope of modernization, it is possible to significantly reduce or even eliminate the reverse gas flow from the inter-ring space to the combustion chamber. In his study on piston rings, Yeşilada [10] examined the wear, breakage and irregular movement of the rings. The study emphasized the critical role of rings in internal combustion engines and emphasized that rings are an important factor affecting engine performance. Chucholowski et al. [11] and Kornprobst et al. [12] developed the first 2D simulation model for the entire piston-cylinder assembly. Their work involved calculating horizontal film thickness and hydrodynamic friction, considering piston dynamics, piston ring dynamics, and gas dynamics. They described the interaction between rings and piston grooves using analytical equations. Furuhama et al. [13] conducted theoretical and experimental studies on gas transport in ring cavity clearances. Karamangil [14] developed thermodynamic models for combustion chamber gases and numerical models for hydrocarbons in the ring, finding that hydrocarbons in the ring groove took longer to leave the cylinder after the combustion event. In their study, Lyubarskyy and Bartel [15] created a 2D CFD model for the piston rings of a diesel-fueled engine. Analyzing mass flow along the ring cavity, they examined pressure and fluid friction, discovering increased flow losses in ring cavity clearances with rising average pressure.

In the literature, there are limited studies on the flow characteristics of clearances in ring cavities, particularly for expansion or power periods. Therefore, there is insufficient research to ensure the highest possible occurrence or examination of the spreading load created by the high pressure generated after combustion on the piston. In this study, a Renault F-Type F8Q706 engine was disassembled. Subsequently, a 1D engine model was created by taking measurements of the manifold, port, valve, cylinder, combustion chamber, and block. Using the obtained measurements and the cylinder characteristics from the 1D engine model, a 2D ring cavity geometry model was created and analyzed. The study examined pressure loss and leakage flows from the ring cavity during the expansion time after combustion.

II. MATERIAL AND METHOD

In this study, the Renault F8Q706 engine was initially modelled as a 1D model in the Ricardo-Wave software to examine the flow characteristics in the ring cavity during the expansion stroke. After verifying the 1D engine model analyses with test results available in the literature, the obtained in-cylinder pressure and temperatures during the expansion stroke were utilized as boundary conditions for the 2D ring cavity analysis. Additionally, the mass fractions of gases inside the cylinder under theoretical complete combustion conditions were calculated to define the fluid type in the 2D ring cavity model.

A. 1D Engine Model Analysis

In this study, the 1D engine model was developed using the Ricardo-WAVE 2019.1 software. Various sub-models were employed in the 1D engine model, including flow friction, turbulence, heat transfer, combustion, and emission models. The 1D engine model utilized geometric and physical dimensions from all components of the engine [16]. The engine and piston dimensions for the F8Q706 model are provided in Table 1 and Table 2. The geometries used in the Wave software are as follows:

The Woschni heat transfer model was defined for the heat transfer model [17].

The Diesel-Wiebe model was used for the turbulent combustion model [18-19].

For the formation of CO and CO_2 emissions, the Newhall model was applied [20], Cheng model for unburned HC emissions [21], Fenimore model for NO_x [22], and Heywood correlations were used [22].

The Chen-Flynn correlation model was employed for mechanical friction losses [23].

The software was configured with a diesel fuel definition, and 250 engine cycles were simulated to ensure steady-state conditions. A time step of 0.1s and a convergence criterion of 0.001 were defined. Figure 1 illustrates the model geometry and valve profiles, and Table 3 provides the boundary conditions defined in the software [8, 12, 21].

Table 1. Main specifications of engine [16].

Engine Model	Renault F-Type F8Q 706
Number of cylinders	4
Displacement, cc	1870
Bore, m	0.08
Stroke, m	0.093
Compression ratio	21.5: 1
Max. torque, Nm at 2500 rpm	118
Max. power, kW at 4500 rpm	47

Table 2. Fuel properties [24]

Properties of Diesel Fuel	Quantity
Chemical Formula	$C_{12}H_{23}$
Lower heating value, MJ/kg	43.1
H/C ratio	1.92
Density, kg/m^3	835
Stoichiometric	14.6
Flash point, K	330
Boiling point, K	633

Table 3. Temperature and pressure values on boundary surfaces. (1D model) [25, 26, 27, 28].

Boundary Surfaces	Pressure (Bar)	Temperature (K)
Inlet (Air)	2.56	327.5
Outlet (Burned gases)	2.83	904
Piston	-	595
Intake port	-	323
Exhaust port	-	490
Liner	-	616
Head	-	635
Intake valve	-	345
Exhaust valve	-	500

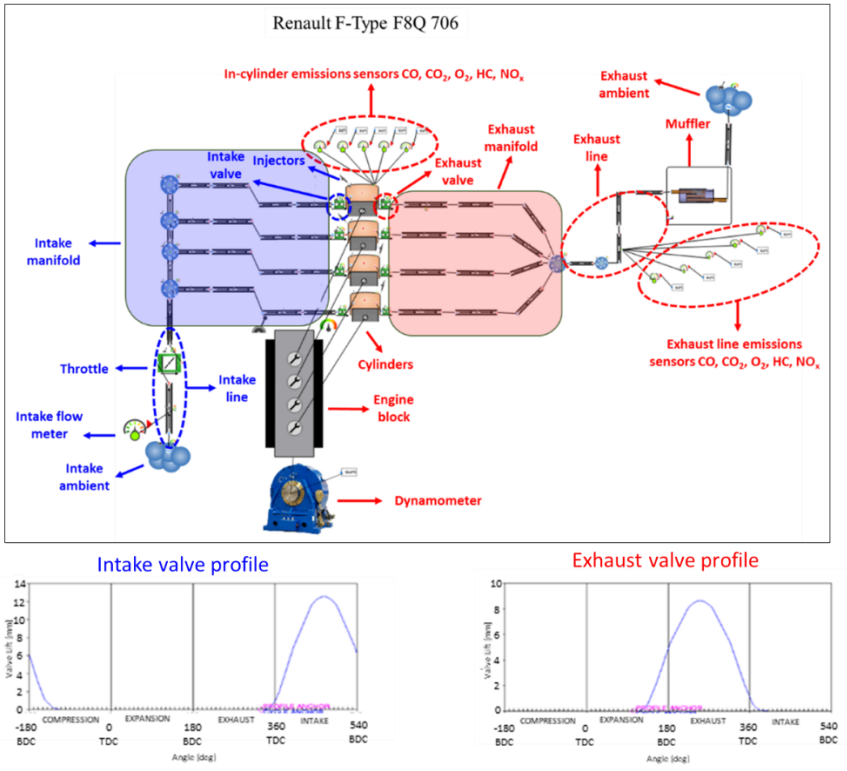


Figure 1. 1D Model and valve profiles.

The 1D engine model for the Renault F8Q706 engine was validated by comparing it with catalog data and literature, as shown in Figure 2. As observed, the power variation trends are similar in all three evaluations. [16, 29]. Upon examining Figure 2, it is observed that the power values obtained from the 1D engine model are respectively 8.526%, 8.555%, 7.596%, and 8.965% higher than the test values in the literature for engine speeds of 1,000, 2,000, 3,000, and 4,000 rpm. Additionally, the power obtained from the 1D engine model is 8.785% higher at 2,500 rpm and 9.457% higher at 4,500 rpm compared to the catalogue power values [29].

These differences arise due to variations in test conditions and modeling conditions. Differences in fuel content, ambient air composition, ambient air temperature/pressure, and variations created by the ideal engine operation are common factors causing such discrepancies in engine modeling. Despite these variations, the 1D model was implemented to apply test conditions as accurately as possible. In the 1D modeling, at the engine's maximum torque speed of 2,500 rpm and full load conditions, the gas temperature and pressure inside the cylinder were calculated during the expansion phase, 15 degrees after the top dead center (ATDC). These values are presented in Table 4.

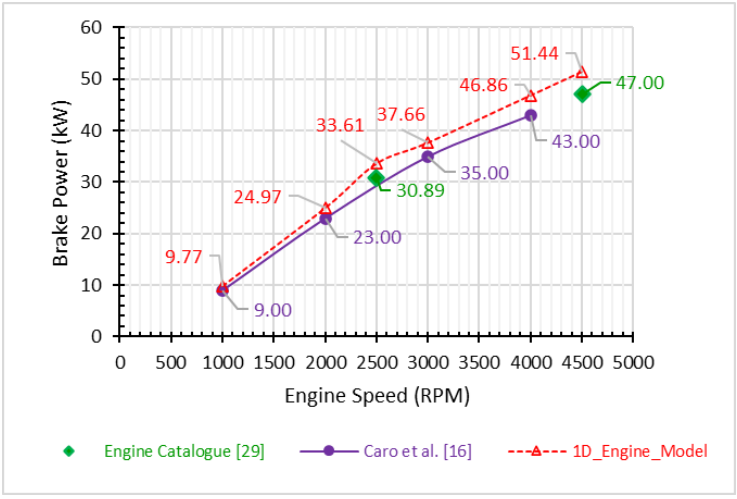


Figure 2. 1D engine model calibration and validation.

Table 4. In-cylinder parameters calculated from the 1D engine model.

In-Cylinder Measurements (after TDC 15KMA)	Quantity
Max. pressure, MPa	6.5
Max. temperature, K	1 888

B. 2D Ring Cavity CFD Model

CFD analyses involve numerical solutions for thermal-fluid problems. In these analyses, a mesh structure is applied to the region bounded by all surfaces involved in the geometry for the inlet and outlet. Conservation equations are then solved at the intersection points of this mesh structure. These equations are mass, momentum, and energy conservation equations. The solutions in CFD models can be either time-dependent or time-independent, and they may encompass static and dynamic flow models. The construction of CFD analyses involves pre-processing, solver, and post-processing. Figure 3 illustrates the steps taken in this study.

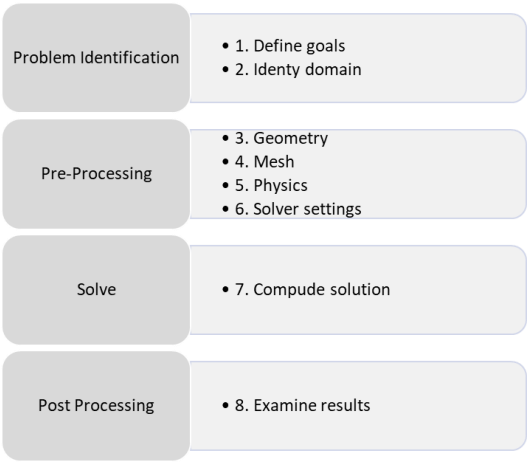


Figure 3. CFD model process.

During the flow, fluid particles are subjected to gravitational, inertial, pressure, and friction forces. These forces induce changes in the velocity of fluid particles. Similarly, heat fluxes resulting from heat transfer between the fluid and its surroundings also cause temperature changes in fluid particles. The Reynolds transport theorem (mass, energy, momentum conservation) is applied to each fluid particle (differential element) in all axes of the fluid, and the numerical solution to the complex equations without analytical solutions is obtained through the Finite Difference Method. The conservation equations for the differential elements within the model are solved using these equations to reach a conclusion.

The conservation of mass is shown in Equation 1.

$$\rho\vec{\nabla}.\vec{V} = \rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{1}$$

The continuity equation, in vector form, is written as in Equation 2.

$$\frac{D\rho}{Dt}+\rho\vec{\nabla}.\vec{V} = 0 \tag{2}$$

In Cartesian coordinates, momentum conservation, based on Newton's second law of motion, is given in Equation 3.

$$\rho\frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{f}-\vec{\nabla}P+\mu\nabla^2\vec{V} \tag{3}$$

In Cartesian coordinates, when the first law of thermodynamics is applied Equation 4 is obtained in vector form:

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha\nabla^2T+\frac{q'}{\rho c_p} \tag{4}$$

The case where viscous heat generation is not neglected is represented by Equation 5:

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha\nabla^2T+\frac{q'}{\rho c_p}+\frac{\Phi}{\rho c_p} \tag{5}$$

The continuity equation used in ANSYS-Fluent CFD analyses is shown in Equation 6.

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}_k \tilde{u}) = \nabla.\left[\bar{\rho} D_T \nabla\left(\frac{\bar{\rho}_k}{\bar{\rho}}\right)\right] + \dot{\rho}^c{}_k + \dot{\rho}^s{}_k \qquad \text{(k=1,.....K)} \tag{6}$$

Equation 7 shows the momentum conservation equation used in ANSYS-Fluent CFD analyses.

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{u}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{u}) = -\nabla\bar{\rho} + \nabla.\bar{\sigma} - \frac{2}{3}\bar{\rho}\tilde{k}l + \overline{F}^s + \overline{\rho g} \tag{7}$$

Equation 8 displays the energy conservation equation used in ANSYS-Fluent CFD analyses.

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{I}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{I}) = -\bar{\rho}\nabla\tilde{u} + \nabla\tilde{J} + \bar{\rho}\tilde{\varepsilon} + \dot{\bar{Q}}^c + \dot{\bar{Q}}^s \tag{8}$$

Equations 9 and 10 represent the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations for k and ε used in ANSYS-Fluent CFD analyses.

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{k}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{k}) = -\bar{\rho}\tilde{k}\nabla.\tilde{u} + \sigma:\nabla\tilde{u} + \nabla.\left[\frac{(\mu+\mu_T)}{Pr_\varepsilon}\nabla\tilde{k}\right] - \bar{\rho}\tilde{\varepsilon} + \dot{\bar{W}}^s \tag{9}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{\varepsilon}) = -\left(\frac{2}{3}c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 3}\right)\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}\nabla.\tilde{u} + \nabla.\left[\frac{(\mu+\mu_T)}{Pr_\varepsilon}\nabla\tilde{\varepsilon}\right] - \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}}\left(c_{\varepsilon 1}\sigma:\nabla\tilde{u} - c_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\tilde{\varepsilon} + c_s\dot{\bar{W}}^s\right) \tag{10}$$

The RNG (ReNormalization Group) model for the turbulent dissipation rate (ε) is given by Equation 11:

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \nabla.(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{\varepsilon}) = -\left(\frac{2}{3}c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 3}\right)\bar{\rho}\tilde{\varepsilon}\nabla.\tilde{u} + \nabla.\left[\frac{(\mu+\mu_T)}{Pr_\varepsilon}\nabla\tilde{\varepsilon}\right] - \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}}\left(c_{\varepsilon 1}\sigma:\nabla\tilde{u} - c_{\varepsilon 2}\bar{\rho}\tilde{\varepsilon} + c_s\dot{\bar{W}}^s\right) - \bar{\rho}R \tag{11}$$

C. Geometry

This study conducted a 2D ring cavity analysis for the expansion phase using the ANSYS-Fluent 2023 R1 module. Therefore, the ring cavity geometry was designed in 2D. The data obtained after the Renault F-Type F8Q706 engine disassembled, as shown in Figure 4, were used to define the geometric measurements using Tables 1 and 5. The surface representation of the 2D ring cavity geometry was created using the SolidWorks software package. When creating the model file in ANSYS-Fluent, the fluid surface was drawn as a solid surface and defined as a fluid. While the piston was at expansion stroke, the flow in the top ring, which is the examination region, was examined by taking the in-cylinder parameters taken from the 1D model. Lozano et al. [8] stated in their study that during the movements of the piston, the ring in the groove does not move smoothly and is in different positions. This limits the flow losses. Even if a smooth movement is displayed as in Mohamed [6]'s study and the ring fits snugly to the ceiling of the slot (for expansion stroke), the flow losses will still be limited. The ring in this study was positioned considering the ideal situation where the ring is in the middle and does not sit on a surface, which is the situation where the highest loss is experienced in terms of flow losses. Figure 5 provides the nomenclature of the surfaces and regions used in the 2D CFD analyses for the ring cavity.

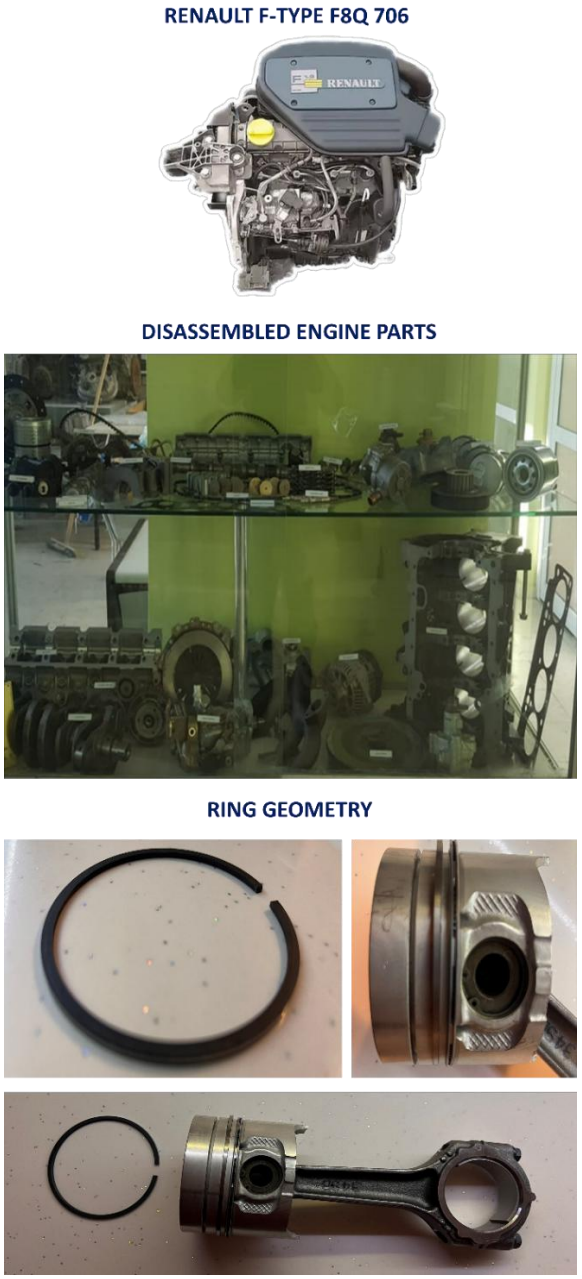


Figure 4. Engine, piston, and ring images.

Table 5. Piston dimensions and characteristics.

Piston Parameter	**Length (mm)**
Compression Height	42.25
Combustion Chamber Depth	0.7
Full Length	70.5
Piston Firing Kit Dimension	12.5
Pin Length	63
Pin Diameter	24
1st Ring Axial Height	2
2nd Ring Axial Height	2
3rd Ring Axial Height	3

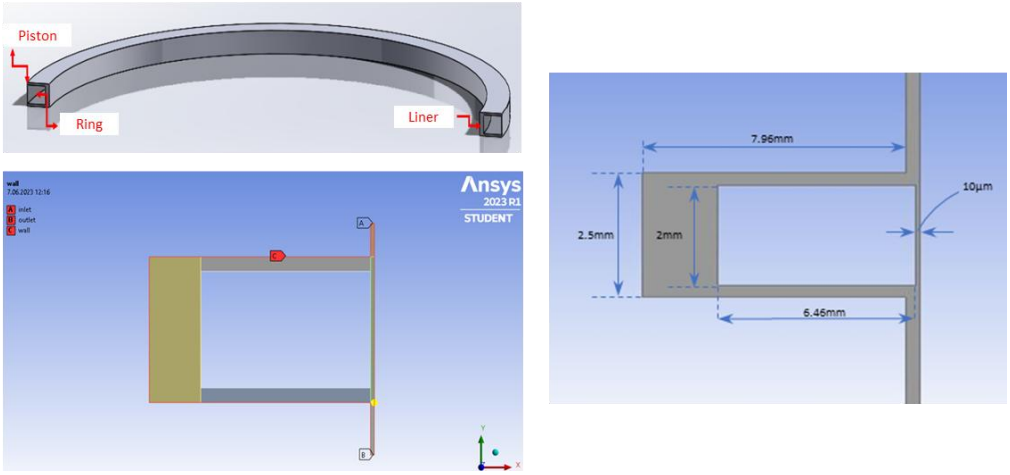


Figure 5. CFD model.

D. Mesh Structure

Specific partial differential equations are solved at the intersection points of the mesh structures created in geometry. Therefore, the mesh structure is important in reflecting the model's reality, including its number and density. Mesh structures can be in different numbers, geometries, and sizes. It relies on experimental and analytical methods for its selection. The mesh structure used in this study was created using ANSYS-Workbench. In the mesh structure definitions, the aspect ratio was taken between 1 and 2, and skewness was set to be less than 0.9. When creating the mesh structure, only the element size definition was made on the geometry, with the element size value set to 0.001 mm. Additionally, inflation definitions were made for the inlet edge, cylinder liner surface (piston wall), engine body surface (liner wall), and outlet. The current mesh structure has a total element count of 924,698. Figure 6 shows the created mesh structure.

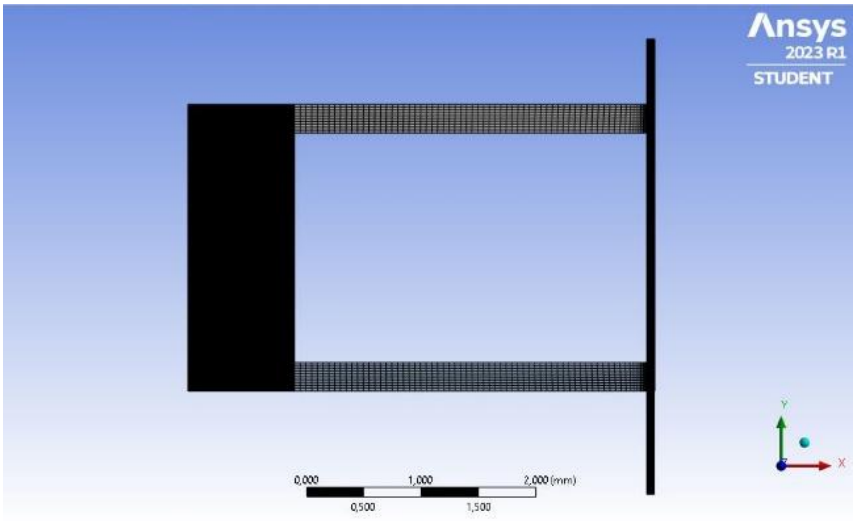


Figure 6. Mesh structure.

The mesh independence test is conducted to evaluate how the results of an analysis are influenced by the number of meshes used. This test involves comparing the results obtained by repeating the same analysis with different mesh counts. The aim is to assess the degree to which the analysis outcomes are affected by the number of meshes used.

To demonstrate the independence of the leakage flow results from the mesh count, repetitive analyses were conducted at 6.5 MPa with different mesh counts. These analyses were performed at an engine speed of 2500 rpm, at full load, in a steady-state, and during the expansion phase. Mesh independence tests conducted within the scope of this study are presented in Figure 7. When examining leakage flows based on mesh counts, it is evident that the most stable and effective mesh count is 924,698.

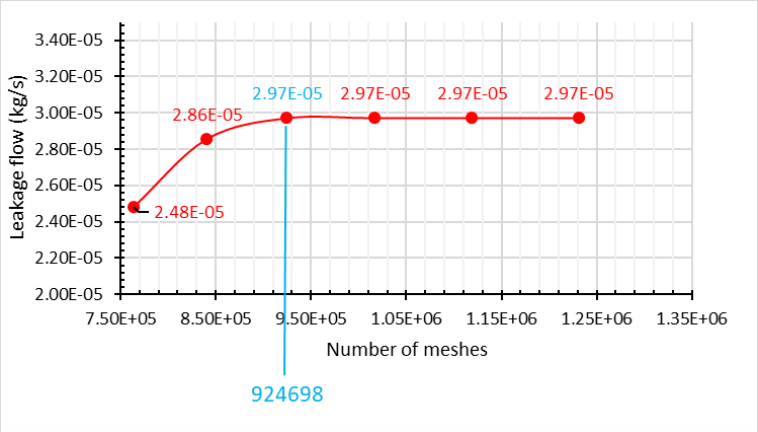


Figure 7. Mesh independence test.

E. Model Definitions

In this study, efficiency losses occurring in the combustion chamber during the expansion phase of the piston have been investigated. For this purpose, the boundary conditions of the 2D ring groove cavity CFD model created were derived from the 1D engine model cylinder characteristics. As for the outlet boundary conditions, atmospheric conditions are assumed to be the most ideal situation that causes an increase in leakage flow and pressure loss. Boundary conditions are defined as pressure-based. The boundary conditions used in the model are provided in Table 6.

Table 6. Boundary conditions for the 2D ring cavity CFD model.

Boundary Conditions	Values
Inlet Pressure	3 MPa, 5 MPa, 6.5 MPa
Outlet Pressure	100 kPa
Inlet Temperature	1 888 K
Outlet Temperature	300 K

The CFD model employed a convergence criterion of 10^{-5} and a turbulence intensity of 1%. The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) Least Squared Cell Based algorithm was utilized for solving the equations. The RANS RNG k-ε turbulence model with standard wall functions and standard initialization was employed as the turbulence model. Additionally, the fluid type used in the model consisted of emission gases with mass ratios entered as multi-phase for theoretical complete combustion, based on the general diesel combustion equation in Equation 12. The emission values obtained according to the reaction in Equation 12, defined as the fluid passing through the ring cavity, and the mass ratios are provided in Table 7.

$$C_{12}H_{23} + 17.75(O_2 + 3.762N_2) \rightarrow 12CO_2 + 11.5H_2O + 66.78N_2 \quad (12)$$

Table 7. Mass fraction of end-combustion emissions fraction of emissions.

Emissions	Mass fraction
CO_2	0.203
H_2O	0.079
N_2	0.718

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the efficiency losses in the compression segment cavity of the compression-ignition Renault F8Q706 engine during the expansion phase were investigated using CFD analyses program. The pressure values during the expansion phase (15 degrees after the top dead center) used in the simulations were 3 MPa, 5 MPa, and 6.5 MPa. Compression-ignition engines typically have a high compression ratio, allowing spontaneous combustion in the high-pressure and temperature air-fuel mixture. The combustion results in high pressure, which exerts forces on the cylinder. To ensure the proper functioning of this system, any situation causing pressure loss is undesirable. Combustion, heat transfer, friction, and pumping losses inside the cylinder contribute to efficiency losses. Pumping efficiency during the intake and compression phases is generally around 95% [26]. However, it is also crucial to minimize losses during the expansion phase when power is generated and pressure forces acting on the piston need to be sustained.

The losses occurring in the rings result from two different geometric features. In this study, the flow characteristics in the top compression ring were examined. The investigations were made with CFD analysis, and the resulting graphics consist of the parameters calculated in the analysis. In Figure 8, a comparison of leakage flow is made during the expansion phase for a pressure value of 6.5 MPa obtained from the 1D model and pressures below this value. Generally, with decreasing input pressure due to expansion, the leakage flow and horizontal fluid velocity in the ring groove decrease, while the temperature increases. For pressures of 6.5 MPa, 5 MPa, and 3 MPa, the leakage flows in the ring groove are 2.97E-05, 1.66E-05, and 3.41E-6 kg s-1, respectively. As seen, the decreasing expansion time pressure corresponds to a reduction in leakage flow, reaching 3.41E-6 kg s-1. The decrease in this value with decreasing pressure is expected and normal. These, it leads to less pressure loss. In Figure 9, after compression, a comparison of fluid velocities is made for input pressures of 6.5 MPa, 5 MPa, and 3 MPa obtained from the 1D model. Here, like Figure 8, the highest fluid velocity is calculated at the highest-pressure value. In Table 8, the pressure loss in the ring gaps in response to the expansion stroke pressures taken from the 1D model is given. Here, it is seen that there is more pressure loss with increasing pressure. Considering that the net piston work in the cylinder depends on the in-cylinder pressure in the expansion stroke, it is inevitable that increased pressure loss will cause a decrease in performance in the expansion stroke. Figure 10 presents the fluid's pressure, temperature, and velocity distributions caused by changing input pressures. With decreasing fluid input pressures, there is more restricted fluid entry into the ring groove due to a decrease in leakage flow and, consequently, fluid velocity [7-8]. This has reduced the heat transfer from the fluid to the piston surface, causing a slight increase in the temperature in the ring groove. The small cross-sectional area of the entry and exit sections of the ring groove has led to a pressure increase within the fluid volume, raising the air temperature to 576.47 K. This temperature increase is an expected but undesirable outcome, like the increase in leakage flows.

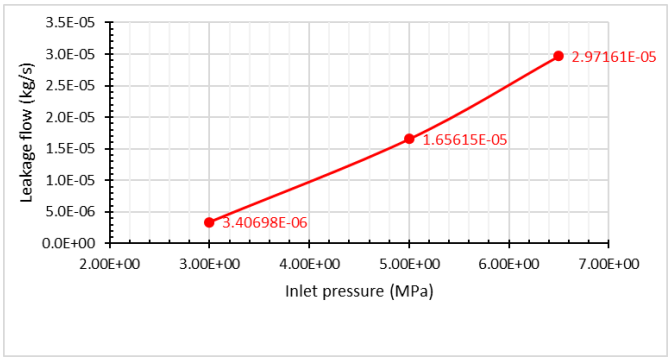


Figure 8. Leakage flows according to inlet pressures.

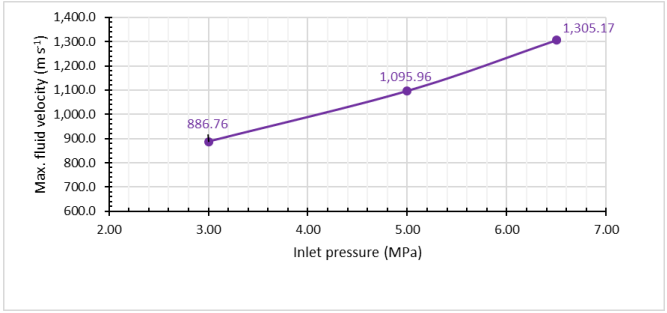


Figure 9. Fluid velocities according to inlet pressures.

Table 8. Performance losses

1B Model in-cylinder pressure, MPa	Pressure loss in CFD, MPa	Net in-cylinder pressure, MPa
3	0.00033	2.99967
5	0.00041	4.99959
6.5	0.00059	6.49941



Figure 10. Pressure, temperature and horizontal velocity contours.

IV. CONCLUSIONS

Studies on the fluid characteristics within the piston ring gaps in reciprocating engines are limited in the literature. Consequently, the ring leakages causing obstacles to the high pressure obtained due to high compression ratios in compression-ignition engines, leading to efficiency losses, have not been thoroughly examined. In this study, the dismantling of the Renault F-Type F8Q706 engine was carried out, and actual cylinder measurements were taken to establish the geometry of the flow volume between the piston and the ring. The engine was initially modeled as 1D, and from there, the temperatures and pressures inside the cylinder during the expansion phase after combustion were calculated. These parameters were then used as boundary conditions for the 2D CFD model of the ring gap. In the 1D model, leakage flows for decreasing pressures of 5 MPa and 3 MPa were also calculated, in addition to the 6.5 MPa pressure obtained at the 15th ATDC (After Top Dead Center) during the expansion phase.

The results obtained from this study provide an interdisciplinary approach where different numerical models are integrated to understand the behavior of the fluid in the ring gap. The findings have the potential to guide the design and optimization processes of the ring in relevant engineering applications related to engines and combustion.

In conclusion, both 1D model and test verifications were conducted, and sensitivity analyses of the 2D CFD model were performed. The behavior of the fluid in the ring gap was extensively examined under the influence of pressure through an integrated approach. The study identified that decreasing pressures led to a reduction in leakage flows.

Nomenclature

Symbols

p	Pressure	1D	1-Dimensional
T	Temperature	3D	3-Dimensional
ρ	Density	RANS	Reynolds-Average Navier-Stokes
c_p	Specific heat	RNG	Re-Normalisation Group (RNG) methods
μ	Viscosity	CO_2	Carbon dioxide
$\dot{\bar{\rho}}^s$	Spray evaporation source term	H_2O	Water
$\dot{\bar{\rho}}^c{}_k$	Chemical reaction source term	CO	Carbon monoxide
$\overline{F}^s$	Momentum gain rate	UHC	Unburned hydrocarbon
DT	Average diffusion coefficient	NO_x	Nitrogen oxides
∇	Gradient vector		
x_b	Flame speed		
θ	Crankshaft angle		

REFERENCES

[1] Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı. (2016). *Paris Anlaşması Metni.* https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa, (12.12.2023).

[2] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). *Motorlu Taşıt İstatistikleri.* https://l24.im/FZoQ, (07.01.2024)

[3] Aktaş, F. (2022). Spark ignition timing effects on a converted diesel engine using natural gas: a numerical study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.* 236, 1949-63.

[4] Aktaş, F. (2022). Numerical investigation of equivalence ratio effects on a converted diesel engine using natural gas. *Journal of Energy Resources Technology.* 144, 092305.

[5] Ertugrul, I., Ulkır, O., Ozer, S., Ozel, S. (2022). Analysis of thermal barrier coated pistons in the COMSOL and the effects of their use with water + ethanol doped biodiesel. *Thermal Science.* 26(4A), 2981-2989.

[6] Mohamed, E. S. (2018). Performance analysis and condition monitoring of ICE piston-ring based on combustion and thermal characteristics. *Applied Thermal Engineering.* 132, 824-840.

[7] Hernández-Comas, B., Maestre-Cambronel, D., Pardo-García, C., Fonseca-Vigoya, MDS., Pabón-León, J. (2021). Influence of compression rings on the dynamic characteristics and sealing capacity of the combustion chamber in diesel engines. *Lubricants.* 9(3), 25.

[8] Orozco Lozano, W., Fonseca-Vigoya, MDS., Pabón-León, J. (2021). Study of the kinematics and dynamics of the ring pack of a diesel engine by means of the construction of CFD model in conjunction with mathematical models. *Lubricants*. 9(12), 116.

[9] Koszalka, G. (2019). The use of the gas flow model to improve the design of the piston-rings-cylinder system of a diesel engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 659, 012072.

[10] Yeşilada, Ö. (1997). *Piston Rings*. (M.Sc.), Istanbul Technical University, Institute of Science, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye.
[11] Chucholowski C, Kornprobst H, Zellinger K. (1982). *FVV.* Absclußbericht Nr. 250.
[12] Kornprobst H, Zellinger K. Bewegung, R. (1987). *FVV.* Abschlußbericht Nr. 344.
[13] Furuhama, S. (1959). A dynamic theory of Piston-Ring lubrication: 1st report, calculation, *Bull JSME*, 2, 423-428.
[14] Karamangil, M. E. (2004). Benzinli motorlarda segman ve conta boşluğu hidrokarbonlarının silindir içi dağılımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1), 53-64.
[15] Lyubarskyy, P., Bartel, D. (2016). 2D CFD-model of the piston assembly in a diesel engine for the analysis of piston ring dynamics, mass transport and friction, *Tribology International, 104, 352-368.*
[16] Satge´ de Caro, P., Mouloungui, Z., Vaitilingom, G., Berge, J. C. (2001). Interest of combining an additive with diesel–ethanol blends for use in diesel engines. *Fuel*. 80(4), 565-574.
[17] Woschni, G. (1967). A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine. *SAE Int.* J. *Engines.*
[18] Ghojel, J. I. (2010). Review of the development and applications of the wiebe function: a tribute to the contribution of Ivan Wiebe to engine research. *International Journal of Engine Research*. 11(4), 297-312.
[19] Wiebe, I. (1956). *Semi-empirical expression for combustion rate in engines*. InProceedings of Conference on Piston Engines.
[20] Newhall, H. K. (1969). *Kinetics of engine-generated nitrogen oxides and carbon monoxide*. Symposium (International) on Combustion. 12(1), 603-613.
[21] Cheng, W. K., Hamrin, D., Heywood, J. B., Hochgreb, S., Min, K., Norris, M. (1993). An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark-ignition engines. *SAE Int. J. Engines*.
[22] Fenimore, C. P. (1971). *Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames*. Symposium (International) on Combustion. 13(1), 373-380.
[23] Pipitone, E. (2009). A new simple friction model for s. i. engine. *SAE Technical Paper*.
[24] Özer, S. (2014). Alkollerin içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(1),* 97-114.
[25] Aktaş, F. (2021). *Numerical investigation of the effects of the use of propane-diesel as a dual fuel in a diesel engine on the combustion regime, engine performance and emission values*. (PhD), Gazi University, Ankara, Türkiye.
[26] Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
[27] Mahle GmbH. (2012). *Pistons And Engine Testing* (1st ed). Vieweg – Teubner.
[28] Winterbone, D. E., Turan, A. (2015). *Advanced Thermodynamics For Engineers* (2nd ed). Butterworth-Heinemann an Imprint of Elsevier.
[29] Engine catalog. (2021). https://mymotorlist.com/engines/renault/, (12.12.2023).

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 60-69, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1433884
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Kılçadır Köyü (Merkez-Bingöl) Çayır Alanlarının Ot Verimi ve Bazı Kalite Özellikleri Açısından İncelenmesi

Investigation of Meadow Areas of Kılçadır Village (Center-Bingöl) in terms of Forage Yield and Some Quality Characteristics

Hamza Balkan[1], Erdal Çaçan[2*]

Geliş / Received: 08/02/2024 ***Revize / Revised: 21/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 09/12/2024***

ÖZ

Bu araştırma, Bingöl iline bağlı Kılçadır köyü çayır alanlarının ot verimi ve kalitesini belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Araştırmada Kılçadır köyüne ait sekiz adet çayır parselinin verim, ağırlığa göre botanik kompozisyon, kalite ve bazı makro element içerikleri belirlenmiş ve parseller bu özellikler açısından karşılaştırılmıştır. Bu özellikler açısından parseller kendi içerisinde istatistiksel olarak önemli farklılıklar göstermiştir. En yüksek bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimi, ham protein oranı, ham protein verimi ve fosfor içeriği 190/5 ve 190/6 numaralı parsellerden alınmıştır. 207/5 numaralı parsel hem ADF ve NDF oranı açısından en düşük değeri veren hem de SKM, KMT, NYD ve magnezyum açısından en yüksek değeri veren parsel olmuştur. Çayır parsellerinde baklagiller %14.7-28.1, buğdaygiller %27.0-74.0 ve diğer familya bitkileri %11.3-53.4 oranlarında ağırlığa göre botanik kompozisyona katılım göstermişlerdir. Sonuçta, çayır parsellerinin verim, ağırlığa göre botanik kompozisyon, kalite ve makro element içerikleri açısından yüksek değerler verdiği ve 190/5 ve 190/6 numaralı parsellerin ot verimi ile ham protein oranı ve verimi açısından, 207/5 numaralı parselin ise diğer kalite özellikleri açısından öne çıktığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Çayır, Verim, Kalite, Makro Elementler

ABSTRACT

This study was conducted to determine the forage yield and quality of meadow fields of Kılçadır village of Bingöl province. In the study, yield, botanical composition by weight, quality, and some macro element contents of eight meadow plots of Kılçadır village were determined and the plots were compared in terms of these characteristics. The plots showed statistically significant differences in terms of these characteristics. The highest plant height, green forage yield, dry matter yield, crude protein content, crude protein yield and phosphorus content were obtained from plots 190/5 and 190/6. Plot 207/5 had the lowest values in terms of ADF and NDF content and the highest values in terms of DDM, DMI, RFV and magnesium. In the meadow plots, legumes accounted for 14.7-28.1%, grasses 27.0-74.0% and other family plants 11.3-53.4% of the botanical composition by weight. As a result, it was determined that meadow plots gave high values in terms of yield, botanical composition by weight, quality

[1]İletişim: hamzabalkan19@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-1892-2797)
Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl
[2]*Sorumlu yazar iletişim: ecacan@bingol.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-9469-2495)
Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, Bingöl
-Bu makale, birinci yazarın yüksek lisans tezinin özetidir.

and macro element contents and plots numbered 190/5 and 190/6 stood out in terms of forage yield and crude protein ratio and yield, while plot numbered 207/5 stood out in terms of other quality characteristics.

Keywords- Meadow, Yield, Quality, Macro Elements

I. GİRİŞ

Çayırlar, bitki örtülerinin oluşum biçimine göre doğal ve yapay olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Doğal çayırlar, bitki örtüsünün doğal olarak oluştuğu alanlardır. Ülkemizdeki çoğu çayır, dünya genelindeki çayırların çoğunluğu gibi doğal olarak oluşmuş alanlardan meydana gelir. Bu çayırların bitki kompozisyonu, ot verimi ve kalitesi, iklim koşulları ve toprak yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Genellikle bu tür çayırlardan biçim yapılarak yararlanılır [1]. Dağların zirvelerinde veya yamaçlarında, kaynak veya akarsu kenarlarında oluşan çayırlar, doğal dağ çayırları olarak adlandırılır. Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan çayırların önemli bir bölümü de bu kategoride yer alır [2].

Çayırlar taban suyu yüksek, eğimi çok az veya düz, sulanabilen arazilerde oluşmaktadırlar. Çayır arazisi de mera arazisi gibi, kendine özgü bitki örtüsüne sahiptir. Çayır bitkileri, çayır arazisinde doğal veya kültürü yapılarak yetişen, hayvanlar tarafından tüketildiklerinde sağlıklarına ve ürünlerine zarar vermeyen bitkilerdir. Genellikle çok yıllık olan çayır yem bitkileri yüksek boylu, dik gelişen, suya istekli, otlanmadan zarar gören ve biçilmeye uygun bitkilerdir. Çayırlar sık bitki örtülü ve kapalı vejetasyonlara sahip olduklarından toprağı sıkı bir şekilde tutarak kuvvetli çim kapağı oluştururlar. Hızlı büyüme döneminde çayır bitkileri yaprakları ile hemen hemen bütün toprak yüzeyini kaplar. Toprakları organik madde bakımından zengin ve pH'ları meralarınkinden daha düşüktür. Yeşil ot ya da kuru ot olarak değerlendirilirler. Biçilen çayır otları kurutulduktan sonra depolanarak yemin az olduğu dönemlerde, özellikle kışın, hayvanların yem ihtiyacını karşılamada kullanılır. Genellikle çayır toprakları biçim dönemine kadar yaş olduklarından otlatmaya uygun değildirler. Bu alanlar otlatıldığında hayvanlar tırnaklarıyla toprakları sıkıştırarak, toprak yapısını bozarlar. Bunun sonucunda ortamın hava-su dengesi değişerek topraklar ağırlaşır, kök derinliği azalır ve bitki gelişimi yavaşlar [3].

Ülkemizde çayır alanları genellikle şahıs arazileridir. Bu durum çayırların yönetim ve ıslahını kolaylaştırmaktadır. Nitekim hayvancılıkla uğraşan kimi yetiştiriciler meralara hiçbir bakım uygulamadıkları halde çayırlarına zaman zaman ahır gübresi, odun veya tezek külleri serpmektedirler [4]. Çayır ve meraların ürettikleri yemler, ancak hayvansal ürünlere dönüştürüldükten sonra (et, süt, yumurta, yün ve yapağı gibi), insanların doğrudan faydalanabileceği bir hale gelir ve ekonomik bir değer taşır [2]. Çayırlar da meralar gibi ülke hayvancılığı açısından büyük öneme sahiptirler. Gerek kaba yem ihtiyacını karşılamaları gerekse sahip oldukları bitki çeşitliliği ve doğal güzellikler, çayırların önemini ön plana çıkaran en büyük etkenlerdir. Çayır yem bitkilerine en iyi örnekler, çayır üçgülü (*Trifolium pratense* L.), yüksek çayır yulafı (*Arrhenatherum elatius* L), çayır kelpkuyruğu (*Phleum pratense* L) ve çayır tilkikuyruğu (*Alopecurus pratensis* L)'dur [4].

Doğu Anadolu Bölgesi'nde çayırlarla ilgili biçim, gübreleme, elde edilen otun depolanması ve otlatma gibi uygulamalarda yapılan hatalardan dolayı çayırların verimi olması gerekenin altındadır [5]. Konu ile ilgili olarak daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında; Erzurum bölgesinde yürütülen bir çalışmada çayırların verim durumları ve bazı toprak özellikleri incelenmiştir. Çalışmada çayırların ot verimlerinin 125-100 kg/da arasında değiştiği ve baklagillerin botanik kompozisyondaki oranlarının çok düşük olduğu belirlenmiştir [6]. Erzurum bölgesinde yürütülen başka bir çalışmada, fosforlu gübre ve fosfor çözücü bakteri uygulamasının çayır alanlarının verim ve botanik kompozisyonuna etkisi incelenmiştir. Çalışmada, bakteri uygulamasının verim ve botanik kompozisyona herhangi bir etkisinin olmadığı, fosforlu gübrenin de artan dozlarda etkisinin önemsiz ve botanik kompozisyonda baklagillerin oranında bir artışa sebebiyet verdiği belirlenmiştir [7]. Kars bölgesinin çayır alanlarının verim ve kalite özelliklerinin biçim zamanlarına bağlı olarak değişiminin incelendiği bir çalışmada ise 2-12 Temmuz tarihlerinde en fazla yeşil ve kuru madde verimi elde edildiği, vejetasyon ilerledikçe NDF, ADF ve ham selüloz oranlarının arttığı ve ham protein oranının önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir [8]. Kırklareli yöresinde çayır alanlarının biçim zamanlarının verim ve bazı besin elementleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, yeşil ot verimi, kuru ot verimi, ham protein oranı, N, P, Ca, Fe, Zn, Mg, S Cu, Cd, Pb ve Mn içerikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, çalışma alanına baklagil yem bitkilerinin botanik kompozisyona ilave edilmesinin gerektiği, Mayıs ayının ikinci yarısının verim ve kalite açısından ideal biçim zamanı olduğu ve çayır otunun incelenen ağır metal içerikleri yönünden herhangi bir kirliliğe rastlanmadığı sonucuna varılmıştır [9]. Iğdır ovasında yapılan bir çalışmada, çayır ve mera alanlarında uygulanabilecek ideal ıslah yönteminin belirlenmesi ve uygulanabilmesi için, öncelikle mevcut vejetasyon yapısının tür bileşiminin ortaya konulması gerektiği bildirilmiş ve çalışmanın yürütüldüğü alanda tür bileşiminin familya bazında önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir [10].

Türkiye İstatistik Kurumu 2022 yılı verilerine göre Ülkemiz toplam tarım alanları 38.4 milyon hektar olup, bu alanın 14.6 milyon hektarı çayır ve mera alanlarından oluşmaktadır [11]. Bu 14.6 milyon hektarın ise 1.4 milyonu çayır alanıdır. Doğu Anadolu Bölgesi, 751.086 ha çayır alanı ile en fazla çayır alanına sahip olan bölgedir.

Bingöl ilinin sahip olduğu çayır alanı ise 30.000 ha'dır [12]. Bingöl ili hayvancılık açısından zengin doğal çayır ve mera alanlarına sahiptir. Çalışma, Bingöl il merkezine bağlı Kılçadır köyüne ait çayır alanlarının sahip olduğu ot verimi ve ot kalitesinin belirlenmesi ve bu alanların verim ve kalite açısından karşılaştırılması amacıyla yürütülmüştür.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma ile ilgili arazi çalışması, Kılçadır köyü (Bingöl/Merkez) sınırları içerisinde yer alan çayır alanlarında, 2022 yılının Mayıs ayı içerisinde yürütülmüştür. Kılçadır köyündeki bu sekiz adet parsel ile hemen hemen köyün bütün çayır alanları ele alınmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü çayır alanları ve parsel bilgileri Tablo 1 ve Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kılçadır köyü çayır alanlarına ait bazı bilgiler

Nitelik	Mevkii	Parsel No	Alan (m^2)
Çayır	Kılçadır Köyü	190/5	11,828
Çayır	Kılçadır Köyü	190/6	7,097
Çayır	Kılçadır Köyü	190/7	7,150
Çayır	Kılçadır Köyü	190/9	5,100
Çayır	Kılçadır Köyü	207/5	3,435
Çayır	Kılçadır Köyü	207/9	4,141
Çayır	Kılçadır Köyü	208/2	4,534
Çayır	Kılçadır Köyü	208/3	7,178



Şekil 1. Çalışma alanındaki çayır parselleri

Bingöl Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden elde edilen Bingöl iline ait uzun yıllar ve 2022 yılına ait iklim verileri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.**2.** Bingöl ilinin uzun yıllar ve 2022 yılına ait iklim verileri

Aylar	Aylık Ortalama Sıcaklık (^{0}C)		Aylık Toplam Yağış (mm)		Aylık Nispi Nem (%)	
	2022	Uzum Yıllar	2022	Uzum Yıllar	2022	Uzum Yıllar
1.Ocak	-2.2	-2.3	191.5	139.4	75.4	72.7
2.Şubat	1.8	-1.1	82.4	128.7	71.9	71.8
3.Mart	1.9	4.2	259.7	129.8	71.1	66.9
4.Nisan	13.9	10.8	90.7	116.4	45.2	62.1
5.Mayıs	15.1	16.3	99.0	76.2	56.2	56.0
6.Haziran	23.0	22.0	22.0	20.6	40.3	43.5
7.Temmuz	27.0	26.7	0.0	7.0	29.2	35.5
8.Ağustos	27.8	26.5	0.0	4.2	26.4	34.5
9.Eylül	22.5	21.3	5.3	12.6	30.9	40.3
10.Ekim	16.6	14.3	19.6	65.4	47.1	56.1
11.Kasım	8.4	6.8	91.0	105.9	69.1	67.5
12.Aralık	5.1	0.7	9.6	134.3	71.3	74.2
Ort./Toplam	13.4	12.2	870.8	940.5	52.8	56.7

İklim verileri incelendiğinde, çalışmanın yapıldığı 2022 yılına ait sıcaklık ortalaması 13.4 ^{0}C, toplam yağış 870.8 mm ve nispi nem değeri de %52.8 olarak ölçülmüştür. Çalışmanın yapıldığı 2022 yılı ve uzun yıllara ait iklim değerleri karşılaştırıldığında, 2022 yılının uzun yıllara ait ortalamalara göre daha sıcak, yağış miktarı ve nispi nem değerlerinin de düşük olduğu görülmüştür.

Her parselin farklı noktalarından ve 0-30 cm derinlikten toprak örnekleri alınıp, karıştırılarak analiz için numune oluşturulmuştur. Bu numune üzerinden yapılan analiz sonuçlarına göre; toprak yapısının killi-tınlı

(%58.4), hafif alkali (pH: 7.27), tuzsuz (%0.008), az kireçli (%2.18), organik madde içeriği iyi (%4.01), alınabilir fosfor oranı az (3.42 kg/da) ve alınabilir potasyum oranı yüksek (42.23 kg/da) olarak belirlenmiştir.

Çayır alanında hasat işlemi 18 Mayıs 2022 tarihinde yapılmıştır. İlk önce çayır alanını temsil edecek nitelikte her parsele üç adet 50 cm x 50 cm ebatlarında kuadrat çerçeve içerisinde kalan 10 adet bitkinin boyu ölçülerek, çayır alanındaki hakim bitkiler için ortalama doğal bitki boyu hesaplanmıştır [13]. Çayır alanını temsil edecek nitelikte belirlenen her çayır parseline üç adet 50 cm x 50 cm ebatlarında kuadrat çerçeve yardımıyla bitki örnekleri toprak seviyesinden biçilip, tartılarak ve ortalaması alınarak dekar başına yeşil ot verimi hesaplanmıştır [14]. Yeşil ot verimi hesaplandıktan sonra örneklerinden 0.5 kg alınıp, oda koşullarında bir gün bekletilmiştir. Bu örnekler, daha sonra 70 ^{0}C'de 48 saat kurutulduktan sonra 24 saat bekletilmiş ve daha sonra tartım yapılmıştır. Tartım sonucu elde edilen oran, yeşil ot verimi ile çarpılarak dekara kuru ot verimi hesaplanmıştır [14]. 50 cm x 50 cm çerçeve içerisinde kalan bitkiler buğdaygil, baklagil (+geniş yapraklılar) ve diğer familya bitkileri olacak şekilde üç farklı gruba ayrılmıştır. Her gruptaki bitkilerin, toplam ağırlığa oranı, ağırlığa göre botanik kompozisyon oranı olarak belirlenmiştir [14]. Çerçeveler içerisinde biçimi yapılan ve yaygın olarak karşılaşılan bitki türlerine bir numara verilerek örnekleri alınmıştır. Bu türlerin teşhisleri, Serin vd. (2005; 2008) [15, 16]'ne göre yapılmıştır.

Çayır otunun ham protein oranı, near infrared spectroscopy (NIRS) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kuru otun ham protein içeriği, dekara elde edilen kuru ot verimi ile çarpılmış ve böylece dekar başına ham protein verimi belirlenmiştir. Ayrıca, çayır otunun NDF, ADF, P, K, Ca ve Mg oranları da yine NIRS cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Çayır otunun SKM, KMT ve NYD ise ADF ve NDF değerleri kullanılarak aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır:

Sindirilebilir kuru madde = 88,9 - (0,779 x %ADF), Kuru madde tüketimi = 120 / %NDF, Nispi yem değeri = (SKM x KMT) / 1.29 [17].

Elde edilen verilere JMP istatistik paket programı vasıtasıyla LSD testi uygulanarak, parseller arasındaki farklılık ve benzerlikler karşılaştırılmıştır [18].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot verimleri

Çayır parsellerinde elde edilen bitki boyu, yeşil ot verimi ve kuru ot verimine ait ortalama değerler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere bitki boyu, yeşil ve kuru ot verimleri açısından parseller arasında ortaya çıkan farklılıkların istatistiksel olarak önemli olduğu gözlenmektedir.

Tablo 3. Çayır parsellerinde tespit edilen bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimine ait ortalama değerler

Parseller	Bitki Boyu (cm)	Yeşil Ot Verimi (kg/da)	Kuru Ot Verimi (kg/da)
190/5	44.6 ab*	2362 a**	507 a
190/6	51.3 a	2600 a	552 a
190/7	40.0 ab	1800 bc	408 b
190/9	34.1 b	1779 bc	367 b
207/4	42.8 ab	1808 bc	355 b
207/5	37.2 ab	1491 c	330 b
207/9	43.3 ab	1701 bc	365 b
208/3	46.7 ab	1885 b	405 b
Ortalama	**42.5**	**1928**	**411**
CV (%)	**12.70**	9.96	10.73

*: P≤0.05, **: P≤0.01.

Çayır parsellerinde bitki boylarının 34.1-51.3 cm, yeşil ot veriminin 1491-2600 kg/da ve kuru ot verimlerinin 330-552 kg/da arasında değişim gösterdiği görülmüştür. En yüksek bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot veriminin 190/5 ve 190/6 numaralı parsellerden elde edildiği görülmüştür. Geriye kalan diğer parseller, yeşil ve kuru ot verimi açısından en düşük değeri veren parseller (190/7, 190/9, 207/4, 207/5, 207/9, 208/3) olmuştur.

Demirkuş vd. [19] Van bölgesi çayırlarında bitki boyunu 15-130 cm, yeşil ot verimini 732-3100 kg/da, kuru ot verimini 173-868 kg/da, Güllap vd. [7] Erzurum çayırlarında kuru ot verimini 469.1 kg/da, Altınok [20] Erzurum ili Narman ilçesi çayırlarında kuru ot verimini 352.3 kg/da, Çaçan ve Arslan [21] Bingöl ili çayırlarında

bitki boyunu 39-70 cm ve Akdeniz [22] Trabzon ili Düzköy çayırlarında yeşil ot verimini 2450-3275 kg/da olarak tespit etmişlerdir. Araştırmacılar tarafından elde edilen bu bulgular, mevcut çalışma bulguları ile büyük oranda benzerlikler göstermektedir.

B. Baklagillerin, Buğdaygillerin ve Diğer Familya Bitkilerinin Oranları

Çayır parsellerinde bulunan bitkilerin ağırlığa göre botanik kompozisyonda baklagil, buğdaygil ve diğer familya bitkileri oranlarına ait değerler Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'te görüldüğü üzere çayır parsellerinde tespit edilen baklagil, buğdaygil ve diğer familya bitkileri oranları arasındaki farklılıkların istatistiki açıdan önem arz ettiği görülmektedir.

Çayır parsellerinde baklagiller %14.7-28.1, buğdaygiller %27.0-74.0 ve diğer familya bitkileri %11.3-53.4 oranları arasında, ağırlığa göre botanik kompozisyona katılım göstermişlerdir. En yüksek baklagil oranları 208/3 numaralı parselden elde edilmiştir. Onu sırasıyla 207/5, 207/9 ve 190/9 numaralı parseller takip etmektedir. En düşük ağırlığa göre botanik kompozisyonda baklagil oranları ise 190/6 ve 190/7 numaralı parsellerden elde edilmiştir. En yüksek buğdaygil oranları 190/6 ve 190/7 numaralı parsellerden, en düşük buğdaygil oranları ise 207/4 ve 190/9 numaralı parsellerden elde edilmiştir. En yüksek diğer familya bitkileri oranı 207/4 numaralı parselden, en düşük oran ise 190/6, 190/7 ve 208/3 numaralı parsellerden elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Çayır parsellerinin baklagil, buğdaygil ve diğer familya bitkileri oranları ve ortalamaları (%)

Parseller	Baklagiller	Buğdaygiller	Diğer Familya Bitkileri
190/5	18.2 bc**	58.9 b**	23.0 d**
190/6	14.7 c	74.0 a	11.3 e
190/7	15.2 c	73.3 a	11.5 e
190/9	22.9 ab	33.6 d	43.5 b
207/4	16.6 bc	27.0 d	53.4 a
207/5	23.1 ab	54.5 bc	22.4 d
207/9	23.0 ab	46.4 c	30.6 c
208/3	28.1 a	58.4 b	13.5 e
Ortalama	**20.6**	**53.3**	**26.1**
CV (%)	15.10	10.00	15.51

**: P≤0.01.

Gökkuş [23] Atatürk Üniversitesi çayır arazilerinde botanik kompozisyonda %26,5 baklagil, %68.77 buğdaygil ve %4.7 diğer familya bitlileri, Akdemir [24] Van ili Edremit ilçesinde çayır alanlarında botanik kompozisyonda %36,71 baklagil, %33.66 buğdaygil ve %56.56 diğer familya bitkileri, Küpe [25] Erzurum çayır alanlarında botanik kompozisyonda %24,9 baklagil, %52.8 buğdaygil ve %21.8 diğer familya bitkileri, Akdeniz [22] Trabzon ili çayır alanlarında botanik kompozisyonda %12 baklagil, %73 buğdaygil ve %15 diğer familya bitkileri oranları elde etmişlerdir. Araştırma bulguları, daha önce yapılan bu çalışmaların bir kısmı ile benzerlikler gösterirken, bir kısmı ile farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Çayır alanlarının, sahip oldukları farklı bitki örtüleri doğrultusunda farklı kompozisyonlara sahip olmaları beklenen bir sonuçtur.

C. Ham Protein, ADF ve NDF Oranları ile Ham Protein Verimi

Çayır parsellerinde elde edilen otun ham protein oranı, ham protein verimleri ile ADF ve NDF oranlarına ait ortalamalar ve oluşan guruplar Tablo 5'te verilmiştir. Tablo5'te görüldüğü üzere çayır parsellerinde elde edilen bitkilerin ham protein oranı, verimi ve ADF ile NDF oranları arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir.

Çayır parsellerinde elde edilen otların ham protein oranları %15.6-20.1, ham protein verimleri 55.0-110.8 kg/da, ADF oranları %23.9-28.3 ve NDF oranları %38.6-45.9 arasında değişim göstermiştir. En yüksek ham protein oranı ve verimi 190/5 ve 190/6 numaralı parsellerden elde edilmiştir. 207/5 numaralı parsel hem ADF hem de NDF oranı açısından en düşük değeri veren parsel olmuştur (Tablo 5).

Gökkuş [26] Erzurum çayır alanlarında yaptığı bir çalışmada ham protein oranını %8.52, ham protein verimini 46.70-80.20 kg/da, Akdemir [24] Van ili çayır alanlarında yaptığı bir çalışmada ham protein oranını %12.38-17.34, ham protein verimini 70.98 kg/da, Arslan ve Tufan [8] Kars ili çayır alanlarında yaptığı çalışmada ham protein oranlarını %9.14-13.94, Altınok [20] Erzurum'un Narman ilçesinde yaptığı bir çayır

çalışmasında ham protein oranını %8.29, Çaçan ve Arslan [21] Bingöl ili çayır alanlarında ham protein oranını %13.1-13.4 arasında tespit etmişlerdir. Bu çalışmada 190/5, 190/6 ve 190/7 numaralı parsellerde baklagil oranı düşük olmasına rağmen (Tablo 4), en yüksek ham protein oranlarının elde edildiği görülmektedir (Tablo 5). Normal şartlarda baklagil oranının yüksek olduğu parsellerde daha yüksek ham protein oranı elde edilmesi gerekirken, burada tersi bir durumun söz konusu olduğu görülmektedir. 190/5, 190/6 ve 190/7 numaralı parsellerde baklagil oranı az, buğdaygiller oranının yüksek olması ve yüksek oranda bulunan bu buğdaygillerin de büyük oranda hayvan besleme açısından kıymetli olan ve etki grubu açısından azalıcı nitelikte olan *Dactylis glomerata* ve *Poa pratensis* gibi nitelikli bitkilerin bu parsellerde yoğun bir şekilde bulunmasından dolayı böyle bir durumun ortaya çıktığı ön görülmektedir. Nitekim *Dactylis glomerata* bitkisinin vejetatif olarak sapa kalkma dönemlerinde ham protein oranının %25.20'lere kadar çıkabildiği Can ve Ayan (2017) [27] tarafından bildirilmiştir.

Tablo 5. Çayır parsellerinin ham protein, ADF, NDF oranları ve ham protein verimlerine ait ortalama değerler

Parseller	Ham Protein Oranı (%)	Ham Protein Verimi (kg/da)	ADF Oranı (%)	NDF Oranı (%)
190/5	18.5 ab**	93.8 a**	27.1 ab*	41.1 ab*
190/6	20.1 a	110.8 a	26.6 abc	40.7 ab
190/7	18.1 ab	73.3 bc	28.2 a	44.5 ab
190/9	16.7 b	60.9 bcd	25.1 bc	41.5 ab
207/4	15.6 b	55.0 d	28.3 a	44.2 ab
207/5	17.9 ab	59.2 bcd	23.9 c	38.6 b
207/9	15.7 b	57.0 cd	28.3 a	45.9 a
208/3	18.5 ab	74.5 b	26.4 abc	41.1 ab
Ortalama	**17.7**	**73.1**	**26.8**	**42.2**
CV (%)	5.7	5.6	5.8	5.3

*: P≤0.05, **: P≤0.01.

Arslan ve Tufan [8] Kars yöresi çayırlarında ADF oranlarını %33.7-39.77, NDF oranını %48.23-53.77, Küpe [25] Erzurum yöresi çayır alanlarında ADF oranını %40.60-44.60, NDF oranını %65.8-68.70, Altınok [20] yine Erzurum yöresi çayırlarında ADF oranını %36.95, NDF oranını %55.98, Çaçan ve Arslan [21] Bingöl yöresi çayırlarında ADF oranını %34.9-35.9, NDF oranını %47.3-48.9 aralığında tespit etmişlerdir. Mevcut çalışmadan elde edilen bulgular, araştırmacılar tarafından bildirilen ham protein oranlarından yüksek, araştırmacılar tarafından bildirilen ADF, NDF oranlarından ise düşük olarak elde edilmiştir. Bu farklılıkların nedeni mevcut çayır alanında bulunan bitki türlerinin farklılığının yanı sıra erken veya geç yapılan biçimlerden ileri geldiği düşünülmektedir. Erken yapılan biçimlerde ham protein oranı yüksek, ADF ve NDF oranları düşük, geç yapılan biçimlerde ise ham protein oranı düşük, ADF ve NDF oranları daha yüksek olarak elde edilmektedir.

D. SKM, KMT Oranları ile Nispi Yem Değeri

Çayır parsellerinde elde edilen otun SKM ve KMT oranları ile nispi yem değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da izlendiği gibi çayır parsellerinde elde edilen otun SKM ve KMT oranları ile nispi yem değerleri arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6'da görüldüğü üzere çayır parsellerinde elde edilen otun sindirilebilir kuru madde oranları %66.9-70.4, kuru madde tüketim oranları %2.62-3.11 ve nispi yem değerleri 135.6-170.0 arasında değişim göstermiştir. En yüksek SKM, KMT ve NYD 207/5 numaralı parselden elde edilirken, bu özellikler açısından en düşük değerler 207/9 numaralı parselden elde edilmiştir. En yüksek SKM, KMT ve NYD'nin 207/5 numaralı parselden elde edilmesinin nedeni bu alanlardan, en düşük ADF ve NDF oranlarının elde edilmesidir. Bu parselde ADF ve NDF oranlarının düşük olmasının sebebi de bu alanda baklagil ve buğdaygil oranlarının dengede, diğer familya bitkileri oranının da düşüklüğünden ileri gelmektedir.

Daha önce çayırlarda yapılan çalışmalarda; Altınok [20] SKM oranını %61.40, KMT oranını %2.14 ve nispi yem değerini 99.05, Gürsoy ve Macit [28] SKM oranını %60.36-70.75, KMT oranını %1.85-3.59 ve nispi yem değerini 86.75-197.04 olarak tespit etmişlerdir. Araştırmacılar tarafından elde edilen bu bulguların, mevcut çalışma buluğlarını destekler nitelikte olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Çayır parsellerinde elde edilen bitkilerin SKM, KMT oranları ve nispi yem değerleri

Parseller	SKM (%)	KMT (%)	NYD
190/5	67.9 bc*	2.95 ab*	155.4 ab*
190/6	68.3 abc	2.97 ab	156.9 ab
190/7	67.0 c	2.70 ab	140.2 ab
190/9	69.4 ab	2.90 ab	155.7 ab
207/4	66.9 c	2.72 ab	141.0 ab
207/5	70.4 a	3.11 a	170.0 a
207/9	66.9 c	2.62 b	135.6 b
208/3	68.4 abc	2.93 ab	155.1 ab
Ortalama	**68.2**	**2.86**	**151.3**
CV (%)	1.8	5.6	7.4

*: P≤0,05.

E. P, K, Ca ve Mg Oranları

Çayır parsellerinin P, K, Ca ve Mg içerikleri Tablo 7'de verilmiştir. Çayır parsellerinde elde edilen otun P, K ve Mg içerikleri arasındaki farklılıklar istatistiki açıdan önemli, Ca içerikleri arasındaki farklılıklar ise önemsiz bulunmuştur.

Tablo 7. Çayır parsellerinde elde edilen bitkilerin P, K, Ca ve Mg içeriklerine ait ortalama değerler

Parseller	Fosfor (%)	Potasyum (kg/da)	Kalsiyum (%)	Magnezyum (%)
190/5	0.33 ab**	2.28 ab*	1.51 öd	0.40 ab*
190/6	0.35 a	2.17 bc	1.61	0.43 a
190/7	0.35 a	2.32 a	1.48	0.38 ab
190/9	0.27 c	2.23 abc	1.62	0.42 ab
207/4	0.30 bc	2.24 abc	1.50	0.42 ab
207/5	0.33 ab	2.32 a	1.48	0.37 b
207/9	0.30 bc	2.13 c	1.43	0.38 ab
208/3	0.31 ab	2.20 abc	1.56	0.39 ab
Ortalama	**0.32**	**2.24**	**1.53**	**0.40**
CV (%)	4.7	3.3	5.0	5.5

*: P≤0.05, **: P≤0.01.

Çayır parsellerinin P oranları %0.27-0.35, K oranları %2.13-2.32, Ca oranları %1.43-1.62 ve Mg oranları %0.37-0.43 arasında değişim göstermiştir. Kalsiyum içeriği açısından parseller arasında bir farklılığın olmadığı, en yüksek fosfor oranının 190/6 ve 190/7 numaralı parsellerden, en yüksek potasyum oranının 190/7 ve 207/5 numaralı parsellerden ve en yüksek magnezyum içeriğinin de 207/5 numaralı parsel dışındaki diğer tüm parsellerden elde edildiği görülmüştür.

Muller [29] mera karışımlarında minimum P oranının %0.29, K oranının %3.0, Ca oranının %1.0 ve Mg oranının ise %0.24 olması gerektiğini bildirmiştir. Bu açıdan bakıldığında çayır otlarının potasyum içeriğinin düşük, fosfor, kalsiyum ve magnezyum içeriklerinin ise yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

Daha önce çayırlarda yapılan çalışmalarda; Görsoy ve Macit [30] P oranını %1.16-1.28, K oranını %0.70-2.69, Ca oranını %0.56-1.61 ve Mg oranını %0.11-0.51 aralığında tespit etmiştir. Çaçan ve Arslan [21] P oranını %0.26-0.27, K oranını %0.94-0.97, Ca oranını %1.16-1.22 ve Mg oranını %0.37-0.38 olarak tespit etmiştir. Elde edilen sonuçların, araştırmacılar tarafından elde edilen sonuçlar ile büyük oranda benzerlikler gösterdiği görülmüştür.

F. Çayır Alanında Tespit Edilen Yaygın Bitki Türleri

Çayır alanında tespit edilen bitkilerin familyaları, tür adları, Türkçe adları, grupları ve ömürleri Tablo 8'de verilmiştir. Arazi çalışması sırasında 15 familyaya ait toplam 32 farklı bitki türü tespit edilmiştir. Bu türlerinden 10 tanesinin baklagiller, 6 tanesinin buğdaygiller ve 16 tanesinin de diğer familya bitkilerine ait olduğu görülmüştür. Bitki türlerinin 7'sinin azalıcı, 2'sinin çoğalıcı ve geriye kalan 23'ünün de istilacı nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu bitki türlerinden 10 tanesinin tek yıllık, 22 tanesinin de çok yıllık olduğu belirlenmiştir (Tablo 8).

Tablo Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.**8**. Çayır parsellerinde yaygın olarak tespit edilen bitki türleri

Familyası	Tür Adı	Türkçe Adı	Grubu	Ömrü (Tek/Çok)
Fabaceae	*Coronilla varia* L.	Taç otu	Çoğalıcı	Çok
"	*Vicia cracca* L.	Kuş fiği	Azalıcı	Çok
"	*Melilotus officinalis* (L.)	Sarıtaş yoncası	İstilacı	Çok
"	*Vicia pannonica* Crantz	Macar fiği	İstilacı	Tek
"	*Lotus corniculatus* L.	Gazel boynuzu	Azalıcı	Çok
"	*Trifolium resupinatum* L.	Anadolu üçgülü	İstilacı	Tek
"	*T. campestre* Schreb.	Kır üçgülü	İstilacı	Tek
"	*T. pratense* L	Çayır üçgülü	Azalıcı	Çok
"	*T. repens* L.	Ak üçgül	Azalıcı	Çok
"	*Medicago* sp.	Yonca	Azalıcı	Çok
Poaceae	*Bromus* sp.	Brom	İstilacı	Çok
"	*Dactylis glomerata* L.	Domuz ayrığı	Azalıcı	Çok
"	*Poa pratensis* L.	Çayır salkımotu	Azalıcı	Çok
"	*Secale* sp.	Çavdar	İstilacı	Çok
"	*Hordeum murinum* L.	Pisipisi otu	İstilacı	Tek
"	*Taeniatherum caput-medusae* (L.)	Kılçık arpası	İstilacı	Tek
Amaranthaceae	*Amaranthus albus* L.	Horoz ibiği	İstilacı	Tek
Asparagaceae	*Ornithogalum narbonense* L.	Tükrük otu	İstilacı	Çok
"	*Muscari neglectum* Guss. ex Ten.	Dağ sümbülü	İstilacı	Çok
Asteraceae	*Anthemis altissima* L.	Tarla papatyası	İstilacı	Tek
"	*Anthemis* sp.	Papatya	İstilacı	Tek
Boraginaceae	*Myosotis* sp.	Unutma beni	İstilacı	Tek
Colchicaceae	*Colchicum szovitsii* Fisch. & C.A.Mey.	Katır çiğdemi	İstilacı	Çok
Compositae	*Achillea arabica* Kotschy	Civan perçemi	İstilacı	Çok
Convolvulaceae	*Convolvulus arvensis* L.	Tarla sarmaşığı	İstilacı	Çok
Geraniaceae	*Geranium dissectum* L.	Turna gagası	İstilacı	Çok
Juncaceae	*Juncus* sp.	Hasır otu	İstilacı	Çok
Plantaginaceae	*Plantago lanceolata* L.	Sinir otu	Çoğalıcı	Çok
Ranunculaceae	*Ranunculus arvensis* L.	Düğün çiçeği	İstilacı	Tek
"	*R. constantinopolitanus* (DC.)	Düğün çiçeği	İstilacı	Çok
Rosaceae	*Potentilla reptans* L.	Beşparmak otu	İstilacı	Çok
Typhaceae	*Typha* sp.	Hasır otu	İstilacı	Çok

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bingöl il merkezine bağlı Kılçadır köyü çayır alanlarında yürütülen bu araştırmada; çayır alanlarının ot verimi, ağırlığa göre botanik kompozisyonu, ot kalitesi ve otun makro besin element içerikleri ele alınmıştır. İncelenen özelliklerin büyük çoğunluğunun parseller arasında istatistiksel olarak önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde; Kılçadır köyü çayır alanlarının incelenen özellikler açısından yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Dolayısıyla verim ve kalite özellikleri açısından incelenen bu çayır alanlarının tatminkâr sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Çayır alanları kendi içerisindeki parseller arasında da önemli farklılıklar göstermiştir. Parseller açısından da bakıldığında, ot verimi ile ham protein oranı ve verimi açısından 190/5 ve 190/6 numaralı parsellerin, sindirilebilir kuru madde, kuru madde tüketimi ve nispi yem değeri açısından ise 207/5 numaralı parselin ön plana çıktığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Tükel, T., & Hatipoğlu, R. (2017). *Çayır-Mera Amenajmanı*. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Genel Yayın No: 191, Ders Kitapları Yayın No: A-59, Adana.
[2] Ekiz, H. (2017). *Çayır ve Mera Yönetimi.* https://acikders.ankara.edu.tr/1760, Ankara.
[3] Altın, M., Gökkuş, A., & Koç, A. (2011). *Çayır ve Mera Yönetimi Cilt:1*. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Tarımsal Üretim ve Geliştirme Gene Müdürlüğü, 24-31, Ankara.
[4] Soya, H., Avcıoğlu, R., & Geren, H. (2004). *Yem Bitkileri*. Hasad Yayıncılık, 22, İstanbul.
[5] Kara, A., Çakal, Ş., Tavlaş, A., Aygün, C., & Avağ, A. (2009). Kuzeydoğu Anadolu'da çayır ve mera kullanımı ile ilgili alışkanlıklar ve problemler. *Alınteri Zirai Bilimleri Dergisi, 16*(1), 7-18.
[6] Şimşek, U., Çakal, Ş., Özgöz, M.M., Sürmen, M., Aksakal, E., Dumlu, S. (2005). Erzurum Çat İlçesi Doğal Çayırlarının Verim ve Toprak Özelliklerinin Belirlenmesi. *Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi* 5-9 Eylül, 851-856.
[7] Güllap, M. K., Erkovan, H. İ., Daşçı, M., Koç, A., & Alatürk, F. (2009). Fosforlu Gübre ve Fosfor Çözücü Bakteri (*Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*) Uygulamalarının Çayırların Verim ve Kompozisyonuna Etkisi. *Türkiye VIII Tarla Bitkileri Kongresi* 19-22 Ekim, 590-591.
[8] Arslan, C., & Tufan, T. (2011). Kars yöresinde farklı tarihlerde biçilen çayırların verim özellikleri, besin madde içerikleri ve en uygun biçim tarihlerinin belirlenmesi. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi, 6*(2), 131-138.
[9] Doğan, A. (2011). *Kırklareli ili Pehlivanköy ilçesi Yeşilpınar Köyü doğal çayır vejetasyonunda farklı biçim zamanlarının verim potansiyeli ve bazı besin elementlerine etkisi.* Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Tekirdağ.
[10] Temel, S., Şimşek, U., Erdel, E., Tohumcu, F., & Gökmen, F. (2016). Farklı toprak özelliklerinin taban çayırların floristik kompozisyonu üzerine etkisi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi, 25*(Özel sayı-2), 168-173.
[11] TÜİK (2024). Türkiye İstatistik Kurumu. http://www.tuik.gov.tr, (31.01.2024).
[12] Özkurt, M. (2020). Türkiye, Doğu Anadolu bölgesi ve Muş ilinde çayır-mera yem bitkileri ve hayvancılığın bugünkü durumu. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 8*(10), 2191-2201.
[13] Tarhan, H., & Çaçan, E. (2020). Bingöl İlinde mera verim ve kalitesinin yöneylere bağlı olarak aylık değişimi ve otlatmaya başlama zamanının belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8*(1), 110-122.
[14] Çaçan, E., & Başbağ, M. (2016). Bingöl İli Merkez İlçesi Yelesen-Dikme Köylerinin farklı yöney ve yükseltilerde yer alan mera kesimlerinde botanik kompozisyon ve ot veriminin değişimi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 53*(1), 1-9.
[15] Serin, Y., Zengin, H., Tan, M., Koç, A., & Erkovan, H. İ. (2005). *Çayır ve Mera Bitkileri Kılavuzu.* Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
[16] Serin, Y., Tan, M., Koç, A., & Zengin, H. (2008). *Türkiye'nin Çayır ve Mera Bitkileri.* Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Çayır, Mera, Yem Bitkileri ve Havza Geliştirme Daire Başkanlığı, Ankara.
[17] Morrison, J. A. (2003). *Hay and Pasture Management, Chapter 6*. Illinois Agronomy Handbook, 72.
[18] Açıkgöz, N., & Açıkgöz, N. (2001). Tarımsal araştırmaların istatistiki değerlendirilmesinde yapılan bazı hatalar: I. Tek faktörlü denemeler. *Anadolu, 11*(1), 135-147.
[19] Demirkuş, T., Demirkuş, N., & Beşkaya Gül, S. (2005). Farklı dönemlerde biçilen Van yöresi çayırlarının botanik yapısı, silolanma özellikleri ve yem değerlerinin belirlenmesi. TÜBİTAK Projesi, PROJE NO: VHAG-1849 (101V140), 12-84.
[20] Altınok, Z. (2015). *İlkbahar otlatmasının çayır vejetasyonun ot verimi ve kalitesi üzerine etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Erzurum, 15-21.
[21] Çaçan, E., & Arslan, İ. (2020). *Ranunculus constantinopolitanus* bitkisinin bazı bitkisel özellikleri, beslenme değeri ve tohumlarına ait çimlenme oranlarının belirlenmesi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8*(7), 1553-1558.
[22] Akdeniz, H. (2022). Trabzon-Düzköy ilçesi yayla çayırlarının floristik yönden incelenmesi. *Journal of Agriculture, 5*(2), 34-49.
[23] Gökkuş, A. (1990). Gübreleme sulama ve otlatma uygulamalarının Erzurum ovasındaki çayırların kimyasal ve botanik kompozisyonlarına etkileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 21*(2), 7-24.
[24] Akdemir, H. (1996). *Van şartlarında doğal çayırların farklı biçim dönemlerinde ot verimi, otun besleme değeri ve botanik kompozisyonunun tespiti üzerine bir araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Van.

[25] Küpe, F. (2013). *Kıraç ve taban meralar ile çayırların botanik kompozisyon ot verimi ve kalitelerinin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, Erzurum.

[26] Gökkuş, A. (1989). Gübre ve herbisit uygulamalarının ot ve ham protein verimleriyle botanik kompozisyonlarına etkileri. *Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi, 20*(1), 65-70.

[27] Can, M., & Ayan, İ. (2017). Domuz ayrığı (*Dactylis glomerata* L.) popülasyonlarında gelişme dönemlerine göre verim ve bazı özelliklerin değişimi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 20*(2), 160-166.

[28] Gürsoy, E. & Macit, M. (2017a). Erzurum ili çayır ve meralarında doğal olarak yetişen bazı buğdaygil yem bitkilerinin nispi yem değerleri bakımından karşılaştırılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 27*(3), 309-317.

[29] Muller, L. D. (2023*). Dietary Minerals for Dairy Cows on Pasture*. https://extension.psu.edu/dietary-minerals-for-dairy-cows-on-pasture, (09.11.2023).

[30] Gürsoy, E., & Macit, M. (2017b). Erzurum ili çayır ve meralarında doğal olarak yetişen bazı baklagil ve buğdaygil yem bitkilerinin mineral madde kompozisyonlarının belirlenmesi. *Alinteri Journal of Agriculture Science, 32*(1), 1-9.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 70-80, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1446441
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Application of Monitoring and Controlling of Water Storage Tanks, Pumps, and pH Value in Industrial Areas Based on Industrial Internet of Things

Endüstriyel Alanlarda Su Depolarının, Pompaların ve pH Değerinin İzlenmesi ve Kontrol Edilmesine Yönelik Endüstriyel Nesnelerin İnterneti Tabanlı Uygulama

Hayati Mamur[1*], Harun Şentürk[2], Mohammad Ruhul Amin Bhuiyan [3]

Geliş / Received: 03/03/2024 ***Revize / Revised: 02/05/2024*** ***Kabul / Accepted: 08/05/2024***

ABSTRACT

In this study, the control and monitoring of 110 kW water motors in 4 water wells at different distances from each other, the monitoring of 500-ton water tanks and additionally the monitoring pH value of the rainwater log of a chemical factory have been carried out. In the application, 9 Raspberry Pi 3 embedded system boards based on the Industrial Internet of Things (IIoT) have been utilized. The sensor data have been taken with the developed analog digital converters (ADCs) and collected in the open-source InfluxDB database with embedded system cards. These data have been visualized in a computer setup the open-source supervisory control and data acquisition system (SCADA) Grafana software. Thus, the IIoT application of a large system has been fulfilled cost-effectively by using Raspberry Pi 3 embedded system boards, open-source InfluxDB and Grafana software.

Keywords- IIoT, Raspberry Pi, InfluxDB, Grafana, Embedded System

ÖZ

Bu çalışmada, birbirinden farklı mesafelerdeki 4 adet su kuyusunda bulunan 110 kW'lık su motorlarının kontrolü ve izlenmesi, 500 tonluk su depolarının izlenmesi ve ayrıca bir kimya fabrikasının yağmur suyu giderinin pH değerinin izlenmesi yapılmıştır. Uygulamada, Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) tabanlı 9 adet Raspberry Pi 3 gömülü sistem kartı kullanılmıştır. Farklı alanlardaki sensör verileri, geliştirilen analog dijital dönüştürücüler (ADC) ile alınmış ve gömülü sistem kartları ile açık kaynaklı InfluxDB veri tabanında toplanmıştır. Bu veriler, açık kaynaklı yönetici kontrol ve veri toplama sistemi (SCADA) Grafana yazılımı olan bir bilgisayar kurulumunda görselleştirilmiştir. Böylece Raspberry Pi 3 gömülü sistem kartları, açık kaynaklı InfluxDB ve Grafana yazılımı kullanılarak büyük bir sistemin IIoT uygulaması maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler- IIoT, Raspberry Pi, InfluxDB, Grafana, Gömülü Sistem

[1]*Corresponding Author Contact: hayati.mamur@cbu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-7555-5826)
Department of Electrical and Electronics Engineering, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Türkiye
[2]Contact: harunsenturk88@gmail.com (https://orcid.org/0000-0001-5680-4057)
Private Manisa Industrial Organized Region Vocational and Technical Anatolian High School, Manisa, Türkiye
[3]Contact: mrab_eee@iu.ac.bd (https://orcid.org/0000-0001-7335-4158)
Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic University, Kushtia, 7003, Bangladesh

I. INTRODUCTION

The use of water and steam technologies in industry is called Industry 1.0. Later, with the use of electrical energy, people's work became easier, and this was described as Industry 2.0. Industry 3.0 has entered working life with digitalization using information technologies. The spread of these computer technologies in the industry has occurred at a faster pace than other developments. Almost all machines have become computerized, allowing production to be faster, more efficient, and less expensive. A new era has begun with the use of the internet around the world. It has become very easy for people to communicate with each other. The rapid dissemination of news and information has been achieved by creating different platforms and communities. This situation has brought about the transfer of machine and process information in the industry via the internet. Thus, it was possible to intervene in machines and processes from remote locations. This concept is expressed as Industry 4.0.

Transferring the information of machines and processes to the internet using wireless networks has led to the formation of a new concept, the Internet of Things (IoT). If these objects are in an industrial environment, the transfer of their data to the internet and the possibility of remotely intervening in these devices and processes are described as Industrial IoT (IIoT) [1]. IIoT systems include interconnected smart power generation plants, industrial production areas, medical applications, and transportation [2]. In IIoT systems, real-time sensor data is transferred to a cloud environment on the internet. These data can be visualized with the Supervisory Control and data Acquisition System (SCADA) and instantly transmitted to operators, engineers, and factory owners. Since the received data can be stored for a long time, retrospective inferences can be made [3]. In addition, information can be obtained about the behavior of the system. Depending on these, artificial intelligence [4], machine learning algorithms [5], and predictive maintenance operations [6] can be performed. As a result, smart factories, smart processes, and smart machines have emerged [7].

One of the most important elements of IIoT systems is embedded system cards. Embedded systems are cheaper electronic cards in the structure of a computer and contain almost all the units found in a computer. Units from embedded systems are assembled into integrated circuits to make microcontrollers. The fact that microcontrollers can be produced more cheaply than embedded systems has enabled these integrated circuits to be used more widely in IIoT systems [8]. While every microcontroller system can be expressed as an embedded system, not every embedded system can be expressed as a microcontroller system. But each of these can be used for IIoT systems. While the units in microcontrollers are quite limited, the units in embedded systems and computers are quite capable.

IIoT has found application opportunities in many areas, from agriculture [9] to health [10], from health to transportation [11], and from transportation to education [12]. Its usage areas are increasing day by day, with a dizzying acceleration [13]. Monitoring the development of a product [14], determining the maintenance status of all agricultural products in a field with image processing devices [15], detecting humidity and temperature in agricultural areas [16], recording them, and intervening remotely when necessary [17]. Today, IIoT can be easily done in the field of agriculture. With the increase in devices with wearable sensor technologies, continuous monitoring of a person's heart condition [18], remote intervention by the patient's doctor [19], monitoring and recording of chronic diseases [20] stand out as applications of IIoT in the field of healthcare. Remote access to this data is based on taking personal privacy into account [21]. In the field of transportation, it is seen that it is used in determining the locations of general vehicles [22], sharing information about how long it takes to reach the destination [23], how many parking spaces there are in a parking area [24], and communicating the road condition to drivers with smart sensors placed on the roads [25]. Monitoring the chemicals in tanks in a chemical factory and analyzing the received data can be used to identify objects passing through the conveyor belt of an industrial process [26]. In addition, it is preferred to deliver the sensor data used to determine the amount of carbon dioxide coming out of factory chimneys to the necessary inspection organizations without any intervention [27]. IIoT is a very good use case for monitoring the status of large-power asynchronous motors located in critical areas of processes and sending alerts to technicians for predictive maintenance. Thus, there will be no interruption in the process, and product production can continue [28].

Factories located in large organized industrial zones do not want the water they use to be interrupted. They also want the quality of the incoming water to be at a certain value. For this purpose, they obtain the necessary permissions in these regions, open water wells, and build water tanks next to them. In addition, they want to keep tight controls on chemical production factories and constantly monitor pH values to prevent water with high pH levels from mixing with rainwater in their region. When an undesirable situation occurs, they take the necessary precautions to be notified immediately.

In this study, IIoT system design and application of four separate water wells in Manisa Organized Industrial Zone (MOIZ) was carried out. In addition, the pH value of hazardous waters that may mix with the rainwater of a factory was monitored with the IIoT system. The data of a system was taken with sensors and transmitted to Raspberry Pi 3 embedded system cards. With these cards, the data was transmitted to the InfluxDB

database and visualized with Grafana to create an IIoT system application. The presentation of the study is made as follows: After a general introduction, "Material" is explained in the second part of the study. "Method" is given in the third section, and "Results" are explained in the fourth section. Finally, "Conclusions" are stated in the fifth chapter.

II. MATERIAL

It is possible to divide the designed and developed IIoT system into several parts. The first of these is a set of nine Raspberry Pi 3 embedded system boards that can work like minicomputers. The second is the analog digital converter (ADC) sensor and relay cards used in receiving and controlling the data of the system developed for the Raspberry Pi 3. Another one is the water pump panel used to control water pumps. The last one is the InfluxDB database, where the data from Raspberry Pi 3 cards are collected, and the Grafana software, which can be called a SCADA, makes the data meaningful and adds visuality to the system.

A. Raspberry Pi 3 embedded system card

The Raspberry Pi has been developed by the Raspberry Pi Foundation to realize minicomputer functions and be used in system controls. It was first used in 2009 to achieve student education purposes and is an open-source embedded system board. Almost all Input/Output (I/O) units installed on a computer can be installed on this controller card. These are I/O systems such as monitors, keyboards, mouse, cameras, and Ethernet lines. With these control cards, image processing can be done precisely thanks to the high-resolution multimedia interface. It contains connectors for Universal Serial Bus (USB) connections. If there is a Wi-Fi network around, this communication makes it possible to send any information to the internet environment [29].

By using the Ethernet port, it is possible to connect to the internet or a different network environment and exchange data. Programming can be done with the C and Python languages, which are embedded system programming languages. At the same time, Linux and Windows operating systems can be installed and run on this card. These operating systems require a micro-static disk (micro-SD) to be used. With the general purpose I/O (GPIO) pins on the Raspberry Pi 3 board, an intermediate integrated circuit (I^2C), universal asynchronous receiver-transmitter (UART), and serial peripheral interface (SPI) communication protocols are possible. It allows both power and data connections to be made via the Ethernet line [30]. In addition, a computer with the Windows operating system can be accessed via a Raspberry Pi main screen monitor with a known Internet Protocol (IP) address by using the Virtual Network Computing (VNC) program.

The Raspberry Pi 3 embedded system board has a Cortex-A53, 1.4 GHz, quad-core, 64-bit supported central processing unit (CPU). Ethernet access is possible with Gigabit Ethernet, 300 MBit/s (USB 2.0). Wi-Fi communication is carried out in 802.11ac, 2.4 GHz, and 5 GHz dual-band. It has 2.0 Bluetooth communication with BLE support. The camera connection is made via a CSI port. The number of GPIOs is 40. There is 1 GB of LPDDR2 SD RAM space. The number of USB ports is 4 and has 2.0 speed. Micro SD can be installed as a storage unit. Due to these mentioned features, using the Raspberry Pi 3 embedded system boards in the IIoT system has provided great convenience.

B. Analog digital convertor

The signals of the transducers used to convert the levels of four 500-ton water tanks into electrical signals are 0.5-4.5 V DC. The output of the pH sensor used to know the pH value of the liquid that is likely to mix with the rainwater of the chemical plant is 4-20 mA. ADC processing is required for the Raspberry Pi 3 embedded system board to process these analog signals. For this reason, the MCP3008 I/P ADC integrated by Microchip has been preferred in the analog sensor card. This integrated circuit requires 2.7-5.5 V DC supply voltage. It can transmit ADC values to the Raspberry Pi 3 card via SPI communication. It has a sampling rate of 200 kSPS with a 10-bit resolution. This integrated circuit has four differential inputs. These differential inputs can be used as 8 analog inputs. It draws 5 nA of current from the power supply when used in low-current mode and 300 µA of current when active. The operating temperature range is between -40°C and +80°C.

C. Liquid pressure sensor

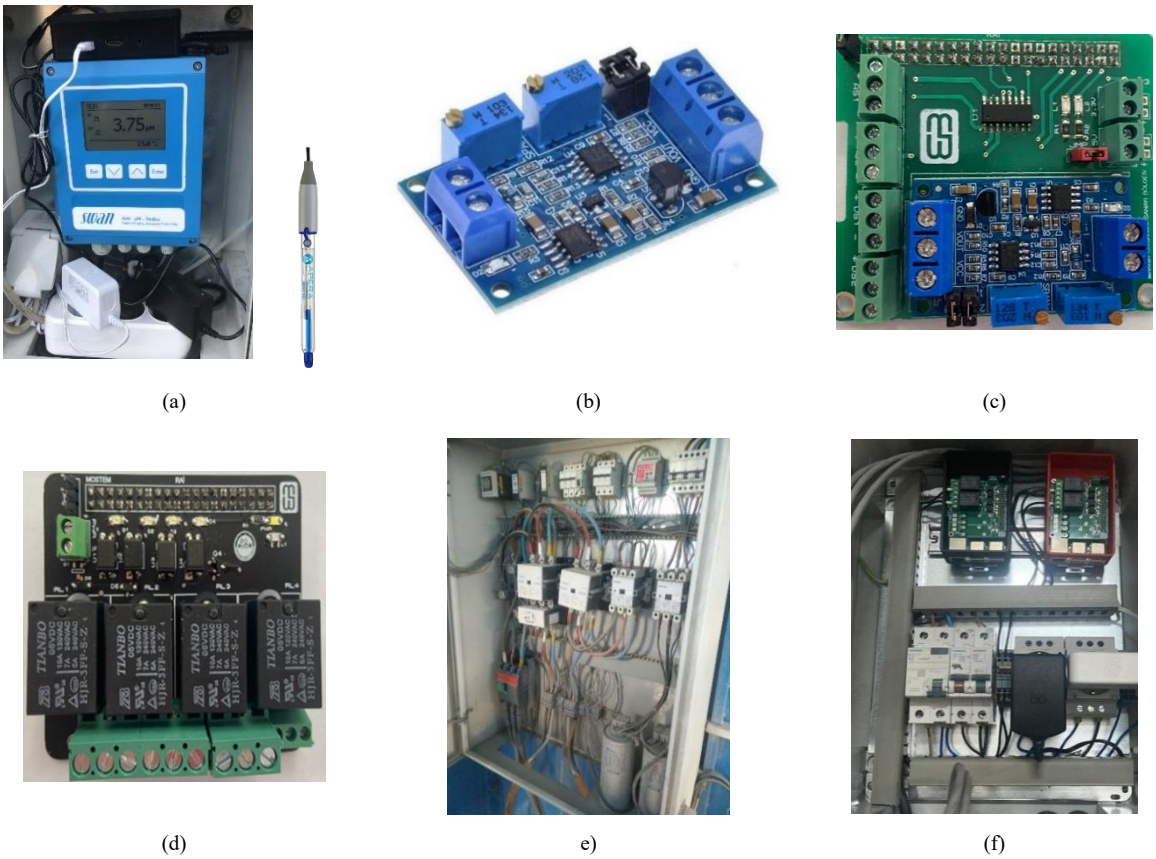
5V G1/4 0-1.2 MPa Hydraulic Water/Oil/Gas DN10 pressure sensors, which can be used in non-corrosive liquids, have been used to determine the levels of four 500-ton water tanks. Their operating voltage is 5.0 V DC. It can be used in the 0-1.6 MPa value range and provides linear output in the 0.5-4.5 V DC range. It has an operating temperature between 0°C and +85°C. It can withstand up to a maximum of 2.4 MPa. The output voltage value is given by the following equation:

$$V_{out} = V_{cc} \times (0.75 \times Pressure + 0.1) \quad (1)$$

Where, V_{out} is the output voltage, and V_{cc} is the supply voltage of the sensor.

D. pH sensor

In the IIoT system, the pH value of the liquid that may mix with the rainwater of the chemical factory has been determined. Rainwater that is likely to combine with other rainwater and end up in clean water basins can be identified by measuring its acidic or basic values using Swan Company's AMI pH redox potentiometric analyzer controller. This device has a pH sensor and was installed in the factory in the area where rainwater goes. Accessing the device allowed for the acquisition of the previously measured values. The device can transmit the measured pH value to other devices at 4-20 mA with the help of its two pins. These two pins have been used in the realized IIoT system. The sensor and device used, and the Raspberry Pi 3 used to send this data to the Influx DB database, are shown in Figure 1a.



(a) (b) (c)

(d) e) (f)

Figure 1. a) Swan AMI pH – Redox potentiometric analyzer – controller device, b) current voltage converter card, c) analog digital converter card for Raspberry Pi 3, d) relay card designed for Raspberry Pi 3, e) well pump control panel and f) Raspberry Pi 3 - Raspberry Pi 3 relay board

The pH value of rainwater is around 5.6. This value normally varies between 0 and 14, depending on the acidity and alkalinity of the liquid. The pH value in drinking water is in the range of 6-9. This value indicates that the liquid is neutral when pH = 7, acidic when pH < 7, and basic when pH > 7.

E. Current-voltage converter

The outputs from which pH information is obtained from the Swam pH measuring device are 4-20 mA. For this value to be entered into the Raspberry Pi 3 embedded system controller, it must first be converted to a voltage value and then to digital data. Using the developed card in Figure 1b, 4-20 mA has been first converted to 0-5 V DC and then converted to digital with the MCP3008 I/P ADC integrated on it and sent to the Raspberry Pi 3 card. The size of the designed card is 40 × 25 × 12 mm. The operating voltage has been kept between -10°C and 60°C. These values are quite suitable for the weather conditions of the water tanks at the MOIZ site. The operating voltage of the card is 5-30 V DC with the linear voltage integrated circuit used.

F. Analog digital converter board for Raspberry Pi 3

It is not possible to directly connect the output voltages of the pressure sensors used to determine the level of four 500-ton water tanks to the General Purpose I/O (GPIO) pins of the Raspberry Pi 3 card. GPIO pins only read digital data. For this purpose, the analog digital converter card was designed, produced, and then used in the system. The current-voltage converter card has been mounted on this card. Figure 1c shows the analog digital converter board designed for the Raspberry Pi 3. This card has been used by placing it on each Raspberry Pi 3 card

on which the IIoT design of the system has been made. This board has 3 analog inputs, two digital signal inputs, and two 5 V DC and two 3.3 V DC supply inputs. To determine the system status, two blue and white light-emitting diodes (LEDs) are placed on it. A jump pin has been added so that the card can receive the supply voltage from the Raspberry Pi 3 card or externally. Thus, high-current feeds can be made by a different source.

G. Relay card for Raspberry Pi 3

The designed and produced relay card has been developed to be mounted on Raspberry Pi 3. Figure 1d shows the relay card developed for Raspberry Pi 3. Four relays have been placed on top of this. These relays have two open and two closed contacts. Optical isolation of Raspberry Pi 3 has been made with PC817 optocouplers. Two of these relays have been used to receive signals from Raspberry Pi 3 and the other two have been utilized to give output from Raspberry Pi 3. The coil voltages of the two relays used to receive signals coming from outside are 220 V AC. The operating information of the 110 kW asynchronous motors in the well is transmitted to the Raspberry Pi 3 card with the help of these relays. Relays activated by MMBT3904 transistors, which send information to the system from the Raspberry Pi 3 card, send the status of the water pump in the well to the operator via a signal lamp. These motors could be controlled with the Grafana SCADA software in the IIoT system. 220 V AC and 5 V DC relays are placed on the card as redundant. Additionally, four signal LEDs have been used for the on/off states of these relays.

H. Water pump control panel

In the IIoT system, four well pump control panels have been used to control four 110 kW water pumps that enable the filling of 500 tons of water tanks. These control panels have been set up and manufactured previously. These have been used before the IIoT conversion of the system. These are shown in Figure 1e. The well pump control panels are installed approximately 10 m away from the water tanks. The control circuit operates with 220 V AC. Two Raspberry Pi 3 control cards and IIoT control panels with Raspberry Pi 3 relay cards installed on the sides of four well pump control panels, all of which are in different sites, have been designed and produced. Figure 1f shows the Raspberry Pi 3 - Raspberry Pi 3 relay board. This board contains two Raspberry Pi 3 supply adapters, two 10 A fuses, an overcurrent relay, and two Raspberry Pi 3 and two Raspberry Pi 3 relay boards. The Raspberry Pi 3 relay board has been attached to the GPIO pins of the Raspberry Pi 3. These have been placed in boxes designed with SolidWorks and produced with a 3D printer. The 220 V AC relays on the relay board are at the top of the board, and the 5 V DC relays are at the bottom of the board.

İ. InfluxDB data platform and Grafana

This database has been used in the IIoT system to store and analyze the levels and pH values of four water wells. InfluxDB is an open-source database and written in Go. It is designed to capture and record real-time data from the field. InfluxDB software uses InfluxQL, a query language like Structured Query Language (SQL). It supports the Hypertext Transfer Protocol Application Programming Interface (HTTP API) for data retrieval. Additionally, there are various visual supports for displaying the data. This software is generally preferred with SCADA-type software such as Grafana [31]. Another feature of this software is that it can handle increased data by adding more machines to a cluster. It facilitates sending data to the database via HTTP. It allows access to old data and deletion at any time.

Grafana is open-source visualization and monitoring software. The implemented IIoT system, it has been used to visualize and monitor the data received with InfluxDB. With this, it can be used with Graphite and Elasticsearch database software. This software offers its users various tools, such as tables for data, graphs, and heat maps. It allows warnings to be placed on certain values of the received data. These warnings can be sent via e-mail [32]. Several users can be determined to log in to the program, and different security levels can be defined for their intervention in the system. Using these features, messages have been sent to system technicians.

III. METHOD

The information flow of the designed and implemented IIoT system and the method used are shown in Figure 2. In the IIoT system, four 110 kW asynchronous motors serve as water pumps and provide water pumping into water wells. Contactors on the pump control panel provide power to water motors. These water pumps have been worked by the IIoT system, with four Raspberry Pi 3 cards used for each water pump. The contactors have been operated with information coming from the Grafana interface to the relays on these Raspberry Pi 3 cards. Information about whether the water pumps are running or stopping has been transmitted to InfluxDB and visualized in the Grafana interface.

Four 500-ton water tanks loaded with water pumps have been positioned across the MOIZ area. These water tanks have been monitored by the IIoT system, with four Raspberry Pi 3 cards used for each water tank. Figure 3 shows the location of the water tanks taken from the interface of the Grafana program. When this figure is examined, there appear to be three water tanks in total. There are two water tanks where the red sign is located.

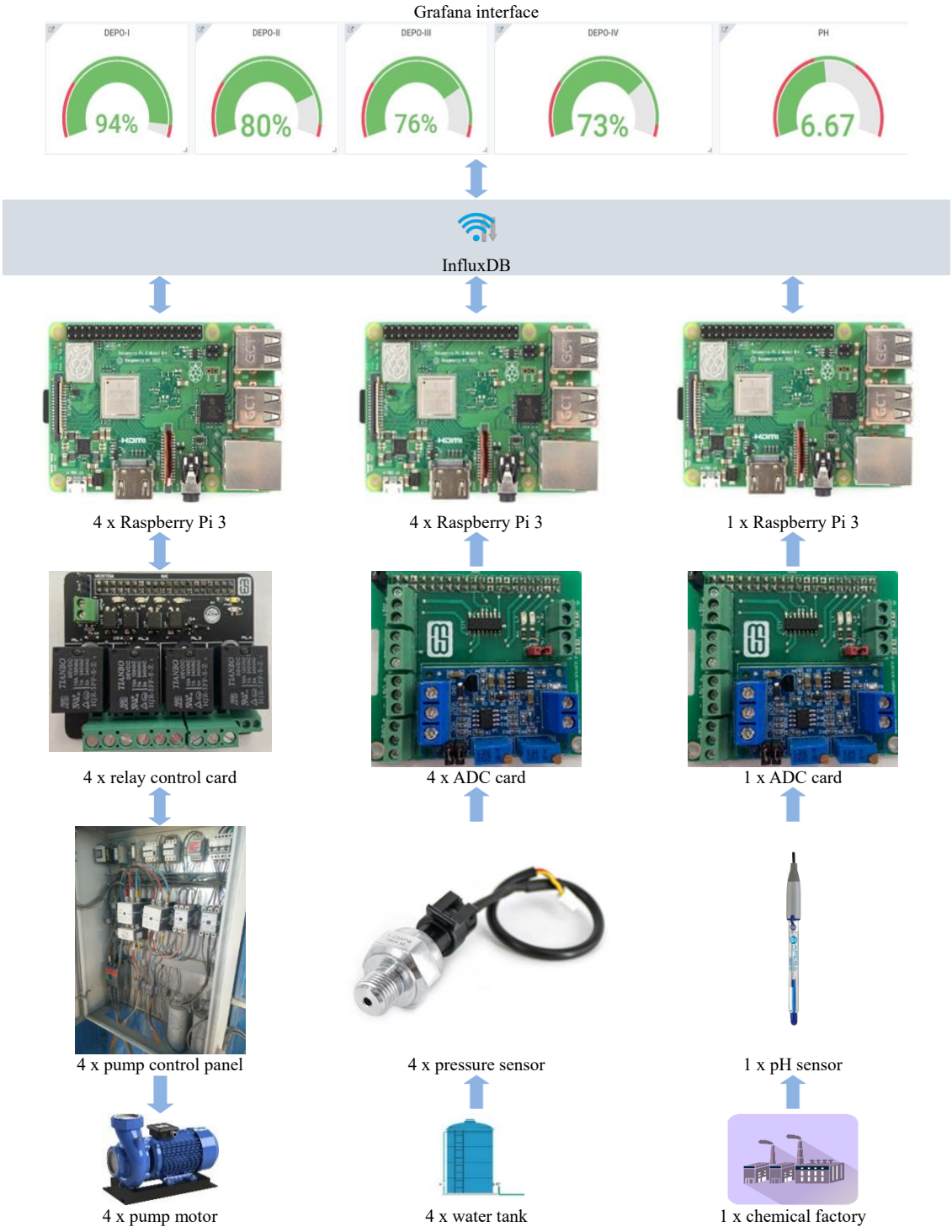


Figure 2. Developed IIoT system data flow



Figure 3. Locations of four different 500-ton water tanks

Level information for four tanks has been obtained analogously from pressure sensors. This analog information has been converted into digital information for the Raspberry Pi 3 to process with the ADC card designed and produced. Afterward, this information has been transferred to the InfluxDB database and visualized with Grafana.

A Raspberry Pi 3 has been used to measure the pH level and transfer it to the IIoT system to determine the chemical rates that are likely to be mixed with the rainwater channels of a chemical production factory. The pH level of the factory has been taken from the 4-20 mA current output of the Swan brand pH analyzer. The value of this analog current signal has been first converted into a voltage signal and a 0-5 V DC signal with a current-voltage converter card. Then, this converted signal has been converted to eight-bit digital with the ADC card and transmitted to the Raspberry Pi 3. So, this pH level has an 8-bit resolution.

The pH data has been made meaningful through a program written in Python. These pH values have been recorded on a Raspberry Pi 3 every minute and sent to the database from there. These pH data have been first transmitted to InfluxDB with the program written on the Raspberry Pi 3. This is visualized with Grafana software that communicates with InfluxDB. In addition, data has been saved to the Raspberry Pi 3 when there was no internet access, so no data loss occurred. When internet access has been restored, this data has been first transmitted to the InfluxDB database and from there to Grafana and visualized.

There are problems with internet access in areas where Raspberry Pi 3 cards are installed, in other words, in areas where water wells are located. This problem had to be solved because field data can be transmitted to InfluxDB via Ethernet cable or Wi-Fi connection. Since there is internet infrastructure in the area where the four Raspberry Pi 3 cards are located, the data here could be transferred to the internet via Wi-Fi. Since there was no internet infrastructure in the other four regions, four USM 3G modem providing devices have been used. Again, since there is no internet infrastructure in the region where the chemical production factory is located, a USB 3G modem device was used here.

The data stored in InfluxDB has been tested with Docker software, which is a storage area and works like a virtual machine. InfluxDB data has been transmitted to Docker software via the HTTP protocol, thanks to open protocol support [33]. The InfluxDB package software has been embedded into the card with Python to transmit the data processed on the Raspberry Pi 3 to the InfluxDB software. Thanks to the free software offered by InfluxDB, data could be easily transferred to the database.

Grafana has built-in support for the InfluxDB data source. Thus, Grafana and InfluxDB data could be visualized via an internet server. Data from the Raspberry Pi 3 was stored in the InfluxDB database. First, InfluxDB was installed after the Debian operating system was installed on the Raspberry Pi 3. Then, InfluxDB was updated. Afterward, a user was created in InfluxDB. Grafana plug-ins were then installed on the Raspberry Pi 3 and the program was updated. Afterward, “http://<ipaddress>:3000” was typed into a browser, and the username and password have been determined for Grafana from the resulting interface. Again, from the same interface, http://<ipaddress>:8086 has been typed, and the previously determined username and password have been entered into the interface. As a result, InfluxDB is connected to Grafana.

Start/stop operations of 110 kW water pumps have been provided through written programs. The panels of the 110 kW water pumps in the system have been previously manufactured. Before this work began, the operator could control these manually using the panel. With this study, the remote starting and stopping of the pumps and the start/stop information of the pumps could be observed remotely with the IIoT system.

The open and closed contacts of the designed relay card have been connected to the place where the start/stop buttons of the previously built panel have been located, thus providing a structure that allows remote control of the pumps. In addition, with the relay contacts on the other relay card, the start/stop information of the pumps could be received from the operator's location by the information transmitted to the GPIO terminals of the Raspberry Pi 3.

Analog data between 0.5-4.5 V DC taken from the pressure sensors in four 500-ton water tanks has been transmitted to the Raspberry Pi 3 thanks to the designed ADC card. Incoming 0.5 V DC information indicates that the tank is 0% full, and in 4.5 V DC information, the tank is defined as 100% full. With the Raspberry Pi 3, this level of information is written in a 10-bit resolution. Therefore, the resolution of the level information is 1024. This information has been transmitted directly to InfluxDB, and from there, it has been visualized in Grafana, which communicates with InfluxDB.

The level of information has been continuously transferred to the Raspberry Pi 3. The Raspberry Pi 3 recorded this data every minute. Thus, when the internet communication between InfluxDB and the Raspberry Pi 3 was interrupted, this data was stored on the Raspberry Pi 3. When internet access became available, this data has been retrospectively transferred to InfluxDB, and retrospective data visualization could be done with Grafana.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

To obtain information and control the 110 kW water pumps in the fields where there are four water wells within MOIZ, the data has been imported into the InfluxDB database with a Raspberry Pi 3-based IIoT system and then visualized with the Grafana interface. Their controls can be made with the graphics and buttons placed in the Grafana interface. With this, the level information data of four 500-ton water wells could be transmitted to InfluxDB with the four Raspberry Pi 3 cards used and other developed ADC cards and visualized with Grafana. A page of the designed Grafana screen is given in Figure 4.



Figure 4. Designed Grafana screen

The start/stop status of 110 kW water pumps could be monitored with 220 V AC relays placed on Raspberry Pi 3 cards, which are activated when the pumps start. These are seen as “Kuyu 1”, “Kuyu 2”, “Kuyu 3” and “Kuyu 4”. When the technicians responsible for the water tanks pressed the start/stop button on the control panel, the 220 V AC relay worked with the motor. With the contact of the relay, the information that this motor is running has been transmitted by sending Logic-1 to the Raspberry Pi 3 GPIO pin. Again, when the technician pressed the start/stop button again to stop the pump on the control panel, the pump stopped, and the 220 V AC relay coil was de-energized, and Logic-0 has been sent to the Raspberry Pi 3 GPIO pin with its relevant contact. These data are shown as pump start/stop in the Grafana interface. To remotely start and stop water well pumps with the IIoT system, Logic - 1 and Logic -0 have been sent to the Raspberry Pi 3 GPIO pin. When Logic-1 has been sent to start the pump, a 5 V DC relay has been operated with a transistor isolated from the control card with optocoupler isolation. 220 V AC is supplied to the middle end of the contacts of this relay. The operation of the relay and the operability of the water pumps have been demonstrated to the authorities by connecting a lamp to this contact.

On the designed Grafana screen, four percentile graphs of "DEPO-I", " DEPO -II", "DEPO-III" and "DEPO-IV" have been placed for the levels of water tanks. The occupancy values of these water tanks are stated as a percentage. When you look at them in order, you can instantly see that there are different occupancy values. The advantage of this is that the occupancy rate of four water tanks can be monitored and recorded with the IIoT system developed from a center, and the water pumps can be intervened with when necessary. The fields are left blank for the “MOSTEM DEPO” and “THE45 DEPO” graphs, which are planned to be included in this developed IIoT system later.

The pH value of the chemical plant, which is likely to mix with rainwater, has been monitored using "Fabrika-PH" in the Grafana interface. Its values are constantly recorded. Under this indicator, the alarms, and warnings section for the status of the pumps in the water wells, changes in the levels of water tanks, and changes in pH levels have been successfully operated, and information is conveyed to the operators when necessary. The sections marked N/A on this screen are areas reserved for sensors that are planned to be added to the software interface later. By clicking on the graphs with the mouse, historical information can be accessed. Historical "DEPO-I", "DEPO-II", "DEPO-III" and "DEPO-IV" graphs are given in Figure 5.

Using this graphical interface, it is possible to see all water level data since the operation of the system. When the mouse is brought closer to this data, it is possible to enlarge the Grafana screen with a magnifying glass. Although the data have been taken for a long time, an average value calculation has not been made. These data are evaluated as maximum and minimum values. But by using all these historical values, it will be possible to have

detailed information about the behavior of the system. With the feature added to the Grafana interface, the indicators of the water tank levels turn red when the levels exceed 97% and fall below 25%, and green in other cases. When you go to the "Fabrika-PH" of the chemical plant, historical data can be viewed graphically. The average "Fabrika-PH" data taken in 2022 is shown in Table 1.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 5. Historical data of a) "DEPO-I", b) "DEPO-II", c) "DEPO-III" and d) "DEPO-VI"

Table 1. "Fabrika-PH" data for 2022

Months	Minimum	Maximum	Average
January	2.98	10.66	6.25
February	3.74	7.64	5.95
March	5.32	7.33	5.88
April	2.59	7.40	6.01
May	1.35	7.65	6.42
June	0.07	6.61	2.86
July	0.06	8.26	7.49
August	4.25	8.00	7.16
September	2.44	8.08	7.48
October	2.36	7.93	6.91
November	2.69	8.14	5.77
December	2.08	8.19	3.23

V. CONCLUSIONS

In this IIoT application, the controlling and monitoring of 110 kW water pumps in four water wells, the monitoring of levels of 500-ton tanks, and the monitoring of pH value of a chemical plant that is likely to mix with rainwater within MOIZ have been carried out by means of 9 Raspberry Pi 3 embedded system cards. Owing to the implemented IIoT system, one-year data obtained from these cards have been kept in the InfluxDB database. Thus, a retrospective analysis of processes could be made. User interfaces have been carried out by visualizing the processes with Grafana software that can communicate with InfluxDB. Water overflows in tanks that previously occurred have been prevented with the developed IIoT application. In addition, by preventing the personnel working here from moving from field to field, it has been possible to monitor the status of the systems in different fields from a single center in a more comfortable way and to intervene in them remotely. During that time, in the

database, the highest water level of 500-ton water tanks has been measured at 99.9%. With the alarm added to the IIoT system, alerts have been sent to technicians' mobile devices as an e-mail. In this way, they have conducted system interventions. Approximately one year of data have been taken to monitor the pH level of the chemical plant that is likely to mix with rainwater. When these data have been examined carefully, there is no excess compared to the determined levels. All these collected data have been keeping in MOIZ's database, enabling retrospective research to be conducted. Ultimately, the low-cost monitoring and controlling IIoT system shows that the future of these IIoT systems is quite open in the industrial field and can be used in many more areas.

ACKNOWLEDGMENT

This study produced from the master's thesis prepared by Harun ŞENTÜRK at Graduate Education Institute at Manisa Celal Bayar University.

REFERENCES

[1] Peter, O., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. *Procedia Computer Science*, 217, 856-865.

[2] Khalil, R. A., Saeed, N., Masood, M., Fard, Y. M., Alouini, M. S., & Al-Naffouri, T. Y. (2021). Deep learning in the industrial internet of things: Potentials, challenges, and emerging applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(14), 11016-11040.

[3] Ahmad, T., & Zhang, D. (2021). Using the internet of things in smart energy systems and networks. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102783.

[4] Kun, X., Wang, Z., Zhou, Z., & Qi, W. (2021). Design of industrial internet of things system based on machine learning and artificial intelligence technology. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(2), 2601-2611.

[5] Zayed, S. M., Attiya, G., El-Sayed, A., Sayed, A., & Hemdan, E. E. D. (2023). An Efficient Fault Diagnosis Framework for Digital Twins Using Optimized Machine Learning Models in Smart Industrial Control Systems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 16(1), 69.

[6] Hafeez, T., Xu, L., & Mcardle, G. (2021). Edge intelligence for data handling and predictive maintenance in IIOT. *IEEE Access*, 9, 49355-49371.

[7] Valeske, B., Osman, A., Römer, F., & Tschuncky, R. (2020). Next generation NDE sensor systems as IIoT elements of industry 4.0. *Research in Nondestructive Evaluation*, 31(5-6), 340-369.

[8] Cakir, M., Guvenc, M. A., & Mistikoglu, S. (2021). The experimental application of popular machine learning algorithms on predictive maintenance and the design of IIoT based condition monitoring system. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106948.

[9] Almadani, B., & Mostafa, S. M. (2021). IIoT based multimodal communication model for agriculture and agro-industries. *IEEE Access*, 9, 10070-10088.

[10] Verdejo Espinosa, Á., Lopez, J. L., Mata Mata, F., & Estevez, M. E. (2021). Application of IoT in healthcare: keys to implementation of the sustainable development goals. *Sensors*, 21(7), 2330.

[11] Priyanka, E. B., Maheswari, C., & Thangavel, S. (2021). A smart-integrated IoT module for intelligent transportation in oil industry. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 34(3), e2731.

[12] Al_Janabi, S. (2020). Smart system to create an optimal higher education environment using IDA and IOTs. *International Journal of Computers and Applications*, 42(3), 244-259.

[13] Ahmed, S. F., Alam, M. S. B., Hoque, M., Lameesa, A., Afrin, S., Farah, T., Kabir, M., Shafiullah, A., & Muyeen, S. M. (2023). Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, 110, 108847.

[14] Ouafiq, E. M., Saadane, R., Chehri, A., & Jeon, S. (2022). AI-based modeling and data-driven evaluation for smart farming-oriented big data architecture using IoT with energy harvesting capabilities, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, Part A, 102093.

[15] Chelliah, B. J., Latchoumi, T. P., & Senthilselvi, A. (2024). Analysis of demand forecasting of agriculture using machine learning algorithm. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 1731-1747.

[16] Manikandan, R., Ranganathan, G., & Bindhu, V. (2023). Deep Learning Based IoT Module for Smart Farming in Different Environmental Conditions. *Wireless Personal Communications*, 128(3), 1715-1732.

[17] Devi, N., Sarma, K. K., & Laskar, S. (2023). Design of an intelligent bean cultivation approach using computer vision, IoT and spatio-temporal deep learning structures. *Ecological Informatics*, 75, 102044.

[18] Rahman, M. Z., Akbar, M. A., Leiva, V., Tahir, A., Riaz, M. T., & Martin-Barreiro, C. (2023). An intelligent health monitoring and diagnosis system based on the internet of things and fuzzy logic for cardiac arrhythmia COVID-19 patients. *Computers in Biology and Medicine*, 154, 106583.

[19] Mukati, N., Namdev, N., Dilip, R., Hemalatha, N., Dhiman, V., & Sahu, B. (2023). Healthcare assistance to COVID-19 patient using internet of things (IoT) enabled technologies. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3777-3781.
[20] Mao, J., Zhou, P., Wang, X., Yao, H., Liang, L., Zhao, Y., ... & Zheng, H. (2023). A health monitoring system based on flexible triboelectric sensors for intelligence medical internet of things and its applications in virtual reality. *Nano Energy*, 118, 108984.
[21] Jhuang, Y. Y., Yan, Y. H., & Horng, G. J. (2023). GDPR Personal Privacy Security Mechanism for Smart Home System. *Electronics*, 12(4), 831.
[22] Al-Turjman, F., Salama, R., & Altrjman, C. (2023). Overview of IoT Solutions for Sustainable Transportation Systems. *NEU Journal for Artificial Intelligence and Internet of Things*, 2(3).
[23] Memika, T., & Polat, T. K. (2023). Internet of Things Supported Airport Boarding System and Evaluation with Fuzzy. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 35(3).
[24] Zulfiqar, H., Ul Haque, H. M., Tariq, F., & Khan, R. M. (2023). A survey on smart parking systems in urban cities. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35(15), e6511.
[25] Mohammed, K., Abdelhafid, M., Kamal, K., Ismail, N., & Ilias, A. (2023). Intelligent driver monitoring system: An Internet of Things-based system for tracking and identifying the driving behavior. *Computer Standards & Interfaces*, 84, 103704.
[26] Yang, P., Zhang, L., & Tao, G. (2023). Smart chemical industry parks in China: Current status, challenges, and pathways for future sustainable development. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 105105.
[27] Siswanto, B., Kerta, J. M., Ranny, & Nugroho, D. D. (2020). automatic detection of carbon dioxide concentration using IoT. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(4), 2474-2477.
[28] Magadán, L., Suárez, F. J., Granda, J. C., & García, D. F. (2023). Low-cost industrial IoT system for wireless monitoring of electric motors condition. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 97-106.
[29] Hosny, K. M., Magdi, A., Salah, A., El-Komy, O., & Lashin, N. A. (2023). Internet of things applications using Raspberry-Pi: a survey. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 13(1), 90-910.
[30] Abas, S. U., Duran, F., & Tekerek, A. (2023). A Raspberry Pi based blockchain application on IoT security. *Expert Systems with Applications*, 229, 120486.
[31] Noprianto, N., Wijayaningrum, V. N., & Wakhidah, R. (2023). Monitoring development board based on InfluxDB and Grafana. *Telematika: Jurnal Informatika dan Teknologi Informasi*, 20(1), 81-90.
[32] Razak, S. F. A., Wee, Y. J., Yogarayan, S., Ismail, S. N. M. S., & Abdullah, M. F. A. (2024). Real-time monitoring tool for heart rate and oxygen saturation in young adults. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(2), 1307-1315.
[33] Bolanowski, M., Paszkiewicz, A., Żabiński, T., Piecuch, G., Salach, M., & Tomecki, K. (2023). System Architecture for Diagnostics and Supervision of Industrial Equipment and Processes in an IoE Device Environment. *Electronics*, 12(24), 4935.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 81-92, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1460611
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Dinamik Titreşim Emici Sistem Tasarımı ve Enerji Hasadı Uygulaması

Dynamic Vibration Absorber System Design and Energy Harvesting Application

Sinan Başaran[1*]

Geliş / Received: 28/03/2024 ***Revize / Revised: 09/09/2024*** ***Kabul / Accepted: 24/09/2024***

ÖZ

Dinamik titreşim emiciler mekanik sistemlerde titreşimleri ortadan kaldırmak veya daha düşük bir seviyeye getirmek için kullanılan pasif titreşim kontrol cihazlarıdır. Titreşim mühendislik uygulamalarında genellikle istenmeyen durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir yapının ya da makinenin performansı ve dayanıklılığı üzerine doğrudan etkisi olan mekanik titreşimlerin aktif ya da pasif yöntemler ile bastırılması gerekmektedir. Dinamik titreşim emici cihazlar, titreşen bir yapının üzerine eklenerek asıl yapı üzerindeki titreşimleri sönümleler. Eklenen cihazın doğal frekansı titreşen asıl yapının doğal frekansı yakınlarında olacak şekilde seçilmektedir. Asıl sistemin üzerindeki titreşimler bastırılarak eklenen yeni kütlenin üzerine aktarılmış olur. Burada ayrıca sistemin serbestlik derecesi de eklenen yapı sayesinde arttırılmaktadır. Bu çalışmada eklenen kütlenin maruz kaldığı mekanik titreşimlerin faydalı enerjiye dönüşmesi adına bir enerji hasadı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak kurulan bir dinamik titreşim emici düzeneğinde elektromanyetik enerji hasadı yöntemi sunulmaktadır. Sistemde eklenen kütlede oluşan mekanik titreşimler ile indüklenen bir bobin üzerinden sabit mıknatıs yapısı yardımı ile gerilim üretimi gerçekleştirilmiştir. Doğal frekansı 3.58 [Hz] olarak tespit edilen sisteme asıl sisteme kendi frekansına yakın olacak şekilde (3.60 [Hz]) ikincil bir sistem eklenerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda rezonans frekansında tahrik edilen sistemin üzerindeki titreşimin dinamik titreşim emici yardımı ile bastırıldığı ve bu işlem sırasında eklenen kütle üzerinde oluşan titreşimlerinde faydalı enerjiye dönüştürme adına enerji hasadı uygulamasının gerçekleştirildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Dinamik titreşim emici, Enerji hasadı, Mekanik titreşimler, Sistem tasarımı.

ABSTRACT

Dynamic vibration absorbers are passive vibration control devices used in mechanical systems to eliminate or reduce vibrations to a lower level. In vibration engineering applications, vibrations are generally considered undesirable. Vibrations, which directly affect the performance and durability of a structure or machine, need to be suppressed using active or passive methods. Dynamic vibration absorber devices are added to a vibrating structure to dampen the vibrations on the main structure. The natural frequency of the added device is chosen to be close to the natural frequency of the vibrating main structure. The vibrations on the main system are suppressed and transferred onto the newly added mass. Additionally, the degree of freedom of the system is increased due to the added structure. In this study, an energy harvesting application was carried out to convert the mechanical vibrations

[1]*Sorumlu yazar iletişim: sinan.basaran@bilecik.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-3783-2260)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye

experienced by the added mass into useful energy. An electromagnetic energy harvesting method is presented in an experimental dynamic vibration absorber setup. Voltage generation was achieved via a coil induced by mechanical vibrations in the added mass with the help of a permanent magnet structure. An experimental study was conducted by adding a secondary system to the original system, which had a natural frequency of 3.58 [Hz]. The secondary system was designed with a frequency close to the original system's frequency, at 3.60 [Hz]. Experimental studies showed that the vibrations on the system driven at the resonance frequency were suppressed with the help of the dynamic vibration absorber, and during this process, an energy harvesting application was carried out to convert the vibrations on the added mass into useful energy.

Keywords- Dynamic vibration absorber, Energy harvesting, Mechanical vibrations, System design.

I. GİRİŞ

Birçok makine ve yapısal sistem mekanik titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu mekanik titreşimler harici kaynaklı olabileceği gibi makinenin ya da yapının içerisinde yer alan tahrik kaynaklarından da oluşabilmektedir. Bir makinenin içerisinde çalışan motor ya da pompa gibi aktüatörler sistem üzerinde harmonik titreşimler oluşturmaktadır. Titreşim problemi sistem performansını olumsuz etkileyen bir durum olarak, enerji kaybına, ekipman hasarına, mekanik parçaların aşınmasına, ya da düşük ürün kalitesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, mekanik titreşimleri azaltmak için birçok yöntem önerilmekle birlikte bunlar arasında en yaygın olanları bir titreşim emici kullanılarak pasif titreşim sönümleyici yöntemi uygulamaktır. Dinamik titreşim emiciler mekanik sistemlerde titreşimleri ortadan kaldırmak veya daha düşük bir seviyeye indirmek için kullanılan pasif bir titreşim kontrol cihazlarıdır. Dinamik titreşim emici cihazları titreşen bir yapının üzerine eklenerek asıl yapı üzerindeki titreşimleri sönümleler. Eklenen cihazın doğal frekansı titreşen asıl yapının doğal frekansı yakınlarında olacak şekilde seçilmektedir. Asıl sistemin üzerindeki titreşimler bastırılarak eklenen yeni kütlenin üzerine aktarılmış olur. Burada ayrıca sistemin serbestlik derecesi de eklenen yapı sayesinde arttırılmaktadır. Eklenen kütle artık titreşmeye başlarken iş makinesinin çalıştığı asıl sistemde titreşimler sönümlenmiş olmaktadır. Bu çalışmada eklenen kütlede oluşan titreşimi enerji hasadı yöntemi ile faydalı enerjiye çevirmeyi amaçlamaktadır. Enerji hasadı sistemleri, günümüzde ve gelecekte artan enerji talebini karşılamak için umut verici bir araştırma alanıdır. Toplanan enerji, özellikle kablosuz sensör ekipmanları ve gömülü entegre devre sistemlerinde düşük güç tüketimi gereken birçok sistemde kullanılmaktadır. Teknoloji ilerledikçe, düşük güç tüketimine sahip cihazlar gelişecek ve enerji toplama sistemleri, hayatın her anında kullanılan bu cihazlar için ek bir enerji kaynağı olacaktır.

Dinamik titreşim sönümleyici, Hermann Frahm tarafından 1909'da patentlenmiştir [1]. Önerilen sistem binalardaki rüzgâr kaynaklı titreşimi ve deprem tepkisini bastırmak için başarıyla kullanılmıştır. Ardından dinamik titreşim emici özellikleri Den Hartog tarafından derinlemesine incelenmiş ve literatüre kazandırılmıştır [2]. Dinamik titreşim emici uygulamaları daha sonra çeşitli alanlara genişletilmiş ve uygulama alanı olarak makinelerin ve yapıların titreşim kontrolü gibi çeşitli uygulamalara yönelik birçok çalışmaya konu olmuştur [3-5]. Ulusal çalışmalar incelendiğinde ise dinamik titreşim sönümleyici yapısının çeşitli çalışmalara konu olduğu görülmektedir. Altı tekerlekte tahrik edilen bir taşıt üzerinde modelleme çalışması yapılarak düşey yönde oluşan rijit modu sönümleyecek şekilde dinamik sönümleyici uygulaması gerçekleştirilmiştir [6]. Başka bir çalışmada ise Euler-Bernoulli köprü kirişi, tek serbestlik derecesine sahip hareketli araç ve titreşim sönümleyicinin dinamik analizi, araç ve köprü dinamiklerine göre tartışılmıştır [7]. Kısaca dinamik titreşim emicinin yaygın uygulamaları arasında çeşitli iş makineleri, testereler ve presler gibi farklı pistonlu makineler ve sabit hızda çalışan büyük pistonlu içten yanmalı motorlar yer almaktadır. Bu sistemlerde dinamik titreşim emici, karşılıklı kuvvetlerin dengelenmesine yardımcı olur. Titreşim emici olmadığında dengesiz kuvvetler cihazın aşırı titreşmesine ve sonuç olarak makinenin yerinde tutulmasını veya kontrol edilmesini imkânsız hale getirebilmektedir.

Bu çalışmada mekanik titreşimlere maruz kalan bir sistemde titreşim sönümleyici olarak sisteme ilave edilen yapı üzerindeki titreşimlerin enerji hasadı yöntemi ile faydalı enerjiye dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Enerji hasadı ya da başka bir değişle enerji toplama yöntemi için birçok farklı yapı ya da malzeme önerilse de en temel olarak elektromanyetik ve piezoelektrik sistemler kullanılmaktadır. Elektromanyetik enerji toplayıcı sistemler, bir bobinin, bir manyetik alan içindeki mekanik titreşime bağlı hareketinden güç üreten sistemlerdir [8-9]. Piezoelektrik enerji toplayıcılar ise, mekanik titreşimlere maruz kaldıklarında yanıt olarak piezoelektrik malzemelerdeki gerilmeden güç üreten sistemlerdir [10-12]. Elektromanyetizma, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonun temellerini attıktan sonra, elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Günümüzde kullanılan jeneratörlerin birçoğu dönen bir rotor yapısında olup büyük ölçekli ve çok sayıda uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra elektromanyetik jeneratörler hem lineer hareket hem de açısal hareket gerçekleştiren cihazlar olarak mikro ila mili Watt seviyelerinde güç toplamak için de kullanılabilir [13]. Bir jeneratörün doğru şekilde tasarlanması ile kinetik enerjiyi elektriğe son derece verimli bir şekilde dönüştürebilmektedir. Fakat enerji

hasadı konseptinden genellikle düşük enerji miktarları söz konusu olduğu için jeneratör boyutları da küçük tasarımlara sahiptir. Enerji hasadında temel motivasyon kablosuz sensör gibi cihazların düşük enerji tüketimlerini karşılamak olduğu için yapılan çalışmalarda bu yönde şekillenmiştir. Sazonov ve ark. [14], geçen araçların neden olduğu enerjiyi toplayan bir elektromanyetik jeneratör tasarlamışlardır ve bu sayede kablosuz sensörler kullanarak bir otoyol köprüsünün saha izlemesini gerçekleştirmişlerdir. Özellikle elektrik şebekesinin bulunmadığı uzak bölgelerdeki uygulamalarda, mikro enerji toplayıcılarının büyük pillere temiz bir alternatif olarak kullanımını teşvik etmek için düşük maliyetli ve yüksek performanslı elektromanyetik jeneratörlere ihtiyaç vardır. Buradan yola çıkarak Bouendeu ve ark. [15] çalışmasında, Faraday'ın manyetik indüksiyon yasasına dayalı olarak mekanik titreşimi elektrik enerjisine dönüştürmek için hibrit bir yaklaşıma dayanan düşük maliyetli, yüksek performanslı bir jeneratör üzerine çalışmışlardır. Tonan ve ark. sundukları çalışmada bir plakanın titreşimlerinden enerji hasat etme analizini gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri sistem piezoelektrik bir yama ile donatılmış ve uç kütle aracılığıyla plakanın birinci titreşim moduna göre ayarlanmış bir konsol dinamik titreşim emici üzerinde yapılan çalışmaları içermektedir [16]. Huang ise çalışmasında alt yapı olarak manyetik-yay içeren doğrusal olmayan enerji dönüşümü sağlayan bir dinamik titreşim emici önermiştir. Geçici darbeler ve harmonik uyarımlar ile, manyetik-yay sistemi için parametrik çalışmalar yapmıştır [17]. Titreşim kontrolü ve enerji hasadı arasındaki korelasyon ve entegrasyondaki son gelişmeler ise Yang ve ark. tarafında bir derleme makalesinde detaylandırılmıştır [18]. Rezaei ve ark., bir elektromanyetik enerji hasadı cihazına bağlı olan bir enerji sönümleyici tasarlayıp deneysel olarak incelemişlerdir. Bu sistem, titreşimleri azaltırken aynı zamanda elektrik enerjisi üretme kapasitesine sahiptir. Yapılan deneyler, sistemin etkinliğini doğrulamış ve bu tür sistemlerin enerji hasadı için potansiyelini ortaya koymuştur [19]. Kısaca hayatımızın her alanında karşımıza çıkan mekanik titreşimlerin faydalı bir enerjiye dönüştürülmesi birçok farklı çalışmada hem sistem tasarımı açısından hem de titreşimin kaynağı açısından ele alınmıştır [20-22].

Dinamik titreşim emici bir sistemin deneysel olarak ele alındığı bu çalışmada asıl sisteme ilave edilen kütlenin maruz kaldığı titreşimin faydalı enerjiye dönüştürülmesi gerçekleştirmiştir. Konu hakkında yapılan çok fazla çalışma olmamasına rağmen benzer bir şekilde dinamik titreşim emici bir sistem üzerinde Ali ve Adhikari'nin [23] yaptığı çalışma görülmektedir. Çalışmalarında olası enerji hasadı için bir titreşim emici kullanma ihtimalini analiz etmek adına hem titreşimi sınırlayan hem de enerji toplayan bir titreşim emiciye piezoelektrik yama eklenmiştir. Orijinal yapının titreşimlere karşı duyarlı olduğu ve emicinin titreşim enerjisinin sınırlandığı eleman olduğu ve bunun da bir piezoelektrik yama aracılığıyla toplandığını raporlamışlardır. Benzer bir yaklaşım Heidari ve Afifi'nin çalışmasında da yer almıştır [24]. Çalışmalarında hem elektrik enerjisi üretmek hem de harmonik tahrik kuvveti altında bulunan iki ucu mesnetli bir kirişin titreşimlerini ortadan kaldırmak amacıyla hareket tabanlı bir enerji toplama cihazı tasarlanmıştır. Bu çalışmada ise laboratuvar ölçekli dinamik titreşim sönümleyici sistemi tasarlanarak üretilmiş ve elektromanyetik enerji hasadı çalışmasında kullanılabilirliği gösterilmiştir. Çalışmada mekanik titreşimlerin önemli bir konusu olan titreşim sönümleyici sistemler açısından temel bir tasarım yöntemi aktarmakta ve deneysel sonuçlar ile teori desteklenmektedir. Bir sonraki bölümde teorik olarak anlatılan dinamik titreşim emici sistemi için Bölüm 3'te ayrıca yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Dolayısı ile başta mühendislik öğrencileri olmak adına araştırmacılar için titreşim sönümleme ve enerji hasadı kavramlarının daha net anlaşılabilmesi adına bir çalışma oraya konmuştur.

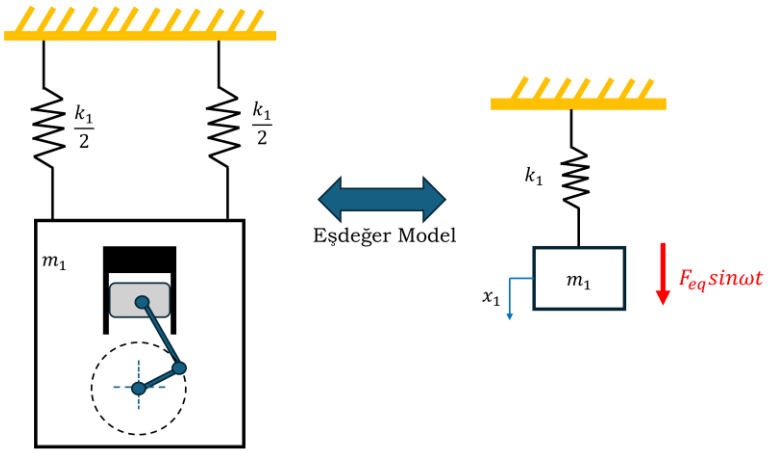
II. DİNAMİK TİTREŞİM EMİCİ SİSTEMİ

Bir makine veya sistem, tahrik frekansı makinenin veya sistemin doğal frekansıyla neredeyse çakışan bir kuvvetin etkisine maruz kalırsa aşırı titreşim bir başka değişle rezonans durumu yaşayabilir. Dinamik titreşim emici pasif bir titreşim önleme yaklaşımıdır. Eğer titreşimin bastırılması amaçlanan sistemin doğal frekansı belirgin ve değişmiyorsa uygulanabilir. Bu gibi durumlarda, makinenin veya sistemin titreşimi, başka bir yay-kütle sistemi olan bir titreşim nötrleştirici veya dinamik titreşim emici kullanılarak azaltılabilir. Tek serbestlik dereceli titreşim sistemlerinde ikinci bir kütle ilavesi yapılarak serbestlik derecesini arttırarak orijinal sistemin titreşim frekansı değiştirilebilir. Bu sistemler titreşimden korunması gereken asıl kütleye bağlı başka bir kütleden oluştuğu için iki serbestlik dereceli bir sistem oluşturur, dolayısıyla titreşim emici sistem iki doğal frekansa sahip olacak şekilde tasarlanmış olur. Titreşim emici sistemler, sabit hızda çalışan makinelerde yaygın olarak kullanılır, çünkü titreşim emici belirli bir frekansa ayarlıdır ve yalnızca dar bir frekans bandında etkilidir. Burada bir sistem olarak olası bir iş makinesini tek serbestlik dereceli bir sistem olarak idealleştirerek dinamik titreşim sönümleyicinin analizini ele alınacaktır.

A. Asıl Sistem Tasarımı

Dinamik sistemlerin en önemli karakteristiklerinden birisi doğal frekanstır. Doğal frekans sistemlerin kütlesine ve katılığına bağlı olarak ifade edilen sisteme özgü bir serbest titreşim frekansıdır. Her sistemin kendine has doğal frekansı bulunmakla birlikte aynı frekansta tahrik ile uyarılmadıkça bir sorun teşkil etmezler. Eğer sistem doğal frekansında uyarılırsa rezonans durumu ortaya çıkar. Dolayısı ile sistem üzerinde büyük titreşim genlikleri oluşur ve bunun yanında yüksek dinamik stresler, gürültü ve yorulma gibi önemli sorunlar ortaya çıkar. Şekil 1'de

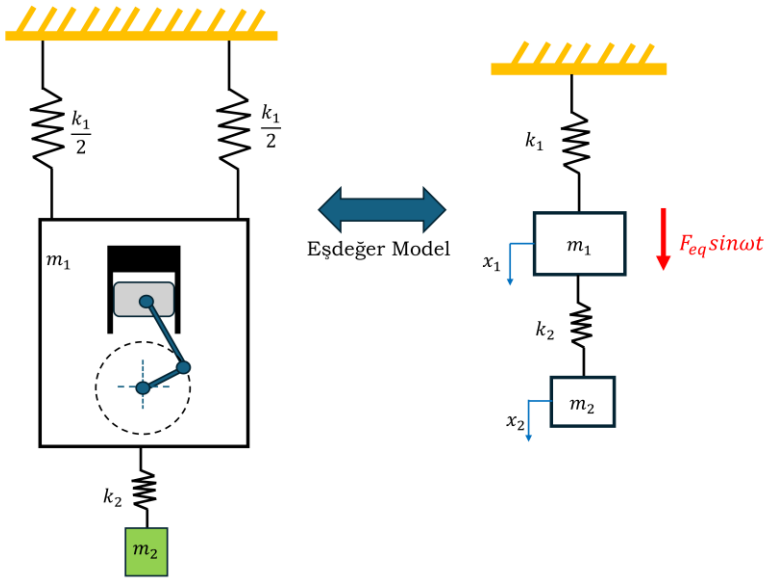
tek serbestlik derecesine sahip bir makine sistemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu sistem asıl sistem olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemin göğe k_1 katılık katsayısına sahip yaylar ile bağlandığını ve sistemin toplam kütlesinin m_1 olduğunu düşünelim. Bu sistemin ayrıca eşdeğer kütle yay sistemi gene Şekil 1'de verilmektedir. Sistem üzerinde çalışan bir motor veya pompa gibi bir yapının olduğu ve çalışma frekansının sistemin doğal frekansı ile aynı olduğu varsayımı geçerlidir. Dolayısı ile sistem üzerine $F_{eq}sin\omega t$ harmonik titreşim etki edildiği düşünülmüştür. Buda sistemin rezonansa girerek çalışmasına sebep olmaktadır. Buda makine üzerinde aşırı bir titreşim oluşturarak makinenin kontrol edilmesini güçleştirmektedir.



Şekil 1. Rezonansa yakın şartlarda çalışan aşırı titreşime maruz kalan makine şematik gösterimi ve eşdeğer modeli.

B. Eklenen Sistem Tasarımı

Asıl sistem için tasarlanacak dinamik titreşim emici bu bölümde aktarılacaktır. Mühendislik sistemlerinde maruz kalınan aşırı titreşimler genellikle istenmeyen bir durumdur ve bu nedenle güvenlik, konfor ve makine dayanımı açısından önlenmesi gerekmektedir. Şekil 1'de verilen bir makine bloğu üzerinde oluşan titreşimlere neden olan enerjinin başka bir ek sistem ilavesi yapılarak sönümlenmesi ve sistemin maruz kaldığı istenmeyen mekanik titreşimlerin azaltılması ya da ortadan kaldırılması mümkündür. Bu yöntem asıl sistem üzerine eklenecek basit bir yay-kütle sistemi ile sağlanabilir. Şekil 2'de makineye, yani asıl sisteme uygulanan dinamik titreşim emici şematik gösterimi ve bu yapıya ait eşdeğer model gösterilmiştir. Asıl sistemin serbestlik derecesi arttırılarak sisteme k_2 katılık katsayısına sahip yay ile m_2 kütlesi ilave edilmiştir. Buradaki tasarım amacı asıl kütleden daha hafif olacak şekilde makine bloğu üzerine ilave bir kütle yerleştirilmesidir. Burada tasarım kriterleri arasında makina bloğu üzerinde bulunan uygun boşluk eklenecek kütle için bağlantı yerlerinin müsaitliği gibi konular ayrıca düşünülmelidir.



Şekil 2. Makineye uygulanan dinamik titreşim emici sistemi şematik gösterimi ve eşdeğer modeli.

Şekil 2'de verilen eşdeğer sistemin Hareket denklemi Newton yaklaşımı ile Denklem (1) ve (2) ile verilmektedir.

$$m_1\ddot{x}_1 = -k_1x_1 - k_2(x_1 - x_2) + F_{eq}sin\omega t \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) \quad (2)$$

Burada $F = \bar{F}e^{j\omega t}$, $x_1 = \bar{X}_1e^{j\omega t}$, ve $x_2 = \bar{X}_2e^{j\omega t}$ kabul edip ve hareket denklemlerinde yerlerine yazarak matris formatına dönüştürebilir.

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - \omega^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{eq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

İşlem kolaylığı açısından değişken dönüşümü yaparak;

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

elde edilir. Denklemden matrisin tersini alarak $\bar{X}_1$ ve $\bar{X}_2$ Denklem (5) ve (6) verildiği gibi yazılabilir.

$$\bar{X}_1 = \frac{z_{22}\bar{F}_1 - z_{12}\bar{F}_2}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} \quad (5)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{-z_{21}\bar{F}_1 + z_{11}\bar{F}_2}{z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}} \quad (6)$$

Burada $\bar{F}_1 = F_{eq}$ ve $\bar{F}_2 = 0$ olduğu için $\bar{X}_1$ ve $\bar{X}_2$ Denklem (7) ve (8)'de olduğu gibi yazılabilir.

$$\bar{X}_1 = \frac{1}{\Delta(\omega)}(k_2 - \omega^2 m_2)F_{eq} \quad (7)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{1}{\Delta(\omega)}k_2F_{eq} \quad (8)$$

Burada $\Delta(\omega)$ Denklem (4)'te verilen matrisin karakteristik denklemidir ve Denklem (9)'da tanımlanmıştır.

$$\Delta(\omega) = (k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2 = 0 \quad (9)$$

Dinamik titreşim emici, bir sistemdeki titreşimleri kontrol etmek veya sönümlemek amacıyla kullanılan bir mekanik sistemdir. Esas kütlenin rezonans frekansında hareketini sıfırlamak için eklenen ikinci kütle ve yay sistemi, dinamik sönümleyici olarak adlandırılan bu mekanizmanın temelini oluşturur. Bu yaklaşıma göre, dinamik sönümleyicinin etkin olabilmesi için eklenen ikinci kütle ve yay sistemi, orijinal sistemin doğal frekansına eşit bir doğal frekansta titreşmelidir. Bu durumda, esas kütlenin titreşimi ile dinamik sönümleyici sistemin titreşimi birbirini tam olarak karşılar ve esas kütlenin enerjisi dinamik titreşim emici cihaz tarafından absorbe edilir. Bu sistemde, ikinci kütle ve yay sisteminin parametreleri, orijinal sistemin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. İkinci sistem, esas kütlenin titreşimini etkili bir şekilde kontrol etmek için tasarlanmalıdır. Bu parametreler genellikle çeşitli yaklaşımlar ile elde edilen matematiksel modeller ve benzetim modelleri kullanılarak en uygun bir şekilde elde edilir. Dinamik titreşim emici sistemler, bina yapısı, köprüler, makineler ve diğer titreşimli sistemlerde kullanılarak istenmeyen titreşimleri azaltmada etkili olabilir. Bu yöntem, rezonans frekansında titreşimi sıfırlayarak ya da azaltarak sistemdeki enerji transferini optimize eder ve istenmeyen titreşimleri önler. Sisteme ilave olarak eklenen kütle yay sisteminin doğal frekansı esas kütle hareketini azaltacak şekilde Denklem (10)'da verildiği gibi seçilebilir.

$$\omega = \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (10)$$

Dolayısı ile asıl sistemin doğal frekansı ile eklenen kütle yay sisteminin doğal frekansı karşılaştırıldığında;

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{m_2}{m_1} \quad (11)$$

elde edilir ve sonuç olarak asıl sistem rezonans frekansında $\bar{X}_1$ hareketi sıfıra yakınsayacak şeklinde çalışmış olur. Denklem (9)'da verilen karakteristik denklem düzenlenirse;

$$\frac{m_1m_2}{k_1k_2}\omega^4 - \left[\left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right)\frac{m_2}{k_2} + \frac{m_1}{k_1}\right]\omega^2 + 1 = 0 \quad (12)$$

Frekans oranı r tanımlanır ve Denklem (11)'deki oranlar yerine konursa;

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{k_1}{m_1}}} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{k_2}{m_2}}} \quad (13)$$

elde edilir. Burada doğal frekans çekilir ise

$$\omega^2 = r^2 \frac{k_2}{m_2} \tag{14}$$

ifadesine ulaşılır. Bu ifade Denklem (12)'de yerine yazılırsa

$$\frac{m_1 m_2}{k_1 k_2}\left(r^2 \frac{k_2}{m_2} r^2 \frac{k_2}{m_2}\right) - \left[\left(1+\frac{k_2}{k_1}\right)\frac{m_2}{k_2} + \frac{m_1}{k_1}\right] r^2 \frac{k_2}{m_2} + 1 = 0 \tag{15}$$

elde edilir. Gerekli sadeleştirmeler yapılarak ve Denklem (11)'de tanımlanan oran kullanılarak karakteristik denklem en sade hali ile elde edilmiş olur.

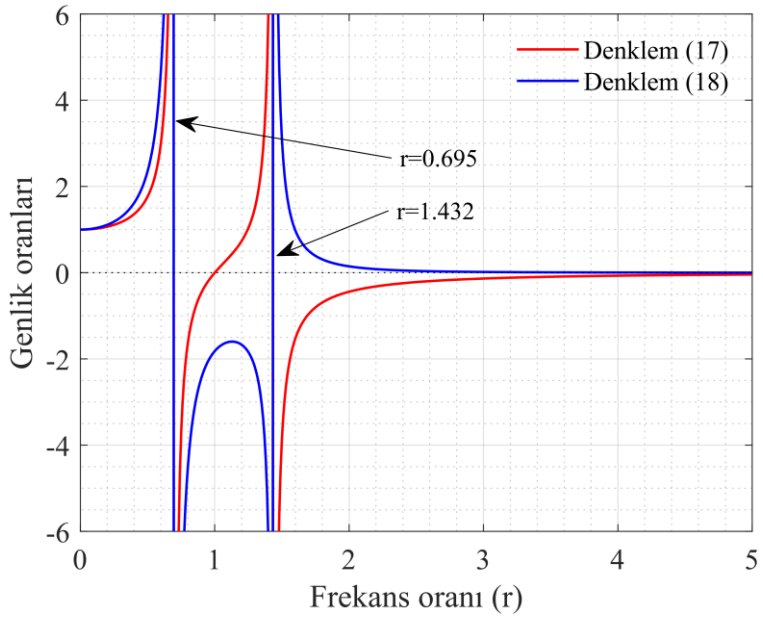
$$r^4 - \left(2 + \frac{m_2}{m_1}\right) r^2 + 1 = 0 \tag{16}$$

Elde edilen denkleme Denklem (7) ve (8)'de hesaplanan yerdeğiştirme ifadeleri yerlerine yazılarak gerekli düzenlemeler sonucunda genlik oranları Denklem (17) ve (18) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\bar{X}_1}{F_{eq}/k_1} = \frac{1-r^2}{r^4 - \left(2+\frac{m_2}{m_1}\right)r^2 + 1} \tag{17}$$

$$\frac{\bar{X}_2}{F_{eq}/k_1} = \frac{1}{r^4 - \left(2+\frac{m_2}{m_1}\right)r^2 + 1} \tag{18}$$

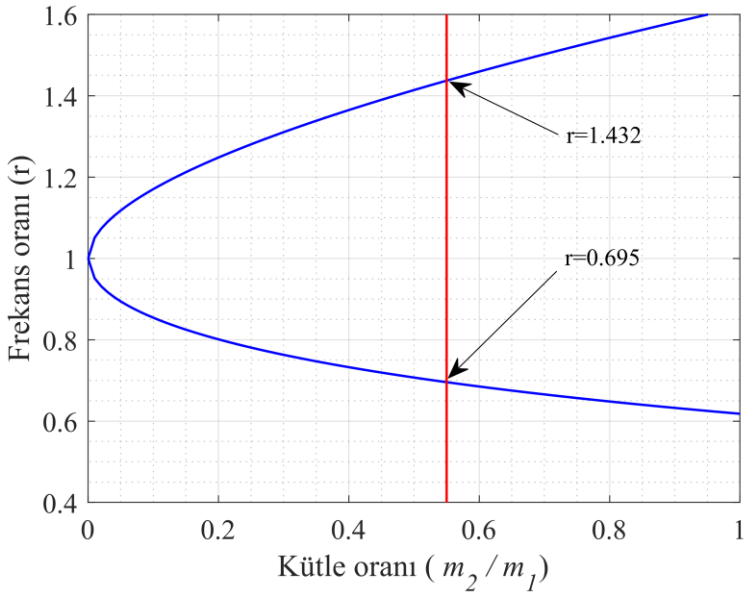
Dinamik titreşim emici sisteminde asıl kütle ve eklenen kütle oranı ele alınarak (m_2/m_1) farklı frekans oranı değerleri için genliklerin davranışı ve olası rezonans durumu Denklem (17) ve (18) yardımı ile incelenebilir. Şekil 3'te $m_2/m_1 = 0.55$ kütle oranı için genlik oranları sunulmuştur. Burada kütle oranı için seçilen değer bir sonraki bölümde aktarılacak olan deneysel çalışmadaki deney düzeneğinin parametreleridir. Çalışmalarda asıl kütle $m_1 = 0.5130$ kg ve sisteme sönümleyici etkisi yaratması için eklenen ilave kütle ise $m_2 = 0.2850$ kg olarak seçilmiştir. Şekilde verilen $m_2/m_1 = 0.55$ kütle oranı için genlik oranlarının artı ya da eksi işaretli olması cevabın tahriki takip ederek aynı faz açısına sahip olduğu anlamına ya da tahrik ile 180° ters faz açısına sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca $r = 0.695$ ve $r = 1.432$ de rezonans oluşumları şekil üzerinden görülebilmektedir.



Şekil 3. $m_2/m_1 = 0.55$ kütle oranı için elde edilen genlik oranları ve rezonans oluşum bölgeleri.

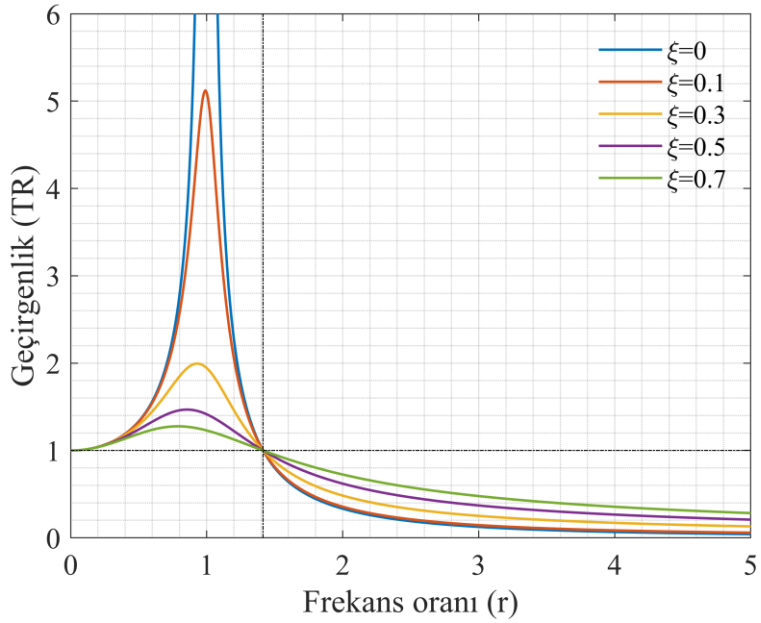
Asıl kütlenin yer değiştirmesinin $x_1(t) = 0$ sıfır olabilmesi için Denklem (7)'de $k_2 - \omega^2 m_2$ ifadesinin sıfır olması gerekmektedir. Bu durum sistemdeki tahrikin yani $F_{eq} sin\omega t$ değerinin sisteme eklenen yay kuvveti ile $(-k_2 x_2)$ ile dengelenmesi ile mümkündür. Şekil 4'te kütle oranının frekans oranı ile olan ilişkisi gösterilmektedir. Burada m_2/m_1 oranı ne kadar küçük seçilirse rezonans frekansları asıl sistemin rezonans frekansına yakın çıkmaktadır. Şekil 4'te benzer şekilde $m_2/m_1 = 0.55$ kütle oranı için frekans oranları sunulmuştur. Şekil 5'te titreşime maruz kalan eşdeğer asıl sistem için seçilen sönüm oranları için $(\xi = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7)$ frekans oranına bağlı geçirgenlik grafiği sunulmuştur. Grafikte, frekans oranına $(r = \omega/\omega_n)$ karşılık gelen tek serbestlik dereceli bir sistemin geçirgenliği çeşitli sönüm oranları için gösterilmiştir. Burada geçirgenlik, sistemin zorlanmış titreşimlerde verdiği tepkiyi ifade eder. Sistemde sönüm olmadığında $(\xi = 0)$ geçirgenlik frekans oranı $\omega/\omega_n = 1$ olduğu durumda sonsuza doğru artar. Bu durum rezonansın göstergesidir ve

sistemin doğal frekansı ile zorlanma frekansı çakıştığı durumda ortaya çıkar. Rezonans durumunda, sistem çok yüksek genliklerde titreşir.



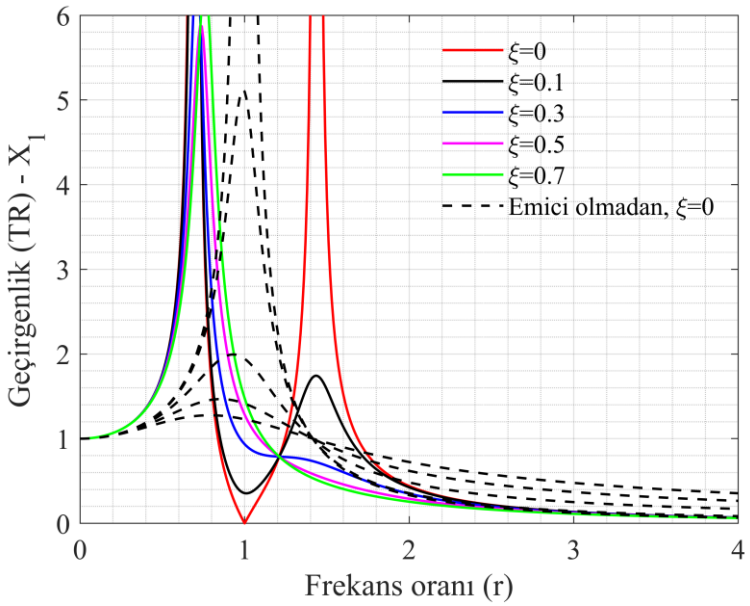
Şekil 4. Kütle oranının frekans oranı ile ilişkisi.

Sönüm oranının düşük olduğu durumlarda ise geçirgenlik rezonans frekansında hala yüksek olmasına karşın sönüm oranı arttıkça sistemin rezonansa girdiğinde verdiği tepki daha kontrol edilebilir hale gelmektedir. Genel olarak, sönüm oranı arttıkça, sistemin rezonans frekansındaki titreşim genliklerinin azaldığı ve daha geniş bir frekans aralığında daha dengeli bir tepki verdiği gözlemlenebilir. Bu da sönümlemenin, rezonans etkilerini azaltmak ve sistemin stabilitesini artırmak için önemli bir araç olduğunu gösterir.



Şekil 5. Asıl sistemin geçirgenlik frekans oranı değişimi.

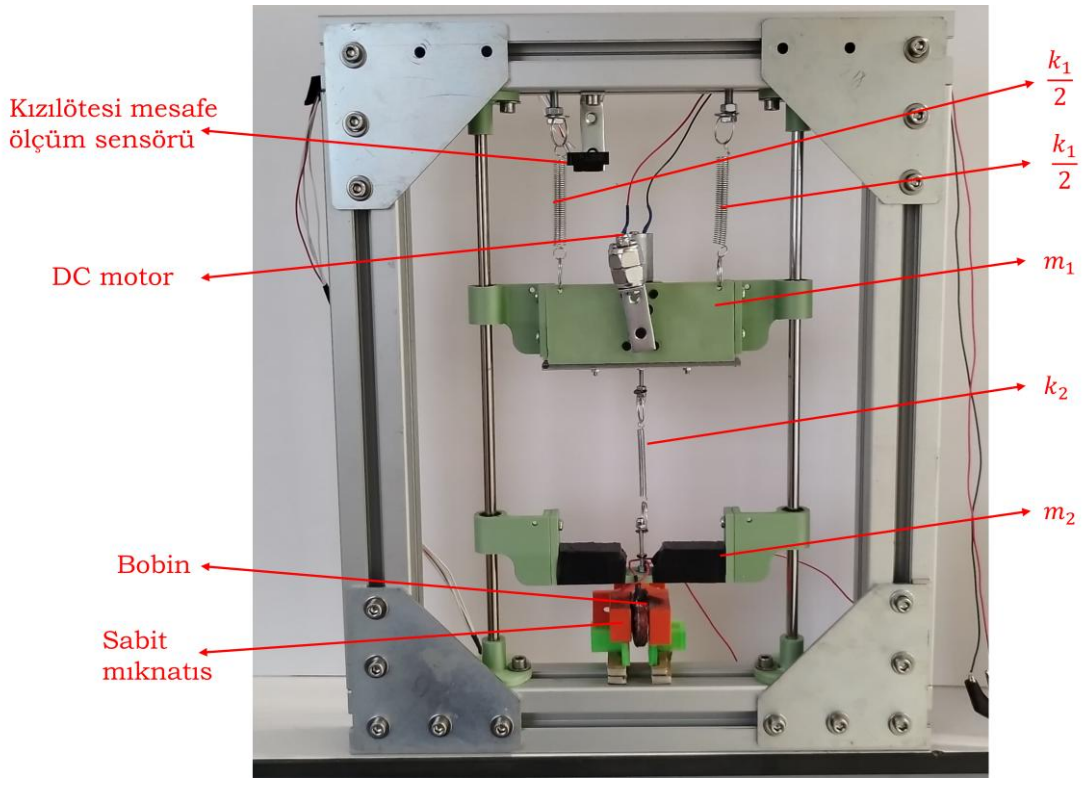
Şekil 6'da dinamik titreşim emici sistem için asıl kütlenin geçirgenlik frekans oranı seçilen sönüm oranları için ($\xi = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) için değişimleri sunulmuştur. Şekilde en belirgin sonuç sistemin derecesi arttığı için rezonans bölgesini belirten frekans değerinin artmasıdır. Gene aynı grafikte dinamik titreşim emici sisteminin etkinliğini göstermek adına sistemde sönüm olmadığı (ξ=0) durum için asıl sistemin tepkisi de verilmiştir. Genel olarak, dinamik titreşim emicinin eklenmesi, ana sistemin rezonans frekansındaki titreşim genliklerini azaltarak ve daha geniş bir frekans aralığında daha dengeli bir tepki vererek sistemin performansını artırır.



Şekil 6. Kütle oranı $m_2/m_1 = 0.55$ için elde edilen geçirgenlik frekans oranı değişimi.

III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Dinamik titreşim emici sistem laboratuvar ölçekli bir önceki bölümde anlatılan tasarıma sadık kalınarak deneysel düzeneği Şekil 7'te verildiği gibi kurulmuştur. Tek serbestlik dereceli bir iş makinesini yansıtmak adına hareketin dikey doğrultuda sınırlanması için sistemde indüksiyonlu krom miller ve sürtünmesi çok düşük yataklar kullanılmıştır. Asıl sistemin toplam ağırlığı $m_1 = 0.5130$ kg'dır. Bu kütleye sistemde harmonik tahriki oluşturan DC motor ve eksantrik yük dahildir. DC motor 24 V ve maksimum 240 rpm çıkış verebilecek kapasitedir. Sisteme ait tüm parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Sistemde bulunan yaylar bağlanmadan önce bir yük hücresi yardımı ile karakterize edilerek yay katsayıları belirlenmiştir. Ayrıca asıl kütlenin yer değiştirmesi temassız ölçüm yapabilen kızıl ötesi GP2Y0A41SK0F model numaralı Sharp sensör ile ölçülmektedir.



Şekil 7. Deneysel sistem.

Deney verileri V-DAQ RT-4 marka Matlab/Simulink üzerinden çalışan USB tabanlı gerçek zamanlı kontrol ve veri toplama kartı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 1 kHz örnekleme frekansı kullanılmıştır.

Tablo 1. Sistem parametreleri.

	Sembol	Değer [Birim]
Asıl Sistem Kütlesi	m_1	0.5130 [kg]
Sonradan Eklenen Kütle	m_2	0.2850 [kg]
Asıl Sistem Yay Katsayısı	k_1	259.25 [N/m]
Sonradan Eklenen Yay Katsayısı	k_2	146.34 [N/m]

Asıl sistemin kütlesi ve katılık değeri kullanılarak doğal frekansı Denklem (19)'de veriliği gibi hesaplanabilir.

$$f_n = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \div 2\pi \tag{19}$$

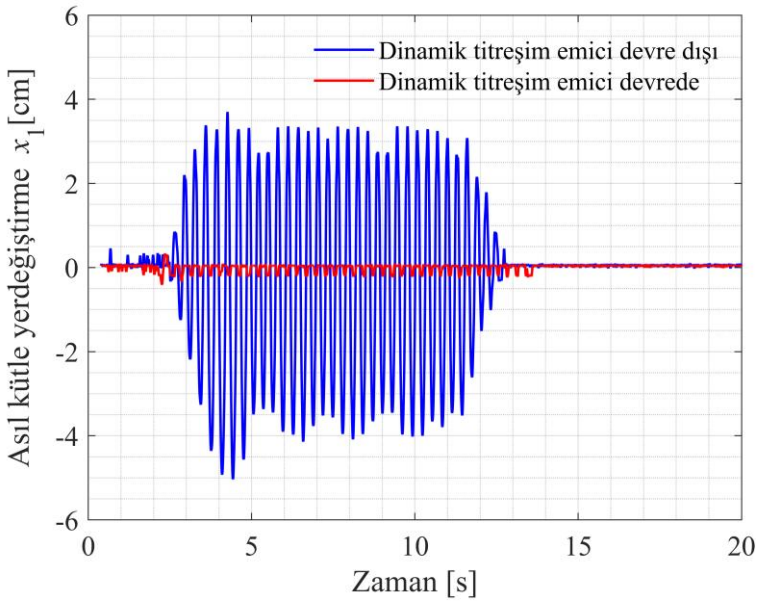
Sayısal değerler yerine konduktan sonra;

$$f_n = 3.58 \text{ [Hz]} \tag{20}$$

elde edilir. Sistemde kullanılan DC motor katalog datası 24 [V] 240 [rpm] çıkış verdiği göstermektedir. Bu tam olarak 4 [Hz] değerine karşılık gelmektedir. Motor voltajını güç beslemesinden biraz azaltarak 21.48 [V] değerine getirilerek sisteme doğal frekansında tahrik verilmiş olur. Bu sayede asıl sistem çok büyük yer değiştirmeler sergileyecek şekilde titreşmeye başlamaktadır. Şekil 8'de deneysel çalışmalar sırasında temassız konum sensörü yardımı ile kaydedilen x_1 konumu dinamik titreşim emici sistem devrede ve devre dışında olmak üzere gösterilmiştir. Şekil 7'te gösterilen deneysel sistemde görüleceği üzere k_2 katılık değerine sahip olan sonradan sisteme bağlanan kütlenin bağlantısını temsil eden yay bir kanca ile takılıp çıkarılabilir şekilde tasarlanmıştır. Dolayısı ile deneyler hızlı bir şekilde dinamik titreşim emici sistem devrede ve devre dışında senaryoları için tekrarlanabilir niteliktedir. Asıl kütlenin yer değiştirmesinin $x_1(t) = 0$ sıfır olabilmesi için Denklem (7)'de $(k_2 - \omega^2 m_2)$ ifadesinin sıfır olması gerekliliğinde sistemde titreşimleri sönümlemek üzere eklenecek olan yay ve kütlenin sayısal değerleri bir tasarım kriteri olarak belirlenebilir. Dolayısı ile eklenen sistemin doğal frekansı Denklem (21)'de sayısal değerler yerine konarak ifade edilebilir.

$$f_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \div 2\pi = 3.60 \text{ [Hz]} \tag{21}$$

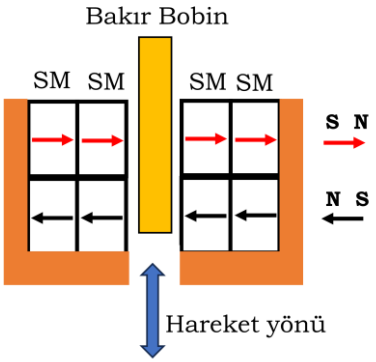
Bu değerde asıl sistemin rezonans noktasında çalışmasına sebep olan tahrik frekansına çok yakındır. Dinamik titreşim emici sisteminde eklenecek kütle ve yay elemanı bu tasarım kriteri dikkate alınarak tasarlandığı takdirde sistemdeki titreşimleri engellemiş olacaktır. Başka bir ifade ile eklenen kütle ve yay sisteminin doğal frekansı o anki tahrik ya da sistemde çalışan motor pompa gibi harmonik titreşime sebep olan doğal frekansı ile aynı olmalıdır.



Şekil 8. Asıl kütlenin yer değiştirme zaman cevabı.

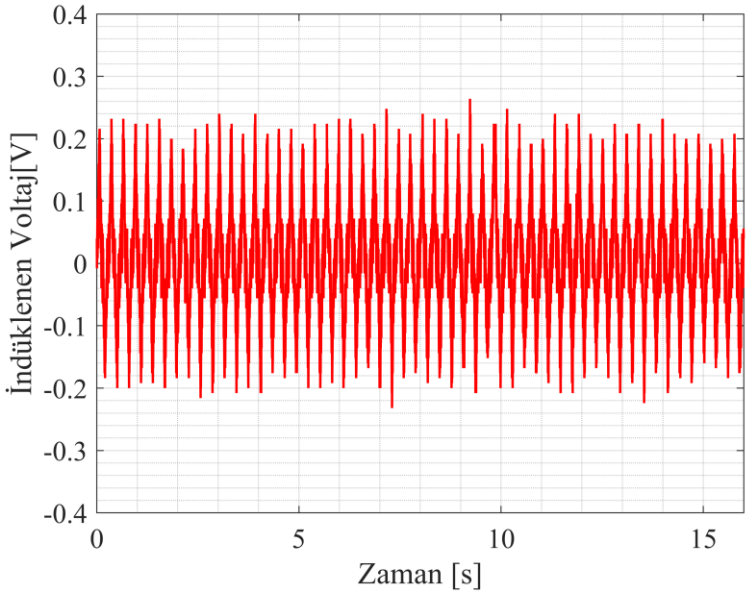
A. Enerji Hasadı Uygulaması

Dinamik titreşim emici sistemler sadece titreşim kontrolü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji hasadı için de kullanılabilirler. Enerji hasadı, çevredeki atıl veya istenmeyen enerjiyi yakalayıp kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürme sürecidir. Bu çalışmada dinamik titreşim emici sistemler için potansiyel bir uygulama alanı olarak enerji hasadı uygulaması sunulmuştur. Bu bölümde sistemin titreşimlerini sönümleyen fakat bu sefer kendi üzerinde titreşimlerin oluştuğu eklenen kütle üzerinde yapılan enerji hasadı çalışması aktarılacaktır. Bunun için deney düzeneğinde Şekil 9'de şematik gösterimi verilen enerji hasadı mekanizması sisteme ilave edilmiştir. Burada aslında sisteme eklenen bakır bobin (m_2 kütlesi üzerine bağlanan) toplam sistem ağırlığı içerisinde verilmiştir. Yani toplam m_2 kütlesi 0.2850 kg'dır. Verilen doğrultuda hareket eden bakır bobin sabit mıknatısılar (SM) arasındaki manyetik alan içerisinde indüklenerek iki ucu arasında bir gerilim oluşturmaktadır. 50×20×10 mm boyutlarında sekiz adet N35 tipi SM şekilde verilen kutup yönlerinde (S= South ve N=North) göre konumlandırılmış olup, bobin üzerindeki manyetik alan etkisi ile gerilim çıkışı sağlanmaktadır. Elde edilen elektromanyetik enerji hasadı sisteminde indüklenen voltaj bir osiloskop yardımı ile ölçülmüştür.



Şekil 9. Enerji hasadı mekanizması.

Sistemde 0.9 mm çapa sahip bakır tel yaklaşık 120 tura sahip olacak şekilde bir bobin haline getirilerek Şekil 7'de deneysel sistemde gösterildiği gibi üç boyutlu yazıcı ile basılmış SM'ları bir arada tutan bir yuva içerisinde hareket edebilmektedir. Şekil 10'de osiloskop yardımı ile ölçülen dinamik titreşim emici sistemi devrede iken m_2 kütlesinin hareketi sonucunda toplanan gerilim gösterilmektedir. Dinamik titreşim emici sistemi başarı ile asıl sistem üzerindeki titreşimleri sönümler iken aynı zamanda da faydalı bir enerji dönüşüm gerçekleştirmektedir. Dinamik titreşim emici sistemleri üzerine gerek piezoelektrik gerekse elektromanyetik yapılar eklenerek birçok farklı enerji hasadı uygulaması literatürde yer bulmaktadır [25, 26]. Burada bakır bobin tasarımı ve kullanılacak mıknatısların yönelimi ve büyüklüğü gibi faktörlerde ayrıca başka bir araştırma konusu olacak şekilde ileriki zamanlarda çalışılabilir.



Şekil 10. Bobin üzerinde indüklenen gerilim.

IV. SONUÇLAR

Bu araştırma makalesi dinamik titreşim emici sistemini detaylı bir şekilde incelenerek deneysel çalışmalar sunulmuştur. Burada dinamik titreşim emici sisteminin kullanım amacı pasif bir titreşim kontrol yöntemi olarak sistemler üzerinde istenmeyen titreşimi azaltmak ya da ortadan kaldırmaktır. Özellikle sabit devirde çalışan üzerlerine harmonik tahriklerin uygulandığı iş makinelerinde sistemin titreşimlerini sönümlemek adına dinamik titreşim emici tasarımları ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerde asıl kütlenin titreşim hareketleri bastırılması amaçlandığı için sonradan ilave edilen kütlenin titreşim hareketleri göz ardı edilmektedir. Dolayısı ile sonradan eklenen kütlenin maruz kaldığı titreşimler ise farklı yöntemler ile değerlendirilebilir. Bu çalışmada dinamik titreşim emici bir sistem üzerinde ayrıca bir enerji hasadı uygulamasının gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Sisteme eklenen ikinci kütle sayesinde aynı zamanda enerji toplayın bir sistem elde edilmiştir. Tepeden tepeye 0.5 volt gerilim bobin üzerinde indüklenmiştir. Enerji hasadı yönteminde elde edilen gerilimler her ne kadar genlik olarak küçük gözükse de gelişen teknoloji ve nesnelerin interneti kavramının hayatımızda her geçen gün daha fazla yaygın hale gelmesi ile umut vadedici çalışmalar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Frahm, H. (1911). U.S. Patent No. 989,958. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[2] Den Hartog, J. P. (1985). *Mechanical vibrations*. Dover Publication, New York, 87-102.

[3] Huang, Y. M., & Chen, C. C. (2000). Optimal design of dynamic absorbers on vibration and noise control of the fuselage. *Computers & Structures*, 76(6), 691-702.

[4] Wu, T. X. (2008). On the railway track dynamics with rail vibration absorber for noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 309(3-5), 739-755.

[5] Sun, Z., Sun, J., Wang, C., & Dai, Y. (1996). Dynamic vibration absorbers used for increasing the noise transmission loss of aircraft panels. *Applied Acoustics*, 48(4), 311-321.

[6] Demir, C. (2004). Alti tekerlekli taşitin deneysel ve teorik olarak frekans analizi, dinamik absorber uygulamasi. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 1(4), 27-40.

[7] Koç, M. A. (2020). Implementation of a Vibration Absorbers to Euler-Bernoulli Beam and Dynamic Analysis of Moving Car. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(3), 523-532.

[8] Zuo, L., Scully, B., Shestani, J., & Zhou, Y. (2010). Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions. *Smart Materials and Structures*, 19(4), 045003.

[9] Elvin, N. G., & Elvin, A. A. (2011). An experimentally validated electromagnetic energy harvester. *Journal of sound and vibration*, 330(10), 2314-2324.

[10] Kim, H. S., Kim, J. H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 12, 1129-1141.

[11] Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano energy*, 80, 105567.

[12] Covaci, C., & Gontean, A. (2020). Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors*, 20(12), 3512.

[13] Beeby, S. P., & O'Donnell, T. (2009). Electromagnetic energy harvesting. *Energy Harvesting Technologies*, Springer, Boston, MA, 129-161.

[14] Sazonov, E., Li, H., Curry, D., & Pillay, P. (2009). Self-powered sensors for monitoring of highway bridges. *IEEE Sensors Journal*, 9(11), 1422-1429.

[15] Bouendeu, E., Greiner, A., Smith, P. J., & Korvink, J. G. (2010). A low-cost electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *IEEE Sensors Journal*, 11(1), 107-113.

[16] Tonan, M., Pasetto, A., & Doria, A. (2024). Vibration Energy Harvesting from Plates by Means of Piezoelectric Dynamic Vibration Absorbers. *Applied Sciences*, 14(1), 402.

[17] Huang, X. (2024). Exploiting multi-stiffness combination inspired absorbers for simultaneous energy harvesting and vibration mitigation. *Applied Energy*, 364, 123124.

[18] Yang, T., Zhou, S., Litak, G., & Jing, X. (2023). Recent advances in correlation and integration between vibration control, energy harvesting and monitoring. *Nonlinear Dynamics*, 111(22), 20525-20562.

[19] Rezaei, M., Talebitooti, R., & Liao, W. H. (2022). Concurrent energy harvesting and vibration suppression utilizing PZT-based dynamic vibration absorber. *Archive of Applied Mechanics*, 1-20.

[20] Maamer, B., Boughamoura, A., El-Bab, A. M. F., Francis, L. A., & Tounsi, F. (2019). A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. *Energy Conversion and Management*, 199, 111973.

[21] Sarker, M. R., Saad, M. H. M., Olazagoitia, J. L., & Vinolas, J. (2021). Review of power converter impact of electromagnetic energy harvesting circuits and devices for autonomous sensor applications. *Electronics*, 10(9), 1108.

[22] Wei, C., & Jing, X. (2017). A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1-18.

[23] Ali, S. F., & Adhikari, S. (2013). Energy harvesting dynamic vibration absorbers. *Journal of Applied Mechanics*, 80(4), 041004.

[24] Heidari, H., & Afifi, A. (2017). Design and fabrication of an energy-harvesting device using vibration absorber. *The European Physical Journal Plus*, 132(5), 233.

[25] Dipak, S., Rajarathinam, M., & Ali, S. F. (2013, August). Energy harvesting dynamic vibration absorber under random vibration. In *2013 IEEE International Conference on Control Applications* (CCA) (pp. 1241-1246). IEEE.

[26] Wang, Q., Zhou, J., Wang, K., Gao, J., Lin, Q., Chang, Y., Xu, D., & Wen, G. (2023). Dual-function quasi-zero-stiffness dynamic vibration absorber: Low-frequency vibration mitigation and energy harvesting. *Applied Mathematical Modelling*, 116, 636-654.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 93-107, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1461163
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Effects of Building Slenderness on the Behaviour of Shear Wall-Frame System Buildings for Various Soil Classes

Farklı Zemin Sınıfları İçin Perde Çerçeve Sistemli Binalarda Yapı Narinliğinin Davranışa Etkisi

İsmail Tozlu[1], Erhan Eren[2*], Şenol Gürsoy[3]

Geliş / Received: 29/03/2024 ***Revize / Revised: 06/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 07/08/2024***

ABSTRACT

In this study, the effect of structural slenderness on both linear and non-linear structural behaviour in buildings with reinforced concrete shear-frame systems was examined. For this purpose, 3 building models with square storey plans were created, with equal total building heights and ratios of height to plan size of 0.67, 1.0, and 2.0, respectively. Additionally, the ratio of shear wall areas to storey areas was kept equal in both directions for each model. The 3 building models created were examined under 15 different scenarios, considering 5 different soil classes recommended in the Turkish Building Earthquake Code. Through linear and non-linear structural analyses, the effects of building slenderness on various parameters were compared. It was observed that although the effect of structural slenderness is relatively small on hard soils, it becomes significantly more pronounced with increasing earthquake load as soil conditions worsen. The effect of building slenderness on structural behaviour is particularly crucial, especially concerning relative storey drifts and second order effects. Additionally, from the non-linear analysis results, it was observed that the damage levels in the structural elements decreased as the structure slenderness decreased.

Keywords- Non-Linear Analysis, Reinforced Concrete Structures, Slenderness Effect, Soil Class, Wall Frame Systems

ÖZ

Bu çalışmada betonarme perde-çerçeve sisteme sahip binalarda yapı narinliğinin doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal davranışa etkisi incelenmiştir. Bu amaçla toplam bina yükseklikleri eşit ve yüksekliğinin plan boyutuna oranları sırasıyla 0.67, 1.0, 2.0 olan kare kat planına sahip 3 adet bina modeli oluşturulmuştur. Ayrıca perde duvar alanlarının kat alanlarına oranları her model için her iki doğrultuda eşit alınmıştır. Oluşturulan 3 bina modeli, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde önerilen 5 farklı zemin sınıfı dikkate alınarak 15 duruma göre irdelenmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal analizler sonucunda yapı narinliğinin yapısal davranış üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulardan yapısal narinliğin etkisi sağlam zeminlerde nispeten az olsa da zemin koşulları kötüleştikçe artan deprem yükü ile önemli derecede arttığı görülmüştür. Özellikle göreli kat ötelenmeleri ve ikincil mertebe etkileri açısından yapı narinliğinin yapısal davranışta etkisi oldukça önemli

[1]Contact: ismailtozlu@karabuk.edu.tr (https://orcid. org/0000-0003-0512-3803)
Department of Civil Engineering, Karabük University, 78050 Karabük, Türkiye
[2]*Corresponding Author Contact: erhaneren@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-4481-8715)
Department of Civil Engineering, Karabük University, 78050 Karabük, Türkiye
[3]Contact: sgursoy@karabuk.edu.tr (https:// orcid.org/0000-0001-8133-0906)
Department of Civil Engineering, Karabük University, 78050 Karabük, Türkiye

olmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan analiz sonuçlarından yapı narinliğinin azalmasıyla yapısal elemanlardaki hasar seviyelerinin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Doğrusal Olmayan Analiz, Betonarme Yapılar, Narinlik Etkisi, Zemin Sınıfı, Perde Çerçeve Sistemler

I. INTRODUCTION

In the analysis of reinforced concrete buildings, rotations resulting from differential settlements in the foundation are typically disregarded, as structures are assumed to be fixed to the foundation soil. However, in cases where foundation and soil effects are overlooked, particularly in the structural analysis of slender buildings (height / width ratio), neglecting foundation rotations may lead to the potential toppling of buildings without experiencing structural damage. While reducing building height or increasing width presents a solution to mitigate the risk of toppling, circumstances may arise where this solution cannot be implemented due to zoning regulations.

Several studies examining wall frame systems and structural slenderness are summarized in this section. Kasap and Kolay investigate shear forces on shear walls and columns across 8-storey structures, examining the impact of shear thickness on residential and commercial buildings under earthquakes [1]. Beyer et al. utilize experimental data from quasi-static cyclic tests on thin structural RC walls to analyse shear deformations for displacement demands in the inelastic range, discussing shear deformation distribution and variation with upper displacements [2]. Tang and Zhang present a probabilistic seismic demand analysis of a mid-rise slender shear wall in western US, considering soil-structure interaction (SSI) effects and suggesting the inclusion of damages in foundation and surrounding soil for a comprehensive evaluation of SSI effects on damage probability [3]. Sağlıyan et al. analysed the effect of the change in shear ratios depending on the soil class on the relative storey drifts of multi-storey reinforced concrete structures with continuous table girderless slabs. At the end of the studies, it was observed that the relative drift values were below the limit values by 1 % for 7-storey models and 1.5 % for 9-storey models [4]. Uçar and Merter investigated the slenderness of soil storey columns due to uplift and investigated the collapse behaviour of buildings under earthquake loads by incremental pushover analysis and energy-based methods. The results of the incremental pushover analyses performed for the frames considered are evaluated and the hysteretic energy values consumed in these sections are calculated by using the rotation values in the plastic joints formed in the collapse mechanisms obtained. The total energy consumed by the structure was determined as the sum of the hysteretic energy values consumed at the plastic joints of the system in case of collapse [5]. Sahin et al. and Garip and Eren developed a shear ratio calculation for static project authors to use in their calculations. The required shear ratio for shear-framed structures is determined according to the Virtual Work Theorem method by considering Z1, Z2, Z3 soil classes. For this purpose, 7 and 9 storey shear-framed buildings with I=1 in the 1st and 2nd earthquake zones were designed and analysed in SAP2000 structural analysis software. The relative storey drifts obtained as a result of the analyses were compared with the limit values in TBEC-2007 and the adequacy of the shear wall lengths was tried to be determined [6, 7]. Hube et al. in their study is to understand the observed damage in slender walls after 2010 Maule earthquake and to reproduce and analyse experimentally the seismic behaviour of such walls. The second objective is to provide recommendations to estimate the lateral displacement and the effective stiffness of slender walls. Test results showed that a 25% reduction in wall thickness reduced the ultimate displacement capacity, ductility, and energy dissipation ability of the wall. Closed stirrups and crossties were effective in increasing displacement capacity and ductility, and closed stirrups were effective in preventing out-of-plane buckling of the wall after compression failure. The average effective stiffness ratio of the tested walls was 0.39, which is slightly larger than the ACI-318 suggestion of 0.35 [8]. Ulutaş et al. determined the shear wall ratio that should be included in the plan for school type buildings to be safe against earthquakes depending on the number of storeys. These shear wall dimensions were divided into the storey areas and the shear wall ratios were determined depending on the number of storeys [9]. Tunç and Al Ageedi carried out structural analyses on a total of 40 buildings with different building and wall dimensions to determine the optimum ratio of shear wall area to storey plan area in reinforced concrete buildings. According to the results of these 40 storey buildings, it was concluded that the further the walls are from the geometric center, the better their structural performance will be as long as the overall wall symmetry is maintained [10]. Erdil and Gündüz to determine the effectiveness of shear walls to be used in reinforced concrete buildings, shear walls designed in different numbers and thicknesses were placed in different areas in the plan. As a result of the analyses, it was determined that placing shear walls with the same area in the building by dividing them into parts reduces the shear force and moment effectiveness of the shear wall, the global stiffness of the building decreases as a result of the shortening of the shear wall length, and finally the displacements and periods increase [11]. Onat and Usta in their study, investigated the effects of shear walls used in high-rise reinforced concrete buildings and the placement of shear walls on the earthquake performance of the building. When the models with different placement of shear walls were analysed, it was concluded that when the shear walls were placed in L-shape, they obtained the lowest

period and relative storey drift values and that the placement of shear walls in this way may be safer than other placement types when designing reinforced concrete high-rise buildings [12]. Atmani et al. investigate considers the influence of plastic length L_p, concrete compressive strength f_{c28}, longitudinal reinforcement ratio ρ_l, transverse reinforcement ratio ρ_{sh}, reduced axial load ν, confinement zone depth CS and focusing on the geometric slenderness λ. A new limit of slenderness and appropriate deformations of rotations are recommended to provide an immediate help to designers and assistance to those involved with drafting codes [13].

From the technical literature review, it has been observed that there is limited research on the impact of building slenderness (height-to-width ratio H/L) on structural behaviour. This article aims to comparatively examine the effects of structural slenderness on the behaviour of reinforced concrete shear-frame system buildings. To achieve this, 3 square-plan buildings with equal heights and varying H/L (building slenderness) of 0.67, 1.0, and 2.0 were considered. The structural systems were designed such that the ratio of the total area of shear wall elements to the storey area remained consistent. A total of 15 models were created, incorporating these 3 building configurations and 5 different soil types recommended in the TBEC. Structural analyses were conducted using both linear and non-linear analysis methods. The findings elucidate the effect of structure slenderness on linear and non-linear structural behaviour across different soil types.

II. MATERIAL AND METHOD

In this study, the impact of structural slenderness on the behaviour of different soil classes was investigated for a reinforced concrete building with a wall-frame system. To accomplish this, 3 building models were created, each with a building height of 24 m and plan dimensions of 12 m, 24 m, and 36 m, respectively. This resulted in vertical rectangular prism, cube, and horizontal rectangular prism-shaped buildings with height-to-plan-size ratios of 0.67, 1.0, and 2.0, respectively. Furthermore, the building structural system was symmetrically designed in both horizontal directions, and the shear wall ratios in the models were set equal to the storey areas. Each building model comprised 8 storeys, with a storey height of 3 m. The modelling incorporated the effective section stiffnesses specified in the Turkish Building Earthquake Code (TBEC) [14]. Additionally, a rigid diaphragm was assumed for the slabs, the column-beam connection was considered semi-rigid, and the vertical structural elements were assumed to be fully embedded in the foundation. Details regarding the building models used in the study are provided in Figure 1, and the necessary parameters for structural analysis are outlined in Table 1. Specifically, the column dimensions for each storey were set at 400x400 mm, beam dimensions at 250x500 mm, shear wall dimensions at 250x4000 mm, and slab thickness at 150 mm.

The behaviour of three building models with different slenderness, while maintaining a constant ratio of shear wall areas to storey areas, was evaluated separately for the ZA, ZB, ZC, ZD, and ZE soil classes specified in the TBEC. Design spectra corresponding to the DD2 earthquake level for each soil class are provided in Figure 2, with the necessary parameters outlined in Table 2. Structural analyses were conducted using the Sta4-Cad program [15]. Various aspects were examined, including earthquake load per unit mass, relative storey drifts, levels of secondary storey effects, overturning moments for shear walls, building overturning verifications, and structural performances. The linear and non-linear structural analysis results for each building model were compared to assess their behaviour under seismic loading conditions.

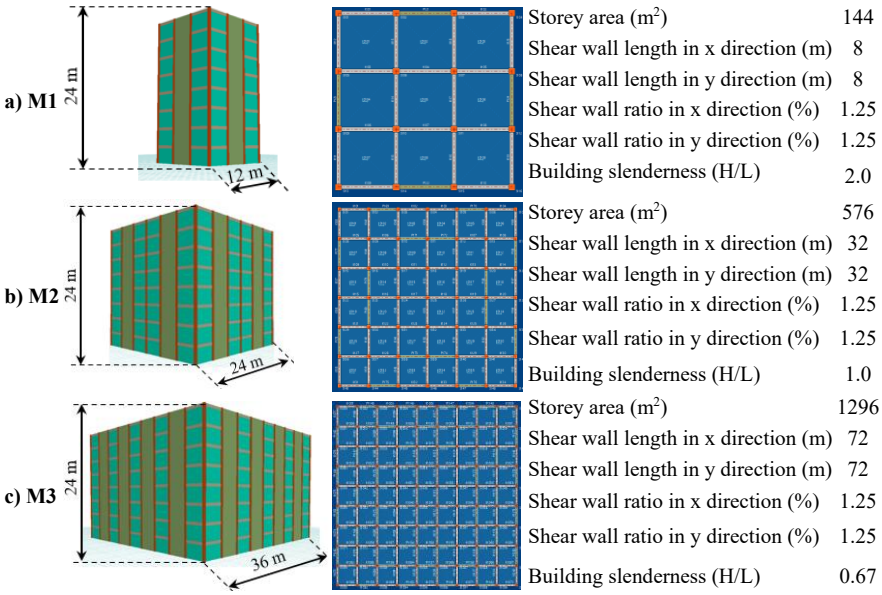


Figure 1. Information on building models

Table 1. Design parameters

Building Importance Coefficient (I)		1
Structural Behaviour Coefficient (R)		5.6
Strength Excess Coefficient (D)		2.5
Live Load Participation Coefficient (N)		0.3
Column Cross-Section Dimensions (mm)		400 x 400
Beam Cross-Section Dimensions (mm)		250 x 500
Thickness of Shear Walls (mm)		250
Slab Thickness (mm)		150
Eccentricity		%5
Damping Ratio		%5
Material Properties	Concrete	C30
	Steel Bar	B420C
Modulus Of Elasticity (MPa)	Concrete	31800
	Steel Bar	200000
Slab Loads	Dl (kN/m^2)	2.12
	LL (kN/m^2)	2
Brick Wall	Thickness (mm)	130
	Load	6.25
Reinforced Concrete Unit Volume Weight (kN/m^3)		25

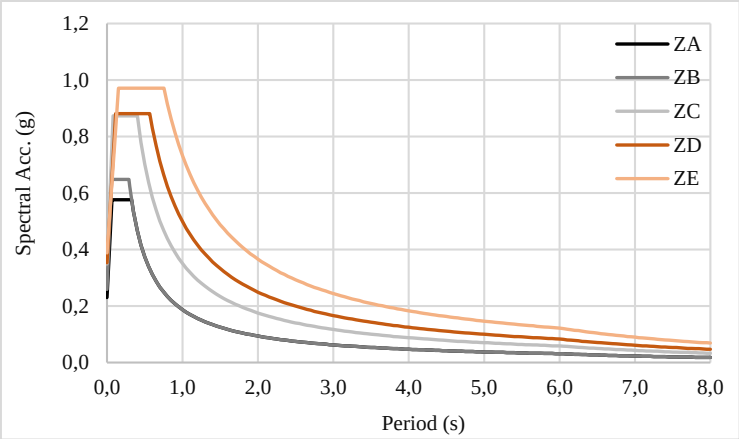


Figure 2. Design spectrums for different soil classes

Table 2. Design spectrums parameters

Soil Classes	T_A (s)	T_B (s)	S_S (g)	S_1 (g)	PGA (g)	S_{DS} (g)	S_{D1} (g)
ZA	0.065	0.325	0.72	0.234	0.303	0.576	0.187
ZB	0.058	0.289	0.72	0.234	0.303	0.648	0.187
ZC	0.08	0.402	0.72	0.234	0.303	0.873	0.351
ZD	0.113	0.566	0.72	0.234	0.303	0.881	0.499
ZE	0.151	0.755	0.72	0.234	0.303	0.971	0.732

Latitude: 41.205507 Longitude: 32.656853

Figure 3 shows the determination of Building Height Classes (BYS) for 5 different soil classes of the 3 building models used in the study. In this way, I represent the Building Importance Coefficient; BKS, Building Usage Class; S_{DS}, Short Period Design Spectral Acceleration Coefficient; DTS, Earthquake Design Class and H_N indicates building height.

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the influence of structural slenderness on building behaviour across different soil classes was investigated using both linear and non-linear analysis methods. To achieve this, structural analyses were conducted on three reinforced concrete wall-frame system building models, each featuring square storey plans and equal heights of 24 meters. The storey areas of these models were 144, 576, and 1296 square meters, respectively. The ratio of building height to storey plan length (H/L) was varied across the models, resulting in ratios of 0.67, 1.0, and 2.0, respectively. Additionally, when designing the storey plans of the building models, efforts were made

to overlap the storey mass and stiffness centres to minimize torsion effects. Furthermore, earthquake calculations considered minimum eccentricity and the structural system was meticulously designed to ensure that the ratio of shear wall area to storey area remained consistent in both horizontal directions across all models. This approach allowed for a comprehensive examination of how structural slenderness influences building behaviour under seismic loading conditions.

A. Linear Analysis

Figure 4 illustrates the ratios of total base shear force to structure weight for different soil classes across each model. It is evident from the figure that the base shear force values, relative to structure weight, are greater in the M2 models for each soil class compared to M1 and M3. Conversely, the building models with the smallest ratios are M1's. These findings suggest that as the H/L value approaches 1.0 for buildings in the examined geometry, the earthquake load acting on the buildings increases proportionally to their weight. Additionally, when considering the effects of soil classes, results for ZA and ZB soil classes appear to be quite close for all 3 models. However, there is an exponential increase in results starting from the ZC soil class. For instance, while the ratio obtained for the ZE soil class in the M1 model is 3.21 times compared to the ZA soil class, this increase is 3.06 and 3.18 times for M2 and M3, respectively. These observations underscore the significant influence of both structural slenderness and soil class on the seismic response of the buildings under consideration.

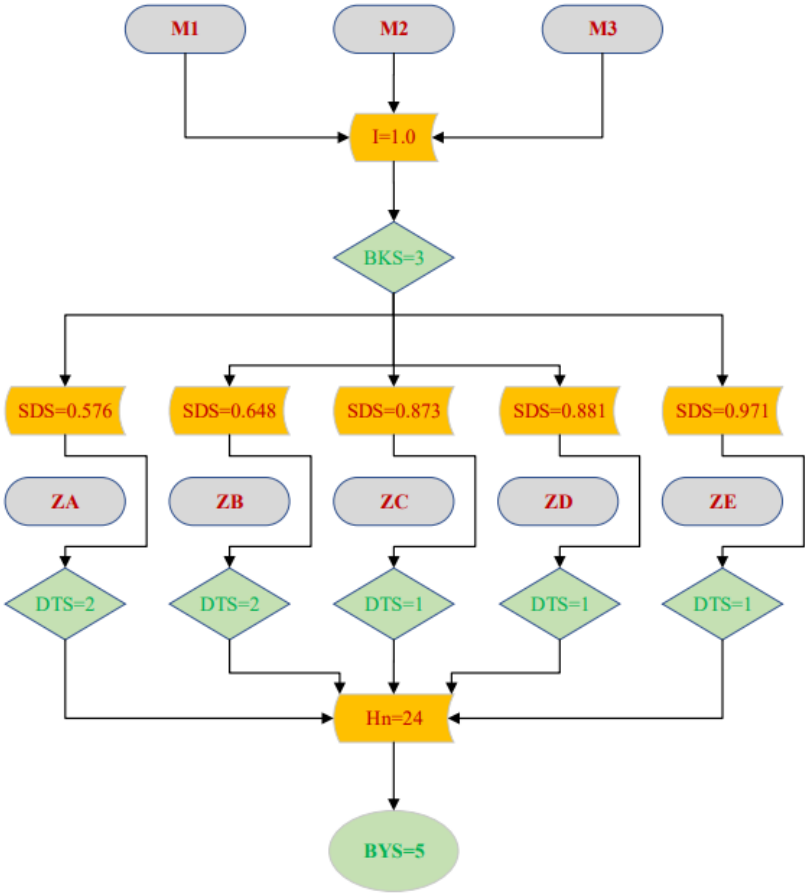


Figure 3. Building height classes of models according to TBEC

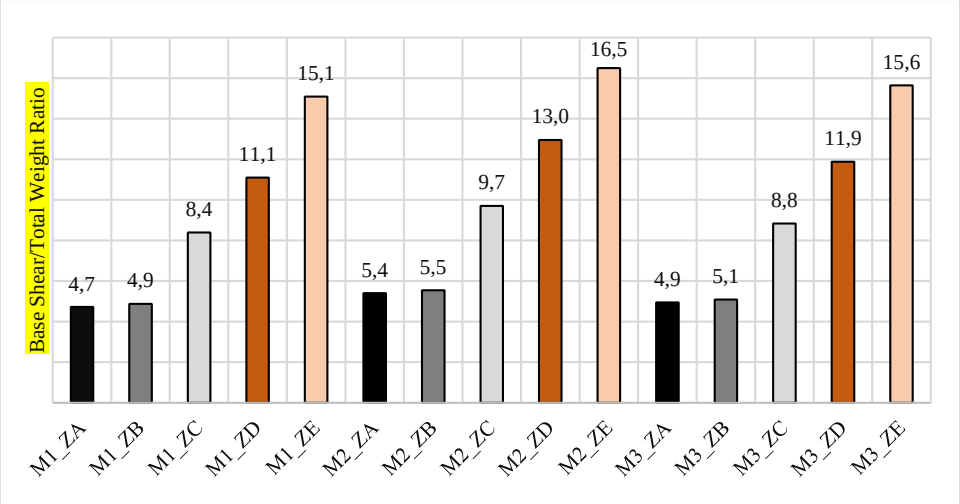


Figure 4. The ratios of total base shear force to structure weight for different soil classes

Figure 5 depicts the maximum second order effects obtained from structural analyses. It is evident from the figure that the models with the highest second order effects are M1, while the models with the lowest are M2 models. In other words, the least second order effects were observed in building models with an H/L ratio of 1.0. When considering the effect of soil type, the largest second order effects for each model are observed in ZC type soil. Specifically, for ZA and ZB soil types, in the M1 model where the structure slenderness is 2.0, there is an approximately 1.42-fold increase compared to the M2 model, which has the smallest second order effects with a slenderness ratio of 1.0. Similarly, this increase was approximately 1.47 for ZC and ZD soil types, and 1.46 for ZE soil type. In M3 models, where the structure slenderness is 0.67, the increase in second order effects is approximately 1.27 times compared to M2 models. These findings underscore the significant impact of both structural slenderness and soil type on the magnitude of second order effects in the analysed building models.

Figure 6 illustrates the base load values per square meter for the considered models. A notable observation from the figure is that despite the increase in building footprint, the unit load on the foundation decreases as the storey area increases. Specifically, although the total building weight increases by 3.75 times for the M2 model compared to the M1 model, the load value per unit area for the foundation decreases by 1.07 times due to the increase in storey area. Similarly, when comparing the M3 and M1 models, where the building weight increases by 8.25 times, the load value per unit area decreases by 1.09 times. These findings indicate that the soil type does not significantly affect the results. It is evident that if the building height remains constant, the load on the foundation decreases even as the total structure weight increases due to the increase in the structure slenderness ratio. This phenomenon occurs in buildings where the same size cross-sections are used.

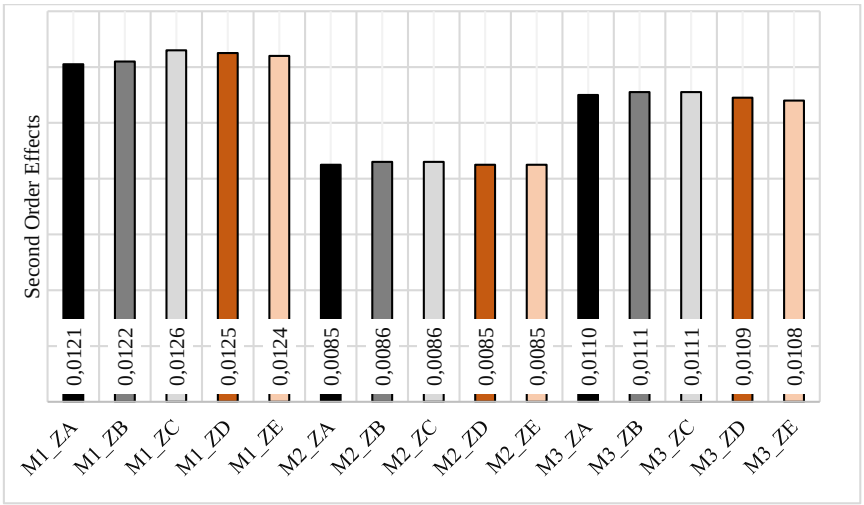


Figure 5. Maximum second order effects for different soil classes

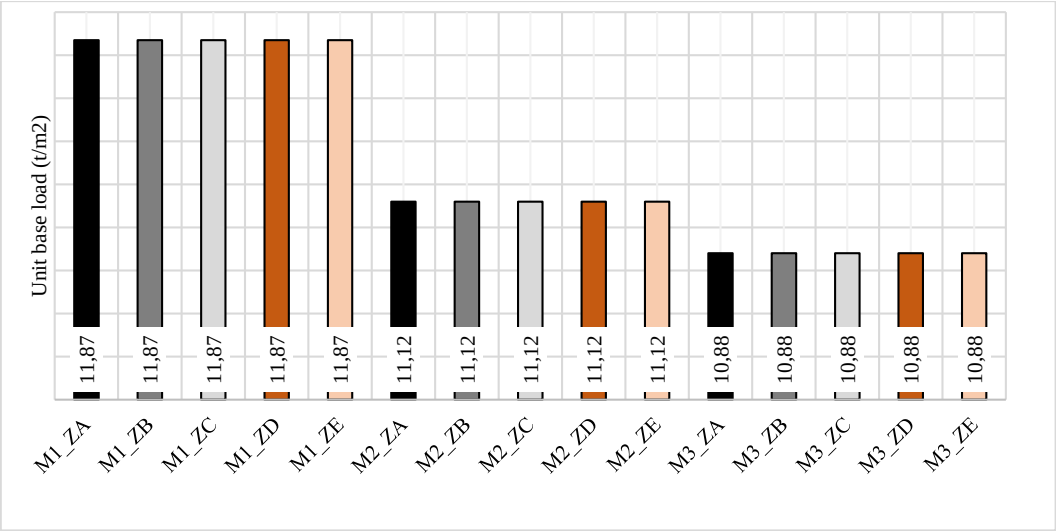


Figure 6. The base load values per square meter

Figure 7 presents the ratios of building base overturning moments to building weights. Observing the figure, it becomes apparent that while the results for ZA and ZB soil types, characterized as hard soil (rock), are relatively similar, the discrepancies between the ratios escalate notably as soil conditions deteriorate, transitioning to more flexible conditions. Specifically, in buildings situated on ZC type soil, described as sandy soil, an increase of 1.79 times for M1, 1.82 times for M2, and 1.81 times for M3 was observed compared to buildings on ZA type soil. This trend continues with more significant disparities as soil conditions worsen. For instance, in buildings on ZD type soil, the increase was calculated as 2.43, 2.46, and 2.48 times for M1, M2, and M3, respectively. Similarly, in buildings on ZE type soil, characterized as soft soil, the ratios increased by 3.32, 3.16, and 3.30 times for M1, M2, and M3, respectively, compared to buildings on ZA type soil. These findings suggest that while the slenderness effect has minimal impact on results for hard soils (ZA and ZB) and relatively hard soil (ZC), the increase in the slender M1 model is most pronounced as soil conditions worsen, indicating the effectiveness of slenderness in adverse soil conditions. Notably, when comparing soft soil (ZE) to hard soil (ZA), the least increase is observed in the M2 model with an H/L ratio of 1.0.

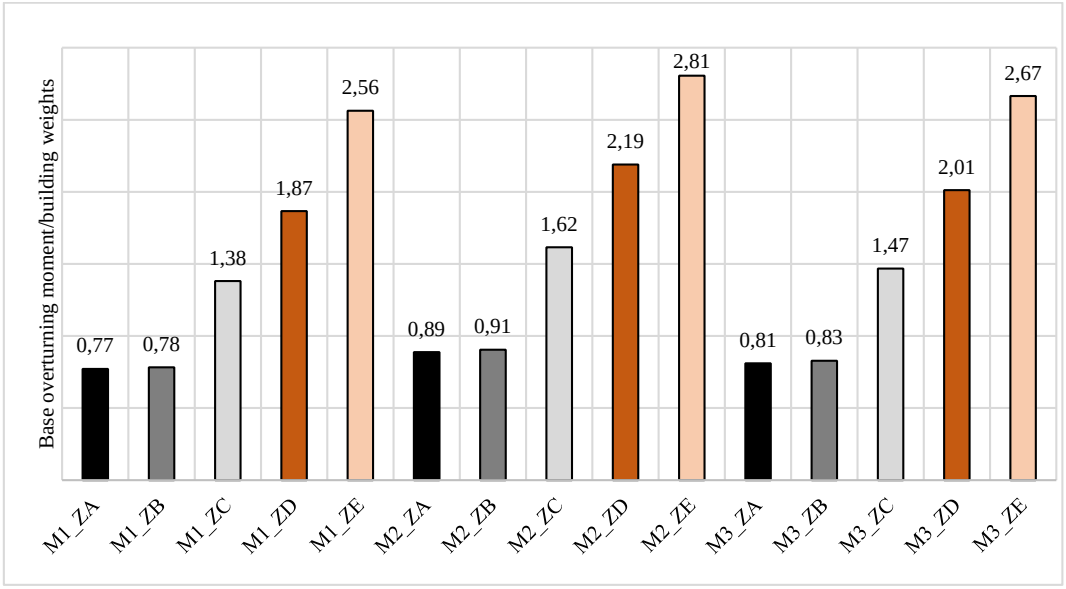


Figure 7. The ratios of building base overturning moments to building weights

Figure 8 displays the average reinforcement ratios required for the structural elements across the 15 models created for different soil classes. In Figure 8, ρ shows the required reinforcement ratio as a result of the calculation, while ρ_{min} represents the minimum reinforcement ratio calculated according to TBEC conditions. It should be emphasized that since Figure 8 shows the required reinforcement amount as a result of the structural analysis, in some cases, ρ/ρ_{min} values were less than 1.0 for some elements. Although, in practice, it is necessary to design according to the minimum reinforcement ratio in such cases, the required reinforcement ratios at the end of the calculation were directly examined in order to make a comparison. Notably, since the minimum

reinforcement ratio for shear walls is sufficient in all models, there is no discernible difference in average reinforcement ratios for shear walls. For columns, there is little disparity in the average reinforcement ratios required for ZA and ZB soil types across all models. However, as soil conditions deteriorate, the rates in the M1 model, characterized by higher slenderness, generally surpass those of other models. Conversely, for beams, the required reinforcement increases as soil conditions worsen, progressing from the M1 model, with a significant slenderness effect, to the M3 model, with less slenderness effect. From these evaluations, it is apparent that structures with the same shear wall ratio exhibit increased stress on columns in slender structures, while beams endure heightened stress in structures with less slenderness.

Figure 9 presents a comparison of relative storey drifts. Upon examination of this figure, it becomes evident that the results for ZA and ZB soil classes are closely aligned. However, a notable divergence is observed as we transition from ZC to ZE soil classes, highlighting the effect of structural slenderness on the results. Across all soil classes, the relative storey drift levels in the M1 model, characterized by the highest slenderness, exceed those of other models. Conversely, the models with the lowest relative storey drifts are the M2 models with an H/L ratio of 1.0. Specifically, the ratio of the maximum relative storey drift values of the M1 model to the maximum relative storey drift values of the M2 model is approximately 1.35, whereas this ratio is 1.17 for M3-M1. Furthermore, the effect of soil class on relative storey drifts is illustrated in Figure 10. From this figure, it can be observed that the ratio of the maximum relative storey drifts obtained for ZE, ZD, ZC, and ZB soil classes in the M1 model to the maximum relative storey drifts obtained for ZA soil class is 3.47, 2.48, 1.82, and 1.03, respectively. Similarly, these ratios for M2 are 3.22, 2.513, 1.83, and 1.02, and for M3, they are 3.36, 2.53, 1.82, and 1.03. These findings indicate that relative storey drifts increase as soil conditions worsen, with the largest increase observed in the M1 model, characterized by the highest structural slenderness.

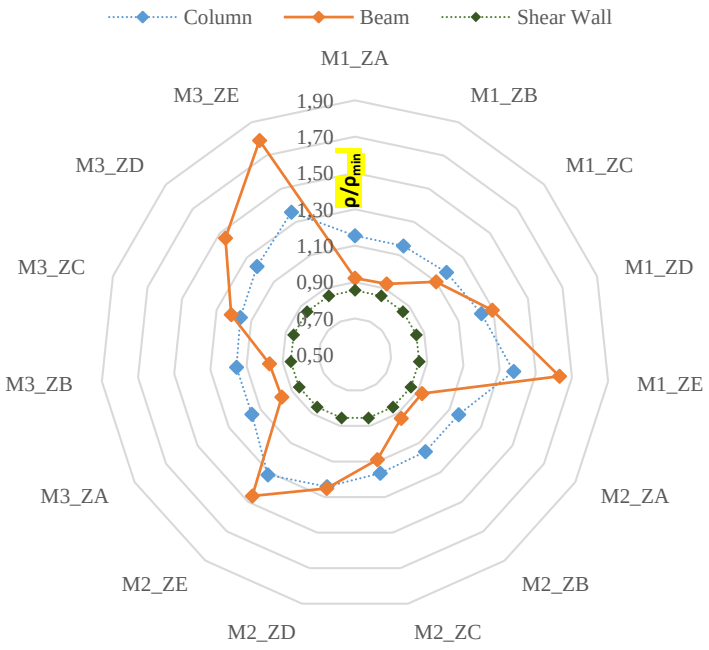


Figure 8. The average reinforcement ratios required for the structural elements ρ/ρ_{min}

Figure 11 illustrates the ratios of the base moment of the edge axis shear walls to the total base moments of the structure. Upon examination of this figure, it is apparent that the edge axis shear walls are subjected to greater stress in M1 models, where the slenderness effect is high. Furthermore, the difference in soil class did not exert a significant influence on this situation. The ratio of total shear wall base moments in structural systems to building base moments was calculated as 0.33 in M1 models, 0.59 in M2 models, and 0.32 in M3 models. Notably, according to the TBEC conditions, the ratio greater than 1/6 stipulated for edge axis walls is not valid for any model. However, the condition that the ratio of the total wall base moment to the total structure base moment exceeds 0.4 is only met in M2 models.

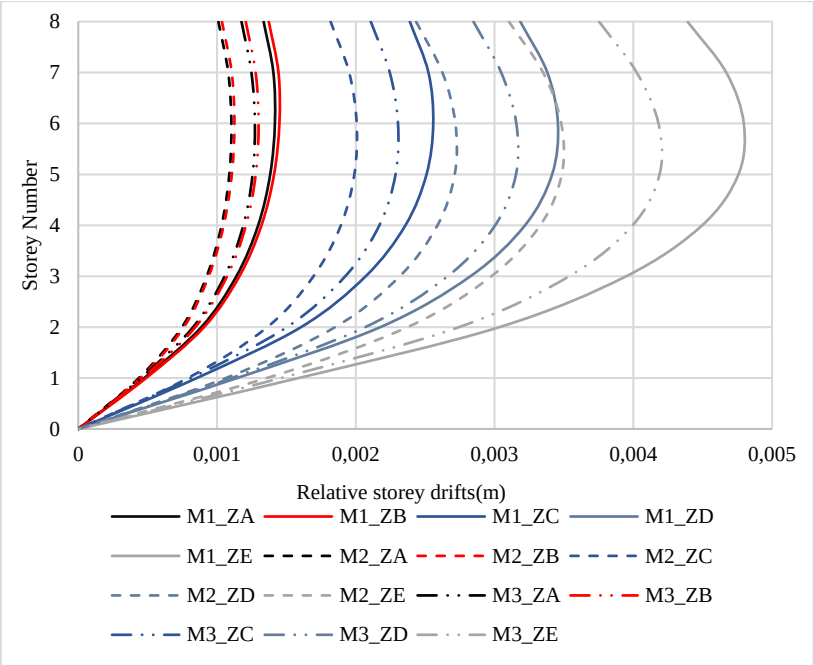


Figure 9. The comparison of relative storey drifts

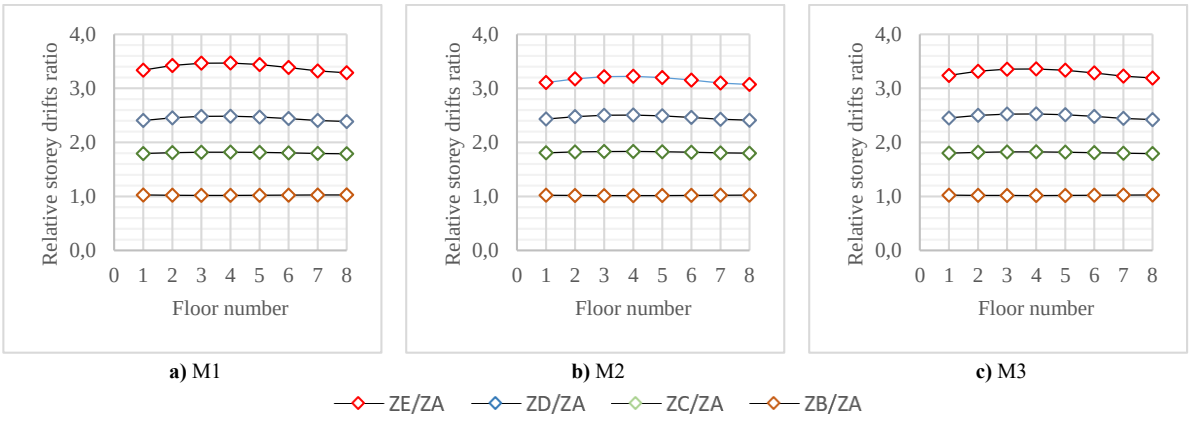


Figure 10. The effect of soil class on relative storey drifts

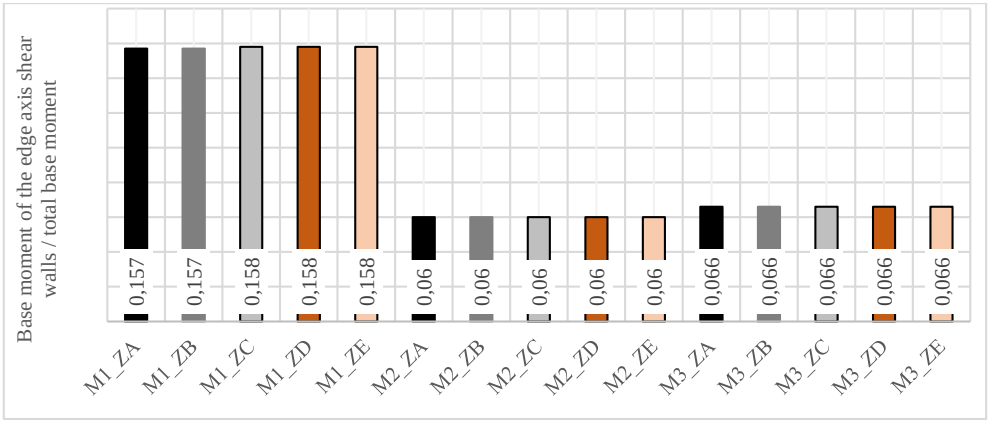


Figure 11. The ratios of the base moment of the edge axis shear walls to the total base moments

B. Nonlinear Analysis

The material models used for the nonlinear multi-mode pushover analysis are given in Figure 12. For each soil class, unit deformations in structural elements were evaluated according to TBEC, and damage levels were determined (see Figure 13). In the nonlinear calculation model, columns and beams are modelled as frame elements, while shear wall elements are modelled as area elements. Effective section stiffnesses were considered

in the calculations in accordance with TBEC. The analysis model assumed fully rigid joints, and the nonlinear behaviour was represented using the distributed plastic hinge model. Both dead loads and live loads, multiplied by the live load participation coefficient, were accounted for as mass sources. Concrete and reinforcement damage limit values are determined by the equations (1), (2), (3) and (4) for the *Collapse Prevention* (CP) performance level. Definition of the parameters in these equations are;

- ε_c: concrete unit strain
- ω_{we}: effective confining reinforcement ratio,
- $\propto_{se}$: confinement reinforcement efficiency coefficient,
- $\rho_{sh,min}$: the smaller of the volumetric transverse reinforcement ratio in two horizontal directions,
- f_{ywe}: expected yield strength of the stirrup reinforcement,
- f_{ce}: expected compressive strength of concrete,
- ρ_{sh}: volumetric stirrup reinforcement ratio,
- A_{sh}: area of stirrup reinforcement,
- s: spacing of stirrup reinforcement,
- a_i: the distance between the axes of longitudinal reinforcements supported by a stirrup arm or tie spacer horizontally,
- b_o and h_o: the cross-sectional size between the axes of the stirrup reinforcement surrounding the core concrete

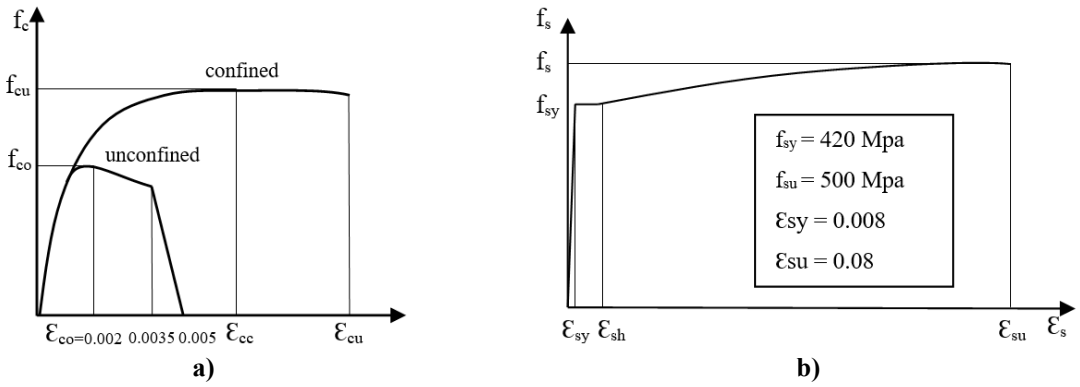


Figure 12. Nonlinear material models a) Concrete b) Steel bar [14,16]

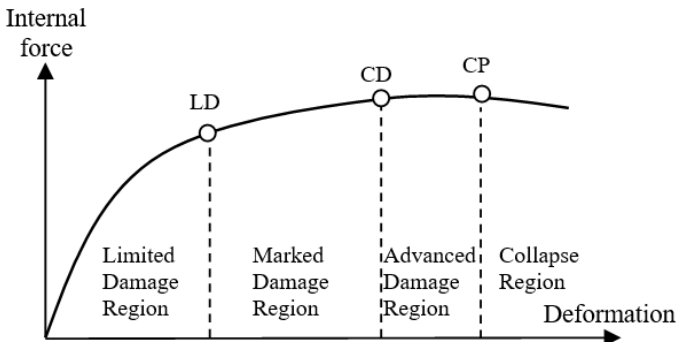


Figure 13. Sectional damage regions according to TBEC [14]

Limit values for *Controlled Damage* (CD) performance level are considered as 75% of CP values, and limit values for *Limited Damage* (LD) performance level are 0.0025 for concrete crushing and 0.0075 for reinforcement. Accordingly, the damage levels of structural elements, beams and vertical structural elements, and their distribution on storeys are given in Table 3. In addition, modal capacity diagrams for the x-x direction are given in figure 14. It can be seen from the modal capacity diagrams that the models with the highest stiffness for each soil class are the M2 models. This situation can be explained by the fact that the horizontal stiffness in the

M1 models is lower than in other models, and in the M3 models, the structural period is extended by increasing the mass, although the slenderness effect is minimal.

$$\varepsilon_c{}^{(CP)} = 0{,}0035 + 0{,}04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0{,}018 \quad (1)$$

$$\omega_{we} = \propto_{se} * \rho_{sh,min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (2)$$

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k * s} \quad (3)$$

$$\propto_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6 * b_0 * h_0}\right) * \left(1 - \frac{s}{2 * b_0}\right) * \left(1 - \frac{s}{2 * h_0}\right) \quad (4)$$

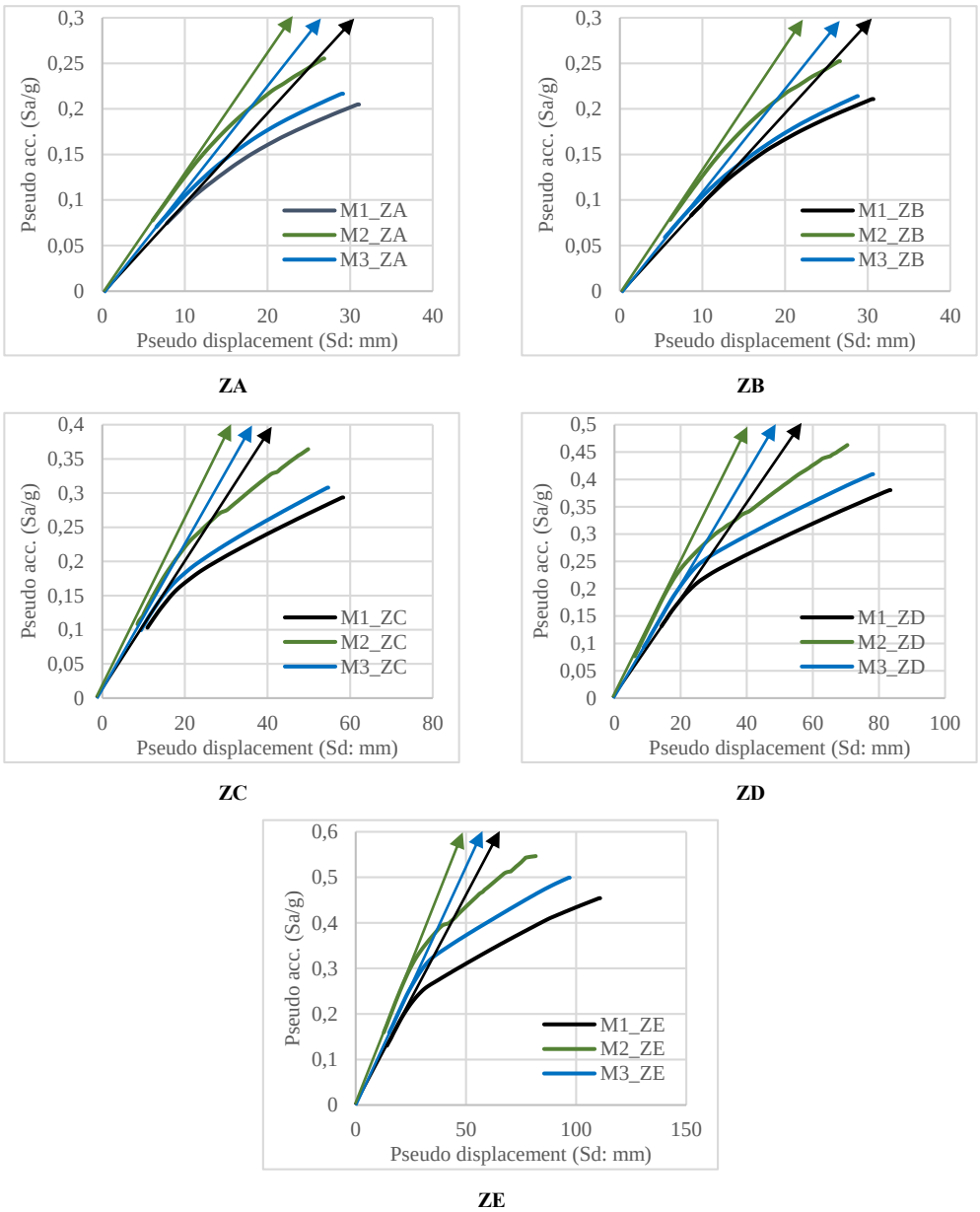


Figure 14. Modal capacity diagrams for the x-x direction

Table 3 shows that there is no damage to the models for ZA and ZB. However, it is seen that the damage levels, especially in the beam elements, increase with increasing horizontal load for ZC, ZD and ZE. In addition, it is seen that the damage levels on structural elements decrease as the structure slenderness decreases. From the results obtained, it was seen that the best structural performance was in the M3 models, and the most negative results were in the M1 models, which have the highest slenderness. Based on the analysis results, it can be said that although structural slenderness did not have a significant effect on hard soils, it could have a significant impact

on structural behaviour as soil conditions deteriorated. In addition, structural performance values are given in Table 4. Table 4 shows that all models for ZA and ZB soil types remain in the LD performance level; and all models except the M3 model for ZC, ZD, ZE soil types move to the CD performance level. Although the performance values obtained depending on the structural slenderness for different soil types are similar, Figure 15 reveals the differences in the damage distribution percentages in the structural elements.

Table 3. Damage levels of beams and vertical elements and their distribution on storeys (%)

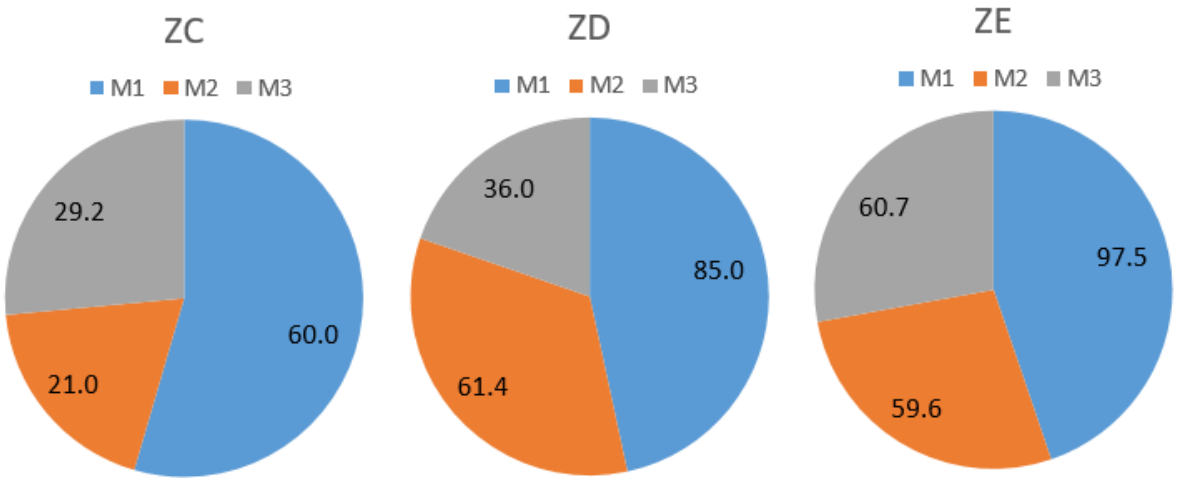
Soil Classes	Storeys	M1						M2						M3					
		Beam			Vert. Elements			Beam			Vert. Elements			Beam			Vert. Elements		
		LDR	MDR	ADR	LDR	MDR	ADR	LDR	MDR	ADR	LDR	MDR	ADR	LDR	MDR	ADR	LDR	MDR	ADR
ZA	8	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	7	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	6	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	5	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	4	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	3	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	2	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	1	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
ZB	8	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	7	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	6	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	5	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	4	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	3	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	2	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
	1	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
ZC	8	60	40	0	95.9	4.1	0	100	0	0	100	0	0	75	25	0	100	0	0
	7	40	60	0	99.3	0.7	0	100	0	0	100	0	0	50	50	0	100	0	0
	6	0	100	0	97	3	0	100	0	0	100	0	0	50	50	0	100	0	0
	5	0	100	0	94.7	5.3	0	100	0	0	100	0	0	63.9	36.1	0	94.8	5.2	0
	4	0	100	0	84.3	15.7	0	76.5	23.5	0	95.9	4.1	0	63.9	36.1	0	100	0	0
	3	20	80	0	95.1	4.9	0	0	100	0	76.9	23.1	0	63.9	36.1	0	100	0	0
	2	100	0	0	100	0	0	55.9	44.1	0	96.3	3.7	0	100	0	0	100	0	0
	1	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0
ZD	8	20	80	0	95.1	4.9	0	41.2	58.8	0	99.1	0.9	0	69.4	30.6	0	94	6	0
	7	0	100	0	99.2	0.8	0	5.9	94.1	0	99.1	0.9	0	47.2	52.8	0	98.7	1.3	0
	6	0	100	0	99.3	0.7	0	0	100	0	99.2	0.8	0	48.6	51.4	0	99.7	0.3	0
	5	0	100	0	99.4	0.6	0	0	100	0	98.6	1.4	0	36.1	63.9	0	94.9	5.1	0
	4	0	100	0	99.5	0.5	0	5.9	94.1	0	99.6	0.4	0	50	50	0	99.4	0.6	0
	3	0	100	0	99.5	0.5	0	55.9	44.1	0	100	0	0	61.1	38.9	0	97.3	2.7	0
	2	0	100	0	100	0	0	100	0	0	66.2	33.8	0	100	0	0	100	0	0
	1	100	0	0	100	0	0	100	0	0	76.4	23.6	0	100	0	0	100	0	0
ZE	8	0	100	0	94.3	5.7	0	29.4	70.6	0	98.6	1.4	0	31.8	68.2	0	98.5	1.5	0
	7	0	100	0	98.8	1.2	0	5.9	94.1	0	99.3	0.7	0	19.4	80.6	0	99.4	0.6	0
	6	0	100	0	99	1	0	0	100	0	98.1	1.9	0	0	100	0	99.4	0.6	0
	5	0	100	0	99.4	0.6	0	0	100	0	99	1	0	0	100	0	99.4	0.6	0
	4	0	100	0	99.6	0.4	0	29.4	70.6	0	99.9	0.1	0	36.1	63.9	0	99	1	0
	3	0	100	0	99.4	0.6	0	58.8	41.2	0	82.7	17.3	0	57.6	42.4	0	98.4	1.6	0
	2	0	100	0	99.9	0.1	0	100	0	0	65.1	34.9	0	69.4	30.6	0	97.7	2.3	0
	1	20	80	0	100	0	0	100	0	0	72.3	27.7	0	100	0	0	96.2	3.8	0

LDR: Limited Damage Region MDR: Marked Damage Region ADR: Advance Damage Region

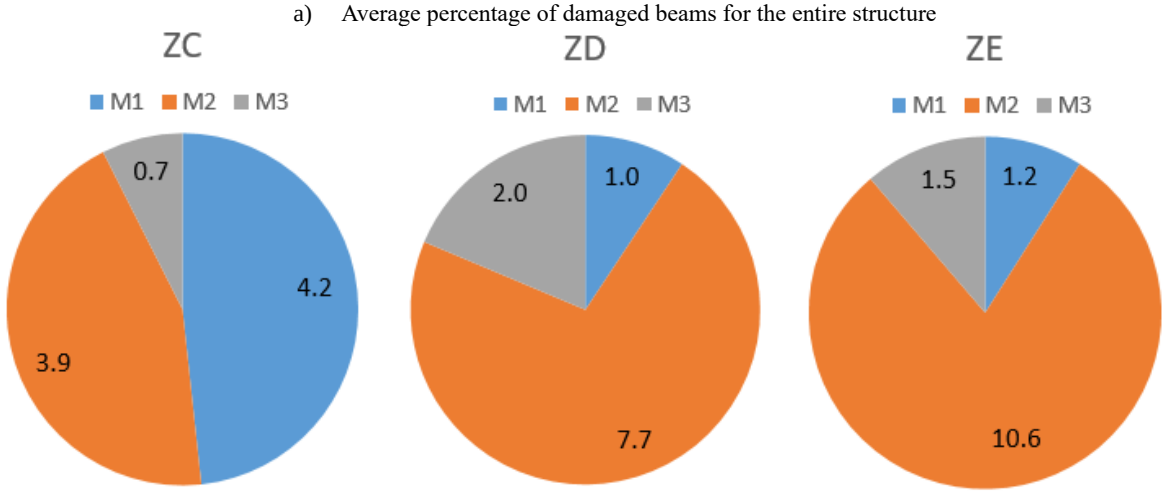
Table 4. Structural performance values

	ZA	ZB	ZC	ZD	ZE
M1	LD	LD	CD	CD	CD
M2	LD	LD	CD	CD	CD
M3	LD	LD	LD	CD	CD

LD: Limited Damage CD: Controlled Damage



a) Average percentage of damaged beams for the entire structure



b) Average percentage of damaged vertical structural elements for the entire structure
H/L values: M1=2.0; M2=1.0; M3=0.67

Figure 15. Average percentage of damaged structural elements for the entire structure

IV.CONCLUSION

In this study, the effect of building slenderness on behaviour by considering different soil classes was investigated using linear and non-linear methods. For this purpose, three models were created with the ratio of height to plan size as 0.67, 1.0 and 2.0. For models with equal building heights and a square storey plan, a wall frame structural system setup was created with equal ratios of total shear wall area to storey area in both horizontal directions. Each model was considered with 5 different soil classes and a total of 15 models were studied. The results obtained are summarized below.

- As the H/L ratio approaches 1.0, the earthquake load acting on the structure increases in proportion to its weight. In addition to, although the earthquake load acting on the structure is quite close for ZA and ZB, it increases rapidly for ZC, ZD and ZE.
- These results show that if the building height is the same, the unit load on the foundation decreases even though the total structure weight increases, due to the increase in the structure slenderness ratio, in structures where the same size structural element sections are used.
- It has been observed that the ratio of building base overturning moments to building weights increases due to increasing earthquake loads as soil conditions worsen. Although the results for ZA and ZB, which are described as hard rock soil, are quite close, it has been observed that the difference between the ratios increases rapidly as the soil conditions worsen.
- There was no significant variance noted in the average reinforcement ratios required for columns across models situated on ZA and ZB class soils. However, as the soil type deteriorated, the rates for the M1 model, characterized by the highest slenderness, generally surpassed those of other models. In contrast, for beam elements, the necessary reinforcement increased as the soil quality degraded. it can be concluded that for

structures with identical shear wall ratios, columns expose greater loads in slender structures, whereas beam elements expose greater loads in structures with less slenderness.

- When the relative storey-drifts were evaluated, it was seen that the ZA and ZB results were quite close to each other. However, the effect of structural slenderness from ZC to ZE on the results is clearly seen. For all soil classes, the relative storey drift levels in the M1 model, which has the highest slenderness, were higher than the other models. The models with the lowest relative storey drifts were the M2 models with the H/L ratio of 1.0.
- When the ratio of the base moment of the edge walls to the total base moment of the structure is examined, it is seen that the edge walls are more stressed in M1 models where the slenderness effect is high. In addition, the difference in soil class did not have a significant effect on this situation.
- According to the linear analysis results, it can be summarized that although it showed that the slenderness effect had little effect on the results for hard soils ZA, ZB and relatively hard soil ZC, it showed that slenderness was effective in adverse soil conditions as the soil conditions worsened.
- When the non-linear calculation results were examined, it was seen that there was no damage to the models for ZA and ZB. However, it was observed that the damage levels, especially in the beam elements, increased with increasing horizontal load for ZC, ZD and ZE. In addition, it has been observed that the damage levels in structural elements decrease as the structure slenderness decreases.
- The results showed that the best structural performance was in the M3 models, and the most negative results were in the M1 models, which have the highest slenderness. When the nonlinear calculation results were examined, it was seen that, similar to the linear calculation results, although structural slenderness did not have a significant effect on hard soils, it could have a significant effect on structural behaviour as soil conditions deteriorated.
- As the natural period decreased due to the increase in stiffness, the M2 models were exposed to more horizontal loads in proportion to their weight for each soil class, as they were subjected to greater earthquake effects.
- In the M1 models, the increasing average relative storey displacement value due to the low horizontal stiffness was effective in increasing the secondary order effects. In the M3 models, although the slenderness effect is minimal, second order effects increased due to the excess vertical load from the increased mass. In this case, when horizontal displacement and vertical load effects are considered together, the least secondary order effects emerged in the M2 models. This situation can be further explained by the fact that M2 models are exposed to relatively more horizontal loads than other models due to their rigidity, considering that the storey heights are equal.

REFERENCES

[1] Kasap, H., & Kolay, İ. (2003). Perdeli-çerçeveli sekiz katlı bir sistemde perde kalınlığının değişmesinin perdeler ve kolonlar arasındaki kesme kuvveti dağılımına etkisi. *Sakarya University Journal of Science*, 7(2), 132-138.
[2] Beyer, K., Dazio, A., & Priestley, N. (2011). Shear deformations of slender reinforced concrete walls under seismic loading. *ACI Structural Journal*, 108(2), 167-177.
[3] Tang, Y., & Zhang, J. (2011). Probabilistic seismic demand analysis of a slender RC shear wall considering soil-structure interaction effects. *Engineering Structures*, 33(1), 218-229.
[4] Sağlıyan, S., Sayın, E., & Yön, B. (2012). Sürekli tablalı kirişsiz döşemeli betonarme binalarda perde oranının göreli kat ötelemelerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 209-220.
[5] Uçar, T., & Merter, O. (2012). Narinlik oranının yanal ötelenmeli betonarme çerçevelerin göçme davranışına etkisinin doğrusal olmayan ve enerji esaslı yöntemlerle araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(1).
[6] Şahin, H., Alyamaç, K.E., & Erdoğan, A.S. (2013). Perdeli çerçeveli yapılarda zemin sınıfı ve kat adedi dikkate alınarak gerekli perde oranının tespiti. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(1), 74-86.
[7] Garip, Z.Ş., & Eren, E. (2022). Perde duvarlı ve çerçeveli betonarme binalarda deprem tasarım sınıflarının bina maliyetine etkisi. *Düzce University Journal of Science and Technology*, 10(2), 700-715.
[8] Hube, M.A., Marihuén, A., de la Llera, J.C., & Stojadinovic, B. (2014). Seismic behavior of slender reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, 80, 377-388.
[9] Ulutaş, H., Dilmac, H., Tekeli, H., & Demir, F. (2019). Okul binalarında bulunması gereken perde duvar oranı üzerine bir çalışma. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 1-10.
[10] Tunç, G., & Al-Ageedi, M. (2020). A parametric study of the optimum shear wall area for mid-to high-rise RC buildings. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 601-617.

[11] Erdil, B., & Gündüz, Y. (2021). Betonarme binalar için perde duvar etkinliğinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 655-669.
[12] Onat, Ö., & Usta, P. (2021). 20 katlı betonarme yapının farklı perde duvar yerleşimlerine göre deprem analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 363-369.
[13] Atmani, A., Boudaoud, Z., & Djebbar, N. (2021). Slenderness ratio and influencing parameters on the NL behaviour of RC shear wall. *Civil Engineering Journal*, 7(12), 2043-2067.
[14] TBEC, (2019). *Türkiye Building Earthquake Code*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 30364 Sayılı Resmi Gazete.
[15] Sta4-CAD (2021). Structural analysis for computer aided design*"*, ver.14.1. http://www.sta4.net/, (20.03.2024)
[16] Tozlu, İ., & Gürsoy, Ş. (2024). Farklı yüksekliğe sahip betonarme binalarda perde duvar yerleşiminin bina davranışına etkisinin doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle incelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 493-509.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 108-136, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1463785
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Real-Time Control and Performance Analysis of PLC-SCADA Supervised Stand-Alone Solar Tracking Systems

PLC-SCADA Denetimli Bağımsız Güneş Takip Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Kontrolü ve Performans Analizi

Faysil Alfirjani[1], Hüseyin Altınkaya[2*]

Geliş / Received: 03/04/2024 ***Revize / Revised: 05/07/2024*** ***Kabul / Accepted: 05/07/2024***

ABSTRACT

This paper presents the real-time control of single-axis and dual-axis solar tracking systems, as well as monitoring of a fixed solar panel system, using PLC (Programmable Logic Controller) and SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). The systems were designed using a novel tracking mechanism and a novel energy generation evaluation method. Based on their efficiencies as well as the power they produced, these three solar panel systems were compared accordingly. In all three systems, identical solar panels having 100 Wp power were used. To control both single-axis and dual-axis solar panels efficiently, an S7-1200 type PLC was employed. Real-time clock and astronomical data were used to control the axis angle of the PV panels. The system was comprehensively monitored and controlled in real-time through the implementation of PLC-SCADA software. The obtained data were recorded and displayed on SCADA screen, and were subsequently analyzed to determine the power output of the three panels under varying climatic conditions. The evaluation of the obtained results was made accordingly. In a total of 61-day period which encompassed 42 days of sunshine, 11 days of cloud and 8 days of rain, double-axis photovoltaic panel produced 337.34 Wh, single-axis photovoltaic panel generated 314.32 Wh and fixed photovoltaic panel produced 220.49 Wh on average. On daily average, double-axis photovoltaic panel produced 7.32% more energy as compared to single-axis photovoltaic panel and 52.99% more energy as compared to fixed photovoltaic panel, whereas single-axis photovoltaic panel produced 42.55% more energy than fixed photovoltaic panel.

Keywords- Solar tracking system, PLC, SCADA, Energy generation

ÖZ

Bu makalede, PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) ve SCADA (Yönetimsel Denetim ve Veri Toplama) kullanılarak tek eksenli ve çift eksenli güneş takip sistemlerinin gerçek zamanlı kontrolü ve sabit bir güneş paneli sisteminin izlenmesi sunulmaktadır. Sistemler, yeni bir takip mekanizması ve yeni bir enerji üretimi değerlendirme yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu üç güneş paneli sistemi verimliliklerine ve ürettikleri güce göre karşılaştırılmıştır. Her üç sistemde de 100 Wp gücünde özdeş güneş panelleri kullanılmıştır. Hem tek eksenli hem de çift eksenli güneş panelini etkili bir şekilde kontrol etmek için S7-1200 tip bir PLC kullanılmıştır. PV panellerinin eksen açısını kontrol etmek için gerçek zamanlı saat ve astronomik veriler kullanılmıştır. Sistem, PLC-SCADA yazılımının uygulanması yoluyla gerçek zamanlı olarak kapsamlı bir şekilde izlenmiş ve kontrol

[1] Contact: faysilal88@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-3130-2418)
Department of Electrical-Electronics Engineering, Karabuk University, 78050 Karabük, Türkiye
[2*] Corresponding Author Contact: haltinkaya@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-1956-1695)
Department of Electrical-Electronics Engineering, Karabuk University, 78050 Karabük, Türkiye

edilmiştir. Elde edilen veriler kaydedilerek SCADA ekranında görüntülenmiş ve daha sonra değişen iklim koşulları altında üç panelin güç çıkışını belirlemek için analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların değerlendirmesi buna göre yapılmıştır. 42 gün güneşli, 11 gün bulutlu ve 8 gün yağmurlu olmak üzere toplam 61 günlük dönemde, çift eksenli fotovoltaik panel ortalama 337,34 Wh, tek eksenli fotovoltaik panel 314,32 Wh ve sabit fotovoltaik panel 220,49 Wh üretmiştir. Günlük ortalamada, çift eksenli fotovoltaik panel tek eksenli fotovoltaik panele göre %7,32 ve sabit fotovoltaik panele göre %52,99 daha fazla enerji üretirken, tek eksenli fotovoltaik panel sabit fotovoltaik panele göre %42,55 daha fazla enerji üretmiştir.

Anahtar Kelimeler- Güneş takip sistemi, PLC, SCADA, Enerji üretimi

I. INTRODUCTION

The global importance of clean and renewable energy has become increasingly apparent in recent times. Reduction of carbon emissions, achieved through the decreased usage of fossil fuel resources, is the primary objective for many countries across the globe. Reducing the use of fossil fuel resources will only be possible with the increase in energy production and efficiency of renewable and clean energy resources. Solar energy has an important place among renewable energy resources, and its share in electricity production has increased significantly in the last decade. In 2022, this share was found to be 4.5% in the world [1]. As of March 2024 in Turkey, the share of solar energy in power plants was 11.74% in terms of installed power and its share in total electricity production was 4.93% [2].

Solar power plants and solar farms can be set up on a larger scale using fixed photovoltaic (PV) panels. Some small powered systems, some medium sized solar power plants, and some experimental setups can either be designed as uniaxial or biaxial. Nowadays, single-axis or dual-axis panels are considered less cost-effective and feasible due to their high installation and maintenance costs. Consequently, solar energy systems are being installed on a massive scale, primarily utilizing fixed PV panels.

The amount and efficiency of the energy obtained from PV panels can be increased by cooling systems, maximum power point tracking (MPPT) algorithms and solar tracking systems (STSs) [3,4]. STSs are known as systems that are effectively designed in order to track sunlight in such a way to absorb the energy efficiently using PV panels. Solar tracking systems may be classified according to drive types, tracking strategies, control systems, and degrees set for movement [5-7].

Solar tracking systems (STSs) can be classified into two categories as, closed loop and open loop systems based on their control mode. In the closed loop tracking system; timely position of the sun is detected using sensors and the data obtained is returned as feedback. Using the feedback control, comparator or microprocessor can detect the errors in the system easily, thus sending the signals to motors for the correction of errors. Such a system runs on the principle of feedback control system. Considering this system to be a pre-defined algorithm or a passive system based mainly on calculations conducted for trajectory of sun, drive system used for tracker's movement is of secondary importance. In the open loop tracking system, a controller is used in order to give the motors a driving signal mainly based on the operating algorithm and the input data of the system alone. In terms of desired output, open loop tracking system does not have any characteristics regarding the output data observation or evaluation. Therefore, the implementation process of this system is relatively simple and cost-effective as compared to the closed loop tracking system. The open loop tracking system has no process involving rectification, therefore, the aim has to be achieved by algorithm alone [8].

STSs can be categorized into two main groups based on their driver types: Passive Solar Tracking and Active Solar Tracking. The former has no mechanical drives to rotate the PV panels towards the radiations of sun. However, either shape memory alloys or low boiling point compressed gas fluid are used in this system in order to move the panels angularly as well as to establish equilibrium after being exposed to an unbalanced illumination. Despite being effective and less complex, this system fails to function with higher efficiencies at some lower temperatures.

Nomenclature

A_V	Voltage gain, V/V
I_{MP}	Typical value of maximum power voltage, V
I_{SC}	Short circuit current of the PV panel, A
V_{MP}	Typical value of maximum power current, A
V_{OC}	Open circuit voltage of the PV panel, V
FF	Fill factor
P_{MP}	Maximum power of PV panel, W
R_f	Feedback resistance, Ω
R_i	Input resistance, Ω
W_{DPV}	Average amount of produced energy of DPV, kWh
W_{FPV}	Average amount of produced energy of FPV, kWh
W_{SPV}	Average amount of produced energy of SPV, kWh
η	Efficiency percentage of the PV panels (%)

Acronyms

DAPV	Double-Axis Photovoltaic Panel
FPV	Fixed Photovoltaic Panel
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SAPV	Single-Axis Photovoltaic Panel
STS	Solar Tracking System

The later uses electrical drives and mechanical gear trains to move the panels to a point that is considered to be normal to the radiations of sun. This system uses sensors, microprocessors and motors in order to track solar trajectory and when compared with passive solar trackers, this system is known to be accurate and efficient. Such systems need to be powered as they consume energy [9].

The degree of movement determines the directions for an independent movement. Based on this, solar tracking systems may be classified as single-axis and dual-axis tracking systems. Parameters like longitude, latitude, solar azimuth angle, elevation angle, declination angle, incident angle and zenith angle play a vital role in determining appropriate locations and directions. In single-axis system, the movement tends to be in only one axis, and rotation is utilized to align the solar panel perpendicular to the incoming solar radiation. These trackers are known to be cheaper and less complex. However, when compared with dual-axis trackers, they are found to be less efficient. In dual-axis solar tracking system, the rotation tends to be in two axes and generally, the rotations are perpendicular. These trackers require more complex control systems and are efficient when compared with single-axis trackers [5,10].

According to the tracking strategy, STSs are divided into two main groups as sensor-based and sensorless. Solar Tracking System (STS) uses microprocessors and electro-optical sensors to detect the precise position of the sun. The microprocessor is initially fed with a signal, and subsequently, the motors are actuated through another signal from the microprocessor. Similar designs use DC motors with reduction gears, and sensors such as LDRs and electronic circuits for solar tracking system. The proposed systems use sensors, which give required inputs to electronic circuits, in order to actuate the motors. Time and Date type solar tracking systems only use pre-defined algorithms based on mathematical formulations calculating the sun's trajectory to determine the position of sun at a particular time interval and orient the PV panels accordingly. No feedback loop or sensor is involved in such a system. Hence, only algorithm plays the role in efficient working of the system. Solar tracking systems with Time, Date and Sensors work according to a predefined algorithm. They are used to check the overall operation conducted by sensors involved in the system, ensuring that the precise position of the sun is detected and that the panels are driven and oriented accordingly. A Dual-axis hybrid STS consisting of an open loop tracking system based on solar movement model and a closed loop tracking system based on feedback signals that are proportional to output power has been proposed for mixed tracking strategy [10].

The present study involves the real-time control of dual-axis, single-axis, and fixed PV panels. The STSs presented in this study are active, open-loop, driver type, and feedback sensorless systems, which do not require an external internet connection and are based solely on astronomical data such as date and time. By entering the surface azimuth angle and zenith angle values into data block in PLC software, the system can be operated anywhere in the world regardless of location. A novel structural design has been developed for dual-axis and single-axis solar tracking systems. The mechanical system designed for the PV panels allows for movement in both north-south (up-down) and east-west (right-left) directions. In order to provide these movements, worm gear reducers are used. The system can move 360 degrees and 180 degrees in east-west and north-south direction, respectively. In addition, the system is able to show both movements simultaneously. With these features, the

system differs positively from other solar tracking systems presented in the literature, as the limitations and weaknesses seen in its mechanical structures are eliminated. In conjunction with the novel structural design for dual-axis and single-axis solar tracking, a new method has been used to evaluate the energy generation performance. This approach enhances the accuracy and reliability of the obtained results, allowing for a more comprehensive understanding of the system's performance. In order to compare the energy produced by DAPV, SAPV and FPV, area under Power-time (P-t) curves were calculated. The integration method and trapezoidal rule were used to calculate the energy amounts accordingly. The obtained data were analyzed using MATLAB software. The integration process was conducted using the trapezoidal method, which utilizes the Trapz command available in MATLAB.

The biggest disadvantage of STSs designed using LDR sensors and other light-based sensors is the continuous variation in the intensity of light due to various reasons. This continuous variation is detected by the LDR sensor, leading to a constant change in the position of the solar panel. During conditions such as sunrise, sunset, rain, snow and fog, the system tends to orient towards the direction with the highest radiation, regardless of the direct incoming radiation. This may cause the system to remain in scanning mode to find the direction with the highest radiation and may require the motor to consume more energy for tracking. The sensors used in STS can be affected by environmental conditions over time and may produce inaccurate measurements. This can lead to incorrect detection of the sun's position or instability in the system. LDRs may deteriorate under high temperatures due to their structural sensitivity. Since LDRs are light-sensitive sensors, they can also be affected by artificial lighting during the day, which can result in power loss. Most of the photo sensors used in solar systems do not show a linear response under different temperatures and radiation values. The complexity and application costs of closed-loop LDR-based STSs are higher than those of open-loop systems. The disadvantages can be summarized as follows: stable operation only in open-air conditions - may not function properly in cloudy weather, higher energy consumption, high maintenance cost, and high price.

The designed system is free from the negative aspects of LDR-controlled solar tracking systems mentioned above and operates stably. The proposed automatic open-loop tracking system is not only cost-effective compared to closed-loop systems, but also provides greater accuracy, stability, and reliability than closed-loop systems in fluctuating weather conditions. Solar tracker based on date and time, which uses reduction gear units to move simultaneously in the east-west and north-south directions, has advanced accuracy with a tracking error of less than 0.2 degree, good motion stability, low maintenance costs, and easy installation. The system's reliability is enhanced by the inclinometer. Once the system is initially set up, it does not require manual alignment. By entering the surface azimuth and zenith angles based on the current coordinates, stable and reliable high solar energy harvesting efficiency can be achieved, regardless of the weather and the location. Another significant advantage of the system is that it does not require internet or GPS connectivity.

The rest of the paper is organized as follows: Literature review is presented in chapter 2. Some definitions of sun angles are given in chapter 3. In chapter 4, mechanical, electrical and software details of STSs, along with their design, installation and implementation, are given. In chapter 5, the results obtained are evaluated and discussed in detail. Finally, the conclusions have been provided in chapter 6.

II. LITERATURE REVIEW

A solar tracking system follows the position of the sun and keeps solar photovoltaic modules at the optimal angle to produce the maximum power output. This system offers benefits not only in terms of increased power and efficiency compared to fixed systems, but also plays a significant role in various solar energy applications, including economic analyses of large-scale solar energy projects. The idea behind designing a solar tracking system is to place solar photovoltaic modules in a position that can track the movement of the sun in order to capture the maximum amount of sunlight. Solar tracking system needs to be placed in such a way to take the best angle of incidence to maximize the electric power output. Several solar tracking principles and techniques have been proposed to efficiently track the sun. There are two main types of solar tracking systems depending on the degree of freedom of movement: single-axis solar tracking system and dual-axis solar tracking system. Various solar tracking systems such as single-axis tracking, dual-axis tracking, and single/dual-axis tracking have been evaluated in recent years. In the literature review given below, information on single-axis, dual-axis, single/dual-axis; sensor-based, sensorless; open loop, closed loop; and PID-fuzzy, image processing, real-time controlled STS is provided.

Jamroen et al. reported the design and implementation of an automatic dual-axis STS in their study [11]. The designed system aimed at adjusting the photovoltaic modules accurately. Using LDR logic design, the modules were oriented in primary and secondary axes in order to follow sun trajectory. In addition, a pseudo-azimuthal system was used in movement mechanism to achieve higher stability. Using a simple configuration method, LDRs were installed to eliminate tracking errors due to complex orientations. M. A. Jallal et al. developed an algorithm called DNNRODDPSO, based on machine learning, by hybridization of RODDPSO algorithm and

a novel neural network in order to predict the precise amount of produced energy. They used four dual-axis solar trackers in their system and the new combined system was called DAST system [12]. In a study, a single-axis tracker was designed by Y. Zhu et al. to enhance the overall solar radiation yield [13]. They used normal vector of tracked panels and analyzed the characteristics of the structure. Based on predicted model for solar radiation using geometrical relationship of sun and earth, their study was validated numerically.

Rousan AL et al. presented two efficient and intelligent single-axis and dual-axis STSs that were based on ANFIS [14]. The study confirmed that ANFIS can be used in design as well as implementation of STSs. The approach was successfully implemented during control of STSs. Orientation angle and optimum tilt values were predicted correctly and their simulation results showed high prediction rates and low mean square error rate.

Lim B et al. studied a large-scale industrial design of dual-axis tracker along with Multiple-Row-Elevation and Vertical axis Rotating Platform [15].

Based on tracking accuracy and energy gain, several studies presented evaluation techniques for STS types. In his analyses of solar resources on double axis tracking, Okoye [16] reported the yield to be high (1.86%-31.52%) when compared with single axis STS yield. Hence, based on results, the dual axis tracking was recommended. Only single axis STS was considered by Jacobson [17] and a comparison between V axis tracking and NS axis tracking was also provided. Usage of V axis tracking was suggested by him but it was not recommended to be used at higher latitudes. Performances of double axis tracking and fixed latitude tilt identical PV systems are theoretically and experimentally realized [18]. Martin [19] analyzed six PV plants that were installed in Spain and the complexity of dual axis trackers due to lack of maintenance were found during operation. By using an indicator, Bahrami et al. [20,21] combined the system's technical and economic feasibilities known as levelized-cost electricity. Their results showed that single-axis STSs could be more advantageous than dual-axis STSs in case of relatively lower installation cost for PV systems.

A real-time tracking algorithm was made by Antonanzas [22]. Under different weather conditions, the algorithm could maximize the production of energy. His results showed a 3.01% increase in solar radiation. In another study by Fernandez et al. [23], mathematical expressions for different single-axis STSs were presented. The models were based on some traditional approaches determining sun's position through global solar radiation. Barker et al. reported the dual-axis STS to have movements in two freedom degrees, thus tracking the sun easily in two different directions i.e. seasonal and daily motions [24]. Senturk and Eke [25] reported that dual-axis solar tracker was more accurate than single-axis STS while tracking sun trajectory. Another study by Roth et al. [26] showed that the output power of PV module may be increased up to approximately 33% as compared to the fixed PV module by using a dual-axis STS. Both single and double axes tracking systems can be classified as sensorless and sensor based solar.

In their study, Roth et al. [27] proposed an azimuth-altitude double-axis STS guided using closed loop control, and the tracker was fully automated. Batayneh et al. [28] proposed double-axis STS having altitude-azimuth mounting which is controlled by fuzzy controller. In different solar collector systems, solar tracker usage has been confirmed by previously conducted studies. Kacira et al. in Sanliurfa [29] reported average daily power gain of approximately 34.6% using double-axis STS when compared with fixed STS. Abdallah and Nijmeh [30] designed a double-axis STS for a PV system. It was reported that the system surface showed a 41.34% increase when compared with fixed surface. Abdollahpour et al. using image processing system, built a unique STS [31]. The system was based on relationship of opaque object with its shadow. According to their study, greater the angle between surface and object, longer will be the shadow if the surface is perpendicular to sunrays. And, if there is a 90^{o} angle, then no shadow will be casted on the surface.

In a study, Mavromatakis and Franghiadakis presented a novel single-axis tracker which could move plane of the collector in two directions through a special supporting structure [32]. Previous studies conducted on solar trackers show that they are used commonly in different solar collector systems. In a study, Chin et al. presented an active single-axis STS used in flat PV module systems [33]. The fuzzy logic controllers and conventional PI controllers were also compared in terms of performance. It was shown that at various optimum operating points, fuzzy logic controllers had better track capabilities and were faster [34]. H.-C. Lu and T.-L. Shih [35] presented fuzzy controlled dual-axis STS design having a maximum power point tracking. Proposed dual-axis STS design helps in improving the photovoltaic cell efficiency by tracking the sun. This mechanism has mainly two motors that allow the rotation of shafts to hold the PV panels in the optimum position.

A dual-axis STS based on real-time image processing and photo sensor was proposed in a study [36]. Dual axis solar tracker with satellite compass and inclinometer automatic positioning and tracking work was carried out [37]. A manual tracking mechanism was designed for a solar-powered steam injera stove [38].

The literature reveals that various configurations have been used in studies related to STS, including different mechanical setups, solar tracking methods (single or dual), solar tracking modes (active, passive,

manual), and solar tracking types (azimuth, azimuth-elevation, horizontal, vertical, etc.), as well as sensor-based and sensorless systems. Different configurations have been proposed in terms of hardware and software, considering cost, efficiency, and reliability. The literature provides recommendations for the most suitable configuration based on these factors.

In the studies found in the literature, generally only two PV systems (single-dual, single-fixed or dual-fixed) have been compared. In this study, however, three different PV systems, namely fixed, single-axis and dual-axis, have been compared. The mechanical installations in the literature have some weaknesses in terms of rotation angle, mechanical durability and operational flexibility. This study compares three different PV systems, including fixed, single-axis, and dual-axis systems. The system allows for two-directional movement (east-west and north-south) and provides a wide range of motion up to 360° in the east-west direction and 180° in the north-south direction. The system is based on astronomical date and time, eliminating the instability problem commonly observed in LDR systems. The system does not require internet or GPS, providing advantages in terms of cost and reliability. The reliability of the system is further enhanced by the inclinometer. Once the system is initially set up, it does not require manual alignment. The system can work regardless of the geographic location and weather conditions. A detailed comparison of the three systems was conducted based on measurements taken over 61 days under different weather conditions.

III. SUN ANGLES

Efficient utilization of solar energy requires knowledge of certain angles that exist between sun rays and earth surfaces. These angles include Latitude Angle, Declination Angle, Hour Angle, Tilt (Inclination) Angle, Zenith Angle, Elevation Angle, Azimuth Angle, Surface Azimuth Angle, and Incidence Angle. Among these, Tilt (Inclination) Angle, Zenith Angle, Azimuth Angle, and Surface Azimuth Angle are used in this study. Solar panels need to be adjusted according to these angles in order to track the solar position and utilize solar energy in the most effective way.

A. Tilt (Inclination) Angle

The tilt angle, represented as (β), refers to the angle between an inclined panel and the horizontal plane. Its orientation differs in the Northern and Southern Hemispheres, with north orientation in the Southern Hemisphere and south orientation in the Northern Hemisphere. This angle can range from 0º to 180º. By adjusting the panel's plane on the east-west horizontal axis with a single daily rotation, the tilt angle of that surface can be fixed for the day [5-7,39-41]. Equation 1 can be used to calculate the tilt angle.

$$\beta = | \Phi - \delta | \quad (1)$$

On the other hand, if the panel's plane is rotated continuously on the east-west horizontal axis, the tilt angle can be determined using equation 2, given as follows;

$$\tan \beta = \tan \theta_z \,.\, |\cos \gamma_s| \quad (2)$$

Similarly, if the plane is rotated around the north-south horizontal axis with continuous adjustments, the tilt angle of that surface can be determined using the equation given below:

$$[\tan \beta = \tan \theta_z \,.\, | \cos (\gamma - \gamma_s) | \quad (3)$$

Figure 1 shows the inclination (tilt) angle.

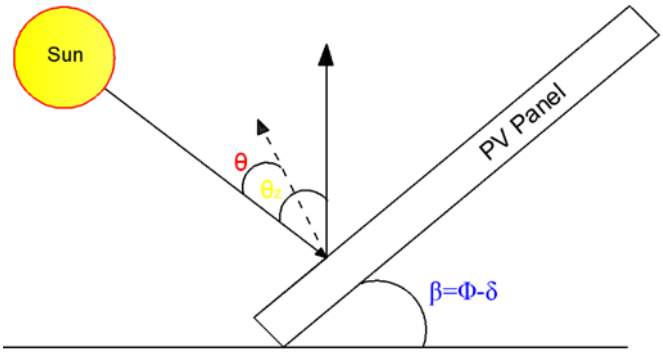


Figure 1. Inclination angle [41].

B. Zenith Angle

The angle between the line to the sun and the vertical axis is known as the zenith angle (θ_z). The surface of the earth has certain fundamental solar angles that are illustrated in Fig. 2. The zenith angle is 90 degrees at sunrise and sunset, while it is 0 degrees at noon. Some other angles are used to calculate this angle [5-7,40].

C. Azimuth Angle

Solar azimuth angle (γs) refers to the angle between the direction of direct solar radiation and the south or north position of the sun. The angle is positive when measured from south to west and negative when measured from south to east. At noon, the angle is 180 degrees. [5-7,39] This angle can be calculated using the following equation:

$$\gamma_s = \cos^{-1}\left[(\sin(\alpha)\,.\,\sin(\Phi) - \sin(\delta) \,/\, \cos(\alpha).\cos(\Phi)\right] \quad (4)$$

Figure 2 shows the Zenith angle, and the Azimuth angle.

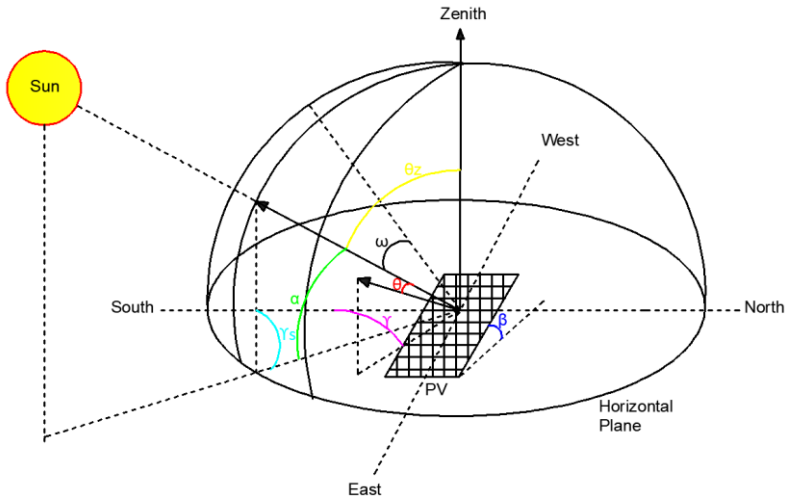


Figure 2. Basic solar angles [41].

D. Surface Azimuth Angle

The surface azimuth angle (γ) is the angle between the projection of the normal to the surface on a horizontal plane and the due south line. It is 0 when the surface faces south, positive (+) when it faces west, and negative (-) when it faces east. This angle can vary between -180 degrees and +180 degrees [5-7,39].

IV. SOLAR TRACKING SYSTEM DESIGN

In this study, three PV panels having a power of 100 watt (W) each were installed using three different setups, thus controlling single-axis STS and dual-axis STS movement. The short circuit current (I_{sc}) and open circuit voltage (V_{oc}) of the systems were carefully measured and then the current and voltage values were recorded at 10-minute intervals. In these systems, charging units, inverters and load resistors were not used. Furthermore, MPPT (maximum power point tracking) was not conducted. The stages comprising production and design, and hardware and software of three system prototypes (single axis panels, fixed panels and dual axis panels) have been explained in this part of the study.

A. Mechanical Part Design

Mechanical setups were designed to support and adjust the position of polycrystalline solar panels with 670 x 970 x 25 mm dimension and a power output of 100 watts peak (Wp). The default data of the solar panels is provided in Table 1.

Table 1. Solar panels datasheet.

Brand Name	Lexron
Model Type	LXRN100P
Electrical Characteristics	
Power Tolerance Range	5%
Rated Maximum Power (Pmax)	100Wp
Typical value of V_{oc}	22.10 V
Typical value of I_{sc}	6.45 A
Typical value of Maximum Power Voltage (V_{mp})	18.00 V
Typical value of Maximum Power Current (Imp)	6.11 A
Max. Series Fuse Rating	10.0A
Max. System Voltage	1000 V
Typical Weight	8.5 Kg
Module Class	Class A

Photovoltaic panels were placed on mechanical supports constructed using profiles. The mechanical system adjusts fixed panel's inclination angle between 30-60 degrees. The inclination angle to be considered in Karabük is found to be 39 degrees and in this study, the panel was fixed at this angle. The fixed panel has been shown in Figure 3.

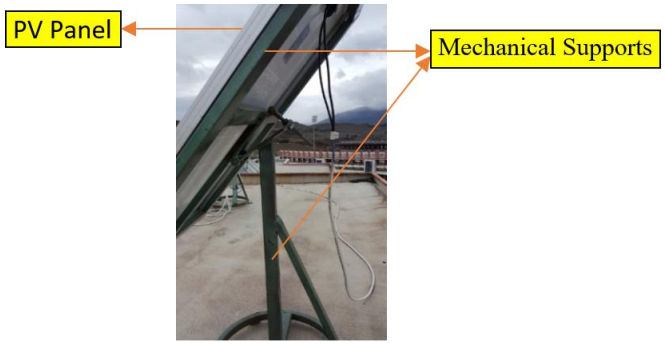


Figure 3. Fixed (flat) PV panel (FPV).

The mechanical system of single axis panel was designed in such a way to move in east-west direction. This movement was provided by the worm gear reducer. Stepper motor's torque was increased by decreasing revolution per minute (rpm) using the reducer. S30 type reducer was used in the system and its gear ratio was found to be 1:50. The designed mechanical system provided the capability to move 360 degrees. The mechanical system using reducer is found to be expensive as compared to systems using linear actuators. However, it provides more precise and broader movement. Single axis solar panel has been shown in Figure. 4.

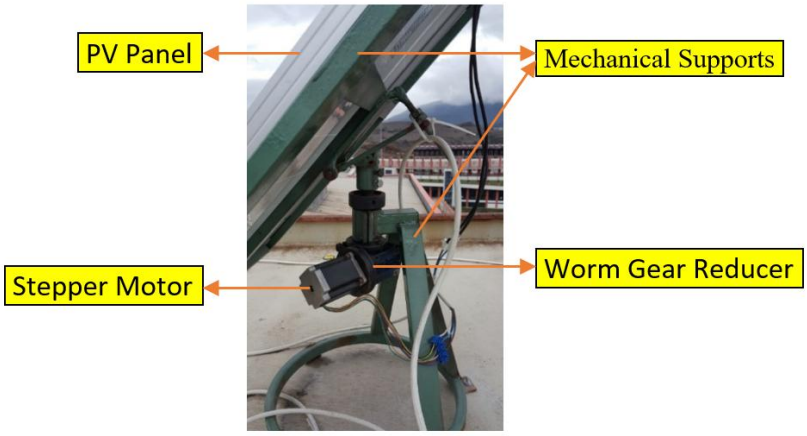


Figure 4. Single-axis PV panel (SAPV).

The mechanical system designed for dual-axis PV panel provided movements in north-south (up-down) and east-west (right-left) directions. In order to provide these movements, two worm gear reducers were used. The system showed 360 degree and 180-degree movements in east-west and north-south direction, respectively. In addition, the system was able to show both movements simultaneously. The dual-axis solar panel is shown in Figure 5.

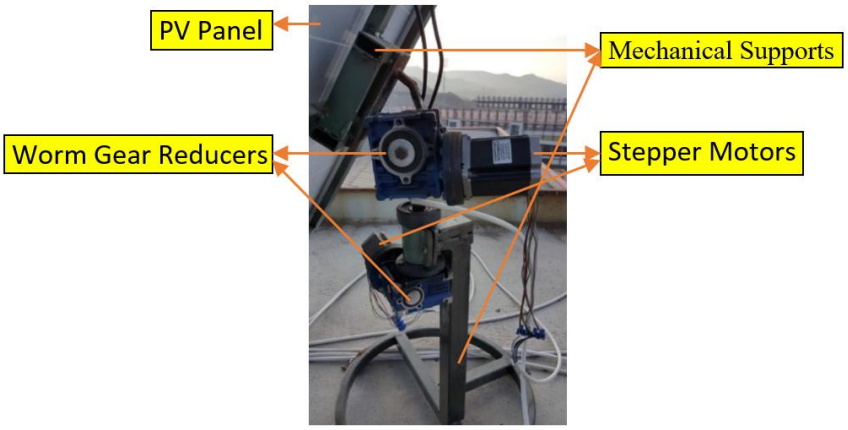


Figure 5. Dual-axis PV panel (DAPV).

B. Electrical Equipments

1) PLC (Programmable Logic Controller): Single-axis, dual-axis and fixed STSs were controlled and monitored remotely using S7-1200 PLC (1215C DC/DC/DC). Figure 6 shows the PLC used in this study having 2 analog outputs (AO), 2 analog inputs (AI), 10 digital outputs (DO), 14 digital inputs (DI) and 2 PROFINET ports. In addition, it has 125 KB memory.



Figure 6. S7-1200 PLC (1215C DC/DC/DC).

2) Current Measuring Unit: To accurately measure the current (I) of the panels, a circuit was required as the AI of PLC functions between 0-10 V or 0-20 mA. The short circuit current (I_{sc}) of photovoltaic panels were measured to be 6.45A. Printed circuits were made using Proteus/ISIS to measure the PV panel current using PLC as shown in Figure 7.

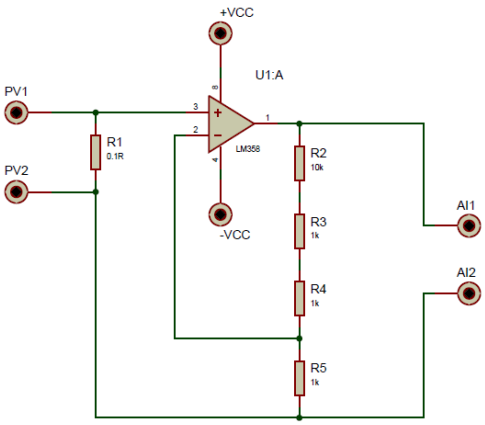


Figure 7. Current measuring circuit.

A non-inverting Op-Amp type ‘LM 358’ was used in this circuit. Gain formula for the Op-Amp can be given as:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (5)$$

Where; A_v is voltage gain (V/V), R_f and R_i are feedback resistance (Ω) and input resistance (Ω), respectively. The resistance values for R_f and R_i were 12 KΩ and 1KΩ respectively, in the printed circuit. The calculations using the given formula (1) yield the voltage gain (A_v) to be 13.

The output of panels was connected to resistors having 0.1Ω values. Using the Op-Amp connected to analog inputs of PLC, voltage on these resistors was increased. Considering analog input max. voltage as 10V (6.45x0.1x13=8.39V) and I_{sc} current of PV panels as 6.45A, the gain was found to be 13. Accordingly, the codes were written in ladder logic in the PLC software. Figures. 8 and 9 show the printed circuit's top and bottom view, respectively.



Fig.ure 8. Printed circuit for current measurement (Top view).

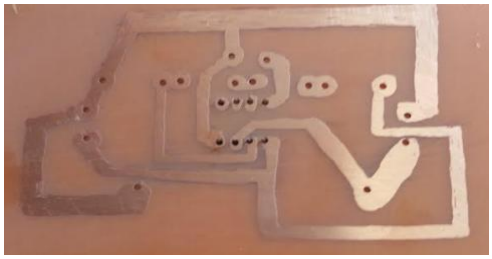


Figure 9. Printed circuit for current measurement (Bottom view).

3) Current Measuring Unit: Voltage measurement of PV panels is performed using AIs, and AIs run on 0-10 V. Therefore, a voltage divider was required in the study. V_{oc} voltage of given panels was found to be 22.10V. To measure the PV panels' voltage using PLC, the Proteus/ISIS printed circuit given in Figure 8 was designed. Using this circuit, voltage measurement was conducted for up-to 30V and the codes were written accordingly using PLC software (30Vx (10K/30K)=10V). Figure 10 shows the voltage measuring circuit's Proteus/ISIS scheme, and Figures 11 and 12 show the printed circuit's top and bottom view, respectively.

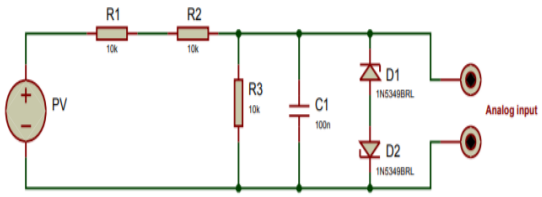


Figure 10. Voltage measuring circuit.

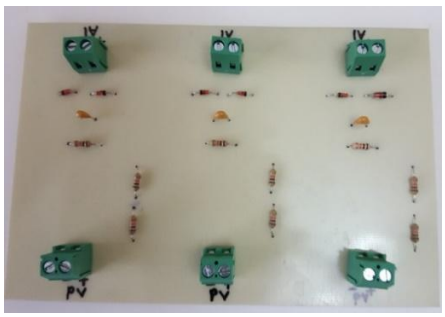


Figure 11. Printed circuit for voltage measurement (Top view).



Figure 12. Printed circuit for voltage measurement (Bottom view).

An electrical enclosure was used in order to place the electrical equipment mentioned above and the cable connections of the equipment were made. The dimension of electrical enclosure was 500x700x200 mm (WXHXD) and the enclosure was made up of polyester. Figure 13 shows the electrical enclosure.

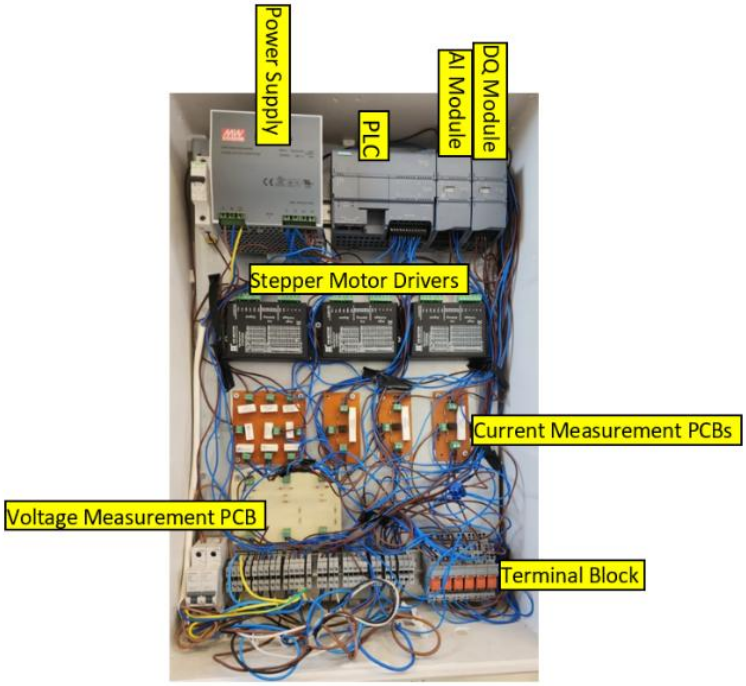


Figure 13. Electrical enclosure.

C. PLC and SCADA Software

TIA Portal V15 was used for providing an interface for PLC and SCADA software implementation. In this study, 1215C DC/DC/DC Siemens PLC was used, and ladder logic was preferred for programming. Using SIMATIC HMI Application and Win CC RT Advanced, PC screen was selected as operator panel instead of a real HMI panel. "Portal View" and "Device & Networks" of the TIA Portal Project, thus created, are shown in Figures 14 and 15, respectively.

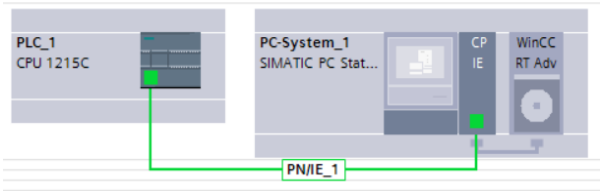


Figure 14. Device & Networks view.

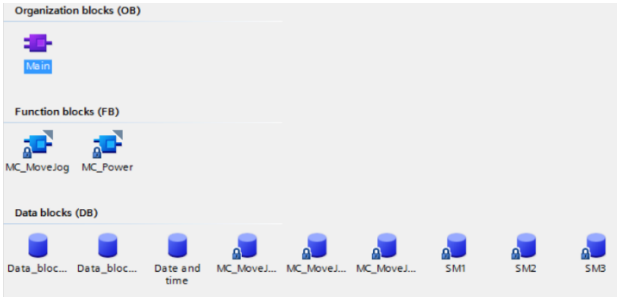


Figure 15. Portal view.

The PLC used in this study has 10 digital outputs (DQ) and 2 analog inputs (AI). Since a total of 15 DQs and 8 AIs were needed, 1 SM 1222 DQ module having 8 channels and 1 SM 1231 AI module having 8 channels were added. "Device Configuration view" has been shown in Figure 16.

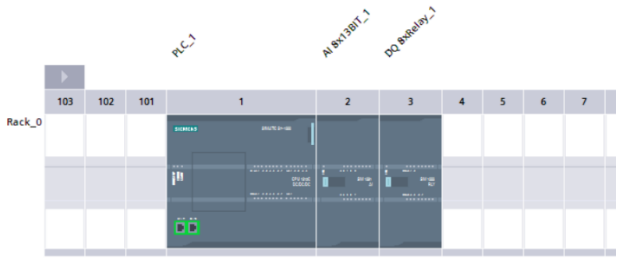


Figure 16. Device configuration view.

The voltage and current values of all three panels (SPV, DPV and FPV) were measured using AIs, and to drive the stepper motors and to control the relays, DQs were used. After the analog and digital hardware connections, TIA Portal interface was used to carry out the required software and hardware configurations. In order to drive the stepper motors, TO_PositioningAxis was used in programming of the software. In this study, the SPV was moved by stepper motor in east-west direction, whereas DPV was moved by two stepper motors in east-west as well as north-south directions.

Based on surface azimuth angle and elevation angle, east-west and north-south movements were adjusted, respectively. In order to provide axial movements to the panels, worm gear reducers were used in this study instead of the commonly used linear actuators. The use of worm gear reducers offers significant advantages in terms of adjusting the rotation angle over wide and clear ranges, as well as providing high movement sensitivity. However, it should be noted that the cost and workmanship associated with using worm gear reducers may be perceived as disadvantageous when compared to other methods. In order to direct the DPV in north-south and east-west directions, three worm gear reducers have been used in the designed system presented in this study. With north-south orientation, the slope angle of the DPV was adjusted, whereas with east-west orientation; based on the change in east-west angle, the panel's surface azimuth angle was found to be varying. This allowed for the necessary sun tracking to be achieved.

The astronomical solar data were used to control the system. The required data were accessed using 'https://midcdmz.nrel.gov/solpos/spa.html' website. After data entry regarding time zone, location coordinates of GTS, altitude of location to sea level, intervals in order to calculate the angles and desired date intervals etc., the website calculates the data and presents them in the form of list. The coordinates of Engineering Faculty building of Karabük University were entered in this interface, and data for the year 2020 were obtained at 10-minute intervals in excel file format. The data obtained comprised Surface azimuth angle, Azimuth angle, Zenith angle, Clock angle and Elevation angle. As an example, the data obtained between 13:00 and 15:00 hours on 18th of August, 2021 have been shown in Table 2.

Table 2. Data obtained for 18th August, 2021 between 13:00 and 15:00 hours.

Date	Time	Zenith Angle	S Azimuth Angle
8.18.2021	13:00:00	28.280655	3.505400
8.18.2021	13:10:00	28.481531	8.614443
8.18.2021	13:20:00	28.846818	13.637170
8.18.2021	13:30:00	29.370236	18.529488
8.18.2021	13:40:00	30.043310	23.255493
8.18.2021	13:50:00	30.855974	27.788647
8.18.2021	14:00:00	31.797193	32.111835
8.18.2021	14:10:00	32.855531	36.216538
8.18.2021	14:20:00	34.019618	40.101485
8.18.2021	14:30:00	35.278495	43.771078
8.18.2021	14:40:00	36.621849	47.233849
8.18.2021	14:50:00	38.040148	50.501093
8.18.2021	15:00:00	39.524698	53.585750

The rooftop of the Engineering Faculty building, located at Karabük University, was chosen as the appropriate site for the installation of the STSs. The faculty building coordinates were accessed from https://www.google.com/maps/place. In Figure. 17, the PV panels installed on the roof have been shown.



Figure 17. PV panels installed on rooftop.

The surface azimuth angle was used to adjust east-west movement of both single and dual-axis panels, whereas elevation angle was used to adjust the north-south movement of double-axis panel. In TIA portal interface, a data block was first created and then data related to the afore-mentioned two parameters were transferred to the data block created from the excel file. The DPV and SPV were kept at reference points during night hours. During daytime, the elevation angle and surface azimuth angle were obtained from relevant data blocks according to the date and time and the panels were brought and adjusted to these angles using stepper motors. After every 10 minutes interval, these processes were repeated. The number of moves or pulses of stepper motors, thus corresponding to movement degrees of mechanical system at the initial system setup, was determined by measurements and experiments. In the mechanical system, the gear ratio of worm gear reducer was 1/50. After every 10 minutes interval, the V_{oc} voltage and I_{sc} current of the installed panels were measured simultaneously. There was only 1 second interval between voltage and current measurements. The current and voltage values thus measured were displayed on supervisory control and data acquisition (SCADA) screen. Furthermore, the values were recorded using SCADA data logger. The collected data were utilized to plot and compare the performance of the PV panels. Figure 18 shows the flow chart of the system.

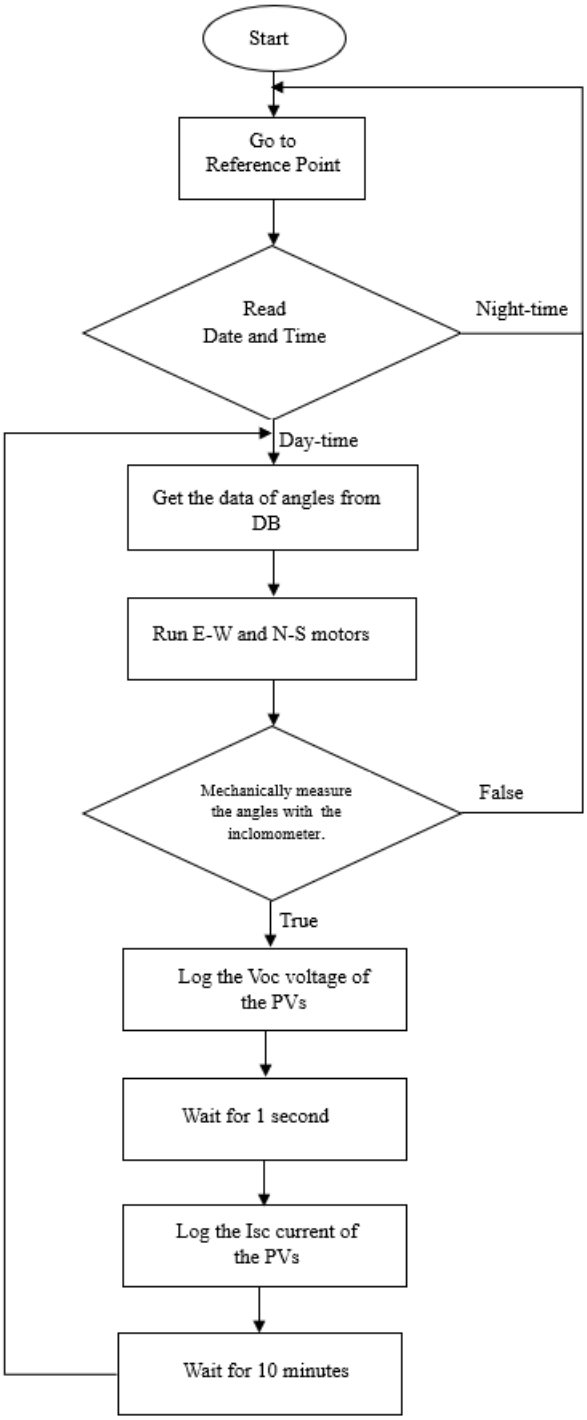


Figure 18. Flow chart of the system.

Part of the ladder diagram (software) is given in Appendix B. The block diagram of the system is shown in Figure 19.

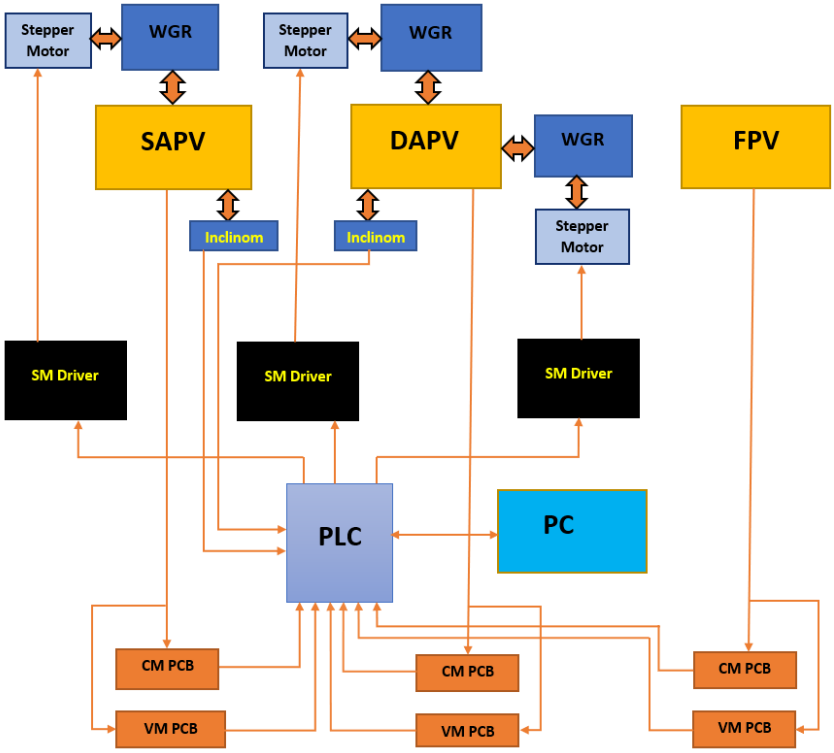


Figure 19. Block diagram of the system.

The system was monitored as well as controlled remotely using the developed SCADA software. A computer screen was used to monitor the SCADA output and meanwhile 3 SCADA screens were programmed. SCADA screen 1, regardless of date and time, shows the tools which can control the axis movements of panels manually. SCADA screen 1 has been shown in Figure 20.

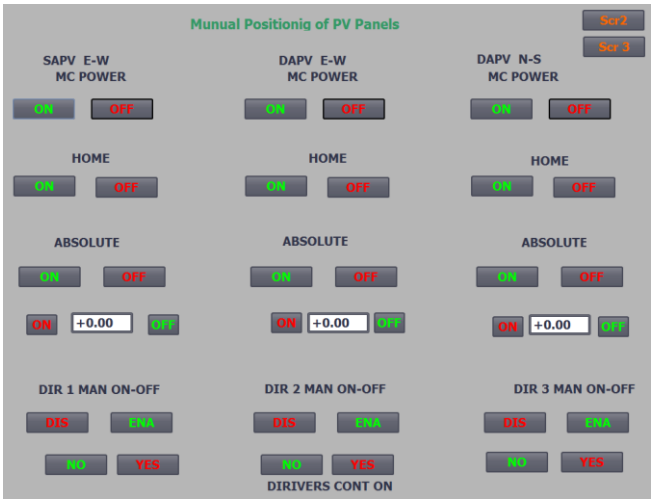


Figure 20. SCADA Screen 1.

In SCADA Screen 2 given in Figure 21, zenith angles and surface azimuth are displayed after every ten minutes in real time, and position data of stepper motors are provided accordingly.

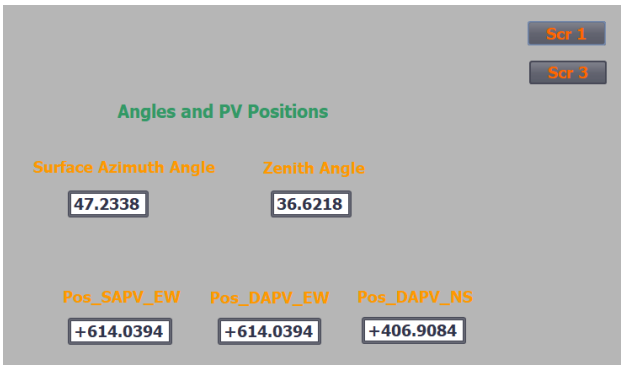


Figure 21. SCADA Screen 2.

In SCADA screen 3 shown in Figure 22, I_{sc} current and V_{oc} voltage of the panels are displayed. The values are recorded after every 10-minute intervals. The graphs are drawn and the operating characteristics of panels are analyzed. In addition, voltage and current values are obtained manually at any time interval.

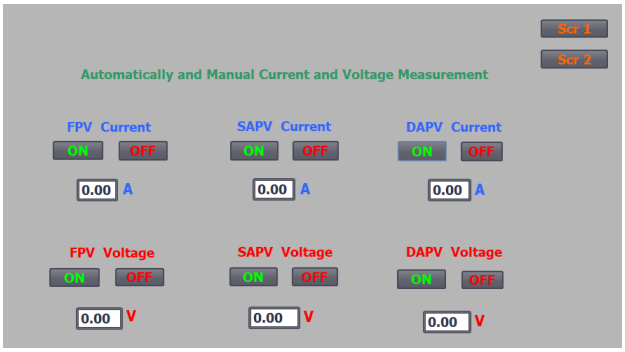


Figure 22. SCADA screen 3.

PV voltage was measured every 10 minutes, while the PV current was measured every 1 second. Figures 23 and 24 show current and voltage values of three panels measured at 14:40 on 18th August, 2021, respectively.

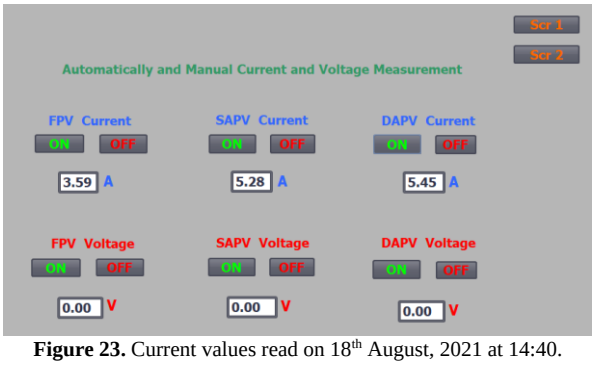


Figure 23. Current values read on 18th August, 2021 at 14:40.

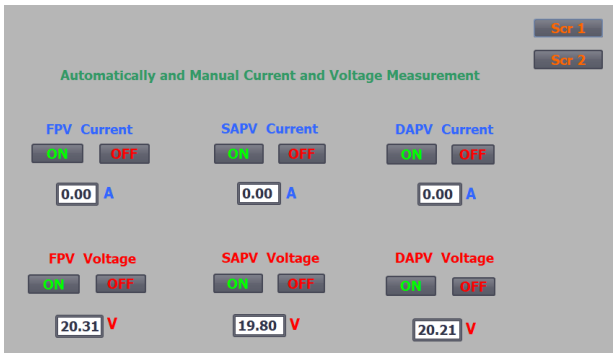


Figure 24. Voltage values read on 18th August, 2021 at 14:40.

The characteristic graphs of PV panels drawn using the real data recorded in the field have been presented in section 5.

D. Cost Analysis

Since this study is for experimental purposes and non-commercial, cost has been kept of secondary importance. Although relatively less costly studies are found in the literature, the increase in cost has been ignored in order to increase the robustness and reliability of the system. In Table 3, the costs of the installed FPV, SAPV and DAPV systems are given as a comparison.

Table 3. Cost of the PV systems.

Equipment	Unit Cost (USD)	FPV	SAPV	DAPV
PV Panel	70	1	1	1
Stepper Motor	30	-	1	2
Driver	40	-	1	2
Worm Gear Reducer	80	-	1	2
Mechanical Profiles	50	1	1	1
Total cost (USD)		120	270	420

The cost of SAPV is $150 (225%) more than the cost of FPV, and the cost of DAPV is $300 (350%) more than the cost of FPV.

In the 61-day period, DAPV produced 337.34 Wh, SAPV produced 314.32 Wh and FPV produced 220.49 Wh on daily average. On daily average, DAPV produced 7.32% more energy than SAPV and 52.99% more energy than FPV, and SAPV produced 42.55% more energy than FPV.

Although the cost of SAPV was 225% more than FPV, it was able to produce 43% more energy on a daily average. Although the cost of DAPV was 350% more than FPV, it was able to produce 53% more energy than FPV. According to these data, SAPV and DAPV do not seem profitable and feasible in terms of cost. It is seen that the costs will increase even more when the replacement of the equipment used in case of possible malfunction and maintenance fees are taken into consideration. Commercial, large powerful solar power plants are installed as FPV. Today, the average depreciation period of solar power plants is calculated as approximately 5 years. It is understood that in the proposed system, the depreciation period of SAPV and DAPV going to be much longer than 5 years compared to FPV.

V. MEASUREMENT RESULTS AND DISCUSSIONS

After every 10 minutes, the short circuit current (I_{sc}) and open circuit voltage (V_{oc}) of the three panels were automatically saved in .xlsx format using the StartLogging function available in TIA Portal, as well as using historical data. Table 4 displays the values that were measured at 14:41 and 14:51 on August 18, 2021.

Table 4. Measured values.

VarName	TimeString	VarValue
DAPV_voltage	18.08.2021 14:41	20.19844
SAPV_voltage	18.08.2021 14:41	19.7986
FPV_voltage	18.08.2021 14:41	20.30707
DAPV_current	18.08.2021 14:41	5.447847
SAPV_current	18.08.2021 14:41	5.279398
FPV_current	18.08.2021 14:41	3.592046
DAPV_voltage	18.08.2021 14:51	20.28347
SAPV_voltage	18.08.2021 14:51	19.88835
FPV_voltage	18.08.2021 14:51	20.42426
DAPV_current	18.08.2021 14:51	5.410903
SAPV_current	18.08.2021 14:51	5.25625
FPV_current	18.08.2021 14:51	3.386072

After arranging the obtained data, P-t, I-t and V-t graphs of relevant PVs were plotted using MATLAB program. Considering the fill factor (FF), the following formula was used to find the power (P).

$$FF = \frac{I_{MP}\, xV_{MP}}{I_{SC} xV_{OC}} \tag{6}$$

Where, maximum power current is denoted by I_{MP}, maximum power voltage is denoted by V_{MP}, and I_{SC} and V_{OC} are the short circuit current and open circuit voltage, respectively. As given in Table 1, the fill factor of the PV panels was found to be 0.7715. Power is calculated using formula 3 as follows.

$$P_{MP} = FFxI_{SC}xV_{OC} \tag{7}$$

The measurements taken between 1st of August, 2021 and 31st of September, 2021 are given as an instance along with the corresponding charts for three different days - 18th of August (sunny day), 21st of September (rainy day) and 25th of September (cloudy day). Voltage-Time (V-t), Current-Time (I-t) and Power-Time (P-t) graphs plotted for 18th August (sunny day) are given in Figures 25, 26 and 27, respectively.

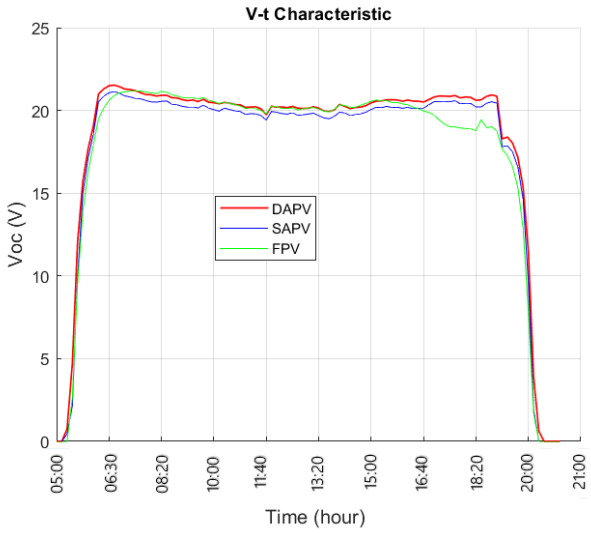


Figure 25. V-t graph plotted on 18th August, 2021.

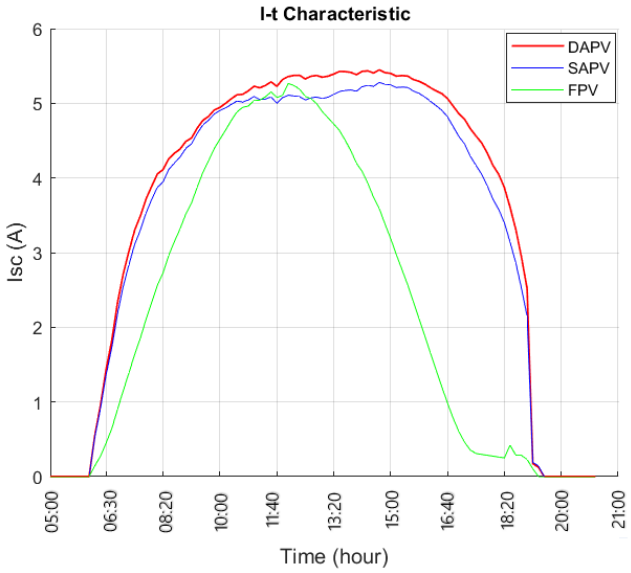


Figure 26. I-t graph plotted on 18th August, 2021.

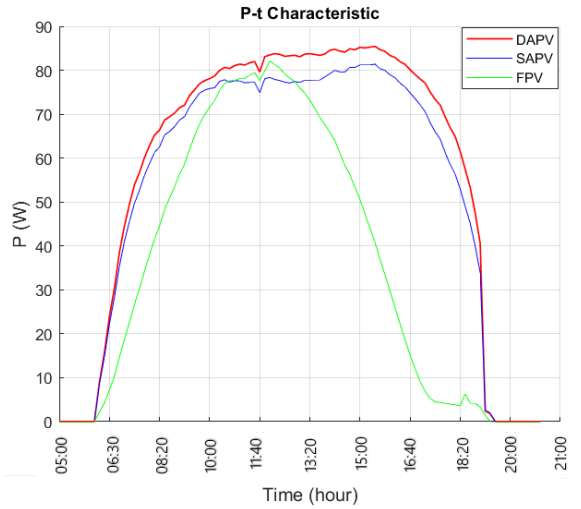


Figure 27. P-t graph plotted on 18th August, 2021.

Examining the three graphs, the voltage values of PV panels were observed to be much closer to each other throughout the day, whereas power and current values of PVs were found to be relatively close between morning and noon time. In the afternoon, the power and current of SAPV and DAPV were found to be increased significantly when compared with FPV. This is considered to be related to surface temperatures of PV panels and low activity of sun during morning hours.

Voltage-Time (V-t), Current-Time (I-t) and Power-Time (P-t) graphs plotted on 25th September (cloudy day), are given in Figures 28, 29 and 30, respectively. When the graphs were analyzed, the difference was not significant between PV panel voltages during the day, whereas there were significant differences observed in power and current values. Differences between power and current values of solar panels were seen to be decreased considerably during the times when sun disappeared.

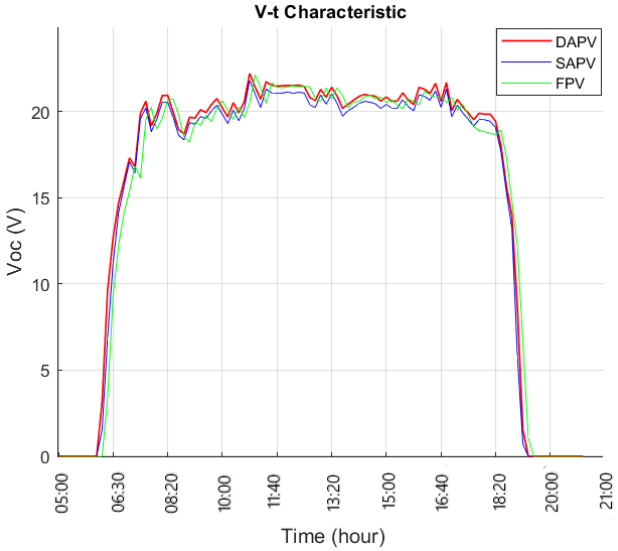


Figure 28. V-t graph plotted on 25th September, 2021.

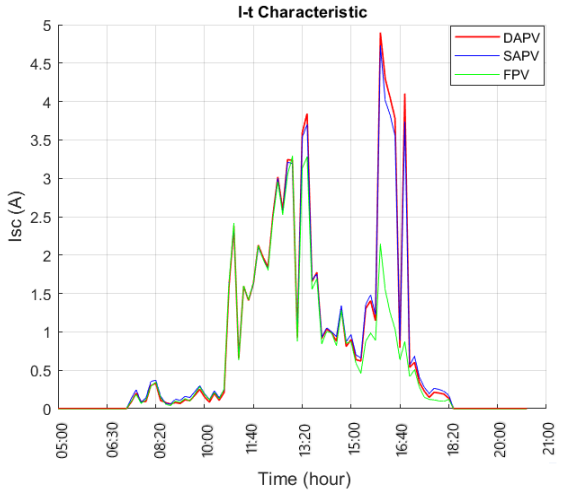


Figure 29. I-t graph plotted on 25th September, 2021.

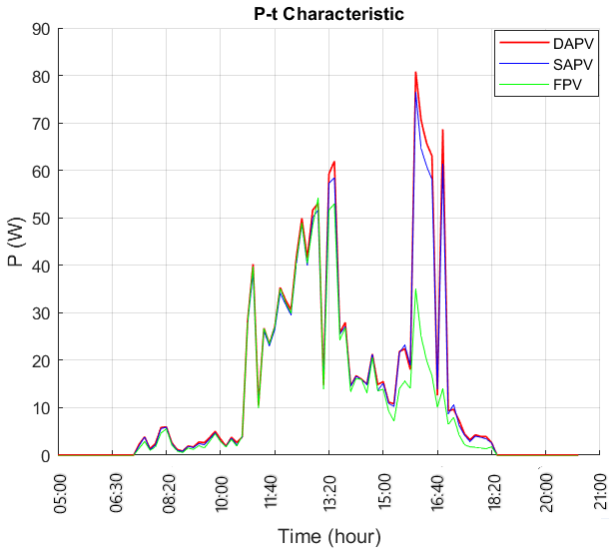


Figure 30. P-t graph plotted on 25th September, 2021.

Voltage-Time (V-t), Current-Time (I-t) and Power-Time (P-t) graphs plotted on 21st September (rainy day) are given in Figures 31, 32 and 33, respectively. Similar to the graphs above, the voltage values of the solar panels were found to be very close to each other, whereas, current and power values were also observed to be close to each other except when the sun did not disappear.

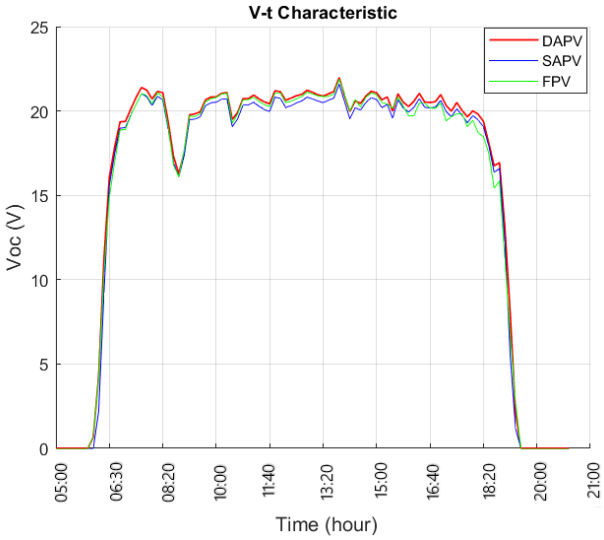


Figure 31. V-t graph plotted on 21st September, 2021.

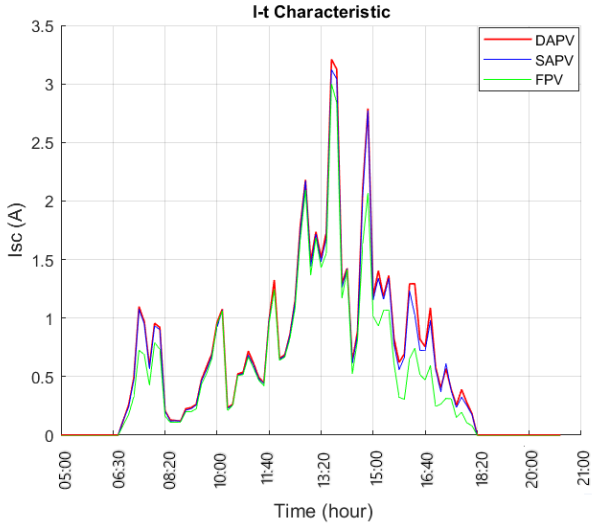


Figure 32. I-t graph plotted on 21st September, 2021.

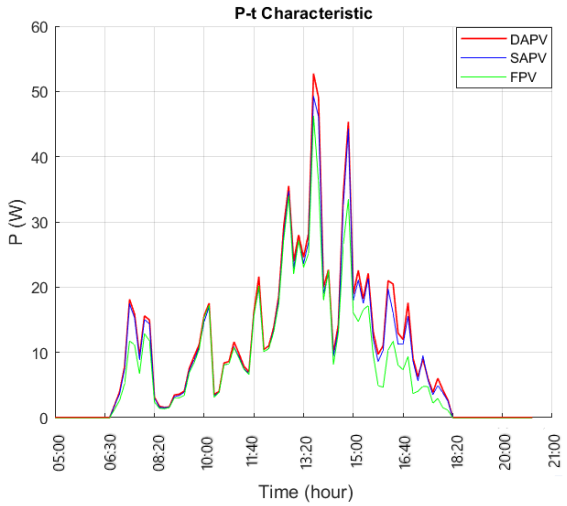


Figure 33. P-t graph plotted on 21st September, 2021.

To compare the energy produced by DAPV, SAPV and FPV, area under Power-time (P-t) curve was calculated. In terms of percentage, the efficiency differences between FPV, DAPV and SAPV were calculated by comparing the energy obtained from PV panels. The formula given below can be used to calculate the efficiency differences and energy output of the DAPV system, SAPV system, and FPV system based on the power curves plotted.

$$W \cong \sum_{i=0}^{n} \frac{y(x_i)+y(x_{i+1})}{2}.h = \frac{h}{2}\sum_{i=0}^{n}(y(x_i) + y(x_{i+1})) \quad (8)$$

Where, number of measurements is denoted by n, and measurement interval in hours is denoted by h. In this study, area under P-t graph was calculated by considering h=0.167 and n=79 in accordance with the graph given in Figure 25. When n equals 79, the value correlates with number of measurements that are taken with intervals of 10 minutes between 06:20 - 19:20 hours. 'h' shows the 10-minute intervals in hours. Other formulas and calculations are given in Appendix A.

The measurement results for 21st of September showed that dual-axis PV panel functions 5.58% and 23.13% (on average) more efficiently as compared to single-axis and fixed PV panels, respectively. It was observed that the single-axis PV panel functions 16.62% (on average) more efficiently than fixed panel. During a total of 61-day period between 1st of August, 2021 and 30th of September, 2021, the weather was sunny for 42 days, cloudy for 11 days and rainy for 8 days. Using the same method described above for the energy calculation of the three example days, the daily amounts of energy production were calculated for a total of 61 days. In Figure. 34, the 61-day energy production amounts of all three panels are given.

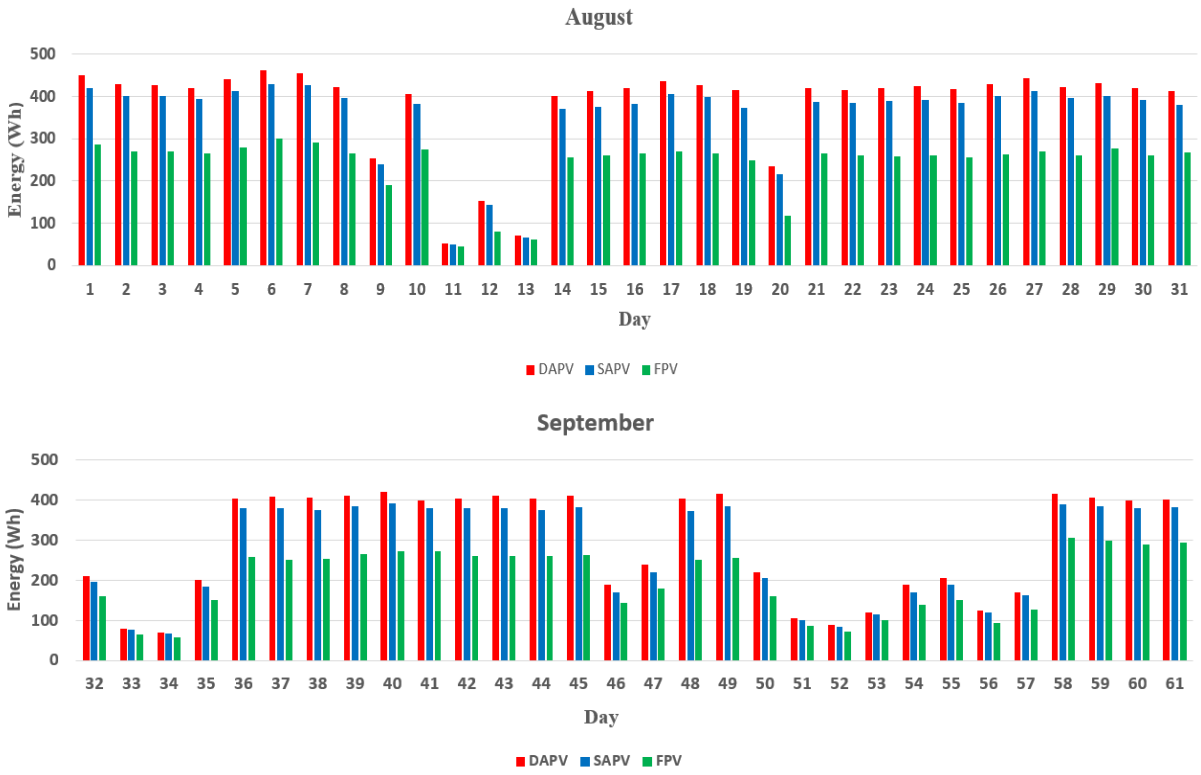


Figure 34. 61-day Energy production amounts.

In Figure 35, energy production amounts of PV panels for sunny, cloudy and rainy days are given separately.

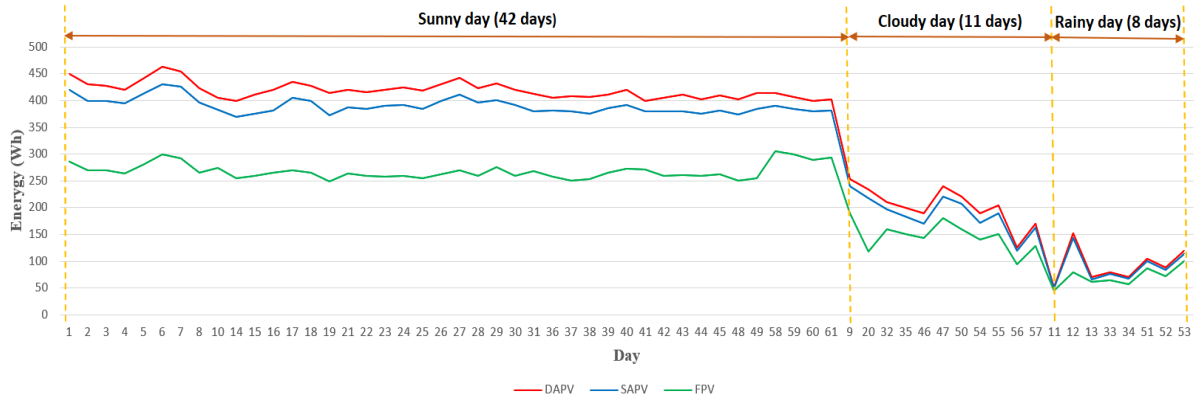


Figure 35. Energy production amounts according to sunny, cloudy and rainy days.

According to the data obtained from the measurements, DAPV produced 419.16 Wh, SAPV produced 390.38 Wh and FPV produced 268.29 Wh on daily average on sunny days. DAPV produced 7.37% more energy than SAPV and 56.23% more energy than FPV, and SAPV produced 45.51% more energy than FPV.

On cloudy days, DAPV produced 203.36 Wh, SAPV produced 189 Wh and FPV produced 146.73 Wh on daily average. On cloudy days, DAPV produced 7.59% more energy than SAPV and 38.59% more than FPV, and SAPV produced 28.81% more energy than FPV.

On rainy days, DAPV produced 92 Wh, SAPV produced 87.38 Wh and FPV produced 71 Wh on daily average. On rainy days, DAPV produced 5.29% more energy than SAPV and 29.58% more energy than FPV, and SAPV produced 23.07% more energy than FPV.

In the 61-day period, DAPV produced 337.34 Wh, SAPV produced 314.32 Wh and FPV produced 220.49 Wh on daily average. On daily average, DAPV produced 7.32% more energy than SAPV and 52.99% more energy than FPV, and SAPV produced 42.55% more energy than FPV.

VI. CONCLUSION

In this study, single-axis STS, double-axis STS, and fixed PV system were designed and controlled in real time. The designed systems were compared based on their efficiencies and power. According to the results of the measurements; on sunny days, DAPV was observed to produce 419.16 Wh, SAPV 390.38 Wh and FPV 268.29 Wh on daily average. According to the results, DAPV produced 7.37% more energy than SAPV and 56.23% more energy than FPV, and SAPV produced 45.51% more energy than FPV. On cloudy days, DAPV was found to produce 203.36 Wh, SAPV 189 Wh and FPV 146.73 Wh on daily average. According to the results, DAPV produced 7.59% more energy than SAPV and 38.59% more energy than FPV, and SAPV produced 28.81% more energy than FPV. DAPV was found to produce 92 Wh, SAPV 87.38 Wh and FPV 71 Wh on daily average on rainy days. According to the results, DAPV produced 5.29% more energy than SAPV and 29.58% more energy than FPV, and SAPV produced 23.07% more energy than FPV. In a total of 61-day period with 42 days of sunshine, 11 days of cloud and 8 days of rain, DAPV was determined to produce 337.34 Wh, SAPV 314.32 Wh and FPV 220.49 Wh on daily average. On daily average, DAPV produced 7.32% more energy than SAPV and 52.99% more energy than FPV, and SAPV produced 42.55% more energy than FPV.

To ensure optimal performance and minimal malfunctioning of STSs, the electrical and mechanical parts, and also the software of the system need to be designed in the most optimal way by taking climatic and geographical conditions into account. In this study, PLC was used as a controller as it is known to be more appropriate for industrial conditions. Worm gear reducers were used in the single-axis STS and dual-axis STS because reducers are able to function with no angle limitations and by reducing rpm, reducers can increase the torque. The choice of stepper motors for the solar tracking system was based on their smooth operation with a PLC and high precision in positioning. The experimental results have revealed that the proposed solar tracking systems work smoothly and efficiently.

The designed system is based on astronomical data (date and time), so it does not experience the instability problem as seen in LDR systems. It provides an advantage in terms of cost and reliability as there is no need for internet and/or GPS connection. The system's reliability is increased with the inclinometer. Once the system is initially set up, it does not require manual alignment. It can operate regardless of the geographical location and weather conditions. The solar tracker based on date and time, which uses reduction gear units to move

simultaneously in both east-west and north-south directions, has advanced accuracy with a tracking error of less than 0.2°, as well as good movement stability, low maintenance cost, and easy installation.

In future researches, the STSs that are installed and controlled based on astronomical data will be compared with several different control methods applied in the literature. Additionally, the tracking systems will be optimized for minimum cost and energy consumption. Finally, it is envisaged that the proposed STSs will be further developed and applied practically on a larger PV system for an institute or a commercial organization.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Coordinatorship of Research Projects of the Karabuk University. Project Number: FYL-2020-2191.

REFERENCES

[1] World Energy Data. (2022). Trends of Eneygy Production. https://www.worldenergydata.org/world-electricity-generation/

[2] Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority. (2024). Electricity Market Sector Report March 2024. https://epdk.gov.tr

[3] Ocłon, P., Cisek, P., Kozak-Jagieła, E., Taler, J., Taler, D., Skrzyniowska, D., &Fedorczak- Cisak, M. (2020). Modeling and experimental validation and thermal performance assessment of a sun-tracked and cooled PVT system under low solar irradiation. *Energy Conversion Management*,222, (113289), 1-23.

[4] Jamroen, C., Fongkerd, C., Krongpha, W., Komkum, P., Pirayawaraporn, A., & Chindakham, N. (2021). A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis. *Applied Energy*, 299, (117295), 1-17.

[5] Hafez, A., Yousef, A., & Harag, N. (2018). Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754–782.

[6] Al-Rousan, N., Mat Isa, N.A., & Mat Desa, M.K. (2018). Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2548–2569.

[7] Awasthi, A., Shukla, A. K., Murali Manohar, S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392–405.

[8] Seme, S., Stumberger, B., Hadziselimovic M., & Sredensek, K. (2020). Solar photovoltaic tracking systems for electricity generation: A review. *Energies*, 13, (4224), 1-24.

[9] Sumathi, V., Jayapragash, R., Bakshi, A., & Akella, P. K. (2017). Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 130-138.

[10] Nsengiyumva, W., Chen, S. G., Hu L., & Chen X. (2018). Recent advancements and challenges in solar tracking systems (STS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 250–279.

[11] Jamroen, C., Komkum, P., Kohsri, S., Himananto, W., Panupintu, S., & Unkat, S. (2020). A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, (100618), 1-14.

[12] Ali Jallal, M., Chabaa, S., & Zeroual, A. (2020). A novel deep neural network based on randomly occurring distributed delayed PSO algorithm for monitoring the energy produced by four dual-axis solar trackers. *Renewable Energy*, 149, 1182–1196.

[13] Zhu, Y., Liu, J., & Yang, X. (2020). Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection. *Applied Energy*, 264, (114647), 1-7.

[14] Al-Rousan, N., Mat Isa, N. A., & Mat Desa, M. K. (2020). Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32, (7), 459–469.

[15] Lim, B. H., Lim, C. S., Li, H., Hu, X. L., Chong, K. K., Zong, J. L., Kang, K., & Tan, W. C. (2020). Industrial design and implementation of a large-scale dual-axis sun tracker with a vertical-axis-rotating-platform and multiple-row-elevation structures. *Solar Energy*, 199, 596–616.

[16] Okoye, C. O., Bahrami, A., & Atikol, U. (2018). Evaluating the solar resource potential on different tracking surfaces in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1569–1581.

[17] Jacobson, M. Z., & Jadhav, V. (2018). World estimates of pv optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked pv panels relative to horizontal panels. *Solar Energy*,169, 55–66.

[18] Yilmaz, S, Ozcalik, H. R., Dogmus, O., Dincer F., Akgol O., & Karaaslan M. (2015). Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 997–1005.

[19] Martín-Martínez S., Cañas-Carretõn M., Honrubia-Escribano A., & Gõmez-Lázaro E. (2019). Performance evaluation of large solar photovoltaic power plants in spain. *Energy Conversion and Management*, 183, 515–528.

[20] Bahrami, A., & Okoye, C. O. (2018). The performance and ranking pattern of pv systems incorporated with solar trackers in the northern hemisphere. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 138–151.

[21] Bahrami A., Okoye C.O., & Atikol U. (2017). Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking pv panels in low latitude countries. *Renewable Energy*, 113, 563–579.

[22] Antonanzas, J., Urraca, R., Martinez-de Pison, F. J., & Antonanzas F. (2018). Optimal solar tracking strategy to increase irradiance in the plane of array under cloudy conditions: A study across Europe. *Solar Energy*, 163, 122-130.

[23] Fernández-Ahumada L. M., Casares F. J., Ramírez-Faz J., & Lõpez-Luque R. (2017). Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models. *Solar Energy*,150, 20-29.

[24] Barker, L., Neber, M., & Lee, H., (2013). Design of a low-profile two-axis solar tracker. *Solar Energy*, 97, 569–576.

[25] Eke, R., Senturk, A., 2012., "Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system", *Sol. Energy* 86 (9), 2665–2672.

[26] Roth, P., Georgiev, A., & Boudinov, H., (2005). Cheap two axis sun following device", *Energy Conversion Management*, 46, 1179–1192.

[27] Roth, P., Georgiev, A., & Boudinov, H. (2004). Design and construction of a system for suntracking. *Renewable Energy*, 29, 393-402.

[28] Batayneh W., Owais A., & Nairoukh M. (2013). An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system. *Automation in Constr*uction, 29, 100-106.

[29] Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., & Demirkol, S. (2004). Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, 29, 1265-1275.

[30] Abdallah, K., & Nijmeh S. (2004). Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management*, 45, (11-12), 1931-1939.

[31] Masoumeh, A., Golzarian, M. R., Rohani A., & Zarchi, H. A. (2018). Development of a machine vision dual-axis solar tracking system. *Solar Energy*, 169, 136–143.

[32] Fernandez-Ahumada, L.M., Casares, F.J., Ramírez-Faz, J., & Lopez-Luque, R. (2017). Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models. *Solar Energy*, 150, 20-29.

[33] Evseev, E.G., & Kudish, A.I. (2009). The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. *Solar Energy*, 83, 377-388.

[34] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia K., & Sharifi A. (2009). A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewabable and Sustainable. Energy Reviews*, 13, (8), 1800-1818.

[35] Lu, H.C., & Shih, T. L. (2010). Fuzzy system control design with application to solar panel active dual-axis Sun tracker system. *Proceeding of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, 10-13 October, İstanbul, 1878-1883.

[36] Rahate, A,, Seung, J., Mehmood, M. U., Kim, Y., Jeon, G., Han, H. J., & Lim, S. H. (2021). Computer vision and photosensor based hybrid control strategy for a two-axis solar tracker - Daylighting application. *Solar Energy*, 224, 175-183.

[37] Wu, C. H., Wang, H. C, & Chang, H. Y. (2022). Dual-axis solar tracker with satellite compass and inclinometer for automatic positioning and tracking. *Energy for Sustainable Development*, 66, 308–318.

[38] Asfaw, A. H. (2023). Manual tracking for solar parabolic concentrator –For the case of solar injera baking, Ethiopia. *Heliyon*, 9, (1), 1-17.

[39] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2003). *Photovoltaic systems engineering 2nd ed. CRC Press, Boca Raton*, U.S.A., 437.

[40] Ghassoul, M. (2021). A dual solar tracking system based on a light to frequency converter using a microcontroller. Fuel. Communications 6 (2021) 100007.

[41] Karafil, A., Ozbay, H., Kesler, M., & Parmaksiz, H. (2015). Calculation of optimum fixed tilt angle of PV panels depending on solar angles and comparison of the results with experimental study conducted in summer in Bilecik, Turkey. *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 26-28 November, Bursa, 971-976.

Appendix A

Calculations

$$W_{FPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{79}(y(x_i) + y(x_{i+1}) = 3464 \quad (9)$$

$$W_{SAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{79}(y(x_i) + y(x_{i+1}) = 5192 \quad (10)$$

$$W_{DAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{79}(f(x_i) + f(x_{i+1}) = 5550 \quad (11)$$

Using Equations 5-7, the total amount of energy obtained in 13 hours from all the panels were calculated separately. Dividing the total amount of produced energy by total hours, the average amount of energy was obtained. With obtained values, average amount of produced energy per hour was calculated and the results were obtained in terms of kilowatt-hour (kWh) using Equations 12-14 as follows:

$$W_{FPV} = \frac{3464}{13} = 266.46\,Wh = 0.266\,kWh \quad (12)$$

$$W_{SAPV} = \frac{5192}{13} = 399.38\,Wh = 0.399\,kWh \quad (13)$$

$$W_{DAPV} = \frac{5550}{13} = 426.92\,Wh = 0.427\,kWh \quad (14)$$

The average energy produced per hour by FPV is denoted by W_{FPV} and the value is calculated in Equation 12, and the average energy produced per hour by SAPV and DAPV are denoted by W_{SAPV} and W_{DAPV} and the values are calculated in Equations 13 and 14, respectively. The comparison of efficiency percentages (denoted as 'η') of the panels are calculated in Equations 15-17 below.

$$\eta = \frac{W_{DAPV} - W_{FPV}}{W_{FPV}}.100 = \frac{426.92 - 266.46}{266.46}.100 = 60.22\% \quad (15)$$

$$\eta = \frac{W_{DAPV} - W_{SAPV}}{W_{SAPV}}.100 = \frac{426.92 - 399.38}{399.38}.100 = 6.89\% \quad (16)$$

$$\eta = \frac{W_{SAPV} - W_{FPV}}{W_{SFPV}}.100 = \frac{399.38 - 266.46}{266.46}.10049.88\% \quad (17)$$

According to measurement results obtained on 18th of August, dual-axis PV panel was determined to function 6.89% (on average) more efficiently when compared with single-axis PV panel and 60.22% (on average) more efficiently when compared with fixed PV panel. In addition, the single-axis PV panel was observed to function 49.88% (on average) more efficiently than fixed PV panel.

Using formulations given in equations (18-26) similar to equations (9-17), the energy values were calculated for power-time (P-t) graph shown in Fig. 31, in which the measurements were taken on 25th September.

$$W_{FPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{66}(y(x_i) + y(x_{i+1}) = 1020 \quad (18)$$

$$W_{SAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{66}(y(x_i) + y(x_{i+1}) = 1296 \quad (19)$$

$$W_{DAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{66}(f(x_i) + f(x_{i+1}) = 1350 \quad (20)$$

$$W_{FPV} = \frac{1020}{10.83333} = 94.15\,Wh = 0.094\,kWh \quad (21)$$

$$W_{SAPV} = \frac{1296}{10.83333} = 119.63\,Wh = 0.12\,kWh \quad (22)$$

$$W_{DAPV} = \frac{1350}{10.83333} = 124.61\,Wh = 0.12\,kWh \quad (23)$$

$$\eta = \frac{W_{DAPV} - W_{FPV}}{W_{FPV}}.100 = \frac{124.61 - 94,15}{94.15}.100 = 32.35\% \quad (24)$$

$$\eta = \frac{W_{DAPV} - W_{SAPV}}{W_{SAPV}}.100 = \frac{124.61 - 119.63}{119.63}.100 = 4.16\% \quad (25)$$

$$\eta = \frac{W_{SAPV} - W_{FPV}}{W_{SFPV}}.100 = \frac{119,63 - 94.15}{94.15}.100 = 27.06\% \quad (26)$$

The measurement results for 25th September showed that dual-axis PV panel functions 4.16% and 32.35% (on average) more efficiently as compared to single-axis and fixed PV panels, respectively. It was observed that the SPV functions 27.06% (on average) more efficiently than FPV.

Using formulations of equations (27-35) similar to equations (18-26), the energy values of FPV, SPV and DPV were calculated for power-time (P-t) graph shown in Fig. 34, in which the measurements were taken on 21st of September.

$$W_{FPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{68}(y(x_i)+y(x_{i+1}) = 800 \quad (27)$$

$$W_{SAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{68}(y(x_i)+y(x_{i+1}) = 933 \quad (28)$$

$$W_{DAPV} \cong \frac{0.167}{2}.\sum_{i=0}^{68}(f(x_i)+f(x_{i+1}) = 985 \quad (29$$

$$W_{FPV} = \frac{800}{11.16666} = 71.64\ Wh = 0.072\ kWh \quad (30)$$

$$W_{SAPV} = \frac{933}{11.16666} = 83.55\ Wh = 0.084\ kWh \quad (31)$$

$$W_{DAPV} = \frac{985}{11.16666} = 88.21\ Wh = 0.088\ kWh \quad (32)$$

$$\eta = \frac{W_{DAPV}-W_{FPV}}{W_{FPV}}.100 = \frac{88.21-71.64}{94.1571.64}.100 = 23.13\% \quad (33)$$

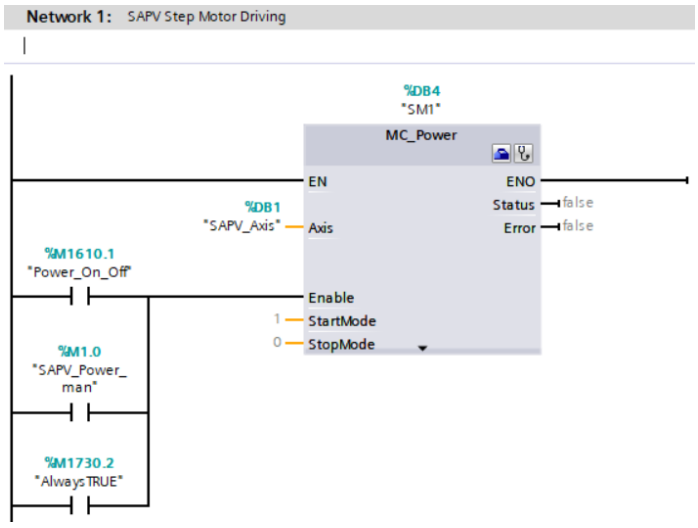
$$\eta = \frac{W_{DAPV}-W_{SAPV}}{W_{SAPV}}.100 = \frac{88.21-83.55}{83.55}.100 = 5.58\% \quad (34)$$

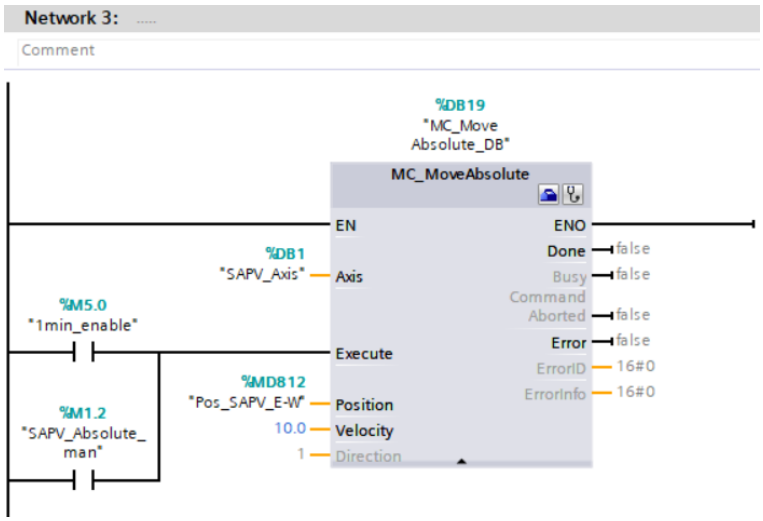
$$\eta = \frac{W_{SAPV}-W_{FPV}}{W_{SFPV}}.100 = \frac{83.55-71.64}{71.64}.100 = 16.62\% \quad (35)$$

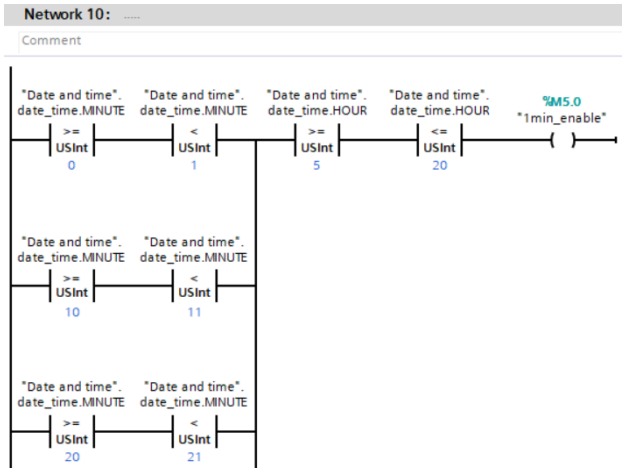
Appendix B

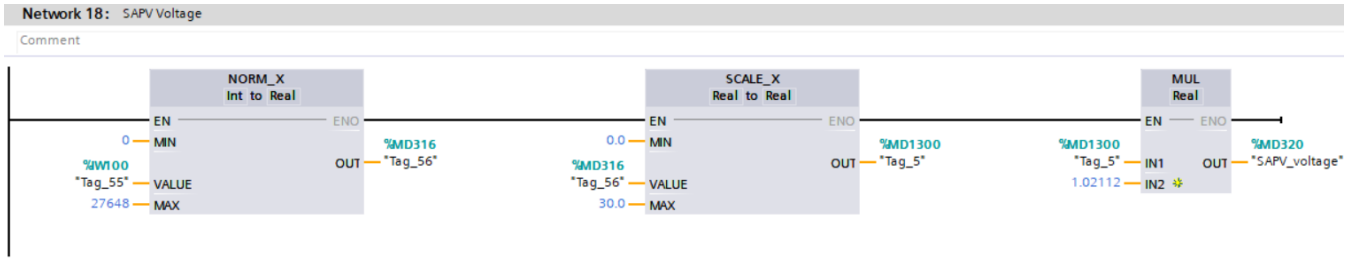
Part of Ladder Diagram

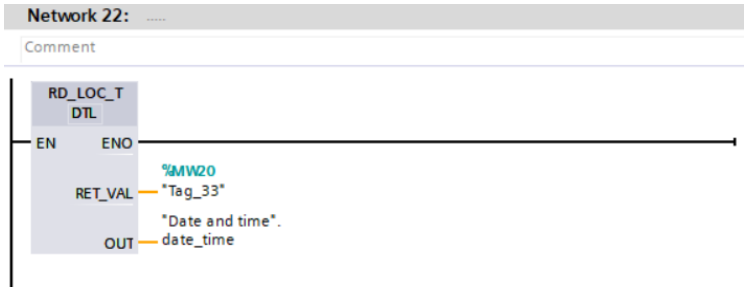
In this section, a part of the Ladder diagram consisting of a total of 86 networks is given. A total of 8 networks are shown related to driving the stepper motors, taking the values of the angles according to date and time from the data block, measuring the current and voltage of the PV panels, sending the position data to the stepper motor drivers.

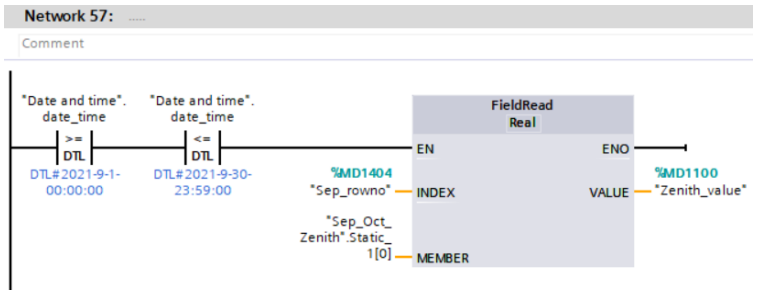


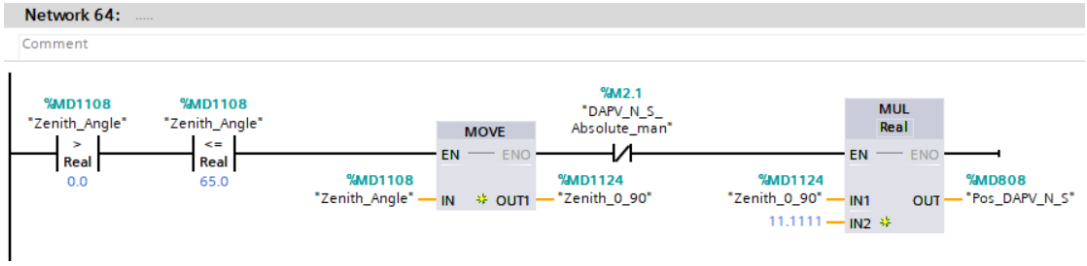

Network 3:
Comment
%DB19
"MC_Move Absolute_DB"
MC_MoveAbsolute
EN
ENO
%DB1
"SAPV_Axis"
Axis
Done
false
Busy
false
Command Aborted
false
Error
false
ErrorID
16#0
ErrorInfo
16#0
%M5.0
"1min_enable"
Execute
%MD812
"Pos_SAPV_E-W"
Position
10.0
Velocity
1
Direction
%M1.2
"SAPV_Absolute_man"


Network 10:
Comment
"Date and time". date_time.MINUTE
>= USInt
0
"Date and time". date_time.MINUTE
< USInt
1
"Date and time". date_time.HOUR
>= USInt
5
"Date and time". date_time.HOUR
<= USInt
20
%M5.0
"1min_enable"
"Date and time". date_time.MINUTE
>= USInt
10
"Date and time". date_time.MINUTE
< USInt
11
"Date and time". date_time.MINUTE
>= USInt
20
"Date and time". date_time.MINUTE
< USInt
21


Network 18: SAPV Voltage
Comment
NORM_X
Int to Real
EN
ENO
0
MIN
%W100
"Tag_55"
VALUE
27648
MAX
OUT
%MD316
"Tag_56"
SCALE_X
Real to Real
EN
ENO
0.0
MIN
%MD316
"Tag_56"
VALUE
30.0
MAX
OUT
%MD1300
"Tag_5"
MUL
Real
EN
ENO
%MD1300
"Tag_5"
IN1
1.02112
IN2
OUT
%MD320
"SAPV_voltage"


Network 22:
Comment
RD_LOC_T
DTL
EN
ENO
%MW20
"Tag_33"
RET_VAL
"Date and time". date_time
OUT


Network 57:
Comment
"Date and time".
date_time
>=
DTL
DTL#2021-9-1-
00:00:00
"Date and time".
date_time
<=
DTL
DTL#2021-9-30-
23:59:00
FieldRead
Real
EN
ENO
%MD1404
"Sep_rowno"
INDEX
VALUE
%MD1100
"Zenith_value"
"Sep_Oct_
Zenith".Static_
1[0]
MEMBER


Network 64:
Comment
%MD1108
"Zenith_Angle"
>
Real
0.0
%MD1108
"Zenith_Angle"
<=
Real
65.0
MOVE
EN
ENO
%MD1108
"Zenith_Angle"
IN
OUT1
%MD1124
"Zenith_0_90"
%M2.1
"DAPV_N_S_
Absolute_man"
MUL
Real
EN
ENO
%MD1124
"Zenith_0_90"
IN1
11.1111
IN2
OUT
%MD808
"Pos_DAPV_N_S"

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 137-159, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1471444
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Z-Skor ve Kutu Grafiğiyle Sapan Değer Belirleme

Outlier Detection by Z-Score and Box Plot

Ahu Dede[1*], Necati Ağıralioğlu[2]

Geliş / Received: 20/04/2024 ***Revize / Revised: 10/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 12/08/2024***

ÖZ

Türkiye'deki 1926'dan 2012'ye kadar olan su kaynakları verileri hataya açıktır ve bu durum sıkı kalite kontrol prosedürlerini gerektirmektedir. 129 istasyondaki aylık ortalama sıcaklık, ortalama bağıl nem ve toplam yağış verilerindeki sapan değerler, z-skoru ve kutu grafikleri kullanılarak analiz edildi. Analiz sonuçları, mevsime özgü ön işleme prosedürlerinin uygulanmasının gerekliliğini ve sapan değer tespit sınırları arasındaki eşitsizliklerin belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, çeyrekler arası aralık için katsayı olarak dört değerinin kullanılmasının zorunluluğu vurgulanmıştır. Sapan değerlerinin, eksik verilere ve sapan olmayan değerlere, özellikle yaz aylarında sıfır olmayan yağış kayıtlarına yakın olma eğilimi göstermesi dikkat çekicidir. Sıcaklık ve yağış sapan değerlerinin mekansal ve zamansal açıdan benzerlikler gösterdiği belirlenmiştir. Bağıl nem ve yağış sapan değerlerini çıkaran komşu bölgeler arasında benzerlik gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, sapma miktarı ile sapan değer adedi arasında ters orantılı bir ilişki saptanmış olup, sapan değer içeren istasyonların bölgesel konumları ile bu istasyonlardaki verilerin dağılımları arasında anlamlı bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Hidroloji, Sapan Değer, Z-Skor, Kutu Grafiği

ABSTRACT

The water resources data from Turkey, spanning the period from 1926 to 2012, are susceptible to errors, necessitating rigorous quality control procedures. Outliers in the monthly average temperature, relative humidity, and total precipitation data from 129 stations were analysed using z-scores and box plots. The analysis revealed the necessity of applying season-specific preprocessing procedures and highlighted significant inequalities in the thresholds used for outlier detection. Additionally, it was emphasized that a coefficient of four should be used for the interquartile range. Notably, outliers tended to be close to missing data and non-outlier values, particularly to non-zero precipitation records during the summer months. Spatial and temporal similarities were observed in the temperature and precipitation outliers, while relative humidity and precipitation outliers exhibited similarities among neighbouring regions that generated outliers. The study also identified an inverse relationship between the magnitude of deviation and the frequency of outliers, and it found a significant correlation between the regional locations of stations containing outliers and the distribution of data within these stations.

Keywords- Hydrology, Outliers, Z-Score, Boxplot

[1]*Sorumlu yazar iletişim: ahudedem@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-0534-6823)
Bağımsız Araştırmacı, İstanbul, Türkiye
[2]İletişim: necati.agiralioglu@antalya.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-5336-9202)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Antalya, Türkiye

I. GİRİŞ

A. Genel

Su kaynaklarının yönetilmesi için ekosistemlerdeki değişiklikler ölçülür, toplanır, düzenlenir, karakteristikleri belirlenir, davranışları tahmin edilir, böylelikle yeni teknolojiler, araçlar ve hizmetler geliştirilir. Fakat ölçümler her ne kadar veri toplama merkezlerinde kontrol edilse de [1,2] çeşitli hatalarla yüklüdür. Bunlar teknikten, cihazdan, personelden ve çevreden kaynaklanabilir [3-6]. Hatalar analizlerin doğru sonuçlar vermesini engeller [3,6-11]. Bunun için kalite kontrol (qualitycontrol) ve türdeşlik (homogeneity) incelemesi yapılır. Kalite kontrol incelemelerinde sapan değer (outlier), iç tutarlılık (internalconsistency) ve ardışık değerler arası farklar (persistence test /temporalcoherency /time continuity) araştırılır. Türdeşlik incelemelerinde varyansın ve ortalamanın türdeşliği araştırılır [11-18]. 1620'den bu yana bahsi geçen sapan değere ilişkin literatür çok geniştir [19]. İlk olarak uyumsuz gözlemlerin göz ardı edilmesi eleştirilmiştir [20]. Ardından sapan değerlerle başa çıkmak için 1850'lerde yöntemler geliştirilmeye başlanmıştır [21]. Sapan değer dağılım aralığının belli bir mesafe uzağında kalan, örneklem ile aynı dağılımdan gelmeyen ve popülasyona uymadığı tespit edilen değerdir [22].

Su kaynaklarında sapan/aykırı değer (outlier), hatalı veya şüpheli veriyi gösterirken ekstrem değer (extreme) gerçekleşen aşırı olayları göstermek için kullanılır [2]. Kırılma/kesme noktası (breakpoint) veya değişim noktası (changepoint) veri serilerini nispeten keskin bir şekilde parçalara/segmentlere ayıran noktaları ifade eder. İklimsel anomali (anomaly) ise uzun dönemli ortalama değerden sapmayı ifade eder. Fakat bazı kaynaklarda anomali ve değişim noktası ifadelerinin sapan değer olarak kullanılmasına [23], sapan değerin sadece hatalı olmadığı bilgi de içerdiği söylemine [24, 25] ve sapan değerlerin ekstrem değerler olduğu söylemine rastlanır [26, 27]. Hatalı sapan değerlerin tespit edilmesi durumunda bu değer veri setinden çıkarılabilir veya düzeltilir. Gerçek sapan değerler ise etkilerini anlamak için özel olarak değerlendirilir. Bu bağlamda sapan değerler karmaşık ve çok boyutlu etkiler yaratabilir. Su kaynaklarındaki sapan değerleri yaratan olaylar tarımda mahsul kayıplarına bu da gıda fiyatlarında artışa neden olabilir, enerjide taleplerin etkilenmesine dolayısıyla enerji piyasalarında dalgalanmalara yol açabilir. Ekstrem yağış olayları, kirleticilerin su sistemlerine karışmasına, ayrıca toprak erozyonuna ve bunun getirisi tarım arazilerinde verim düşüklüğüne, gıda arzında azalmaya ve fiyat artışlarına neden olabilir. Ekstrem sıcaklıklar, toprağın nemini azaltabilir dolayısıyla mikroorganizmaların faaliyetlerini olumsuz etkilenerek toprağın verimliliğini düşürür ve üretiminde sorunlara yol açabilir. Bunun yanında orman yangınlarına neden olabilir ve ormansızlaşma hızlanabilir, bu da iklim değişikliğiyle mücadele açısından kritik öneme sahip karbon döngüsünü etkileyerek atmosfere daha fazla karbondioksit salınımına neden olabilir. Su kaynaklarına bağımlı enerji üretim tesisleri kuraklık dönemlerinde enerji üretim kapasitesini kaybedebilir. Bu durum, enerji arzında dalgalanmalara ve enerji güvenliğinde risklere yol açabilir. Sapan değerler aşırılık içerdiğinden oluşan riskler sigorta taleplerinde artışa neden olabilir. Ekstrem hava koşulları, inşaat ve altyapı projelerinde maliyet artışlarına, tedarik zincirlerinde dolayısıyla üretim süreçlerinde aksamalara yol açabilir. Ayrıca sağlık üzerinde de etkili olabilir ve sosyal hizmetlerin yükünü artırabilir. Bunun yanında işgücü verimini düşürebilir ve iş güvenliği açısından risk oluşturabilir. Ek olarak göç hareketlerine neden olabilir. Bu durum, hem göç veren hem de göç alan bölgelerde ekonomik ve sosyal zorluklar yaratabilir. Son olarak kültürel ve sosyal dinamikleri de etkileyebilir. Örneğin yerel festivallerin veya turizm faaliyetlerinin aksamasına neden olabilir. Tüm bunlar dış ticaret dengesinden enflasyona makroekonomik istikrarı tehdit eder. Ve sadece ekonomik sonuçlar doğurmakla kalmaz, aynı zamanda ekosistemlerin ve insan topluluklarının sağlığı ve refahı üzerinde de kritik roller oynar. Bu açılardan bakıldığında, su kaynaklarındaki sapan değerlerin etkileri oldukça kapsamlı ve çok katmanlıdır. Bu durum, politika yapıcıların ve iş dünyasının bu etkileri anlamak ve yönetmek için daha bütünsel yaklaşımlar geliştirmelerini gerektirir. Bu etkiler için veri analistlerinin daha sağlam tahminler geliştirmesi ve bunların stratejilere dahil edilmesi, devletlerin inovasyona yatırım yapması ve su kaynaklarının daha verimli kullanılması için kaynak yönetimi stratejilerinin sürdürülebilirliğini artırması gerekir.

Sapan değeri tespit ederken veriye ve eşik değere bakılır. Verinin kendisinin ya da kendisi dışında kalanların bir referansa olan uzaklığı kullanılır. Bu referans, ortalama, medyan gibi bir merkez ya da en yakın veya belli bir yüzdelik dilim olabilir. Eşik; Z, F, ki-kare, t gibi çeşitli dağılımlardaki kritik değer ya da yaygın olarak kabul edilen bir sabit olabilir.

İstatistik tabanlı Z-skor, Weisberg t-testi, Walsh ve Grubbs t-testi gibi tekniklerde verinin kendisinin merkeze uzaklığı Z veya t dağılımına uyduğu için kritik değerin üzerinde olan uzaklıklar sapan değer kabul edilir [22, 28-36]. Tek değişkenli bu yöntemleri çok değişkenli veri ortamına genişletmek için mesafe tabanlı yöntemler geliştirilmiştir. Çeşitli mesafe teknikleri vardır. Öklit, Mahalanobis, Manhattan, Minkowski gibi tekniklerle bulunan her verinin veri kümesinin merkezine mesafeleri, ki-kare dağılımına uyduğu için kritik değerin üzerinde olan uzaklıklara ait değerler sapan değer olarak belirlenebilir [30, 35, 37, 38]. Gerçek veriye uydurulmuş bir regresyon doğrusunun gerçek veriyle farkları alındığında verinin kendisinin merkeze uzaklığı alınmış gibi olur. Student-türü artıklar denilen bu farklar Z dağılımına uyar ve kabul edilen kritik değeri aşanlar sapan değer kabul edilir [22, 28, 29, 30, 33]. Destek vektör veri açıklaması (SVDD) yönteminde verinin normal durumu temsil eden

örneklerle eğitilen, kabul edilen sapan değer toleransına bağlı olarak, yarıçapı, merkezi, hata marjı belirlenen hiperkürenin merkezine mesafesi yarıçap sınırlarının dışındaysa sapan değer olarak kabul edilir [38 – 42].

İstatistik tabanlı Dixon Testi, Tukey testi, kutu grafiği gibi tekniklerde verinin kendisinin en yakın veriye veya belli bir yüzdelik dilime uzaklığı kabul edilen bir sabitin dışındaysa sapan değer kabul edilir [22, 28-31, 33, 37, 43]. Derinlik tabanlı yöntemler bu tek değişkenli sıra istatistiklerini çok değişkenli veri ortamına genişletmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemde derinlik fonksiyonları veri noktaları için bir merkezilik ölçüsü sağlar. Yüksek derinlik değerine sahip noktalar daha merkezi kabul edilirken düşük derinlik değerine sahip olanlar daha aykırı kabul edilir. Derinlikleri hesaplamak için birçok farklı algoritma geliştirilmiştir. Bunlar Tukey, Mahalanobis, projeksiyon, zonoid, uzaysal derinlik gibi fonksiyonlarıdır. Bunlar da ki-kare dağılımına uyduğu için kritik değerin üzerinde olan derinliklere ait değerler sapan değer olarak belirlenebilir [38, 39, 44-50]. K-en yakın komşular algoritmasında, verinin kendisine k adet en yakın verilere olan uzaklığının ortalamaları kabul edilen bir sabitin dışındaysa sapan değer kabul edilir [28, 37-39, 51].

Çok değişkenli veriler farklı yoğunlukta dağılmış olabilir. Bu durumda kümeleme yardımıyla yoğunluğa göre gruplar bulunur ardından gruplara göre sapan değerler bulunabilir ya da sadece kümeleme yöntemiyle sapan değerler bulunabilir. Bunlar için hiyerarşik kümeleme, k-ortalama, Gauss dağılım tabanlı kümeleme, DBSCAN algoritmaları kullanılabilir [30, 34, 39, 48, 51-54]. İzolasyon ormanı yönteminde kullanılan dâhili düğümler değişen merkezler olarak düşünülebilir ve mesafe yerine dallanma sayısı hesaplanır. Oluşturulan ağaçların ortalamaları alınarak anomali skoru bulunur. Bire yakın skorların önceden kabul edilen sapan değer miktarına kadar sapan olduğu varsayılır [37, 38, 54-56].

Verilerin merkeze uzaklıklarının çarpımının, verilerin bir eksiğinin merkeze uzaklıklarının çarpımından farkının incelenmesi aslında verinin kendisi dışında kalanların incelenmesi ile bulunan sapan değerlerdir. Olabilirlik (likelihood) fonksiyonu kullanılarak bulunan bu farklar ki-kare dağılımına uyar ve kritik değeri aşanlar sapan değer kabul edilir. Sapan değerin, verinin kendisi dışında kalanların incelenmesi ile bulunmasında diğer teknikler Cook uzaklığı, sapma artıkları (deviance residuals), DFFITS, DFBETAS gibi farklardır. Bu farklar F veya Z dağılımına uyar ve kritik değeri aşanlar sapan değer kabul edilir. Tüm bu tekniklerde gözlemin tahmin katsayılarına etkisini gösteren kaldıraç (leverage) noktası yardımcı olarak kullanılır [28, 30, 52, 57-59]. Lokal Sapan Değer Faktörü (LOF) algoritmasında verinin kendi komşularının ve komşularının komşularının diğer veriler tarafından erişilebilirliği kıyaslayarak her veriye bir erişilemezlik oranı atanır. Kritik değer olarak 1 kullanılır [37-39, 48, 51, 52, 54]. Katmanlı ağ yapısından meydana gelen autoencoders, GAN, DBN, RNN, LSTM gibi derin öğrenme teknikleri tahminle gerçek arasındaki hatanın büyüklüğüne göre sapan değeri belirler [34, 37-39, 55, 60].

Görüldüğü gibi sapan değer tespitinde verinin kendisinin bir referansa olan uzaklığının dikkate alındığı yöntemler temelde ikiye ayrılır. Bunlar Z-skor ve kutu grafiği yöntemleridir. Bu araştırmanın amacı, bu iki yöntemin uygulaması ve sonuçları hakkında daha önce incelenmemiş özellikleri hidrolojik veriler ile incelemektir.

B. Su Kaynaklarında Sapan Değer Tespiti için Kullanılan Yöntemler

Su kaynaklarında sapan değer analizlerinde birçok yöntem kullanılmıştır. Verinin merkeze uzaklığını normal dağılıma uyduğunu kabul edip, genellikle 3 olan bir sabitle karşılaştırılarak sapan değeri belirleyen z-skor yöntemi ile yağış [61 -63], yüzey sıcaklığı [63], deniz seviyesi [64], yeraltı su seviyesi [65], nehir su seviyesi [66], akım hız verisi [67] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda 2 olan bir sabitle karşılaştırılarak yağış [63, 68], yüzey sıcaklığı [63], taşkın verileri [69], akım verileri [70] gibi değişkenlerde sapan değerler tayin edilmiştir. Bazı çalışmalarda 2,5 olan bir sabitle karşılaştırılarak sıcaklık [71], taşkın verileri [69] gibi değişkenlerde sapan değerler tespit edilmiştir. Nadiren 4 olan bir sabitle karşılaştırılarak da sıcaklık [72, 73] ve yağış [72] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Çok nadiren ise 5 olan bir sabitle karşılaştırılarak yüzey sıcaklığı ve yağış [63] gibi değişkenlerde sapan değerler tayin edilmiştir. Ve gene Çok nadiren 3,5 olan bir sabitle karşılaştırılarak sıcaklık [73] değişkeninde sapan değerler belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda ise çeşitli iklimsel değerler [2], yağış [74, 77, 78], sıcaklık [75, 77], buharlaşma [76], basınç, kar derinliği, bağıl nem, güneşlenme süresi [77], hava kalitesinde incelenen $PM_{2,5}$, PM_{10}, SO_2, NO_2, CO ve O_3 [79] gibi değişkenlerdeki sapan değerleri belirlemek için kullanılan sabit belirtilmemiştir. Bazı çalışmalarda da veri adetine göre değişen sabitler kullanılarak hidrolojik veri [80] ve akım hızı [67] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Z-skor yöntemine benzer şekilde verinin merkeze uzaklığını Log Pearson Tip 3 dağılımına uyduğunu kabul edip, %10'luk anlamlılık seviyesine göre sapan değeri belirleyen yöntem ile taşkın debilerindeki sapan değerler tayin edilmiştir [81]. Verinin merkeze uzaklığını Gumbel dağılımına uyduğunu kabul edip, kritik değere göre sapan değeri belirleyen yöntem ile yıllık maksimum yağışlarda sapan değerler belirlenmiştir [82].

Z-skor yöntemine çok benzer verinin merkeze uzaklığını Grubbs tablosuna uyduğunu kabul edip sapan değeri belirleyen Grubbs yöntemi ile hidrolojik veri [23], yağış [83, 85-87], kar derinliği [84], sıcaklık, bağıl nem, rüzgar hızı, güneşli saatler ve buharlaşma [85], nehir su seviyesi [66], taşkın debisi [88, 89], yıllık maksimum akım [90] gibi değişkenlerde sapan değerler tespit edilmiştir. Gene Z-skor yöntemine çok benzer verinin ortancaya uzaklığını 2,5 ile 7,5 arasında değişen bir sabitle karşılaştırılarak sapan değeri belirleyen ortanca mutlak sapma

yöntemi ile yeraltı su seviyesi [65], sıcaklık [91, 92], yağış [91, 92], rüzgar hızı, güneş radyasyonu, bağıl nem [91], basınç, bulutluluk oranı [92], radyasyon verisi [95], akım hızı [67], hava kalitesinde incelenen $PM_{2,5}$, PM_{10}, SO_2, NO_2, CO ve O_3 [79], atmosferdeki eser gazların miktarı [94] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir.

Regresyon yöntemiyle iklim değişikliği analizlerinde kullanılan bitki fenoloji verileri [95], sıcaklık [96, 97], hidrolojik veriler [23], taşkın verileri [69], yağış [97], tuzluluk ve bor izleme verileri [98], deniz seviyesi [64] gibi değişkenlerde sapan değerler tayin edilmiştir.

Destek vektör veri açıklaması (SVDD) yönteminin bir alt modeli olan tek sınıf SVM ile toprak tipini belirten uydu verisi [99] ve geofiziksel veriler [54] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir.

Verinin ilk %25. ve %75. değere uzaklığını, genellikle 1,5 olan bir sabitle karşılaştırılarak sapan değeri belirleyen kutu grafiği yöntemi ile yağış [100 -104], sıcaklık [103-105], deniz seviyesi [106], yeraltı su seviyesi [65], nehir debisi [107,108], bitki örtüsü indeksi [109] gibi değişkenlerde sapan değerler tespit edilmiştir. Bazı çalışmalarda 3 olan bir sabitle karşılaştırılarak da yağış [110-114], sıcaklık, su buharı basıncı, rüzgar hızı [114] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Nadiren 5 olan bir sabitle karşılaştırılarak da sıcaklık, çiğlenme noktası sıcaklığı, deniz seviyesi basıncı, rüzgar hızı [115] gibi değişkenlerde sapan değerler tayin edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise sıcaklık [116-118], basınç [117], bağıl nem [118], soğutma – ısıtma derece günleri [119] gibi değişkenlerdeki sapan değerleri belirlemek için kullanılan sabit belirtilmemiştir. Verinin ilk ve son değere uzaklığını Dixon sabitiyle karşılaştırılarak sapan değeri belirleyen Dixon yöntemi ile yağış [85, 120], sıcaklık , bağıl nem , rüzgar hızı ve güneşli saatler, buharlaşma [85], hidrolojik veriler [23] gibi değişkenlerde sapan değerler ortaya konmuştur. Bazı çalışmalarda ise istatistiksel yöntemlerle sıcaklık, yağış, bağıl nem [121], nehir debisi [122, 123] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Ama hangi istatistiksel yöntemler olduğu belirtilmemiştir. Çeyrekler aralığındaki gibi yüzdelerin kullanıldığı başka çalışmalar da mevcuttur [74, 124]. Yağışın göl seviyesinde sebep olduğu değişimi gösteren grafikteki sapan değerler görsel inceleme ile bulunmuştur [125]. Sapan debi değerleri için su seviyesi-debi eğrisinin modelleneni ve ölçüleni arasındaki farkın deneyime dayalı karar verilen bir değeri geçmesine göre sapan değer belirlenmiştir [126, 127]. Bir başka çalışmada uç (ekstrem) değerler için çizilen yağış -dönüş aralığı grafikleriyle sapan değer belirlenmiştir [26]. Maksimum nehir akım verilerindeki sapan değerler taşkın frekans eğrilerine dayalı kritik değerlerle ortaya konmuştur [128].

Derinlik tabanlı yöntemlerle yıllık maksimum akım [90], taşkın verisi [129, 134], deniz seviyesi basıncı, yüzey rüzgarının bölgesel ve meridyen bileşenleri, deniz yüzeyi sıcaklığı, yüzey hava sıcaklığı, gökyüzü bulutluluğu [130], hava kalitesinde incelenen ozon ve nitrojen dioksit [131], sıcaklık [132], yağış [113], nehir debisi [47, 133] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir.

Kümeleme yöntemi ile iklim değişikliği analizlerinde kullanılan bitki fenoloji verisi [95], elektrik sayaçlarındaki ölçüm verisi [135], hava sıcaklığı, buhar basıncı [136, 137], atmosfer basıncı, bağıl nem ve rüzgar hızı [137], yağış, güneşlenme süresi, güneş ışınımı, kar suyu eşdeğeri [136]; kümeleme algoritmalarından DB-SCAN ile sıcaklık, yağış, basınç ve bulutluluk oranı [92], geofiziksel veriler [54]; başka bir kümeleme algoritması K-Ortalamalar yöntemiyle su ürünleri yetiştiriciliğindeki pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık [138] gibi değişkenlerde sapan değerler tespit edilmiştir.

İzolasyon ormanı yöntemi ile nehir su seviyesi [139], geofiziksel veriler [54], su ürünleri yetiştiriciliğindeki pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık [138] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir.

Temel bileşenler analiziyle taşkın verilerindeki [140] sapan değerler, dalgacık tabanlı yöntemle, yüzey modelleri üretmek için kullanılan havadan lazer tarama verisinde [141] sapan değerler tayin edilmiştir.

Verinin kendisini değil de kendisi dışındaki verileri inceleyerek sapan değeri belirleyen yöntemlerden biri olan olabilirlik fonksiyonu ile bazı iklimsel gözlemler [2], nehir debisi [30], aylık ortalama ozon miktarı [142], güneşlenme süresi [143]; olabilirlik fonksiyonu ve Bayes ağları ile yıllık maksimum yağışlar [144], rüzgar hızı [52]; Cook uzaklığı ile yağış [57]; lokal sapan değer faktörüyle (LOF) toprak tipini belirten uydu verisi [99], geofiziksel veriler [54], sıcaklık, basınç ve bağıl nem [145], su ürünleri yetiştiriciliğindeki pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık [138], debi değerleri [146] gibi değişkenlerde sapan değerler belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda da yeni yöntemler önerilmiştir [70, 102, 122, 147].

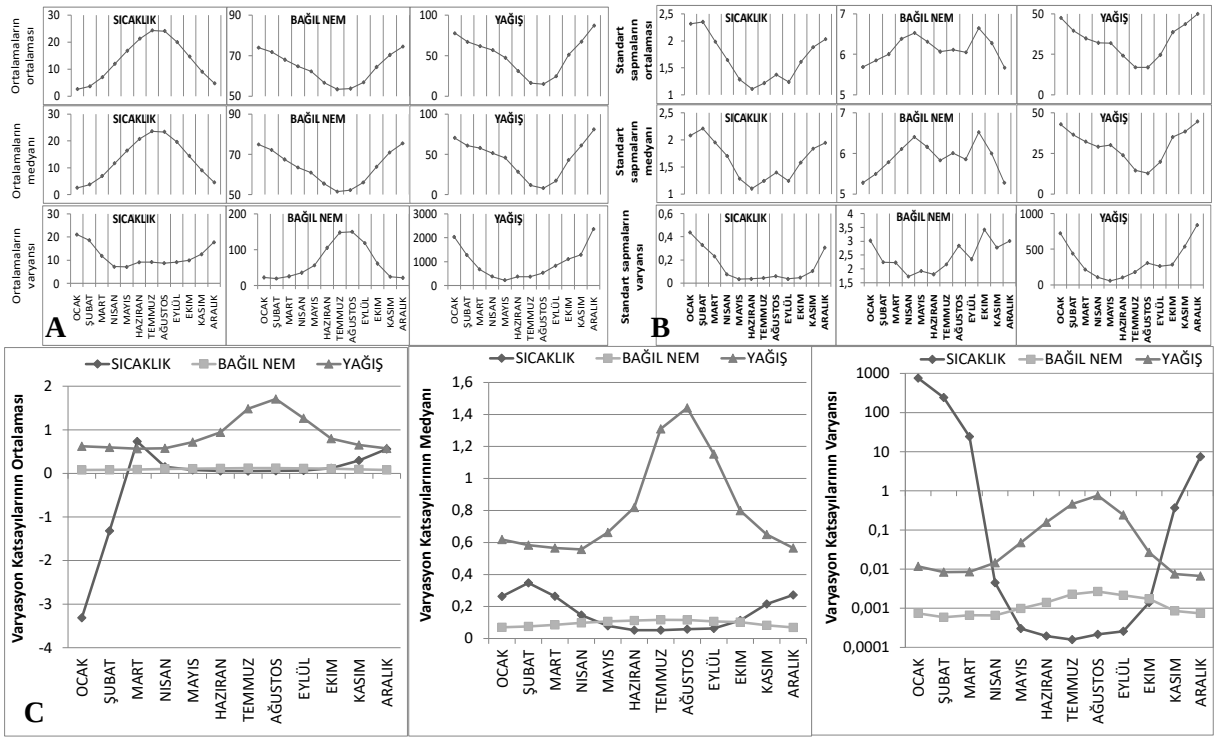
II. VERİLERİN ANALİZİ

Bu çalışmada Devlet Meteoroloji İşlerine (DMİ) bağlı Türkiye Meteorolojik Veri Arşiv ve Yönetim Sisteminden ve University of East Anglia (İngiltere) kurumunun genel ağ açık veri tabanından temin edilen ve Dede & Ağıralioğlu [148] çalışmasında da kullanılan 1926 – 2012 arası Türkiye genelinde 129 istasyonda aylık ortalama sıcaklık (°C), 128 istasyonda aylık ortalama bağıl nem (%) ve 128 istasyonda aylık toplam yağış (mm) olmak üzere 4620 adet dizi kullanılmıştır. Verilerin korelasyon özellikleri önceki çalışmada verilmiştir [149].

Şekil 1.A'daki ortalamaların ortalamaları normal olarak yazın yükselen sıcaklıklara, düşen bağıl nem ve yağışlara, kışın düşen sıcaklıklara, yükselen bağıl nem ve yağışlara işaret eder. 128 istasyonun her birinin standart

sapması her birinin ayrı ayrı 1926 – 2012 arası yayılımını gösterir. Şekil 1.B'deki ilk iki satır bu zamansal değişimin genel değerinin aylık olarak farklılaşmasını göstermektedir. En alt satır ise bu zamansal değişimin coğrafi değişiminin yani istasyondan istasyona değişiminin aylık olarak farklılaşmasını gösterir. Şekil 1.B'de görüldüğü gibi sıcaklık ve yağışta standart sapmalarının ortalaması birbirine benzer; yazın azalır, kışın artar. Yani 87 yıl boyunca yaz aylarında genelde yüksek sıcaklıklar ve düşük yağışlar görülür, kış aylarında ise yüksek veya düşük sıcaklıklar ve az veya çok yağışlar görülür. Standart sapmalarının varyansı ise sıcaklıkta ocak, şubat ve aralıkta yükselir. Nisan, mayıs, haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekimde en düşük seviyeye gelir. Bağıl nemde en az nisan, mayıs, haziranda olduğu ve ağustos, eylül, ekim, kasım, aralık ve ocakta en yüksek değerde olduğu görülür. Yağışta mart, nisan, mayıs, haziran ve temmuzda en düşükken ağustos, eylül ve ekimde ortalamanın altında, şubat ve kasımda ortalamanın üstünde, ocak ve aralıkta en yüksektedir.

Standart sapmayı ve ortalamayı birlikte değerlendirmek için birim ortalama başına düşen standart sapma yani varyasyon katsayısı (Cv) alınmıştır. Bunun için Şekil 1.B'deki standart sapmaların ortalamaları Şekil 1.A'daki ortalamaların ortalamalarına bölünmüştür. Bu hem her ikisini basitçe değerlendirme açısından iyidir, hem de farklı toplumlar olan sıcaklık, bağıl nem ve yağışı birbiriyle karşılaştırma olanağı sunar. Bunları bütün olarak yorumlayabilmek için yani 12 ayın hepsini görebilecek şekle getirmek için her ay için ayrı ayrı olmak üzere 128 istasyonun ortalaması alınmıştır. Şekil 1.C'deki ilk grafik bunu göstermektedir. Ortalama aşırı değerlerden etkilenebilir diye medyanı da alınmıştır. Şekil 1.C'deki ikinci grafik de bunu göstermektedir. Yani ilk grafikteki tek bir değer 1926-2012 arası birim ortalamadan sapmaların tüm istasyonlardaki genel değeridir. Grafiğin tümü ise 1926-2012 arası birim ortalamadan sapmaların tüm istasyonlardaki genel değerlerini her bir ay için gösterir. Böylece bunların mevsimlik nasıl değiştiği görülebilir. Buna göre, yıllık değişimlerin genel coğrafi değeri sıcaklık için yazın daha az kışın daha fazladır. Bağıl nem ve yağış içinse bunun tam tersidir. Dolayısıyla bağıl nem ve yağışın histogramları yaz aylarında kış aylarına göre yayvandır yani 1926-2012 arası değişimler genel olarak yazın kışa göre daha fazladır. Şekil 1.C'deki üçüncü grafikte görüldüğü gibi, varyasyon katsayısının (Cv) varyansı için de aynı durum geçerlidir. Bu, aslında bir nevi ortalamanın sağlaması gibidir. Çünkü yıllık değişimlerin genel coğrafi değeri bağıl nem ve yağış için yazın daha fazla oluyorsa varyansta bir nevi farklılığı, çeşitliliği ifade ettiği için değişimin fazla olduğu aylarda çeşitliliğinde fazla olması uyumlu bir durumdur. Yani bağıl nem ve yağış için 1926-2012 arası değişimlerin istasyonlar arası çeşitliliği yazın kışa göre daha fazladır. Zaman içindeki artış ve azalışının dışında bir de bunlar miktar olarak birbirleriyle kıyaslanabilirler. Ortalama ve varyansta, bağıl nem ve sıcaklığın büyüklükleri birbirine yakındır. Yağış onlardan uzaktır.



Şekil 1. Tüm istasyonlardaki ortalama (A), tüm istasyonlardaki standart sapma (B), varyasyon katsayısı(C).

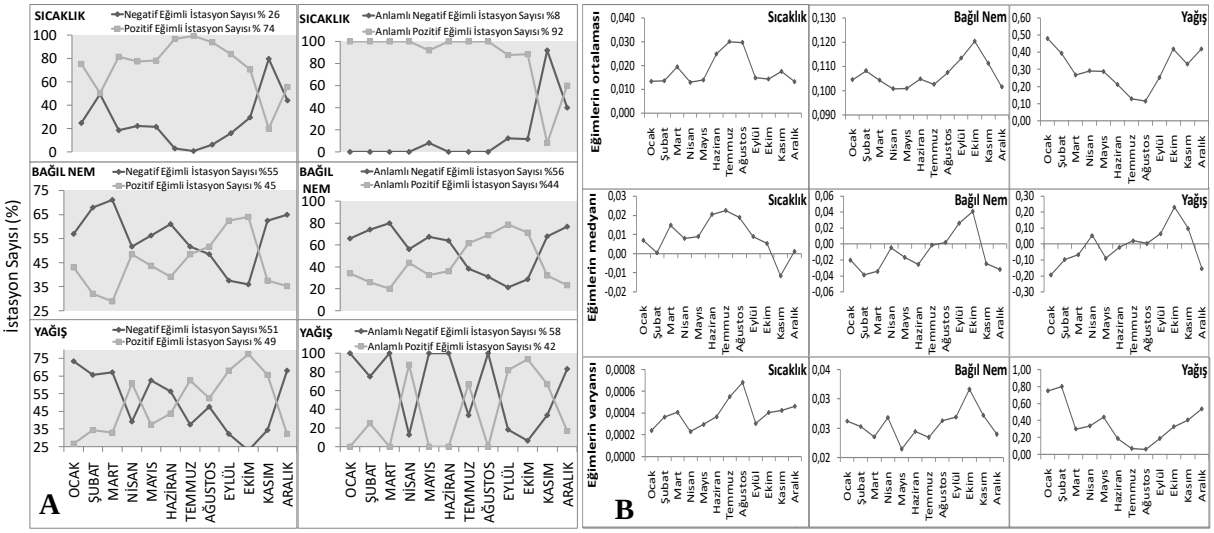
Şekil 2.A'da ilk sütunda tüm eğimler, ikinci sütunda sadece anlamlı eğimler dikkate alınmıştır. Bunlar eğimlerindeki artışın ve azalışın aylık değişimlerini gösterir. Sıcaklıkta pozitif eğimli istasyon sayısı negatif eğimli istasyon sayısına göre fazla, bağıl nem ve yağışta sonbahar hariç olmak üzere tam tersidir. Sonbaharda 1926'dan 2012'ye doğru istasyonların yarıdan fazlasında artış eğilimi vardır. Sıcaklıktaki artış eğilimindeki istasyon sayıları

azalış eğilimindekilere göre oldukça fazladır. Bağıl nem ve yağıştaki azalış eğilimindeki istasyon sayıları ile artış eğilimindeki istasyon sayıları birbirine yakındır. Kısaca sıcaklık için eğimler yazın artar, kışın daha az artar. Bağıl nem ve yağış için eğimler sonbaharda artar, ilkbaharda ve kışın azalır. İstasyonların 1926-2012 arasındaki değişimini gösteren eğimler doğrusal regresyon denklemi Denklem (1) ile hesaplanmış; t istatistiğiyle, Denklem (2), kontrol edilmiştir. Bu bağıntılarda x bağımsız değişken y bağımlı değişkendir. Ayrıca σ, r ve n sırasıyla standart sapma, korelasyon katsayısı ve veri adetidir.

$$eğim = \frac{\sum(x-\bar{x})\,(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \qquad \begin{matrix} x: bağımsız\ değişken \\ y: bağımlı\ değişken \end{matrix} \tag{1}$$

$$t_değeri \quad \frac{eğim \cdot \sigma_x \cdot \sqrt{n-1}}{\sigma_y \sqrt{(1-r^2)(\frac{n-1}{n-2})}} \tag{2}$$

Tüm eğimleri pozitif kabul edip sadece büyüklüklerine bakıldığında Şekil 2.B'de sıcaklık için yazın eğimlerin değişimi ki bu değişim artış şeklindedir Şekil 2.A'da görüldüğü gibi, kışın eğimlerin değişimine göre ki bu da çoğunlukla artış şeklindedir, daha fazladır. Yağış için yazın eğimlerin değişimi ki bu değişim, biraz artış biraz azalış şeklindedir, kışın eğimlerin değişiminden yani azalışından daha azdır. Bağıl nem için sonbaharda eğimlerin değişimi yani artışı, ilkbahardaki eğimlerin değişiminden yani azalışından daha fazladır. Kısaca Şekil 2.B'de ilk iki satırda görüldüğü gibi sıcaklık için eğimlerin yazın artışı, kışın artışından fazladır. Yağış için tam tersi yani eğimlerin yazın artışı, kışın azalışından azdır. Bağıl nem ise ikisi arasında bir geçiş özelliğindedir. Sonbahardaki artış ilkbahardaki azalıştan fazladır. Basitçe eğimler genel olarak sıcaklık için yaz aylarında kış aylarına göre diktir, bağıl nem için sonbaharda ilkbahara göre diktir, yağış için kışta yaza göre diktir. Yani 1926-2012 arası meydana gelen değişim sıcaklık için daha çok yazdan gelir, bağıl nem için daha çok sonbahardan gelir, yağış için bu değişim daha çok kıştan gelir. Şekil 2.B'de son satırda görülen eğimlerin varyansı bir nevi ortalamanın sağlaması gibidir. Çünkü yıllık değişimlerin genel coğrafi değeri sıcaklık ve bağıl nem için yazın daha fazla oluyorsa varyans da bir nevi farklılığı, çeşitliliği ifade ettiği için değişimin fazla olduğu aylarda çeşitliliğin de fazla olması uyumlu bir durumdur. Zaman içindeki artış ve azalışın dışında bir de miktar olarak bunlar birbirleriyle kıyaslanabilirler. Ortalama ve varyansta bağıl nem ve sıcaklığın büyüklükleri birbirine yakındır. Yağış onlardan uzaktır.



Şekil 2. Pozitif ve negatif eğimli istasyon sayıları (A), tüm istasyonlardaki eğim (B).

III. KULLANILAN YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan yöntem önceki çalışmada [149] yöntem bölümünde "histogram ve kutu grafiği yönteminin kullanılma biçimi" başlığı altında açıklanmıştır. Sapan değerleri tespit etmek için sıcaklık ve bağıl nemde μ±3σ (μ:ortalama, σ:standart sapma) sınırlarıyla Z-Skor, yağışta $Q_{3,1} \pm 2IQR$, $Q_{3,1} \pm 3IQR$, $Q_{3,1} \pm 4IQR$ ve $Q_{3,1} \pm 5IQR$ ($Q_{3,1}$:üçüncü ve birinci çeyrek, IQR:Q_3 -Q_1 çeyrekler açıklığı) sınırlarıyla kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır. Z-Skoru yöntemi, veri noktasının ortalamadan ne kadar uzakta olduğunu gösterir. Z-Skorlarının mutlak değerlerinin -3/+3 aralığı dışında kalanları sapan değer olarak kabul edilir. Tukey kutu grafiği yöntemi

olarak bilinen kutu grafiği yöntemi ise 75. yüzdelik dilim ve 25. yüzdelik dilim arasındaki aralığın iki katının 75. yüzdelik dilime eklenmesi ve 25. yüzdelik dilimden çıkarılmasıyla bulunan sınırların dışında kalanları sapan değer olarak kabul edilir. Kullanılan yönteme yapılan ekler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

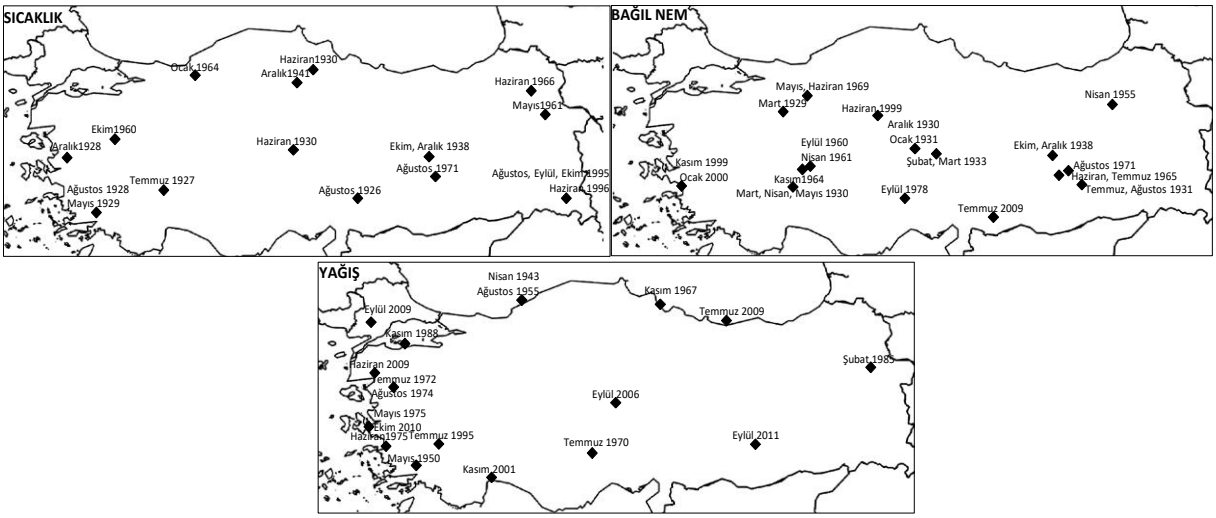
Sapan değerleri daha detaylı değerlendirebilmek için hem komşularıyla hem kendi istasyonunda sapmış olan değerler, yüksek güvenirliğe sahip sapan değerler (YGSD) olarak kabul edilmiştir. YGSD'lere sadece komşularıyla sapan, ama kendi içinde sapmayan değerler eklenince tüm sapan değerler olarak kabul edilmiştir.

Diziler genel olarak ortalama, varyans, çarpıklık, basıklık/sivrilik parametrelerine ve doğrusal düzenli (eğim), dalgalı düzenli (period), doğrusal düzensiz, dalgalı düzensiz bileşenlerine sahiptir. İstasyonların sahip olduğu bu parametreler ve bileşenler istasyondan istasyona farklılık gösterir. Genellikle algoritmalar uygulanmadan önce tüm özelliklerin hesaplamalara eşit şekilde katkıda bulunabilmesi için veriyi ölçeklendirmek tavsiye edilir. Ölçeklendirme, istasyonların sahip olduğu bu parametreleri ve bileşenleri ortak bir değere getirmek için ve dolayısıyla veri değerlerini belirli bir aralığa yeniden boyutlandırmak için yapılan ön işlemlerdir. Bu şekilde veri setindeki her değer aynı ölçekte olur, birbirleriyle karşılaştırılabilir hale gelir ve daha tutarlı sonuçlar üretildiği düşünülür. Çarpıklık ve sivrilik parametresi sadece yağışta vardır [149] ve ortak bir değere getirmek sapan değerin kaçırılmasına sebep olur. Doğrusal veya dalgalı düzensiz bileşenler ortak bir değere getirilemezler. Veriler aylık olarak ayrıldığı için dalgalı düzenli bileşen (period bileşeni) bulunmaz. Ortak bir değere getirilenler ortalama, standart sapma, ve eğimdir. Eğimler sıfıra getirilince ortalamalar da getirilmiş olur. O yüzden sadece standart sapma ve eğim ortak değerlere getirilmiştir. Bazı çalışmalarda sadece ortalama ortak bir değere getirilirken [150], bazı çalışmalarda sadece eğim [139], bazılarında ise standart sapma ve ortalama birlikte (standartizasyon) [30, 57, 107, 114, 117, 118, 151-153] ortak bir değere getirilmiştir. Bazı çalışmalarda ortalama yerine ortanca [75, 115] veya ilk çeyrek [54], standart sapma yerine çeyrekler açıklığı aralığı kullanılmıştır. Bu çalışmada 4 ön işlem denenmiştir: eğimleri sıfıra eşitlemek, standart sapmaları bire eşitlemek, her ikisini de eşitlemek, hiçbirini eşitlememek. Bu şekilde tek tek denenmesinin sebebi, istasyonların eğimleri veya standart sapmaları arasında fark çok ise bunları eşitlemek gerekliliğidir. Aksi taktirde sapan değer kaçırılabilir. Ama istasyonların eğimleri veya standart sapmaları arasında fark az ise bunları ortak bir değere getirmek avantajlı da olabilir dezavantajlı da olabilir. Veriyi inceleyip ona göre karar vermek gerekir. Bu durumların hepsi belli bir veri adetinin üzerinde böyledir. Belirli bir veri adetinin altında farklar azsa da çoksa da durum belirsizdir.

Belirlenen sapan değerler eşit önem seviyesine sahip olmadıklarından belli bir sıralamada olmalıdırlar. Bu sıralamanın nasıl yapılacağını araştırmacı tasarlamalıdır. Bunun için referansları belirlemek gerekir. Bunlar sırasıyla; sapma durumu, komşu güvenilirliği, sapma miktarı, korelasyon katsayısı, komşusuyla mesafesi ve sapan değerin yılıdır. Sapma durumuna göre sapan değerler iki gruba ayrılır. Bunlar kendi istasyonunda ve komşularıyla uyumlu olarak sapmış olanlar üst sırada, sadece komşularıyla uyumlu olarak sapmış olanlar bu grubun altında listelenir. Hem kendi istasyonunda sapmış olanlar hem komşularıyla uyumlu olarak sapmış olanların kendi istasyonundaki sapma miktarları yüksek olanları üst sırada listelenir. Eğer kendi istasyonunda eşit sapma miktarına sahipse yüksek güvenilirlikli gruplara mensup olan komşulara sahip sapan değerler daha üst sıradadır. Bunlar önceki çalışmada ayrıntılı açıklanmıştır [149]. Bu gruplarda da eşit güvenilirlik varsa komşularıyla gösterdiği sapma miktarı fazla olan üst sıradadır. Komşularıyla olan sapma miktarlarında da eşitlik varsa komşularıyla olan korelasyon katsayıları yüksek olanlar üst sıradadır. Bunda da eşitlik varsa komşularıyla olan mesafeleri düşük olanlar üst sıradadır. Bunda da eşitlik varsa daha eski yıllarda ölçüm ve kayıt tekniklerinin daha düşük hata oranının daha yüksek olabileceği düşünüldüğünden senesi küçük olan daha üst sıradadır. Bunun altında sadece komşularıyla uyumlu olarak sapmış olanların yüksek güvenilirlikli gruplara mensup olan komşulara sahip olanları vardır. Bu gruplarda eşit güvenilirlik varsa komşularıyla gösterdiği sapma miktarı fazla olan üst sıradadır. Bu gruplandırmalar bu şekilde devam eder.

IV. BULGULAR

Sıcaklık ve bağıl nem için Z-Skor ve yağış için kutu grafiğiyle tespit edilen sapan değerlerin yüksek güvenilirliğe sahip olanları Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu değerler ve tüm sapan değerler üzerinden yapılan incelemeler sonucu ortaya çıkan bulgular dört başlık altında toplanmıştır. Bunlar sapan değeri tespit etmek için kullanılan sınırların, önişlemlerin, komşuların ortaya çıkardığı ve sapan değerin kendisinin ortaya çıkardığı bulgulardır.



+

Şekil 3.Yüksek güvenilirliğe sahip sapan değerlerin (YGSD) coğrafi dağlımı.

A. Sapan Değer Belirlerken Kullanılan Sınırların Ortaya Çıkardığı Bulgular

İlk bulgu normal dağılımlı olmayan yağış için kullanılan $Q_{3,1} \pm 2IQR$ sınırının uyumluluğuyla ilgilidir. Tablo 1.A'da YGSD'e baktığımızda sıcaklık ve bağıl nemde bütün ön işlemlerde on binde 2 – 3 değer sınırların dışındadır. Yağışta da bütün ön işlemlerde on binde 1 – 2 değer $Q_{3,1} \pm 4IQR$ sınırlarının dışındadır. Yani sıcaklık ve bağıl nem değişkenleriyle benzerdir. 2IQR, 3IQR ve 5IQR sınırlarında sırasıyla yaklaşık on binde 20, 7 ve 1 değer sınırların dışındadır. Tüm sapan değerlere baktığımızda sıcaklık değil ama bağıl nemde bütün ön işlemlerde on binde 3 – 4 değer sınırların dışındadır. Yağışta da bütün ön işlemlerde on binde 1 – 2 değer $Q_{3,1} \pm 4IQR$ sınırlarının dışındadır. Yani bağıl nem değişkenleriyle benzerdir. 2IQR, 3IQR ve 5IQR sınırlarında sırasıyla yaklaşık on binde 30, 8 ve 0,1 değer sınırların dışındadır. Bu çalışmada diğer çalışmalarda sıklıkla kullanıldığı için $Q_{3,1} \pm 2IQR$ ile ve tüm değişkenlerin uyumlu olması açısından $Q_{3,1} \pm 4IQR$ ile değerlendirme yapılmıştır.

Diğer bir bulgu veriler normal dağılımlı olmadığında $\mu \pm x\sigma$ sınırı yerine kullanılan $Q_{3,1} \pm$ xIQR sınırının $\mu \pm x\sigma$ sınırını temsil edebilmesi ile ilgilidir. Sıcaklık ve bağıl nem değişkenlerinde $\mu \pm x\sigma$ ve $Q_{3,1} \pm$ xIQR sınırları kullanılarak bulunan sapan değerler Tablo 1.B'de görülmektedir. Dört ön işlem yöntemi için de denenmiştir. Bu sınırların yakalayabildikleri sapan değerler birbirleriyle birebir örtüşmezler. Ortak olarak gördükleri değerler vardır. Birinin sapan değer olarak gördüğü bir değeri, diğerinin sapan değer olarak görmediği durumlar da vardır. Sınırların birbirleriyle % 40 - 50 arası bir uyumsuzluğu vardır. Dolayısıyla birbirleri yerine kullanıldıklarında yarı yarıya birbirlerini temsil ederler.

Tablo1. Yağışta dört (A), sıcaklık ve bağıl nemde iki (B) farklı sınır için sapan değer adetleri.

A

		Normal Sınırlar (μ±3σ)		Çeyrekler Sınırları (IQ3,1 ± 5IQR)	(IQ3,1 ± 4IQR)	(IQ3,1 ± 3IQR)	(IQ3,1 ± 2IQR)
		Sıcaklık	Bağıl Nem	Yağış	Yağış	Yağış	Yağış
YGSD		0,02%	0,03%	0,01%	0,02%	0,08%	0,25%
	(İstasyon– Komşu)	14 adet	25 adet	8 adet	19 adet	70 adet	231 adet
		0,02%	0,03%	0,01%	0,01%	0,07%	0,23%
	E* (İstasyon– Komşu)	19 adet	26 adet	5 adet	13 adet	64 adet	208 adet
		0,01%	0,02%	0,003%	0,01%	0,06%	0,22%
	S** (İstasyon– Komşu)	11 adet	20 adet	3 adet	10 adet	54 adet	201 adet
		0,02%	0,02%	0,001%	0,01%	0,05%	0,19%
	S(E(İstasyon– Komşu))	16 adet	19 adet	1 adet	8 adet	44 adet	175 adet
Tüm Sapan Değerler		0,07%	0,04%	0,01%	0,02%	0,09%	0,36%
	(İstasyon– Komşu)	66 adet	36 adet	8 adet	19 adet	84 adet	324 adet
		0,07%	0,04%	0,01%	0,01%	0,08%	0,31%
	E* (İstasyon– Komşu)	61 adet	33 adet	5 adet	13 adet	70 adet	283 adet
		0,08%	0,04%	0,003%	0,02%	0,08%	0,34%
	S** (İstasyon– Komşu)	70 adet	32 adet	3 adet	15 adet	68 adet	307 adet
		0,07%	0,03%	0,002%	0,01%	0,06%	0,28%
	S(E(İstasyon– Komşu))	64 adet	28 adet	2 adet	9 adet	55 adet	254 adet

*E: eğimlerin sıfıra eşitlendiği durum.
**S: standart sapmaların bire eşitlendiği durum.

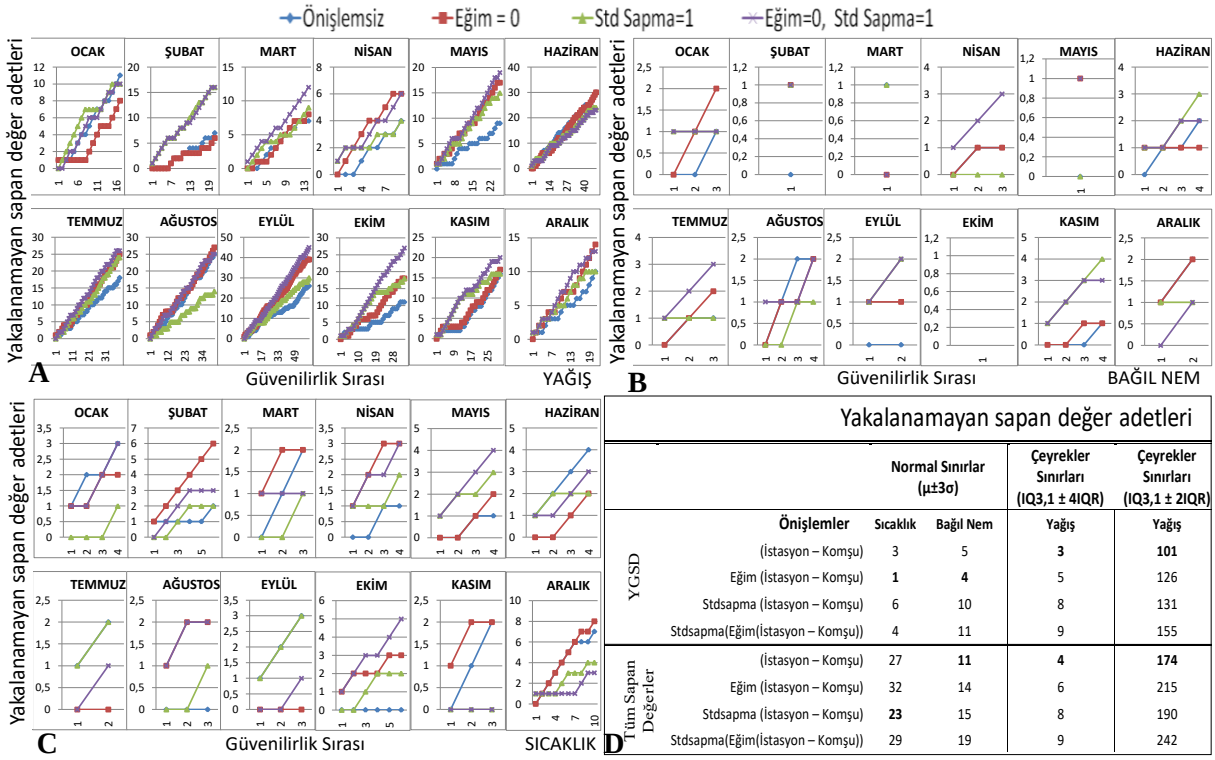
B

		Sıcaklık			Bağıl Nem		
		Ortak Sapan Değerler	(IQ3,1 ± 2IQR) sapan gördüğü (μ±3σ) sapan görmediği değerler	(μ±3σ) sapan gördüğü (IQ3,1 ± 2IQR) sapan görmediği değerler	Ortak Sapan Değerler	(IQ3,1 ± 2IQR) sapan gördüğü (μ±3σ) sapan görmediği değerler	(μ±3σ) sapan gördüğü (IQ3,1 ± 2IQR) sapan görmediği değerler
YGSD	(İstasyon – Komşu)	9	2	5	22	14	3
	E* (İstasyon – Komşu)	12	3	7	21	7	5
	S** (İstasyon – Komşu)	8	2	3	15	6	5
	S(E(İstasyon – Komşu))	11	3	5	15	4	4
Tüm Sapan Değerler	(İstasyon – Komşu)	56	44	10	26	21	8
	E* (İstasyon – Komşu)	55	33	6	23	13	10
	S** (İstasyon – Komşu)	56	34	14	22	10	10
	S(E(İstasyon – Komşu))	51	37	13	18	10	10

*E: eğimlerin sıfıra eşitlendiği durum.
**S: standart sapmaların bire eşitlendiği durum.

B. Sapan Değer Belirlerken Kullanılan Ön işlemlerin Ortaya Çıkardığı Bulgular

Yöntem bölümünde belirtilen dört ön işlemin etkinliğine karar vermek için her ön işlemden geçen verilerin ayrı ayrı sapan değerleri bulunmuştur. Ortak olmayan sapan değerler hangi ön işlemde daha fazla yakalanmışsa bu ön işlem daha verimli kabul edilmiştir. Bu değerlerin yakalanamadığı ön işlem gruplarının verimi daha düşük kabul edilmiştir. Bu yüzden farklı ön işlemlerde yakalanamamış sapan değer adetlerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 4'te farklı ön işlemlerde yakalanamamış sapan değer adetleri görülmektedir. En alttaki çizgiler yakalanamamış sapan değerin en az olduğu ön işlemleri gösterir. Şekil 4.A'da yağış için mavi çizgi 12 ayın 8'inde aşağıdadır. Haziran ve ağustosta yeşil çizgi aşağıdadır. Yani yağış için yazın varyansları eşitlemek, diğer aylarda ön işlem yapmamak yani mavi çizgi ağır basmaktadır. Şekil 4.B'de bağıl nem için kırmızı çizginin ağırlıklı olarak daha aşağıda kaldığını söyleyebiliriz. Kış ayları için ise mavi çizgi aşağıdadır. Yani bağıl nem için kışın ön işlem yapmamak, diğer aylarda eğimleri eşitlemek ağır basmaktadır. Şekil 4.C'de sıcaklık için özellikle güvenilirlik sırasına göre başta olan değerler içinde kırmızı çizginin ağırlıklı olarak daha aşağıda kaldığını söyleyebiliriz. Ocak şubat mart ayları için yeşil çizgi daha aşağıdadır. Yani sıcaklık için kışın varyansları eşitlemek, diğer aylarda eğimleri eşitlemek ağır basmaktadır. Aylara göre değişen ön işlem seçmek yerine her değişken için bir tane ön işlem seçmek istenirse ağırlıklı olan aylardaki ön işlem alınır. Yağış için bu ön işlem, ön işlem yapmamaktır. Bağıl nem için 6 ay eğimleri eşitlemek 6 ay ön işlem yapmamak, sıcaklık için 5 ay eğimleri eşitlemek 5 ay ön işlem yapmamak baskın görüldüğünden ilgili ön işlemlerde yakalanamayan sapan değer adetlerinin en az nerede olduğuna bakılır. Şekil 4.D'de görüldüğü gibi YGSD'de sıcaklık ve bağıl nem için standart sapmaları eşitlememek eğimleri eşitlemek en az yakalanamayan sapan değer adetine sebep olur. Sapan değerlerin hepsinde sıcaklık için standart sapmaları eşitlemek ama eğimleri eşitlememek, bağıl nem için her ikisini de eşitlememek en az yakalanamayan sapan değer adetine sebep olur. Yüksek güvenilirlikli olması sebebiyle ön işlem olarak sıcaklık ve bağıl nem değişkeni için sadece eğimler eşitlenmesi, yağış değişkeni için ön işlem yapılmaması uygundur.



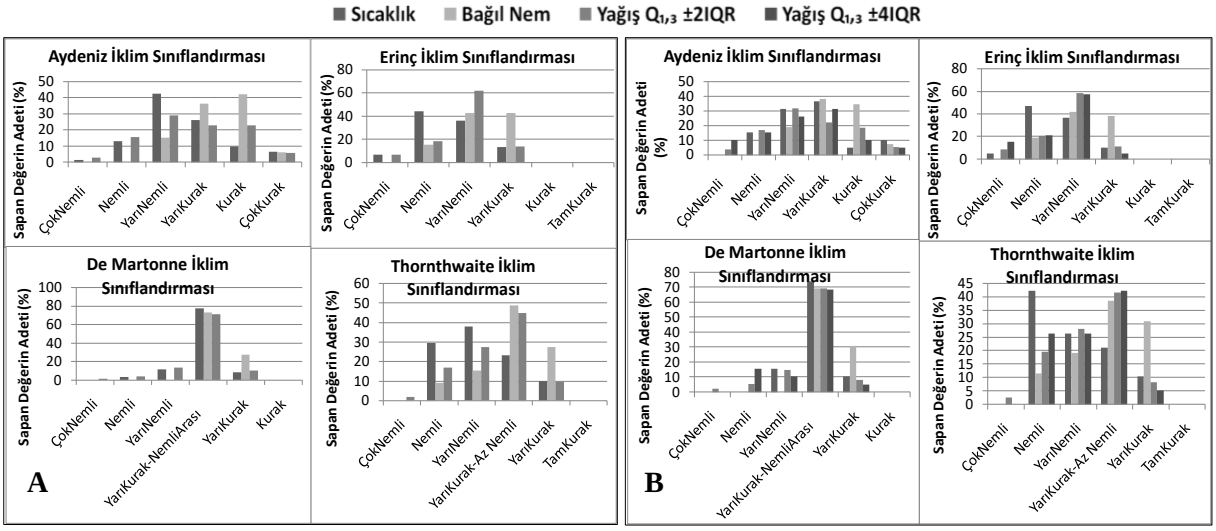
Yakalanamayan sapan değer adetleri

		Normal Sınırlar (μ±3σ)		Çeyrekler Sınırları (IQ3,1 ± 4IQR)	Çeyrekler Sınırları (IQ3,1 ± 2IQR)
	Önişlemler	Sıcaklık	Bağıl Nem	Yağış	Yağış
YGSD	(İstasyon – Komşu)	3	5	**3**	**101**
	Eğim (İstasyon – Komşu)	**1**	**4**	5	126
	Stdsapma (İstasyon – Komşu)	6	10	8	131
	Stdsapma(Eğim(İstasyon – Komşu))	4	11	9	155
Tüm Sapan Değerler	(İstasyon – Komşu)	27	**11**	**4**	**174**
	Eğim (İstasyon – Komşu)	32	14	6	215
	Stdsapma (İstasyon – Komşu)	**23**	15	8	190
	Stdsapma(Eğim(İstasyon – Komşu))	29	19	9	242

Şekil 4. Yağışta (A), bağıl nemde (B), sıcaklıkta (C) yakalanamamış aylık sapan değerler ve toplam adetleri (D).

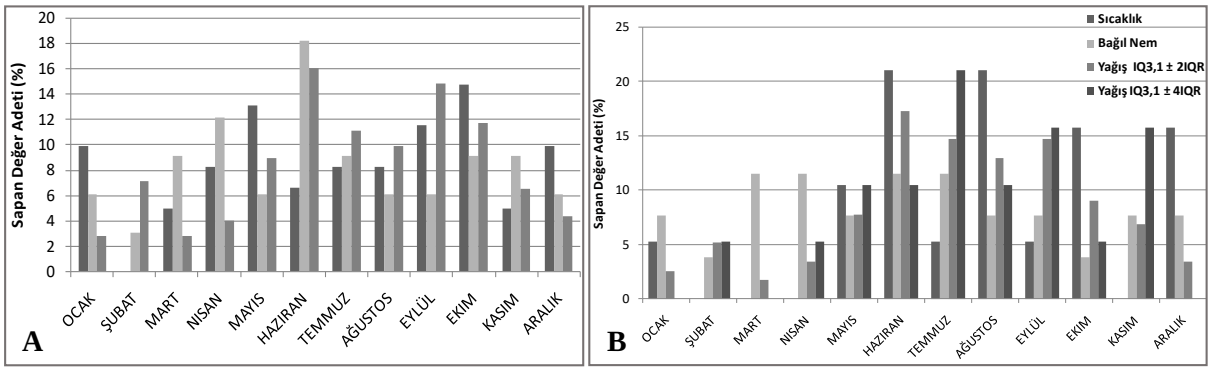
C. Belirlenen Sapan Değerlerin Ortaya Çıkardığı Bulgular

Şekil 5.A'da tüm sapan değerler sıcaklık için nemliye meyilli yarı nemli, yağış için yarı nemli, bağıl nem için yarı nemliye meyilli yarı kurak bölgelerde bulunur. Şekil 5.B'de YGSD'ler sıcaklık için nemli ve yarı nemli bölgelerde öncelikli, yarı kurak bölgelerde ikincil, bağıl nem için tam tersi yarı kurak bölgelerde öncelikli nemli ve yarı nemli bölgelerde ikincil, yağış için yarı nemli bölgelerde öncelikli yarı kurak ve nemli bölgelerde ikincil olarak görülmüştür. Özetle belirlenen sapan sıcaklık ve yağış değerleri bağıl neme göre biraz daha nemli bölgelerde çıkmıştır.



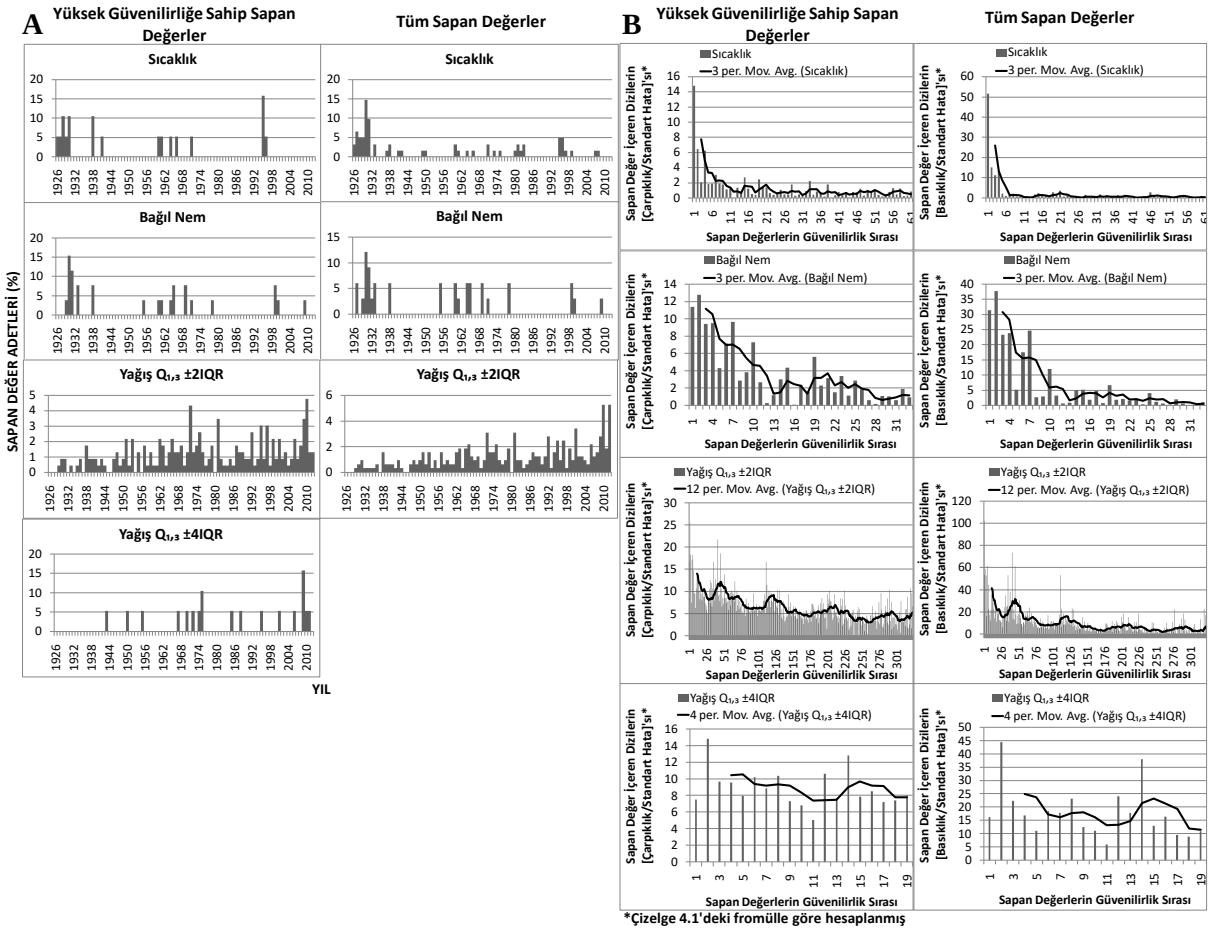
Şekil 5.İklim bölgelerine göre tüm sapan değerlerin (A) ve YGSD (B) dağılımı.

Şekil 6.A'da tüm sapan değerler genel olarak sıcaklıkta şubat hariç tüm yıla, bağıl nemde haziran ayında diğer aylara göre biraz daha fazla olmak üzere tüm yıla, yağışta kış ve ilkbaharda daha az olmak üzere tüm yıla yayılmıştır. Şekil 6.B'de YGSD'ler sıcaklıkta ağırlıklı olarak yılın son sekiz ayına, bağıl nemde genel olarak tüm yıla, yağışta kış ve ilkbaharda daha az olmak üzere genel olarak tüm yıla yayılmıştır. Ortak durum tüm mevsimlere yayılmakla birlikte, sapan sıcaklık ve yağış değerlerinin kış mevsiminde biraz daha az çıkmasıdır.



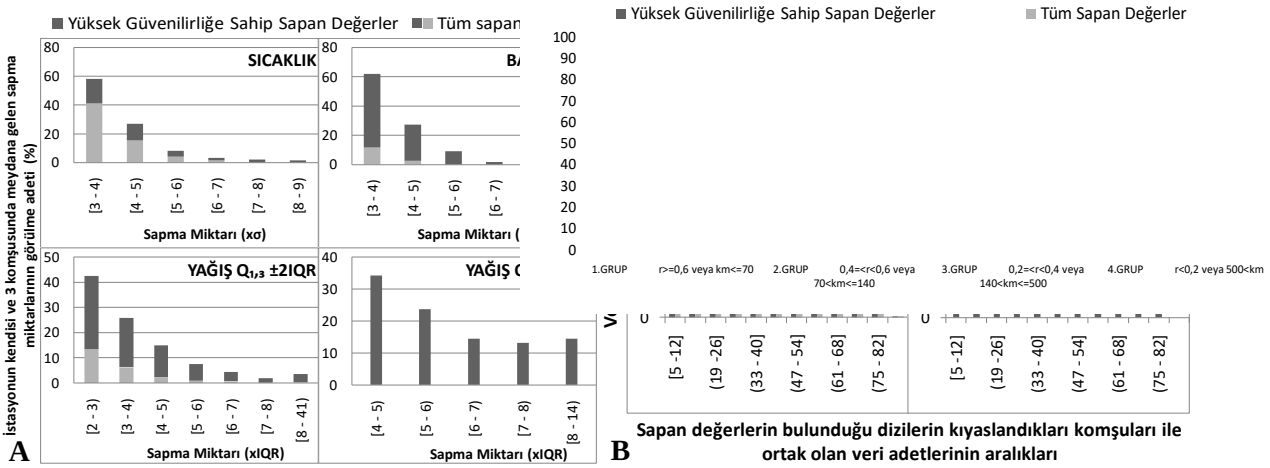
Şekil 6. Farklı aylara göre tüm sapan değerlerin (A) ve YGSD (B) dağılımı.

Şekil 7.A'da sapan sıcaklık ve bağıl nem değerleri yağışınkilere göre daha benzer yıllarda çıkmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem değişkenlerinde ortak olarak gözlemlenen 3 adet sapan değer (İst No:17201 Ekim ve Aralık 1938 ve İst No:17874 Ağustos 1971) mevcuttur. Şekil 7.B'de sapan değer içeren dizilerden normal dağılımlı olmayanları çarpıklık ve basıklık katsayısına göre sıcaklık için %5-21, bağıl nem için %36-54, yağış için %87-96'dır.



Şekil 7.Yıllara göre sapan değerlerin dağılımı (A).Sapan değer içeren dizilerin normallik sıralaması (B).

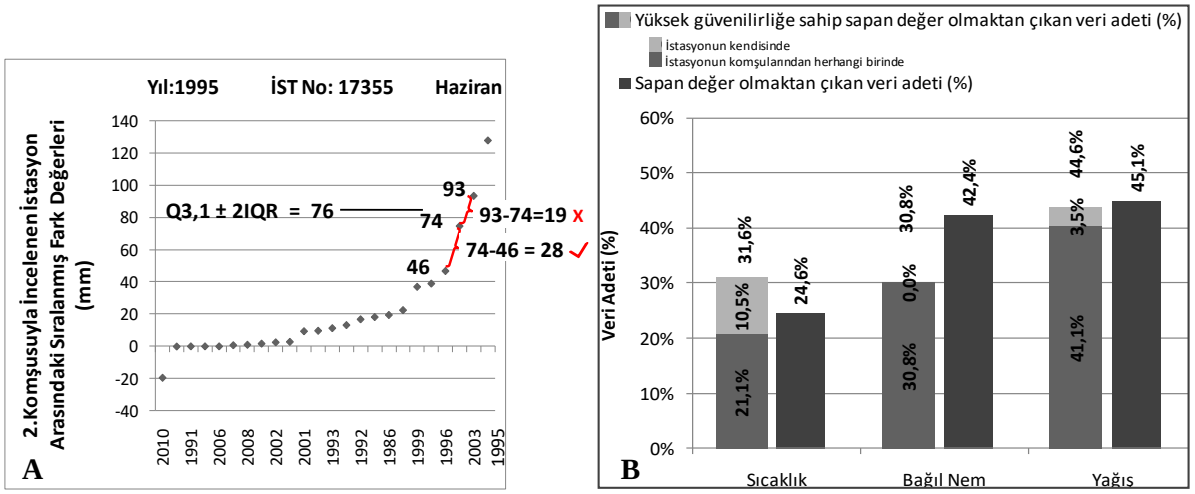
Şekil 8.A'da görüldüğü gibi 3σ – 7σ sapma miktarı ile bağıl nem, 3σ – 9σ sapma miktarlı sıcaklık ve 2IQR – 41IQR sapma miktarlı yağış değişkenine göre daha düşük sapma miktarları göstermiştir. Şekil 8.B'de görüldüğü gibi sapan değerleri içeren dizilerin veri adetleri çoğunlukla 47-54 adet arasındadır.



Şekil 8. Sapma miktarlarının dağılımı (A). Sapan değer içeren veri adetlerinin dağılımı (B).

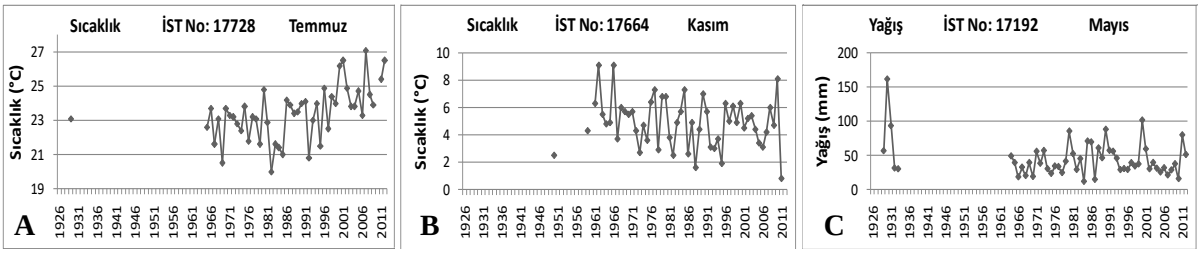
Belirlenen sapan değerler sapan olmayan değerlere bazen çok yakın çıkar. Çünkü hem sapan değerler ile sapan değerin kendine en yakın sapan olmayan değerler arasındaki fark bu sınırlarla denetlenen bir durum değildir, hem de birden fazla sapan değerler sahte sapan veya maskelenmiş sapan değer problemlerine sebep olabilir. Şekil 9.A'da Osmaniye merkez istasyonunu gösteren bir grafik y-ekseni istasyonun değerlerinin 2. komşusunun değerleriyle olan küçükten büyüğe sıralanmış bir şekilde farkını gösterir. x-ekseni de bu sıralanışa denk gelen zamanları gösterir. Bu dizide son 3 değerin diziden uzaklaştığı görülmektedir. Sondan 3. değerle sondan 4. değer

arasında 28 veri yoktur. Sondan 2. değerle sondan 3. değer arasında 19 veri yoktur. Sapan çıkma sınırı ise 76 mm'dir. Yani 93 mm değeri normal değildir ama 74 mm değeri normaldir. Ama baktığımızda 93mm'ye göre 74 mm en yakınındaki veriye daha uzaktır. Bu çalışmada kullanılan yöntemde en yakın 3 komşusundan biriyle bu durumun meydana gelmesi zaten değerin sapan çıkmasına engeldir. Kendi içinde böyle bir durumun meydana gelmesi yüksek güvenilirliğe sahip sapan değer çıkmasına engeldir. Sonuç olarak tüm sapan çıkan değerler incelendiğinde bu problemin görülme durumu %30 – 45 arasındadır. Yüksek güvenilirliğe sahip sapan değerler için Şekil 9.B'de soldaki sütunlar bunu göstermektedir. Sağdaki sütunlarda görüldüğü gibi %25 ila %45 arası veri de sapan değer olmaktan çıkar.



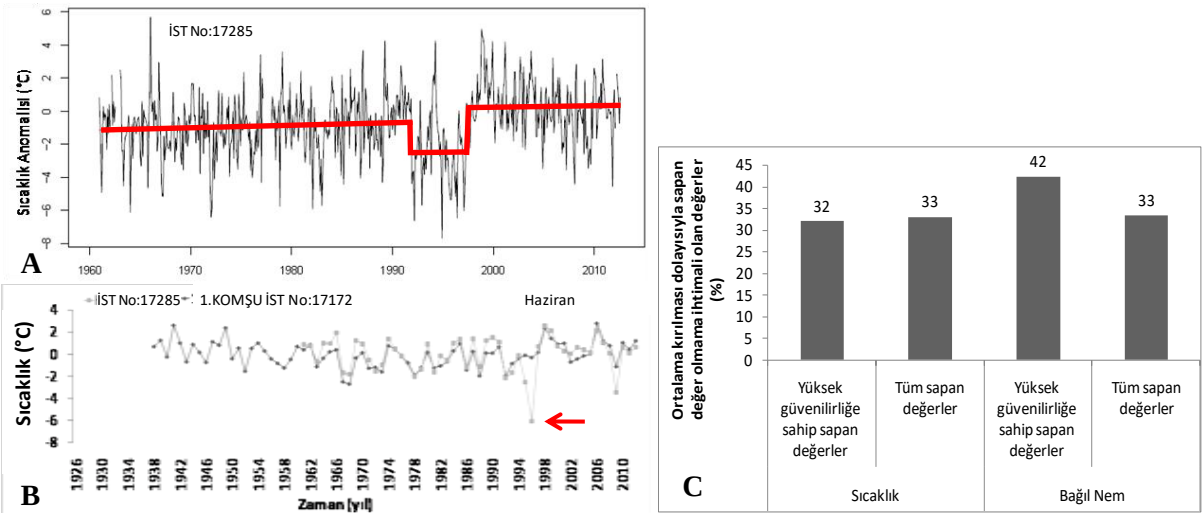
Şekil 9. 17355 no.lu istasyonun komşusuyla farkı (A), sapan belirlenen ama sapan olmayabilecek veri adeti (B).

Eksik veri tamamlama hesaplarında yararlanılabilecek büyük bir zaman diliminde tek bir veri olarak duran verileri sapan değer olarak almamak bir avantaj olabilir. Fakat YGSD'in bilgisinin eksik veri tahmininde kullanılması ihtimali düşüktür. Fakat yüksek güvenilirliğe sahip olmayan sapan değerler eksik verilere yakın çıkarsa bunun bir dezavantaj olacağını düşünülebilir. Çünkü bu sapan değer zaten çok fazla sapmadığı için veri bilgisi önemli olabilir ve eksik veri tahmininde yararlanılabilir. Şekil 10.A'da Ankara Polatlı istasyonu (No:17728) 1929 yılı temmuz ayı için 23°C'yi kendi içinde değil ama komşularıyla uyumsuzluğundan sapan değer olarak göstermiştir. Fakat 1930'daki değerden sonra 1965'e kadar veri kaydı yoktur. 1925 – 1965 arası veriyle ilgili fikir verebilecek tek değer budur. Aynı şekilde Şekil 10.B'de Ankara Kızılcahamam istasyonunda da (No:16664) 1952 yılı kasım ayı için 2,6°C'yi sapan değer göstermiştir. Ama 1925 – 1959 arası veriyle ilgili fikir verebilecek tek değer budur. Gene benzer şekilde Şekil 10.C'de Aksaray merkez istasyonunda da (No:17192) 1930 yılı mayıs ayı için 162 mm yağışı sapan değer göstermiştir. Burada da 1925 – 1964 arası veriyle ilgili fikir verebilecek 5 değerden biridir.



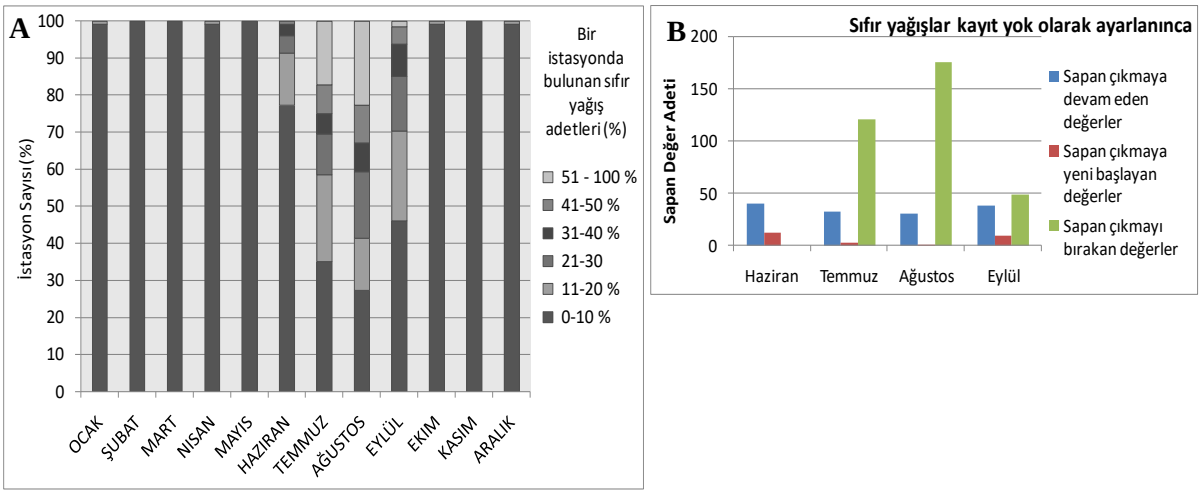
Şekil 10.17728 no.lu istasyonun verisi (A), 17664 no.lu istasyonun verisi (B), 17192 no.lu istasyonun verisi (C).

Yıllık verilerde RHtestV3 yazılımı ile yapılan incelemelere göre sıcaklık için 86, bağıl nem için 115 ve yağış için 27 istasyonda ortalamada kırılmalar mevcuttur [154]. Bunlar aylık verilerde sapan değer olarak yakalanabilir. Şekil 11.A'daki Hakkâri merkez istasyonunda (No.17285) 1995-96 arası ortalamada kırılma görülmektedir. Bu istasyonda 1995 yılının ağustos ayından 1996 yılının haziran ayına kadar 6 değer sınırlarının dışında kalarak sapan değer gözükmektedir. Şekil 11.B'deki haziran ayına ait grafikte 1996 değeri bu sapanlardan biridir. Sıcaklık için olduğu gibi bağıl nem içinde böyle durumlar vardır. Ama yağış için ortalama kırılmaları olsa da sapan çıkan değerlerle paralellik göstermez. Şekil 11.C'de görüldüğü gibi belirlenen sapan sıcaklık değerlerinin % 33'ü RHtestsV3 ile uyumlu olarak ortalama kırılması olmasından şüphelenilen değerlerdir. YGSD için bu %32'dir. Belirlenen sapan bağıl nem değerlerinin % 33'ü RHtestsV3 ile uyumlu olarak ortalama kırılması olmasından şüphelenilen değerlerdir. YGSD için bu %42'dir



Şekil 11.17285 no.lu istasyonun yıllık verisi (A), 17285 no.lu istasyonun ve komşusunun aylık verisi (B), sapan değerin ortalama kırılmasına denk gelenlerinin miktarı (C).

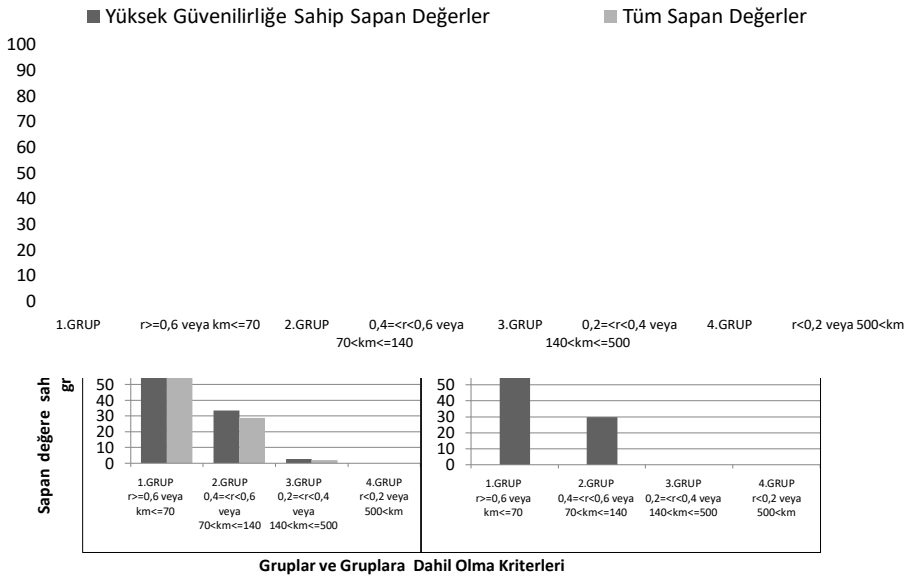
Sıfır yağış kayıtlarının fazlaca olduğu aylarda sapan değerin tespit edilmesi daha güçtür. Çünkü nadir yağışlı durumlar çoğunlukla sapan değer olarak gözükmekte Şekil 12.A'da görüldüğü gibi haziran, temmuz, ağustos ve eylül hariç diğer aylarda istasyonların sıfır yağış adeti %10'un altındadır. Temmuz ve ağustosta yarısından fazlası sıfır yağış içeren istasyonlar mevcut istasyonların %20'sidir. Eylülde istasyonların yarısında, haziranda ise sadece % 20'sinde, sıfır yağış miktarı %10'un üstündedir. Dolayısıyla Eylül ayı yapısı itibariyle haziran ayından daha çok temmuz ve ağustosa benzerdir. Sıfır yağışların kayıt yok yapılmasının bir değişiklik ortaya çıkarıp çıkarmayacağının anlaşılması amacıyla, bu 4 ay için sıfır yağışlar kayıt yok yapılmıştır. Sonuç olarak Şekil 12.B'de görüldüğü gibi önceden sapan çıkan değerlerin hepsi haziranda halen sapan çıkmaya devam etmiş, eylülde bu değer %44'e gerilemiş, fakat esas gerileme ağustos (%15) ve temmuzda (%21) olmuştur.



Şekil 12. Sıfır yağış adetleri (A), sıfır yağışlar kayıt yok yapılınca değişen sapan değer miktarı (B).

D. Belirlenen Sapan Değerlerin Komşularının Ortaya Çıkardığı Bulgular

Belirlenen sapan değerlerin sapan çıkmasına işaret eden komşular Dede & Ağıralioğlu çalışmasında [149] açıklanan güvenirlik değerlendirmesine tabi tutulduğunda, Şekil 13'de görüldüğü üzere, düşük güvenirlikli gruplar (3.ve 4.Grup) sıcaklık değişkeni için yoktur, bağıl nem değişkeni için %10 ve yağış değişkeni için $Q_{3,1}\pm$ 2IQR sınırlarına göre %2 görülmüştür, $Q_{3,1}\pm$ 4IQR sınırlarına göre yoktur.



Şekil 13. Sapan değere sahip istasyonların komşularının güvenirliğini belirten grupların görülme sıklığı.

V. TARTIŞMA

Birçok çalışmada, yağış için $Q_{3,1}\pm$ 1,5IQR veya $Q_{3,1}\pm$ 3IQR sınırları kullanılmasına karşın [62, 100-104, 110-114], sıcaklık ve bağıl nemle uyumlu olabilmesi için sınırları $Q_{3,1}\pm$ 4IQR almak gerekir. Yağış normal dağılımlı olmadığı ve normal hale getirme dönüşümü yapmanın sapan değerleri normal sınırlara geriletmeye ve/veya veride bulunmayan başka sapan değerler oluşmasına sebep olacağından $Q_{3,1}\pm$ xIQR sınırlarıyla incelenmesi, $\mu\pm x\sigma$ sınırlarıyla arasında uyumsuzluk yaratmıştır.

En uygununu seçebilmek için ön işlemler arasında karşılaştırma yapılması yada aylara göre değişen ön işlemler kullanılması fazladan işlem yüküne sebep olduğu için zayıf bir yön olarak düşünülebilir.

Sapan değerlerin eksik verilere ve sapan olmayan değerlere yakın çıkması yada ortalama kırılmalarıyla aynı anda ortaya çıkması yöntemin güvenilirliğini düşürür. Şekil 12'deki aylardan hangilerinde değişiklik yapılacağını belirlemek için Şekil 12. A ve B'nin çizilmesi gerekir. Ve sonucunda sıfır yağışları kayıt yok durumuna çevirmek gerekir. Tüm bunlar ikinci bir işlem yükü çıkarmaktadır.

Bahar ayları gibi geçiş mevsimleri ve yarı kurak, yarı nemli gibi geçiş bölgeleri diğer kararlı durumlara göre daha düzensiz olurlar. Sapan değerler kararlı bir durumla düzensiz bir durumun bir araya gelmesiyle ortaya çıkarken, iki kararsız durumun bir araya geldiği zamanlarda pek görülmemiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi sıcaklık ve bağıl nem normal dağılımlı değişkenler olarak geçiş bölgeleri olan yarı kurak ve yarı nemi bölgelerde daha çok sapan değer çıkarmışken, çarpık dağılımlı olan yağış değişkeni nemli bölgelerde daha çok sapan değer çıkarmıştır. Şekil 6'te görüldüğü gibi çarpık olan yağış verileri ise geçiş mevsimi olan ilkbaharda pek sapan değer göstermemiştir.

Şekil 7.B'deki verilere göre sapan değer diziyi tek başına çarpık dağılımlı yapamaz ama dizinin normalliğini azaltabilir. Bu durumu desteklemeyen bir çalışma olmasına rağmen [74] destekleyen [2, 24,155-157] çalışmalar çoğunluktadır.

Tablo 1.A'da ve Şekil 8'deki verilere dayanarak sapan değer adeti fazlaysa sapma miktarının az, sapan değer adeti az ise sapma miktarının fazla olduğu yorumu yapılır. Bağıl nem, sıcaklık ve yağış değişkenine göre daha düşük sapma miktarları göstermiştir. Fakat YGSD'ler dikkate alındığında bağıl nem diğer iki değişkene göre daha çok sapan değer barındırır.

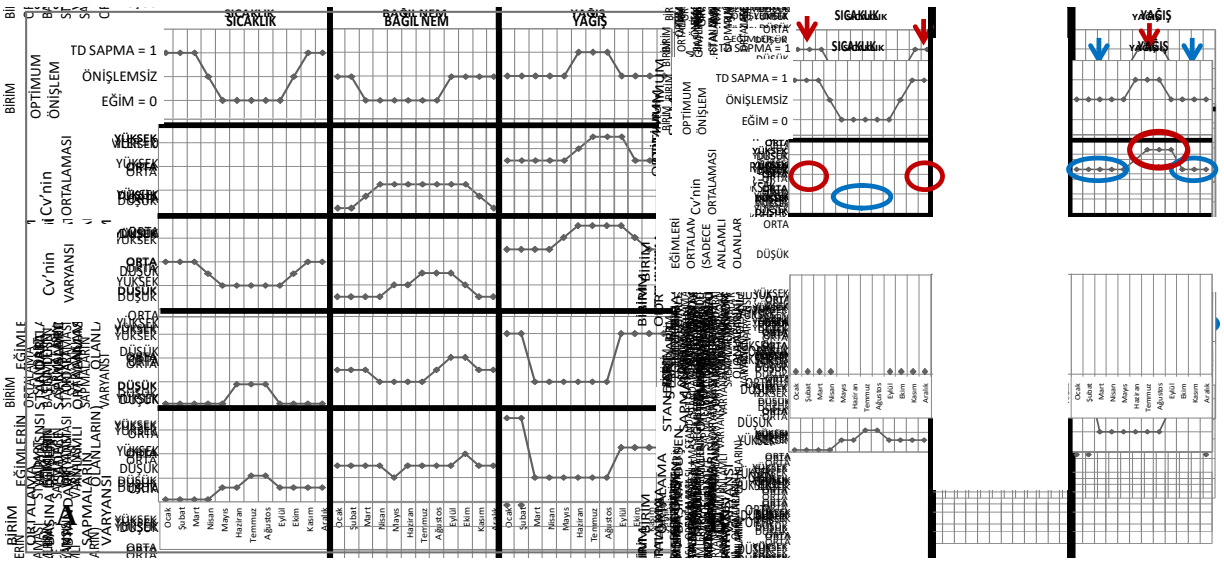
Şekil 14.A'da optimum ön işlemlerin basitleştirilmiş grafiklerinde görüldüğü gibi bağıl nem 6 ay yağışa, 5 ay sıcaklığa benzeyerek bir geçiş özelliği göstermektedir. Bu geçiş özelliği verinin özellikleriyle de uyumludur. Şekil 1.B'de yaz ve kış değişen sıcaklık ve yağışa kıyasla bağıl nem bahar aylarında değişim göstermiştir. Şekil 2.B'de görüldüğü gibi sıcaklıkta pozitif bir eğim hakim olduğundan bunun sıcaklığın daha fazla olduğu yaz aylarında olması normaldir. Yağışta da değişimin daha çok kışın olması yağışlar kışın olduğu için normaldir. Bağıl nemde en kuvvetli değişimlerin sonbaharda olması bağıl nemin sıcaklık ve yağış arasında bir geçiş özelliğinde olmasından kaynakladığı düşünülebilir. Miktar olarak da bağıl nemin eğimleri sıcaklık ve yağış arasındadır. Bunların haricinde önceki çalışmada [149] görüldüğü üzere sıcaklık ve yağışta bir istasyonun diğer istasyonlarla

korelasyonu yazın kışa göre daha düşüktür. Bağıl nemde ise bahar aylarında daha fazladır. Ek olarak mesafe arttıkça azalan korelasyonun azalışı genelde sıcaklık için kışın yaza göre, yağış içinde yazın kışa göre daha düşüktür. Bağıl nem için yarı yarıya her iki durum da geçerlidir [149]. Son olarak çarpıklık/basıklık sınamasında %99,9 güven seviyesine göre istasyonların sıcaklık için % 0 – 5'i, bağıl nem için % 1 – 11'i ve yağış için % 9 – 91'i çarpık veya basıktır [148]. Burada da bağıl nem sıcaklık ve yağış arasında kalmaktadır.

Şekil 7.A'da yıllara göre sapan değer miktarlarında artış görülmektedir. Bu sapan değerler, gerçekte var olmayan bir durumu yansıtan, veri setine yanlış bir şekilde dahil edilmiş değerler olabileceği gibi gerçekten olmuş olaylar da olabilir. Şekil 7.A'da kısmen sıcaklık için ama net olarak yağış için günümüze yaklaştıkça sapan değerlerin miktarındaki artış iklim değişikliği ile ilişkilendirilebilir. İklim değişikliği nedeniyle daha sık ve şiddetli hale gelen aşırı hava olayları bu artışların sebebi olarak yorumlanabilir.

Şekil 6'te görüldüğü gibi sapan sıcaklık ve yağış değerlerinin kış mevsiminde daha az çıkması Şekil 1.B'nin ilk iki satırındaki grafiklerle uyumludur. Çünkü istasyonların standart sapmalarının ortalamasını almak hem tüm coğrafya hakkında genel bir fikir verir hem de bölgesel farklılıkları kapatır ve değişkenlerin birbiriyle olan farklarını öne çıkarır. Böylelikle standart sapmanın sıcaklık ve yağış değişkenlerinde aynı aylık seyri takip ettiği görülmüş olur. Mevsim olarak ortak hareket eden değişkenlerin sapan değerlerinin de mevsim olarak ortak hareket ettiği düşünülebilir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi sapan sıcaklık ve yağış değerlerinin bağıl neme göre daha nemli bölgelerde çıkması Şekil 1.A'nın ve Şekil 1.B'nin son satırındaki grafiklerle uyumludur. Çünkü istasyonların ortalamalarının ve standart sapmalarının varyansını almak istasyonların bölgesel olarak ne kadar benzer olduklarının anlaşılmasını sağlar. Böylelikle sıcaklık ve yağış değişkenlerinde istasyonların bölgesel olarak benzediği görülmüş olur. Bölgesel olarak benzer değişkenlerin sapan değerlerinin de bölgesel olarak ortak hareket ettiği düşünülebilir.



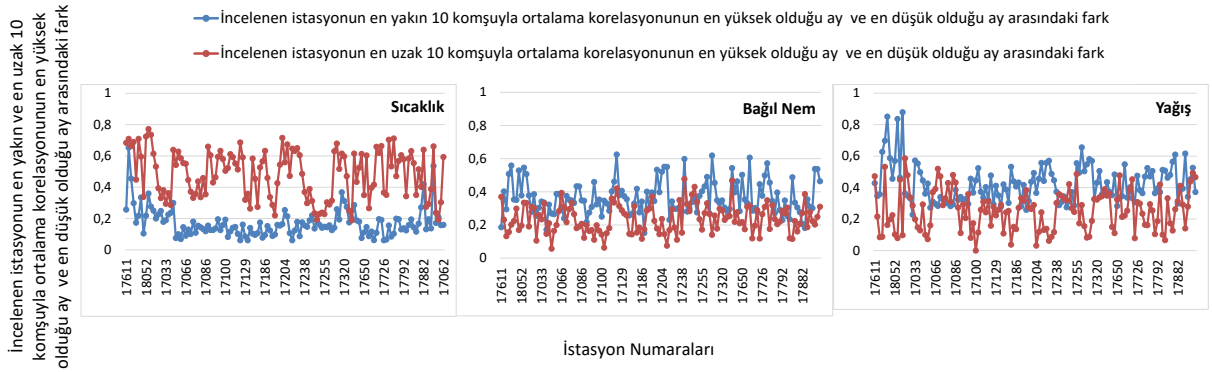
Şekil 14. Ön işlem, Cv ve eğimin basitleştirilmiş grafikleri (A), Cv'nin ve eğimin özellikleri (B).

Sapan sıcaklık ve yağış değerleri kışın benzerlik göstermesine rağmen sıcaklık ve bağıl nemde aynı senede çıkan 3 sapan değer görülmesi bu iki değişkenin istasyonlardaki ölçüm aletlerinin benzerliğine bağlı olabilir. Sıcaklık ve bağıl nem aynı kuru termometreye veya aynı sensöre bağlı olarak ölçülür. Yağış değerleri ise plüviyometreyle ölçüldüğü için diğer ikisinden bağımsızdır [158]. Bu durum Şekil 1.C ile de uyumlu olabilir. Çünkü sıcaklık ve bağıl nemin birim ortalama başına düşen standart sapması miktar olarak birbirine yakındır. Bu da ortalamadan sapma miktarlarının yakın olduğunu gösterir. Sapan değer de ortalamadan bir sapma olduğundan uyumlu olması beklenebilir.

Şekil 14.A optimum ön işlemin, birim ortalama başına düşen standart sapmanın ve eğimin aylık değişimlerini belirten basitleştirilmiş grafikleri göstermektedir. Şekil 14.B'de varyasyon katsayısı (Cv) ve eğimin ortalamasına baktığımızda, varyansın yüksek, eğimin düşük olduğu durumlarda optimum ön işlem sıcaklıkta ve yağışta varyans eşitleme ön işlemi olarak bulunmuştur. Varyansın düşük, eğimin yüksek olduğu durumlarda ise sıcaklıkta eğim eşitleme ön işlemi olarak bulunmuştur. Dolayısıyla yükselen özellik, istasyonlar arasında eşitlendiğinde yakalanan sapan değerde artış olabilir. Varyans parametresi, eğim bileşeninden daha fazla bu duruma uyar.

Şekil 14.A'da ikinci satırda görülen birim ortalama başına düşen standart sapma yükseliş seyrindeyken ve Dede & Ağıralioğlu çalışmasındaki [149] Şekil 5'te mesafe arttıkça korelasyonun azalışı düşüş seyrindeyken Şekil 14.A'da ilk satırdaki optimum ön işlem sıcaklık ve yağış için standart sapmanın eşitlenmesidir. Yani ortalamadan sapışlar artınca istasyonlar birbirlerine daha çok benzer ve istasyonları aynı standart sapmaya getirmek daha çok sapan değer yakalanmasını sağlar.

Dede & Ağıralioğlu çalışmasındaki [149] Şekil 5'te mesafe arttıkça korelasyonun azalışı yükseliş seyrinden düşüş seyrine geçmesinin sebebi sıcaklıkta uzak korelasyonların daha da düşmesi, bağıl nemde ve yağışta yakın korelasyonların daha da yükselmesidir. Yani mevsimden mevsime sıcaklıkta yakın mesafedeki korelasyonlar az değişim gösterirken bağıl nem ve yağışta yakın mesafedeki korelasyonlar çok değişim gösterir. Başka bir deyişle bağıl nem ve yağış kısa mesafede çok değişirken sıcaklık kısa mesafelerde çok değişmez. Şekil 15'de görülen bağıl nem ve yağışta yakın korelasyonlardaki mevsimsel farklılığın sıcaklıktakinden daha yüksek olması bu durumu destekler. Tüm bunlar Şekil 13'deki sapan değer içeren istasyonların komşularının bağıl nem ve yağışta daha düşük güvenilirlikte olduğunu açıklayabilir.



Şekil 15. Tüm istasyonlarda incelenen istasyonun en yakın ve en uzak 10 komşuyla korelasyonunun en yüksek olduğu ay ve en düşük olduğu ay arasındaki fark.

VI. SONUÇ

$Q_{3,1}$±xIQR sınırları ile μ±xσ sınırları arasında uyumsuzluk olmasına rağmen, $Q_{3,1}$± 4IQR sınırlarının kullanılması daha tutarlı ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olur. Uyumlu sınırların kullanılması, sonuçların güvenilirliğini artırır.

En uygun ön işlemi seçmek için karşılaştırma yapılması veri işleme sürecine ek bir karmaşıklık ve zaman alıcı adım ekler. Başka bir ek işlem sıfır yağışları "kayıt yok" durumuna çevirmektir. Bunlar yöntemin etkinliğini azaltabilir ve pratik uygulanabilirliğini zorlaştıran bir faktör olarak görülebilir. Su kaynakları yönetiminde, verilerin hızlı ve verimli bir şekilde işlenmesi önemlidir. Ek işlem yükü, bu süreci yavaşlatabilir ve su yönetimi kararlarının alınmasını geciktirebilir.

Sapan değerlerin eksik verilere, sapan olmayan değerlere ya da ortalama kırılmalarına yakın çıkmasının, veri analizi yönteminin güvenilirliğini düşürür ve su yönetimi stratejilerinin doğruluğunu etkileyebilir.

Normal dağılımlı sıcaklık ve bağıl nem, yarı kurak ve yarı nemli bölgelerde daha fazla sapan değer üretirken, çarpık dağılımlı yağış değişkeninin nemli bölgelerde daha fazla sapan değer üretmesi, sapan değer üretme eğilimlerinde görünürde bölgeler ve dağılımların daha derinde kararlı ve kararsız durumların kombinasyonunun rol oynadığını gösterebilir. Su kaynakları yönetiminde bu kombinasyonların izlenmesi göz önünde bulundurmalıdır.

Sapan değerlerin, veri dağılımının simetrisini bozmasa bile, birçok istatistiksel analizin geçerliliği için önemli olan normal dağılıma uygunluğunu olumsuz etkilemesi, analizlerin sonuçlarını etkileyebilir. Bu durum, su kaynakları yönetiminde daha doğru ve güvenilir kararların alınmasını geciktirebilir.

Değişkenlerde sapan değer adeti fazla ise, sapma miktarının az olduğu; sapan değer adeti az ise sapma miktarının fazla olduğu gözlemi, su kaynakları analizlerine farklı bir veri yorumlama stratejisi sunabilir. Hangi parametrelerin daha dikkatle izlenmesi gerektiğini belirlemek için kullanılabilir.

Bağıl nemin, hem sıcaklığa hem de yağışa benzer özellikler sergilemesi, dolayısıyla sıcaklık ve yağış arasında bir geçiş özelliği göstermesi, su kaynakları yönetimi açısından bu iki farklı değişken arasındaki bağlantıyı anlamada ve etkileşimi analiz etmede kullanışlı bir gösterge olabilir.

Sapan değerlerin zamanla artışı, aşırı hava olaylarının sıklığındaki artış olarak da düşünülebilir. Bu, iklim değişikliğinin tehlikeli etkilerinden biridir ve hem doğal ekosistemler hem de insan toplulukları üzerinde büyük bir baskı oluşturur. Öngörülemeyen hava koşulları, ekonomik kayıplara, altyapı hasarlarına ve insanların yaşamlarını tehlikeye atabilecek krizlere yol açabilir.

Kışın atmosferik koşulların daha değişken ve dengesiz olması, sıcaklık ve yağışta daha geniş bir değişime yol açar. Bu değişimler genellikle birbirini dengeler ve uç noktalar daha az belirgin olur. Yazın atmosfer daha stabil ve homojen olduğundan, sıcaklık ve yağışta daha az değişkenlik beklenir. Ancak bu stabilite, aynı zamanda ekstrem olayların daha belirgin olmasına yol açabilir. Bu durum iklim değişikliği ile bağlantılı olabilir. İklim değişikliği, farklı hava olaylarının birbirini dengelemesine neden olabilir. Örneğin, bir bölgeye gelen aşırı soğuk hava kütlesi kısa süre sonra bir sıcak hava dalgası ile dengelenebilir, bu da uzun vadeli verideki uç noktaların daha az belirgin olmasına yol açabilir. Küresel ısınma, özellikle yaz aylarında ortalama sıcaklıkların artmasına ve bu nedenle daha sık ekstrem sıcaklık olaylarının görülmesine neden olur. Yazın atmosfer stabil olduğunda bile, ani ve şiddetli sağanak yağışlar meydana gelebilir. İklim değişikliği, atmosferdeki su buharı miktarını artırarak bu tür olayların sıklığını ve şiddetini artırabilir. Stabil hava koşulları altında bu tür ekstrem yağış olayları, uç noktaların belirginleşmesine yol açabilir.

Kışın kutupsal soğuk hava kütleleri, Akdeniz üzerinden gelen siklonlar ve Balkanlar üzerinden gelen soğuk hava dalgaları gibi farklı hava olayları, farklı bölgelerde farklı sıcaklık ve yağış koşullarına neden olabilir. Yazın Azor yüksek basıncı gibi yüksek basınç sistemleri, hava koşullarını stabil ve homojen hale getirebilir. Yüksek basınç sistemleri geniş alanlarda benzer sıcaklık ve yağış koşullarına yol açabilir, bu da yazın bölgeler arasındaki benzerlikleri artırabilir. Sapan sıcaklık ve yağış değerlerinin nemli bölgelerde yaygın görülmesi, bu bölgelerde havanın genellikle daha doygun olması, bunun da büyük yağış olaylarına ve bu olaylara bağlı sıcaklıkta ani değişimlere yol açması olabilir. Bağıl nemin, yarı kurak bölgelerde daha fazla sapan değer göstermesi, bu bölgelerde güneşlenme, rüzgar ve düşük nem etkisiyle daha belirgin olan sıcaklık dalgalanmaları bağıl nemin aniden çok yüksek veya çok düşük değerlere ulaşmasına neden olabilir. Sapan yağış ve sıcaklık değerleri genellikle büyük ölçekli hava olayları veya belirli coğrafi faktörlerle oluşabilir, ancak bağıl nem daha yerel ve anlık sıcaklık değişimlerine tepki veriyor olabilir. Yarı kurak bölgelerde, gündüz-gece sıcaklık farkları ve aniden gelen nemli hava kütleleri bağıl nemde sapan değerlere yol açabilir.

Sıcaklık ve bağıl nem ölçümleri genellikle birbirine benzer veya aynı cihazlar kullanılarak yapılır. Bu cihazlar aynı çevresel koşullardan etkilenir ve benzer kalibrasyon hatalarına maruz kalabilir. Bu, sıcaklık ve bağıl nemin standart sapmalarının miktar olarak yakın olmasının bir nedeni olabilir. Aynı anda sıcaklık ve bağıl nemde sapan değerlerin görülmesi, bu iki değişkenin aynı atmosferik olaylardan etkilenmesinden kaynaklanabileceği gibi, aynı cihaz tarafından ölçülüyor olmalarından da kaynaklanabilir. Eğer bir sensörde bir hata veya sapma varsa, bu hata hem sıcaklık hem de bağıl nem ölçümlerinde benzer bir sapmaya neden olabilir. Bu durum, iki değişkende de aynı dönemde sapan değerlerin görülmesine yol açabilir. Eğer bu sapan değerler gerçekten atmosferik olaylardan kaynaklanıyorsa, su yönetimi planlarında bu olaylara hazırlıklı olmak gerekir. Eğer atmosferik olaylar yerine cihaz hatalarından kaynaklanıyorsa, bu durum su kaynakları yönetimini doğrudan etkileyebilir. Ölçüm hatalarından kaynaklanan yanlış veriler, su kaynaklarının aşırı veya yetersiz kullanılmasına neden olabilir, bu da uzun vadede kaynakların tükenmesine veya bozulmasına yol açabilir. Cihazlardan kaynaklanan hataların tespit edilmesi ve düzeltilmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından kritik önemdedir. Bu, su yönetimi için kullanılan verilerin güvenilirliğini artırır ve yanlış kararların önüne geçer.

Varyasyon katsayısının (Cv) yüksek olduğu mevsimlerde, istasyonların standart sapmalarını eşitlemek, veriler arasındaki yayılımın daha homojen hale gelmesini ve sapmaların daha belirginleşmesini sağlıyor ve tespit edilmesini kolaylaştırıyor. Eğimlerin yüksek olduğu mevsimlerde, istasyonların eğimlerini eşitlemek, eğimden sapmaların daha net bir şekilde ortaya çıkmasını sağlıyor ve sapan değerlerin tespit edilmesini kolaylaştırıyor. Verilerin mevsimsel varyasyonları ve eğimleri dikkate alınarak yapılan analizler, sapan değer tespitinin doğruluğunu artırır ve bu da veri analizi süreçlerinde daha sağlam ve güvenilir sonuçlara ulaşılmasını sağlar. Bu tür bulgular, veri bilimi ve istatistiksel analiz alanlarında uygulamalı stratejiler geliştirmek için temel oluşturabilir.

Kışın, atmosferde kutupsal soğuk hava kütleleri, Akdeniz üzerinden gelen siklonlar gibi büyük ölçekli hava sistemleri hakimdir. Bu sistemler geniş alanları etkileyebilir, bu nedenle iki uzak istasyonun sıcaklıkları yaza göre daha çok birlikte artıp azalabilir. Yazın atmosfer daha stabildir, ancak yerel etkiler daha belirgin hale gelebilir. Örneğin, bir bölgedeki yüksek basınç sistemi geniş bir alanı etkilerken, deniz esintisi, topografya, yerel rüzgarlar gibi yerel faktörler iki uzak istasyon arasında farklı sıcaklık değişikliklerine yol açabilir. Yakın istasyonlar ise her iki mevsimde de daha benzer sıcaklık değişimleri gösterir. Yağış miktarının yaz aylarında kış aylarına kıyasla belirgin ölçüde düşük olması, yakın konumda bulunan iki istasyonun yağış verilerinde daha az benzerlik göstermesine yol açmaktadır. Uzak konumdaki istasyonlar ise, genel olarak düşük bir benzerlik sergilediklerinden, her iki mevsimde de birbirlerine yakın düzeyde benzerlikler göstermektedir.

Sonuç olarak, sıcaklık, bağıl nem ve yağış verilerinde sapan değer belirlemek için kullanılan μ±xσ ve $Q_{3,1}$± xIQR sınırları, x sırasıyla 3 ve 4 kullanıldığında birbirine daha çok benzese de bu benzerlik %60'ı geçmez. Bu sınırlar bazen ortalama kırılmalarını ve sıfır yağışın çok olduğu mevsimlerdeki sıfır olmayan yağışları sapan değer çıkarabilir. Ayrıca bu sınırlar eksik verilere ya da sapan olmayan değerlere çok yakın sapan değerler belirleyebilir. Bu sınırları kullanan araştırmacıların bunlara dikkat etmesi önerilir. Bu sınırlarla belirlenen sıcaklık ve yağış sapanları bölgesel ve zamansal olarak benzerlik gösterirken, bağıl nem ve yağış sapanlarını, sapan çıkaran komşular benzerlik gösterir. Belirlenen sapan değerlerin kendi içinde bir dengesi vardır. Normal dağılımı, nemli ve kurak bölgeleri kararlı, normal olmayan dağılımı, yarı nemli ve yarı kurak bölgeleri kararsız kabul edersek; Kararsız dağılımdan gelen sapanlar kararlı bölgelerde yada tam tersi olacak şekilde çıkarken, sapma miktarları yüksekse sapan değer adetleri düşük yada tam tersi şeklinde çıkar. Sapan değer belirlerken ön işlem kullanmak gerekebilir. Bağıl nemin geçiş özelliğiyle ve standart sapmanın benzerliği etkilemesiyle de desteklendiği gibi ön işlemler mevsimle birlikte değişebilir. Ön işlem olarak dizilerin yükselen istatistiksel özelliğini istasyonlar arasında eşitlemek daha çok sapan değer yakalanmasını sağlayabilir. Bu açıdan varyans parametresi eğim bileşeninden daha baskındır. Mevsimsel olarak farklı ön işlemler kullanılarak yapılacak bir çalışmayla sonuçlar karşılaştırılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında hazırladığı doktora tezi esas alınarak üretilmiştir. Tez çalışmasına katkıda bulunan jüri üyeleri Prof. Dr. Ercan Kahya'ya ve Prof. Dr. C. Melek KazezyılmazAlhan'a teşekkür ederiz.

Bu doktora tezi, yazar İTU'de öğrenciyken yapılmıştır. Makale sürecinde yazar, bağımsız araştırmacıdır.

KAYNAKLAR

[1] WMO. (1993). *Guide on the global data-processing system*.Geneva –Switzerland WMO, 305.
[2] WMO. (2011).*Guide to Climatological Practices. 3rd Edition*, World Meteorological Organization, Geneva.
[3] Bayazıt, M. (1999). *Hidroloji*.İTU İnşaat Fakültesi Matbaası,İstanbul.
[4] SimavM., TürkezerA., SezenE., AkyolS., İnamM., CingözA., KılıçoğluA.(2011). Data quality control & management system of Turkish sea level monitoring network.*Harita Dergisi*, 145,15 -28.
[5] RissanenP., JacobssonC., MadsenH., MoeM., Pálsdóttir Þ.&VejenF. (2004). *Nordic methods for quality control of climate data.* Norwegian Meteorological Institude.
[6] Gürünlü AlmaÖ. (2009). *Genetic algorithm based outlier detection using information criterion*. Phd thesis, DEU The Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
[7] BannayanM., HoogenboomG. (2008). Weatheranalogue: A toolforreal-time prediction of dailyweather data realizationsbased on a modified k- nearestneighborapproach.*Environmental Modelling & Software*. 23 (6), 703-713.
[8] Government of thePeople'sRepublic of BangladeshMinistry of WaterResources. (2015).*Time Series Data Quality Control Guideline (For Hydro-meteorological data).*WaterResources Planning Organization.
[9] BarberC., LamontagneJ.R.,VogelR. M. (2020). Improvedestimators of correlationand R2 forskewedhydrologic data.*Hydrological Sciences Journal*. 65 (1), 87-101.
[10] DikbaşF. (2018). A New Two-DimensionalRankCorrelationCoefficient.*Water Resource Manage*. 32, 1539–1553.
[11] WMO. (2016).*Guidelines on Best Practices for Climate Data Rescue*. World Meteorological Organization. Geneva.1182.
[12] MillerP. A., StanleyG. B. (1992). A system for the hourly assimilation of surface observations in mountainous and flat terrain. *Monthly Weather Review*. 120,2342–2359.
[13] National Climatic Data Center. (1993).*Report of the international workshop on quality control of monthly climate data.*The international workshop on quality control of monthly climate data. Asheville, NC (United States).
[14] WestcottN., AndsagerK., StoeckerL., SpinarM., SmithR., ObrechtR. & O'ConnellD. (2011). *Quality control of 19th century weather data.* Midwestern Regional Climate Center Publication.
[15] ToretiA.,KuglitschF. G., XoplakiE., LuterbacherJ. (2012). A Novel Approach for the Detection of Inhomogeneities Affecting Climate Time Series.*Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 51 (2), 317–326.
[16] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2009).*Handbook of automated data quality control checks and procedures.* Stennis Space Center, Mississippi: National Data Buoy Center.
[17] AguilarE., AuerI., BrunetM., PetersonT. C., WieringaJ. (2003). *Guidelines on climate metadata and homogenization*. Geneva: WMO.
[18] FıratM., DikbasF., KocA. C., GungorM. (2012). Analysis of temperature series: estimation of missing data and homogeneity test.*Meteorological Applications*. 19 (4), 1469-8080.

[19] BaconF. (1902). *Novum Organum*, 1620, ed. by J. Devey, New York: P. F. Collier.
[20] Bernoulli D.(1961). The Most Probable Choice Between Several Discrepant Observations and the Formation. There from of the Most Likely Induction. 1777, in C. G. Allen,*Biometrika.* 48, 3 – 13.
[21] BeckmanR. J., CookR. D. (1983).“Outlier.....s”, *Technometrics*, 25(2),119–149.
[22] HawkinsD. M. (1980). Identification of Outliers. Springer Science Business Media. B.V, Chapman & Hall.
[23] SinghV. P. (2017).*Handbook of Applied Hydrology. Second Edition*, McGraw-Hill Education: USA.
[24] MaityR. (2018).*Statistical Methods In Hydrology And Hydroclimatology*.Springer Nature, Singapore.
[25] LaioF., AllamanoP., ClapsP. (2010). Exploiting the information content of hydrological ‘outliers’ for goodness-of-fit testing. *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 14 (10), 1909–1917.
[26] HershfieldD. M. (1973). “On the probability of extreme rainfall events”, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 54 (10), 1013-1018.
[27] Van den BrinkH. W., KönnenG. P. (2008). The statistical distribution of meteorological outliers. *Geophysical Research Letters*. 35,23702.
[28] BarnettV., LewisT. (1978).*Outliers in Statistical Data*. Great Britain: John Wiley & Sons Ltd.
[29] lglewiczB., HoaglinD. C. (1993). *Volume 16: How to Detect and Handle Outliers*. USA: American Society for Quality Control Statistics Division.
[30] RousseeuwP. J., Leroy A. M. (1987). *Robust Regression And Outlier Detection*. USA: John Wiley & Sons.
[31] OvlaH. D., TaşdelenB.(2012). Aykırı Deger Yönetimi.*Mersin Univ Saghk Bilim Derg*. 5 (3), 1-8.
[32] GrubbsF. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples.*Technometrics*. 11(1), 1-21.
[33] PrescottP. (1978). Examination of the Behaviour of Tests for Outliers when More than One Outlier is Present. *Journal of the Royal Statistical Society. Applied Statistics*. 27(1), 10-25.
[34] ChandolaV., BanerjeeA., KumarV. (2009).*Anomaly Detection : A Survey*. ACM Computing Surveys.
[35] WilksD.S. (2006).*Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Second Edition*, Elsevier Inc, USA.
[36] Abbott P. F. & World Meteorological Organization Commission for Climatology. (1986). *Guidelines on the quality control of surface climatological data.* World Meteorological Organization WMO/TD. 85 (111).
[37] AggarwalC. C., SatheS. (2017). *Outlier Ensembles*, Switzerland:Springer.
[38] AggarwalC. C. (2017). *Outlier Analysis*, Switzerland:Springer.
[39] WangX., WangX., WilkesM.V. (2021). *New Developments in Unsupervised Outlier Detection*. Singapore: Springer, Xi’an Jiaotong University Press.
[40] SwerskyL. (2018). *A Study of Unsupervised Outlier Detection for One-Class Classification*. Master thesis, Department of Computing Science, University of Alberta.
[41] TaxD. M.J., DuinR. P.W. (2004). Support Vector Data Description. *Machine Learning*. 54, 45–66.
[42] RuffL., VandermeulenR. A., GornitzN., DeeckeL., SiddiquiS. A., BinderA., MullerE., KloftM. (2018). Deep One-Class Classification.*International Conference on Machine Learning*, Stockholm, Sweden.
[43] DawsonR. (2011). How Significant is a Boxplot Outlier?.*Journal of Statistics Education.* 19(2), 1-14.
[44] RutsI., RousseeuwP. J. (1996). Computing depth contours of Bivariate point clouds.*Computational Statistics & Data Analysis*. 23,153-168.
[45] Cárdenas-MontesM.(2014).Depth-Based Outlier Detection Algorithm. M. Polycarpou et al. (Eds.): HAIS 2014, LNAI 8480, 122–132.
[46] ChenY., DangX., PengH., BartH. L. (2009). Outlier Detection with the Kernelized Spatial Depth Function.*Jr. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 31(2).
[47] HussainI. (2020). Outlier Detection using Nonparametric Depth-Based Techniques in Hydrology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications.* 11(9), 456-462.
[48] IlangoV., SubramanianR., VasudevanV. (2012). A Five Step Procedure for Outlier Analysis in Data Mining.*European Journal of Scientific Research.* 75(3), 327-339.
[49] MozharovskyiP. (2022). Anomaly detection using data depth: Multivariate case. arXiv:2210.02851v1 [stat.ML].
[50] Rutst I.& RousseeuwP.J. (1996). ISODEPTH: A Program for Depth Contours.*Proceedings in computational statistics: 12th symposium*, Barcelona, Spain.
[51] Ranga SuriN. N. R., NarasimhaM. M., AthithanG. (2019).*Outlier Detection: Techniques and Applications*. Switzerland: Intelligent Systems Reference Library, Springer. 155.
[52] GuptaM., GaoJ., AggarwalC., HanJ. (2014).*Outlier Detection for Temporal Data*. Morgan & Claypool Publishers.
[53] KıralG., BillorN., TürkmenA. (2013). Robust kümeleme yöntemi ile grup sapan değerlerin belirlenmesi.*Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi.* 22(1), 189-212.
[54] MisraS., LiH., HeJ. (2020).*Machine Learning for Subsurface Characterization*. Gulf Professional Publishing.
[55] TranK. P. (2022).*Control Charts and Machine Learning for Anomaly Detection in Manufacturing*.Springer Series in Reliability Engineering, Switzerland.
[56] LiuF. T., Ting K. M. & ZhouZ. H. (2008).Isolation Forest.*Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, Pisa, Italy. 413-422.

[57] PegramG. (1997). Patching rainfall data using regression methods. 3. Patching and outlier detection.*Journal of Hydrology*,198, 319–334.
[58] TürkanS., ÇetinM. C., ToktamışO. (2012). Outlier detectıon by regression diagnostics based on robust parameter estimates.*Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*. 41(1),147 – 155.
[59] DilmaçH., ŞişmanY. (2023). New approaches for outlier detection: The least trimmed squares adjustment. International *Journal of Engineering and Geosciences*. 8(1), 26-31.
[60] AllaS. , AdariS. K. (2019).*Beginning Anomaly Detection Using Python-Based Deep Learning: With Keras and PyTorch*. Apress; 1st ed.
[61] AcarR. (2003). Çoruh hidrolojik havzasında yıllık yağış verilerinin istatistiksel modellemesi.*Pamukkale Univety Engineering College Journal of Engineering Science*. 9(3), 313-317.
[62] YeşilırmakE., AkçayS., DağdelenN., GürbüzT., SezginF. (2009). Quality control and homogeneity of annual precipitation data in Büyük Menderes Basin, Western Turkey.*Fresenius Environmental Bulletin*. 18, 1748-1757.
[63] HuntB. (2007).Climatic outliers.*International Journal of Climatology*. 27, 139-156.
[64] RadziA.B.A. (2009).*Trend analysis of sea level rise for west coast of peninsular Malaysia*. Master Theises, Civil – Hydrology and Water Resources, Universiti Teknologi Malaysia.
[65] JeongJ., ParkE., HanW. S., KimK.Y., ChoungS., ChungIl-M. (2017). Identifying Outliers of Non-Gaussian Groundwater State Data Based on Ensemble Estimation for Long-Term Trends. *Journal of Hydrology*. 548, 135-144.
[66] Ekeu-weiI.T., BlackburnG.A., PedrucoP. (2018). Infilling Missing Data in Hydrology: Solutions Using Satellite Radar Altimetry and Multiple Imputation for Data-Sparse Regions.*Water*. 10, 1483.
[67] KöseÖ. (2010). Characteristics of Various Filters Used to Eliminate Outliers in Velocity Time Series Obtained Using ADVs.*VI. Ulusal Hidroloji Kongresi*,Pamukkale Üniversitesi, Denizli. 360-368.
[68] NooneS., MurphyC., CollJ., MatthewsT., MullanD., WilbyR., WalshS. (2015). Homogenization and analysis of an expanded long-term monthly rainfall network for the Island of Ireland (1850–2010).*International Journal of Climatology*. 36, 2837-2853.
[69] GottschalkL., KundzewiczZ. (1995). Analysis of outliers in Norwegian flood data. New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources, *Cambridge University Press*. 245-251.
[70] KirkA., McCuenR. (2008). Outlier Detection in Multivariate Hydrologic Data.*Journal of Hydrologic Engineering*.13(7), 641-646.
[71] HansenJ., RuedyR., SatoM., LoK. (2010). Global surface temperature change. The American Geophysical Union. *Reviews of Geophysics*. 48.
[72] DomonkosP. (2006). Testing of homogenization methods porpuses, tools and problems of implementation. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[73] DomonkosP. (2011). Adapted Caussinus-Mestre Algorithm for Networks of Temperature series (ACMANT).*International Journal of Geosciences*. 2(3), 293-309.
[74] Vicente-SerranoS. M., Beguer´ıaS., L´opez-MorenoJ. I., Garc´ıa-VeraandPetrStepanekM. A. (2010). A complete daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity.*International Journal Climatology*. 30, 1146–1163.
[75] YakuninA., MogahedH. (2018). Improvement of statistical methods for detecting anomalies.*Climate and Environmental Monitoring Systems*.289.
[76] ShabaniS., SamadianfardS., SattariM. T., MosaviA., ShamshirbandS., KmetT., Várkonyi-KóczyA. R. (2020). Modeling Pan Evaporation Using Gaussian Process Regression K-Nearest Neighbors Random Forestand Support Vector Machines; Comparative Analysis. *Atmosphere*. 11(66).
[77] KlokEJ., KleinT. AMG. (2009). Updated and extended European dataset of daily climate observations.*International Journal of Climatology*. 29(8), 1182–1191.
[78] HofstraN., NewM., McSweeneyC. (2010). The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data.*Clim Dyn.* 35, 841–858.
[79] WuH., TangX., WangZ., WuL., LuM., LianfangW., ZhuJ. (2018). Probabilistic Automatic Outlier Detection for Surface Air Quality Measurements from the China National Environmental Monitoring Network.*Advances in Atmospheric Sciences*. 35, 1522-1532.
[80] ChowV., MaidmentD., Mays L. (2013).*Applied Hydrology*. 2nd Edition, McGraw-Hill Companies.
[81] OğuzE.B., ÖnözB. (2003). Assessment of outliers in statistical data analysis.*Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences.* 23, 173-180.
[82] AminM.T., RizwanM., AlazbaA.A. (2015). Comparison of mixed distribution with EV1 and GEV components for analyzing hydrologic data containing outlier. *Environmental Earth Sciences*. 73(3), 1369-1375.
[83] CiupakM., Ozga-ZielinskiB., TokarczykT., AdamowskiJ. (2021). A Probabilistic Model for Maximum Rainfall Frequency Analysis. *Water*. 13, 2688.

[84] SallabandaA. (1996). Homogeneity evaluation of snow cover records in Albania.*Proceedings of the First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data*, Budapest. 6–12.
[85] ShabaniS., SamadianfardS., SattariM., MosaviA., BandS., KmeťT., Varkonyi-KoczyA. (2020). Modeling Pan Evaporation Using Gaussian Process Regression K-Nearest Neighbors Random Forest and Support Vector Machines; Comparative Analysis. *Atmosphere*. 11, 1-17.
[86] Fernández-PalominoC.A., Lavado-CasimiroW.S. (2017). Regional maximum rainfall analysis using L-moments at the Titicaca Lake drainage, Peru. *Theor Appl Climatol*.129,1295–1307.
[87] AslanS. (2008). Ege Bölgesi günlük maksimum yağışlarının bölgesel analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi FBE, yüksek lisans tezi.
[88] LamontagneJ., StedingerJ. (2015). Examination of the Spencer-McCuen Outlier-Detection Test for Log-Pearson Type 3 Distributed Data. *Journal of Hydrologic Engineering*. 21,04015069.
[89] CohnT., EnglandJ., BerenbrockC., MasonR., StedingerJ., LamontagneJ. (2013). A generalized Grubbs-Beck test statistic for detecting multiple potentially influential low outliers in flood series. *Water Resources Research*. 49, 5047-5058.
[90] KaynarL. (2005). *Doğu Karadeniz bölgesi yıllık maksimum akımlarının istatistik methodlarla analizi*. İTU, FBE, yüksek lisans tezi.
[91] FaybishenkoB., VersteegR., PastorelloG. (2022). Challenging problems of quality assurance and quality control (QA/QC) of meteorological time series data. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 36, 1049–1062.
[92] AltayL. (2011).*Konum-zaman bağlamında aykırı gözlem tespit yöntemlerinin incelenmesi ve bulanık Kümelendirme tabanlı bir metot.*Yüksek lisans tezi. Hava harp okulu, havacılık ve uzay teknolojileri enstitüsü.
[93] LanzanteJ.R. (1996). Resistant, Robust and Non-Parametric Techniques for the Analysis of Climate Data: Theory and Examples, Including Applications to Historical Radiosonde Station Data.*International Journal of Climatology*.16, 1197-1226.
[94] SheeseP., BooneC., WalkerK. (2015). Detecting physically unrealistic outliers in ACE-FTS atmospheric measurements.*Atmospheric Measurement Techniques*. 8,741-750.
[95] LiJ.S., HamannA., BeaubienE. (2020). Outlier detection methods to improve the quality of citizen science data. *Int J Biometeorol*. 64(11), 1825-1833.
[96] EstévezJ., GavilánP., García-MarínA. (2018). Spatial regression test for ensuring temperature data quality in southern Spain.*Theoretical and Applied Climatology*. 131, 309-318.
[97] TellezB., CernockyT., & TerradellasE. (2008). Calculation of climatic reference values and its use for automatic outlier detection in meteorological datasets.*Advances in Science and Research*. 2, 1-4.
[98] LenwoodW. H. JR., KillenW. D., AndersonR. D., PerryE. (2004). Analysis of historical salinity and boron surface water monitoring data from the San Joaquin River watershed: 1985-2002.*Environmental monitoring and assessment*. 95(1-3), 125–151.
[99] ErdoğanG. (2012).*Spectral methods for outlier detection in machine learning*. The Institute for Graduate Studies in Science and Engineering. Master of Science, Boğaziçi University.
[100] LongmanR. J., NewmanA. J., GiambellucaT. W., LucasM. (2020). Characterizing the Uncertainty and Assessing the Value of Gap-Filled Daily Rainfall Data in Hawaii.*American Meteorological Society*.1261 – 1276.
[101] ZhaoC., YangJ. (2019). A Robust Skewed Boxplot for Detecting Outliers in Rainfall Observations in Real-Time Flood Forecasting. *Advances in Meteorology*.1-7.
[102] BhattacharyaS., BeirlantJ. (2019). Outlier detection and a tail-adjusted boxplot based on extreme value theory.
[103] SharifM., BurnD. H. (2006). Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model.*Journal of Hydrology*.325, 179–196.
[104] BoulangerJP., AizpuruJ., LeggieriL., Et al (2010). A procedure for automated quality control and homogenization of historical daily temperature and precipitation data. (APACH): part 1: Quality control and application to the Argentine weather service stations, *Climatic Change*. 98, 471–491.
[105] FreitasL., PereiraM., CarameloL., MendesM., NunesL. (2013). Homogeneity of monthly air temperature in Portugal with HOMER and MASH", *Idojaras*. 117, 69-90.
[106] Murav'evA.V., KulikovaI.A., KruglovaE.N. (2009). Distribution of extreme characteristics of atmospheric circulation from reanalysis data and hydrodynamic modeling. *Russ. Meteorol. Hydrol*.34, 431–441.
[107] NaghettiniM. (2017).*Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer, Switzerland.
[108] FarmerW. H., VogelR. M. (2013). Performance-weighted methods for estimating monthly stream flow at ungauged sites.*Journal of Hydrology*. 477, 240–250.
[109] LiuD., LiuH., MengX. (2023). Advanced Hydrologic Modeling in Watershed Scales. MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
[110] GonzálezR., Fidel J.& JiménezJ., QuesadaV., ValeroF. (2001). Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe.*Journal of Climate*. 14, 964-978.

[111] MeenaH. M., MachiwalD., SantraP., MoharanaP., SinghDr. (2019). Trends and homogeneity of monthly, seasonal, and annual rainfall over arid region of Rajasthan, India. *Theoretical and Applied Climatology*. 136, 795-811.
[112] GöktürkO.M., BozkurtD., SenO., KaracaM. (2008). Quality control and homogeneity of Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*. 22, 3210 – 3218.
[113] ZaifogluH., AkintugB., YanmazA. (2018). Quality and Homogeneity Analysis of Precipitation Data in North Cyprus. *Conference: 13th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İzmir, Turkey.
[114] ŠtěpánekP., ZahradníčekP. (2008). Experiences with quality control and homogenization of daily series of various meteorological elements in the Czech Republic 1961-2007.*Proceedings of the sixth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 76.
[115] DunnR. J. H., WillettK. M., ThorneP. W., WoolleyE. V., DurreI., DaiA., ParkerD. E., Vose R. S. (2012).HadISD: a quality-controlled global synoptic report database for selected variables at long-term stations from 1973–2011.*Clim. Past*, 8, 1649–1679.
[116] ToretiA., DesiatoF. (2006). Homogenization and validity controls for temperature trend estimates over Italy. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[117] ŠtěpánekP., ŘezníčkováL., BrázdiR. (2006). Homogenization of daily air pressure and temperature series for Brno (Czech Republic) in the period 1848-2005.*Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[118] Štěpánek P., MikulováK. (2006). Homogenization of air temperature and relative humidity monthly means of individual observation hours in the area of The Czech and Slovak Republic. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[119] ShiJ., YangL. (2020). A Climate Classification of China through k-Nearest-Neighbor and Sparse Subspace Representation.*Journal of Climate*. 33(1), 243-262.
[120] BorgesP., FrankeJ., AnunciaçãoY., WeissH., BernhoferC. (2015). Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of precipitation distribution in Distrito Federal, Brazil.*Theoretical and Applied Climatology*.
[121] EstévezJ., GavilánP., García-MarínA.P. (2011). Data validation procedures in agricultural meteorology – a prerequisite for their use. *Adv. Sci. Res.*6, 141–146.
[122] AydınM., TunaA. (2018). Aykırı Değerlerin Tespiti ve Taşkın Debilerinin Hesabı için Bir Yöntem Geliştirilmesi. *Teknik Dergi*. 8339-8363.
[123] AydınM. (2015). Hidrolojik Verilerdeki Aykırı Değerlerin Taşkın Frekans Analizi Üzerine Etkisinin İncelenmesi: Van Gölü Havzası Örneği.*Journal of The Institute of Natural & Applied Sciences*. 20(1-2), 47-55.
[124] El KenawyA., L´opez-MorenoJ. I., StepanekcandP., Vicente-SerranoaS. M. (2013). An assessment of the role of homogenization protocol in the performance of daily temperature series and trends: application to north eastern Spain. *International Journal Climatology*. 33,87–108.
[125] KuhnN. J., BaumhauerR., SchüttB. (2011). Managing the impact of climate change on the hydrology of the Gallocanta Basin, NE-Spain. *Journal of Environmental Management*. 92(2), 275-283.
[126] McMahonT. A., PeelM. C. (2019). Uncertainty in stage–discharge rating curves: application to Australian Hydrologic Reference Stations data.*Hydrological Sciences Journal*. 64(3), 255-275.
[127] DeGagneaM. P.J., DouglasG. G., HudsonH. R., SimonovicS. P. (1996). A decision support system for the analysis and use of stage-discharge rating curves.*Journal of Hydrology*.184, 225-241.
[128] AydınM. (2012). *Hidrolojik verilerdeki aykırı değerlerin tahmini için bir method geliştirilmesi ve Dicle ile Fırat havzalarına uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
[129] ChebanaF., Dabo-NiangS., OuardaT. (2012). Exploratory functional flood frequency analysis and outlier detection. *Water Resources Research*. 48, 4514.
[130] SuhailaJ. (2021). Functional Data Visualization and Outlier Detection on the Anomaly of El Niño Southern Oscillation. *Climate*. 9(118).
[131] ChebanaF., OuardaaT. (2011). Multivariate extreme value identification using Depth functions.*Environmetrics*. 2, 441–455.
[132] RomanoE., MateuJ. (2013). Outlier Detection for Geostatistical Functional Data: An Application to Sensor Data. A.Giusti et al. (eds.), Classification and Data Mining, Studies in Classification, Data Analysis and Knowledge Organization, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 131-138.
[133] ChebanaF., OuardaT. (2011). Depth-based multivariate descriptive statistics with hydrological Applications. *Journal of geophisical research*. 116, 1-19.

[134] WaznehH. (2016). Identification of hydrological neighborhoods for regional flood frequency analysis using statistical depth function.*Advances in Water Resources*.
[135] EichingerF., et al. (2013). Data Analysis Challenges in the Future Energy Domain. *International Symposium on Intelligent Data Analysis*.
[136] JenniferL., AndreasH., ElisabethB. (2020). Outlier detection methods to improve the quality of citizen science data. *International Journal of Biometeorology*. 64, 1825-1833.
[137] LuY., KumarJ., CollierN., Krishna B.& LangstonM. A. (2018). Detecting Outliers in Streaming Time Series Data from ARM Distributed Sensors.*IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, Singapore. 779-786.
[138] PetkovskiA., ShehuV. (2023). Anomaly Detection on Univariate Sensing Time Series Data for Smart Aquaculture Using K-Means, Isolation Forest, and Local Outlier Factor.*12th Mediterranean Conference on Embedded Computing.*
[139] YuQ., YuanShengL. (2019). Hydrological Time Series Anomaly Pattern Detection based on Isolation Forest.*IEEE 3rd Information Technology,Networking,Electronic and Automation Control Conference.*
[140] AmirpouyaS. (2015). Flood Outlier Detection Using PCA and Effect of How to Deal with Them in Regional Flood Frequency Analysis via L-Moment Method. *Water Resources*. 42, 448-459.
[141] AkyayT., KarslıoğluM. O. (2009). Wavelet-Based Outlier Detection of Airborne Laser Scanning Data. *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, İstanbul, Turkey. 426-427.
[142] IhC., GeorgeT., ChungC. (1988). Estimation of Time Series Parameters in the Presence of Outliers. *Technometrics*. 30, 193-204.
[143] MarinovaT.,AlexandrovV. (2006). On homogenization of climate long-term series in Bulgaria. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, Budapest, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[144] PanagiotaG., PanayotisP. (2007). Outliers and trend detection tests in rainfall extremes. *Proceedings of the 32nd IAHR World Congress*, Venice.
[145] AkarA.U. (2021).*GNSS gözlemlerindeki troposferik gecikmenin destek vektör makineleri algoritması ile kestirimi*. Yüksek Lisans Tezi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya Teknik Üniversitesi.
[146] GiustariniL., ParisotO., GhoniemM., HostacheR., TrebsI., OtjacquesB. (2016). A user-drivencase-based reasoning tool for infilling missing values in daily mean river flow records.*Environmental Modelling & Software*. 82, 308-320.
[147] Wakdikar M. P. & Deo M. C. (1999). Outlier detection and effects in dynamic modeling.*ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 5(1), 33-41.
[148] DedeA. (2023).*Hidrolojik sapan değer tespitine yeni bir yaklaşım*.Doktora Tezi, İTU.
[149] DedeA., AğıralioğluN. (2023). Hidrolojik Sapan Değer Tespitinde Komşu İstasyon Seçimi.*Fırat Üniversitesi Mühendislik Bililmleri Dergisi*.35(1), 81-99.
[150] González-HidalgoJ. C., ArrillagaM. de L., StepanekP., LanjeriS. (2006). Quality control of monthly precipitation data from Mediterranean areas of Spain. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases,* Budapest, Hungary,Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[151] LundR., WangX. L., ReevesJ., FengY., LuQ., GallagherC. (2006). Changepoint Detection in Periodic and Autocorrelated Time Series.*Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases,* Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[152] GuijarroJ. A. (2006). Homogenization of a dense thermo-pluviometric monthly database in the Balearic Islands using the free contributed R package 'Climatol'.*Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases,* Budapest, Hungary, Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 71.
[153] YangJ., ChenY., RahardjaS. (2022). Neighborhood Representative for Improving Outlier Detectors.*Information Sciences.* 625.
[154] WangX. L., FengY. (2010).*RHtestsV3 User Manual.* Science and Technology Branch, Environment Canada, Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate. Toronto: Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.
[155] Water Resources Planning Organization. (2015). *Time Series Data Quality Control Guideline (For Hydro-meteorological data).* Government of the People's Republic of Bangladesh Ministry of Water Resources.
[156] SevrukB., GeigerH. (1981).*Selection of distribution types for extremes of precipitation.* World Meteorological Organization (WMO), Operational hydrology report (OHR) No. 15.
[157] HarveyJ. E. R., MaxA. L. (2015).*Understanding Mathematical And Statistical Techniques in Hydrology An Examples-Based Approach.* John Wiley & Sons, UK.
YalçınG. D. (2005). *Klimatoloji – I.* Ankara: DMİ Genel Müdürlüğü Matbaası.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 160-166, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1477568
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Radiological Doses Assessment of NORM Waste for Soil Samples in Some of the Oil Fields

Radyolojik Dozlar Bazı Petrol Sahalarındaki Toprak Numuneleri için NORM Atıkların Değerlendirilmesi

Marwan M. A. Al-Tameei[1*], Kareem K. Mohammed[2], İlyas İnci[3]

Geliş / Received: 07/05/2024 ***Revize / Revised: 05/06/2024*** ***Kabul / Accepted: 16/08/2024***

ABSTRACT

Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) wastes are generated during oil production operations and the unjustified radiation exposures resulting from it represent challenges facing many countries, including Iraq. This research deals with an evaluation of the absorbed dose rates and the total annual radiation dose resulting from this waste in the study area. The activity concentrations of radionuclides in 13 soil samples were measured by using the Falcon 5000 system containing an HPGe detector. For which, the samples were placed at a distance of 5 cm from the detector surface for 3 hours. Then, the radiation dose rates were calculated. It is found that the values of the average absorbed dose is 23.42 nGy/h and the average total annual effective outdoor and indoor doses are 0.029 mSv/y and 0.115 mSv/y, respectively. These values are lower than the limits set by the International Atomic Energy Agency (IAEA) GSR Part3 standards and the recommended values in UNSCEAR 2000. The outputs of RESRAD-ONSITE software showed that the total dose values are 3.24 μSv/y , which is less than the permissible values for the total radiation dose for workers in the radiation field. The research recommended conducting continuous monitoring of absorbed dose rates and total annual effective doses for workers in work areas and continuous radiation evaluation of NORM waste sites through the use of appropriate radiation monitoring devices and taking samples to make the necessary measurements and spreading radiation awareness among workers in work areas.

Keywords- NORM, Absorbed Dose, Soil Samples, Annual Dose, Dose Assessment

ÖZ

Petrol üretim operasyonları sırasında Doğal Olarak Oluşan Radyoaktif Madde (NORM) atıkları üretilmekte ve bundan kaynaklanan haksız radyasyona maruz kalma, Irak dahil birçok ülkenin karşılaştığı zorlukları temsil etmektedir. Bu araştırma, çalışma alanında absorbe edilen doz oranları ve bu atıklardan kaynaklanan toplam yıllık radyasyon dozunun değerlendirilmesini içermektedir. 13 toprak örneğindeki radyonüklitlerin aktivite konsantrasyonları, HPGe dedektörü içeren Falcon 5000 sistemi kullanılarak ölçüldü. Bunun için numuneler 3 saat boyunca dedektör yüzeyinden 5 cm mesafeye yerleştirildi. Daha sonra radyasyon doz oranları hesaplandı.

[1*]*Corresponding Author Contact: mr_ph8512@yahoo.com (https://orcid.org/0009-0009-1367-8033)*
Ddirectorate of Radiation control, The National Authority for Nuclear, Radiological, Chemical and Biological Regulation commission , Al-Firdus Sq., St. No: 91, Build. No: 18, Al-Sa'doon District - P.O.Box: 2025
[2]Contact: kareem.mohammad@nahrainuniv.edu.iq (https://orcid.org/0009-0002-5987-2738)
Al-Nahrain Renewable energy research center, Al-Nahrain University, Baghdad - Al-Jadriya District.
[3]Contact: ilyasinci@karatekin.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2623-8186)
Department of Physics, Çankırı Karatekin University, Kırkevler, Uluyazı Kampüsü Ring Yolu, 18100 Çankırı Merkez.

Ortalama absorbe edilen doz değerlerinin 23.42 nGy/h olduğu ve ortalama toplam yıllık etkili dış ve iç ortam dozlarının sırasıyla 0.029 mSv/y ve 0.115 mSv/y olduğu bulunmuştur. Bu değerler Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) GSR Part3 standartlarında belirlenen limitlerin ve UNSCEAR 2000'de önerilen değerlerin altındadır. RESRAD-ONSITE yazılımının çıktıları, toplam doz değerlerinin 3.24 µSv/y olduğunu gösterdi; bu, radyasyon alanında çalışanlar için toplam radyasyon dozu için izin verilen değerlerden daha azdır. Araştırma, çalışma alanlarındaki işçiler için emilen doz oranlarının ve yıllık toplam etkin dozların sürekli izlenmesini ve uygun radyasyon izleme cihazları kullanılarak NORM atık sahalarının sürekli radyasyon değerlendirmesinin yapılmasını ve gerekli ölçümlerin yapılması için numunelerin alınmasını ve çalışma alanlarındaki işçiler arasında radyasyon bilincinin yayılmasını önermiştir.

Anahtar Kelimeler- NORM, Emilen Doz, Toprak Örnekleri, Yıllık Doz, Doz Değerlendirmesi

I. INTRODUCTION

Oil and gas production processes are always accompanied by the generation of Natural Radioactive Materials (NORM) as these materials are found within the Earth's crust [1]. These materials are characterized by their richness in radionuclides from the decay series of the elements U-238 and Th-232, in addition to potassium isotopes (K-40) at different concentrations. Because these nuclides have long half-lives, they have been present within the Earth's crust for a long time [2], [3]. These natural radioactive materials are extracted with oil from the ground and placed on the inner walls of pipelines and oil separation or storage tanks [4].

Exposure levels resulting from these radioactive wastes require great monitoring and attention, as external and internal exposure (inhalation and ingestion) resulting from K-40 and nuclides within the U-238 and Th-232 decay series are the most common [5]. Mostly uranium-series elements are radium and radon. Radioactive radon, which is the product of the disintegration of 226Ra is found in some underground waters at very high concentrations [6]. Radon exposure is also an issue with NORM waste. It should be noted that all work related to NORM that is not subject to control and supervision results in undue exposure to radiation [5].

NORM sources can cause high radiation exposure among workers at work sites at levels above the normal exposure level, in addition to the risks they cause to the environment, but they do not constitute a cause for concern [7]. There are a number of activities that need to be monitored by the competent regulatory authorities, in addition to the need to take measures to address the inaccuracy and uncertainty in assessing the radiation doses resulting from these wastes and the extent of their impact on human health and the environment [8].

These materials are in the form of raw materials, final or by-product products, intermediate materials, or process wastes, in addition to being liquid, solid, gaseous, or a mixture of them [9].

A number of IAEA conferences have addressed the issue of NORM waste and related issues such as radiation exposure, prevention, and management of these highly radioactive wastes. Despite the many conferences and meetings that have been held and discussed this topic, the problem of this waste is still long-standing and cannot be easily addressed without arriving at a correct understanding of its management [10].

This study used a RESRAD-ONSITE program (computer code) designed by Argonne National Laboratory - USA, with the aim of assessing radiation doses, in addition to the risks of cancer to an individual present on soil contaminated with radiation. The software inputs include important information in order to calculate pollution properties, such as the properties of the surface and subsurface layers, as well as the atmospheric, hydraulic and hydrogeological properties of the site. The program user has the freedom to choose all or some of the inputs. [11]

The importance of this study comes in order to evaluate the radiation doses resulting from NORM waste generated during oil production operations in some oil fields in Iraq.

II. THE STUDY PROBLEM

Iraq is considered one of the oil-producing countries and, like the rest of the world, suffers from the problem of NORM waste due to the absence of legislation that regulates the correct management of this waste. Uncontrolled practices related to this waste cause unjustified radiation exposure that poses risks to the health of workers and the public, as well as the environment.

III. MATERIALS AND METHOD

During this study, 13 soil samples of NORM waste were collected and prepared for measurement using the Falcon 5000 measurement system within the laboratory of the Iraqi Radioactive Sources Regulatory Authority (IRSRA) and then the results were analyzed using the relevant computer programs, as shown below:

A. Collection and Preparation of Samples

Soil Samples of NORM waste were collected from some Iraqi oil fields in the governorates of Baghdad, Maysan, and Basrah in the middle of October, and the number of samples reached 13 soil samples, as shown in Table 1, then it was prepared in the laboratory according to the context followed in it for preparing samples by drying, grinding, and sifting them, then filling them and placing them in special containers. After that, the weights of the samples were measured, and then they were left for 30 days to achieve balance.

Table 1. Soil Samples Characteristic

No.	Sample Code	Sample Depth (m)	Geological Structure	Color	GPS	Location
1	MCN1	2648	Al-Khasib Formation (Carbonite rocks) (Limestone)	Mixed Black & Gray	33.346437° , 44.567712°	Al-Nahrawan district (Baghdad)
2	MCN2	2650				
3	MCN3	2658				
4	MCN4	2652				
5	MCN5	2680		Dark Gray	33.34662° , 44.56136°	
6	MCL1	1200		Gray	33.13695° , 44.81602°	Al-Laj district (Baghdad)
7	MCL2	1000		Brown		
8	MCM1	3250	Nahr Omar Formation (Sandstone)	Gray	32.06027° , 47.43696°	Buzurgan field (Maysan Governorate)
9	MCM2	3100		Beige		
10	MCB1	4600	Al-Yamamah Formation (Carbonite rocks) (Limestone)	Gray	30.916390° , 47.322440°	West Qurna-1 field (Basra Governorate)
11	MCB2	3820				
12	MCB3	4624				
13	MCB4	3828				

B. Samples Measurement

The Falcon 5000 system, which includes a high-purity germanium (HPGe) detector with size 60×30 mm, was used to measure the activity concentrations of radionuclides. Through the values of activity concentrations of radionuclides as shown in Table 2, the absorbed radiation dose and the annual effective dose resulting from these nuclides were calculated using the equations shown below: [12], [13] and [15]

Table 2. Activity

No.	Samples Code	Activity Concentration (Bq/kg)		
		K-40	**Ra-226**	**Th-232**
1	MCN1	329 ± 0.44	28.7 ± 0.022	3.92 ± 0.02
2	MCN2	10.57 ± 0. 034	15.1 ± 0.003	1.44 ± 0.019
3	MCN3	180 ± 0.056	70 ± 0.046	17.6 ± 0.032
4	MCN4	10.2 ± 0.022	25.9 ± 0.031	29.6 ± 0.04
5	MCN5	35.9 ± 0.014	24.7 ± 0.007	15.1 ± 0.01
6	MCL1	223 ± 0.15	6.59 ± 0.007	21.5 ± 0.006
7	MCL2	45.24 ± 0.02	6.23 ± 0.001	20.1 ± 0.007
8	MCM1	113 ± 0.16	1.03 ± 0.001	17.8 ± 0.01
9	MCM2	11.9 ± 0.024	22.6 ± 0.01	25.1 ± 0.042
10	MCB1	41.8 ± 0.023	12.84 ± 0.013	39.7 ± 0.03
11	MCB2	53.94 ± 0.021	12.6 ± 0.01	13.7 ± 0.03
12	MCB3	49.5 ± 0.031	11.5 ± 0.01	7.84 ± 0.01
13	MCB4	23.4 ± 0.001	23.12 ± 0.04	13.2 ± 0.016
	Min.	10.2 ± 0.034	1.03 ± 0.001	1.44 ± 0.019
	Max.	329 ± 0.44	70 ± 0.046	39.7 ± 0.032
	Average	86.72 ± 0.12	20.07 ± 0.012	17.43 ± 0.014
	UNSCEAR report 2000	400	35	30

Concentration of (U-238, Th-232, Ra-226 & K-40) in Soil Samples

$$D = 0.462\ A_{Ra} + 0.694\ A_{Th} + 0.0417\ A_k \quad (1)$$

$$AEDE_{outdoor} = D \times 8760 \times 0.7 \times 0.2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$AEDE_{indoor} = D \times 8760 \times 0.7 \times 0.8 \times 10^{-6} \quad (3)$$

Where D is the absorbed radiation dose, A is the radioactivity concentration of Ra-226, Th-242, and K-40. AEDEoutdoor and AEDEindoor are the equivalent annual effective dose of radionuclides.

In addition, the RESRAD-ONSITE program (version 7.2) was used to calculate the total radiation dose resulting from external and internal exposure (inhalation and ingestion) up to more than 500 years in the future, using the activity concentration values obtained from samples measured with the Falcon 5000 system. Two calibration processes are performed for the Falcon 5000, energy calibration using a standard source placed in front of the detector, and the source energy curve is matched with the energy curve stored in the system. Efficiency calibration uses a file attached in the system through which the calibration process is carried out using the Genie 2000 software program.

IV. RESULT AND DISCUSSION

The samples were measured using the HPGe system and the values of activity concentrations of radionuclides (K-40, Ra-226, Th-232, and U-238) were obtained. It was shown in Table 2 that the average values of activity concentration for the radionuclides were less than the recommended values in UNSCEAR 2000[16]. Using these values in the aforementioned equations, both the absorbed dose rate and the annual effective dose were calculated.

A. Absorbed dose rate (D) and annual effective dose equivalent (AEDE)

Both the absorbed dose rate and the annual effective dose were calculated using Eq.(3.1) for soil samples, where the maximum value for soil samples was 50.48 nGy/h, the minimum value was 8.287 nGy/h and the average value was 23.42 nGy/h. The values of the annual effective dose equivalents for outdoor and indoor for soil samples were calculated using equation Eq. (3.2) and Eq. (3.3) and the maximum value of AEDEoutdoor was 0.062 mSv/y for MCN3, the minimum value was 0.01 mSv/y for MCN2 and average value was 0.115 mSv/y. The maximum value of AEDEindoor was 0.25mSv/y for MCN3, the minimum value was 0.041 mSv/y for MCN2 and the average value was 0.029 mSv/y. The results showed that they are less than the limits recommended in UNSCEAR 2000[16]. Table 3 and Figures 1, 2 and 3 shown all values of the D and AEDE.

Table 3. Absorbed dose rate and the annual effective dose in Soil Samples

No.	Samples Code	D (nGy/h)	$AEDE_{outdoor}$ (mSv/y)	$AEDE_{indoor}$ (mSv/y)
1	MCN1	29.35	0.036	0.144
2	MCN2	8.29	0.01	0.041
3	MCN3	50.48	0.062	0.25
4	MCN4	22.03	0.03	0.11
5	MCN5	22.03	0.027	0.11
6	MCL1	25.33	0.031	0.12
7	MCL2	16.91	0.021	0.083
8	MCM1	15.94	0.019	0.078
9	MCM2	26.1	0.03	0.13
10	MCB1	31.7	0.04	0.16
11	MCB2	16.35	0.02	0.08
12	MCB3	12.11	0.015	0.06
13	MCB4	19.63	0.024	0.096
	Min.	8.287	0.01	0.041
	Max.	50.48	0.062	0.25
	Average	23.42	0.029	0.115
	UNSCEAR 2000	55	0.07	0.41

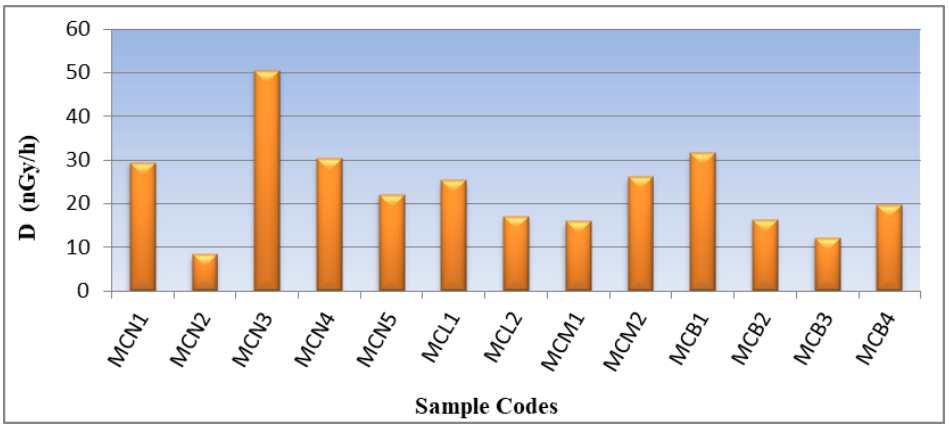


Figure 1. Absorbed Dose Rate (nGy/h) for Soil Samples

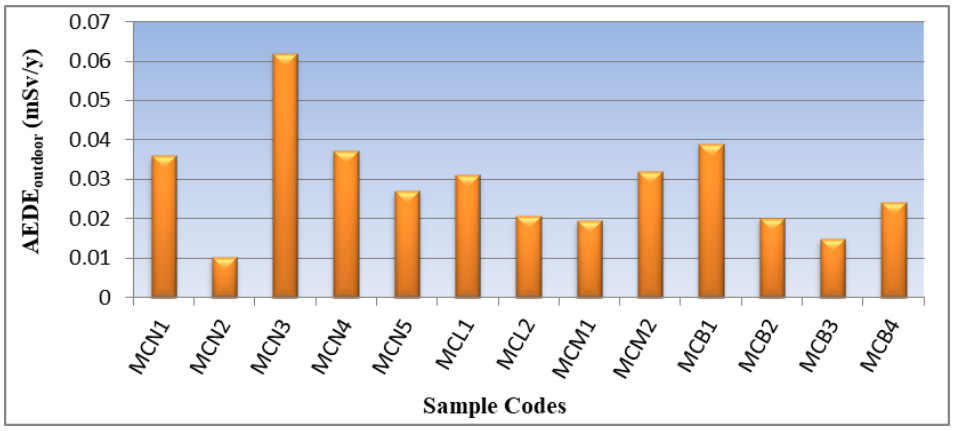


Figure 2. Annual Effective Dose Equivalent outdoor (mSv/y) for Soil Samples

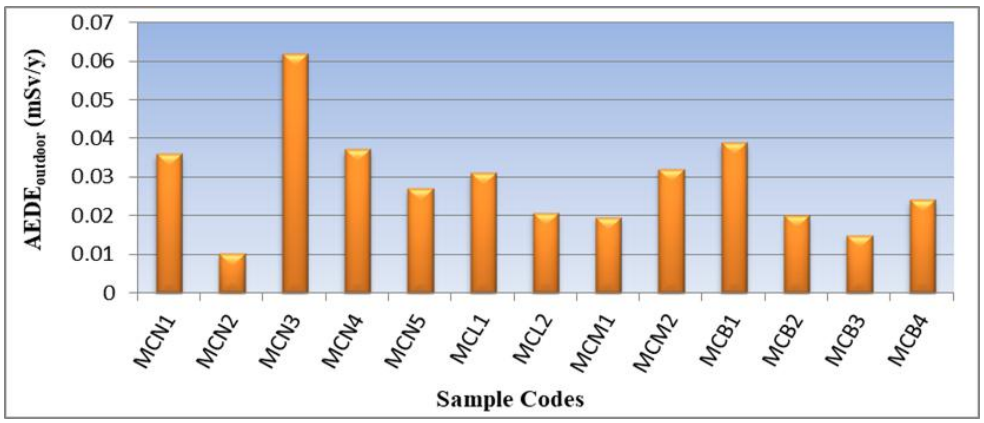


Figure 3. Annual Effective Dose Equivalent indoor (mSv/y) for Soil Samples

B. Total Dose using RESRAD-ONSITE Software Program

The RESRAD-ONSITE version 7.2 software program was used, which is considered one of the specialized programs in the field of environmental risk assessment, as it estimates environmental risks as well as the risks resulting from exposure to radioactive materials inside the site.

The total radiation dose to the workers was calculated and compared to local and international standards, as the program depends on several parameters, which represent the type of radioactive isotope, its activity concentration, the area of the study area, the depth of the contaminated area, in addition to the time spent by the workers in the study area, taking into account other environmental factors.

The results showed that the radiation dose resulting from external exposure is 3.22 µSv/y equal to 0.003 mSv/y. The total dose value represented by the external and internal dose (inhalation and ingestion) is 3.24 µSv/y.

The results of RESRAD-ONSITE software program shown in Table 4 and Figure 4 are considered less than the permissible limits for the total annual radiation dose to workers according to international atomic energy agency general safety requirements GSR-Part3 [17].

Table 4. Total Dose Measured with RESRAD for the Samples

	External	Inhalation	Ingestion	Total
		(μSv/y)		
Dose	3.22	0.019	0.001	3.24

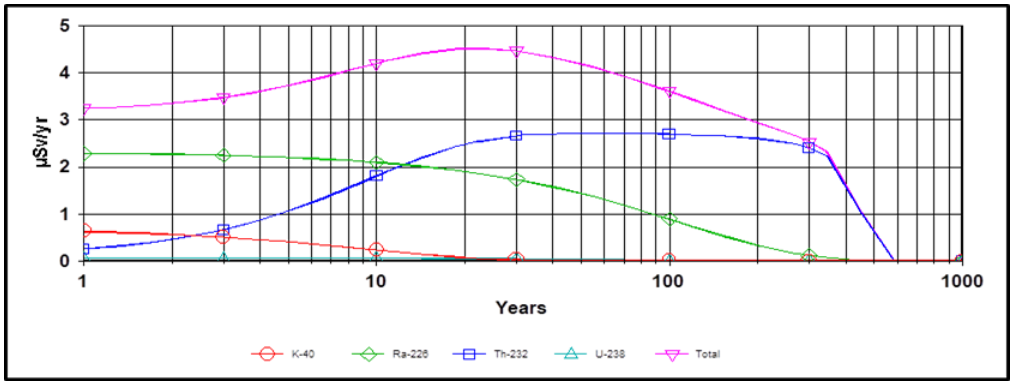


Figure 4. Total Dose measured by RESRAD-ONSITE software program for all nuclides

V. CONCLUSION

According to the results, we conclude that the absorbed dose and the total annual dose values are less than the recommended limits in UNSCAER 2000, meaning that there are no risks threatening human health and the environment. However, this waste cannot be overlooked when imagining the large quantities generated by the oil industry annually.

The results obtained using the RESRAD-ONSITE software program are considered less than the annual dose limits for workers according to the standards of the IAEA GSR Part3, as the highest value for the total dose was recorded at 20 years of value 0.0045 mSv/y.

VI. RECOMMENDATIONS

Through this study, in order to reduce the radiation risks resulting from this waste, the following must be done:

1- Conduct continuous monitoring of the absorbed dose rates and annual effective doses for workers working in the study areas.
2- Continuous radiation evaluation of NORM waste collection sites using radiation monitoring devices to ensure that there are no radiation risks that threaten human health and the environment.
3- Spreading awareness and knowledge among workers regarding the risks of radioactive materials and following occupational safety standards while working.

REFERENCES

[1] Akarsu, E., Hamilton, D.J. & Tyler, D.C. (2001). NORM in the oil and gas industry - exposure assessment and management plan. *The APPEA Journal*, 41(1), 737 – 747.

[2] IAEA, (2010). *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry*. TCS-40, 218 pages, Vienna.

[3] Khudheir, M. (2021). Radiological Risk Assessment of Oil waste in the Oilfields at Zubair district of Basrah. *Iraqi Academics Syndicate International Conference for Pure and Applied Sciences, Babylon, Iraq*, Nov. 14-15.

[4] Alhamd, M. W., Atiyah, S. N., Alqaisi, Z. A., & katea AL-Gharrawy, M. (2023). Naturally Occurring Radioactive Materials in the Soil of Near Basra Oil Company Fields. *Iraqi Journal of Industrial Research*, 10(1), 70-77.

[5] Khalil, W. A., Helal, N. L. & Elsayed, M. (2021). Assessment of the annual dose of the occupational workers involved in dry decontamination of NORM contaminated equipment in Egyptian oil and gas industry. *Science Archives Journal*, 2(3), 201-206.

[6] Kaya, S., Kaya, A., Çelik, N., Kara, R. T., Taşkın, H., & Koz, B. (2020). Determination of the environmental natural radioactivity and mapping of natural background radioactivity of the Gumushane province, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 326, 933-957.
[7] IAEA (2013). *Management of NORM Residues (TECDOC-1712).* 66, Vienna.
[8] IAEA (2015*). Naturally occurring radioactive material (NORM VII)*. Beijing, China, 22–26 April, 706.
[9] Ali K. K. & Ibraheem D. B. (2017). Radiological hazard Assessment Due to Natural Occurring Radioactive Materials (NORM) in Oil and Gas Production Industry –East Baghdad Oil Field. *Iraqi Journal of Science*, 58 (1A), 115-126.
[10] Ahmeida, E. (2020). *Management of naturally occurring radioactive materials (NORM) in the oil and gas industry*, Arab atomic energy agency, atomic and dvelopment bulletin, 32(2). (In Arabic)
[11] Kamboj, S., Gnanapragasam, E. & Yu, C. (2001). *User's Guide for RESRAD-ONSITE code*, Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, 111.
[12] IAEA, (2008). *Naturally occurring radioactive material (NORM V)*. Proceedings of an International Symposium Held in Seville, Spain, 19–22 March, 534.
[13] Beretka, J. & Matthew, P. J. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Journal Health physics*, 48(1), 87-95.
[14] Kocher, D. C. & Sjoreen, A. L. (1985). Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Journal Health Physics*, 48(2), 193-205.
[15] Sam, A. K., & Abbas, N. (2001). Assessment of radioactivity and the associated hazards in local and imported cement types used in Sudan. *Journal of Radiation Protection Dosimetry*, 93(3), 275-277.
[16] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. 1, 90, New York.
[17] IAEA (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General safety requirements, No. GSR Part 3*, 471, Vienna.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 167-174, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1481180
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Investigation of Intermolecular Interactions of 2-Acetoxybenzoic Acid with Hirshfeld Surfaces

2-Asetoksibenzoik Asidin Hirshfeld Yüzeyleri ile Ara Moleküler Etkileşimlerinin İncelenmesi

Mehmet Hanifi Kebiroğlu[1*], Mücahit Yılmaz[2]

Geliş / Received: 09/05/2024 ***Revize / Revised: 14/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 15/10/2024***

ABSTRACT

In this study, the crystal structure and intermolecular interactions of acetoxybenzoic acid were analyzed. Through crystal structure analysis, the arrangement of carbon (C), oxygen (O), and hydrogen (H) atoms, along with their chemical bonds, was determined. It was identified that oxygen atoms impart polar character to the molecule and play a significant role in intermolecular interactions, such as hydrogen bonding. Hirshfeld surface analysis, performed using CrystalExplorer software, focused on the interactions of the molecule with solvent molecules. This analysis provided a more comprehensive understanding of molecular interactions and structure. Additionally, properties such as electron density, curvature, and surface shape indices were mapped. The structural and electronic properties of acetoxybenzoic acid were visualized, offering a deeper understanding of its chemical and physical properties. XRD analysis revealed the crystallinity of the molecule and provided detailed insights into the crystal structure through the position of the peaks. This study illuminated the molecular structure and interaction properties of acetoxybenzoic acid, contributing to predictions of reactivity at the molecular level.

Keywords- Acetoxybenzoic Acid, Crystal Structure Analysis, Hirshfeld Surface Analysis, XRD

ÖZ

Bu çalışmada, asetoksibenzoik asidin kristal yapısı ve moleküller arası etkileşimleri analiz edilmiştir. Kristal yapı analizi sonucunda, karbon (C), oksijen (O) ve hidrojen (H) atomlarının düzenlenmesi ve kimyasal bağları belirlenmiştir. Oksijen atomlarının moleküle polar karakter kazandırdığı ve hidrojen bağları gibi moleküller arası etkileşimlerde önemli bir rol üstlendiği tespit edilmiştir. CrystalExplorer yazılımı kullanılarak yapılan Hirshfeld yüzey analizi, molekülün çözücü moleküllerle olan etkileşimlerine odaklanmıştır. Bu analiz sayesinde moleküler etkileşimler ve yapı hakkında daha kapsamlı bir anlayış elde edilmiştir. Ayrıca, molekülün elektron yoğunluğu, eğrilik ve yüzey şekil indeksleri gibi özellikler haritalandırılmıştır. Asetoksibenzoik asidin yapısal ve elektronik özellikleri görselleştirilmiş, bu sayede kimyasal ve fiziksel özelliklerine dair daha derin bir anlayış kazanılmıştır. XRD analizi, molekülün kristalliğini ve tepe noktalarının konumlarıyla kristal yapının detaylarını ortaya koymuştur. Bu çalışma, asetoksibenzoik asidin moleküler yapısını ve etkileşim özelliklerini aydınlatarak moleküler düzeyde tepkime tahminlerine katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler- Asetoksibenzoik Asit, Kristal Yapı Analizi, Hirshfeld Yüzey Analizi, XRD

[1]*Corresponding author contact: hanifi.kebiroglu@ozal.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-6764-3364)
Department of Medical Services, Darende B. I. Vocational School, Malatya Turgut Özal University, Malatya, Türkiye
[2]Contact: muyilmaz@firat.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0048-2233)
Department of Physics, Faculty of Science, Firat University, Elazig, Türkiye

I. INTRODUCTION

Intermolecular interactions, unlike chemical bonds, is a subject that examines how interactions between molecules affect the properties of matter. These interactions are not related to the formation of chemical bonds between molecules, but are related to Van der Waals forces between molecules, hydrogen bonds, ion-dipole interactions, dipole-induced dipole interactions and solution interactions [1, 2]. The identification of molecules in solution is influenced by many factors such as aromatic interactions, cation-π interactions, CH-O hydrogen bonds, short strong hydrogen bonds, and hydrophobic interactions, which make it difficult to understand the interactions quantitatively [3, 4]. Intermolecular interactions play an important role in the understanding of chemical and biological systems. The behaviour of a molecular system is determined by the free energy. Entropy and enthalpy are useful in understanding the free energy of an intermolecular interaction [4]. Enthalpy and entropy are thermodynamic concepts that are important in intermolecular interactions. During chemical reactions, enthalpy change occurs at the molecular level with the formation or breakage of bonds between molecules [5]. This is important as it determines the energy balance of the reaction. Entropy increase is often associated with the liberalisation of intermolecular interactions or changes that allow for more regulation [6]. Enthalpy and entropy determine the equilibrium state and thermal behaviour of a reaction.

Molecular structure is one of the key factors determining the chemical and physical properties of a compound. These structural properties can be better understood by detailed analysis of the crystal structure [7]. The study of crystal structure is critical in understanding intermolecular interactions and stability. The crystal structure of acetoxybenzoic acid, when analysed in terms of the arrangement of atoms and chemical bonds, provides valuable information about the stability and reactivity of the molecule.

Hirshfeld surface analysis is a powerful tool for the detailed study of molecular interactions in crystallography and materials science. This technique allows us to visualise intermolecular distances, electron densities and surface properties [8, 9]. Hirshfeld surface analysis on acetoxybenzoic acid molecule reveals how the molecule interacts with solvent molecules and how these interactions contribute to the properties of the molecule.

In this study, it is aimed to understand the interactions of the acetoxybenzoic acid molecule in the identification of molecules in different solutions. The pharmacological activity of this molecule is closely related to its molecular structure and intermolecular interactions. Therefore, a detailed study of the acetoxybenzoic acid molecule can provide a better understanding of this compound and expand its potential application areas.

II. MATERIALS AND METHODS

A. Crystal Structure

In the crystal structure of acetoxybenzoic acid molecule, the bonds between molecules and the arrangement of atoms determine the characteristic properties of the molecule. The crystal structure of acetoxybenzoic acid molecule is shown in Figure 1. In Figure 1, brown spheres represent carbon (C) atoms, red spheres represent oxygen (O) atoms and pink spheres represent hydrogen (H) atoms. The lines between atoms in this structure indicate chemical bonds. C atoms form the main skeleton of the molecule, providing most of the molecular structure and stability. O atoms give the molecule a polar character and play a role in intermolecular interactions such as hydrogen bonds. Table 1 presents the key bond lengths and angles in the optimized structures.

Table 1. Key Bond Lengths and Angles in Optimized Structures

Parameter	2-Acetoxybenzoic Acid	K-Doped	Na-Doped
C=O (carboxyl)	1.23 Å	1.25 Å	1.24 Å
C-O (acetoxy)	1.35 Å	1.37 Å	1.36 Å
K-O (carboxyl oxygen)	-	2.80 Å	-
K-O (acetoxy oxygen)	-	2.85 Å	-
Na-O (carboxyl oxygen)	-	-	2.30 Å
Na-O (acetoxy oxygen)	-	-	2.35 Å
C-C (benzene ring)	1.39 Å	1.38-1.40 Å	1.37-1.39 Å
O-C=O (angle)	124.3°	125.6°	125.1°

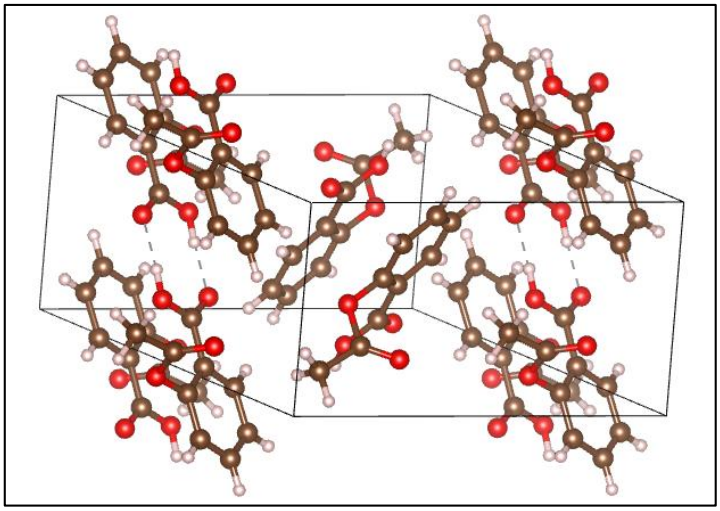


Figure 1. Crystal structure of acetoxybenzoic acid molecule

B. Method

Hirshfeld surface analysis was performed using the CrystalExplorer programme [14]. This analysis helps to better understand molecular interactions and structure. The properties of the molecule, such as electron density, curvature, and surface shape indices, have been mapped to investigate the molecular structures and interactions. Hirshfeld surface analysis was performed on the interactions of 2-acetoxybenzoic acid molecule with solvent molecules.

C. Intermolecular Hirshfeld Surface Analysis

Hirshfeld surface analysis provides an understanding of molecular interactions in crystallography and materials science, allowing us to better understand the structural properties and interactions of molecules [10]. The Hirshfeld surface is defined to contain a certain fraction of the electron density of a molecule to visualise the interactions of the molecule with neighbouring molecules [11-13]. On the Hirshfeld surface, a wide range of properties can be visualised, including the external, de, and internal, di, distances of atoms to the surface. The intermolecular distance information on the surface can be condensed into a two-dimensional histogram of de and di, a so-called fingerprint plot, which is a unique identifier for molecules in a crystal structure [3].

Hirshfeld surface analysis visualises the relationship between the characteristic properties of the acetoxybenzoic acid molecule and its interactions with solvent molecules and how the whole molecule interacts with its environment. The Hirshfeld surface maps showing the surfaces mapped on curvedness, de, di, dnorm and shape-index, which were analysed to explain the intermolecular interactions, is shown in Figure 2.

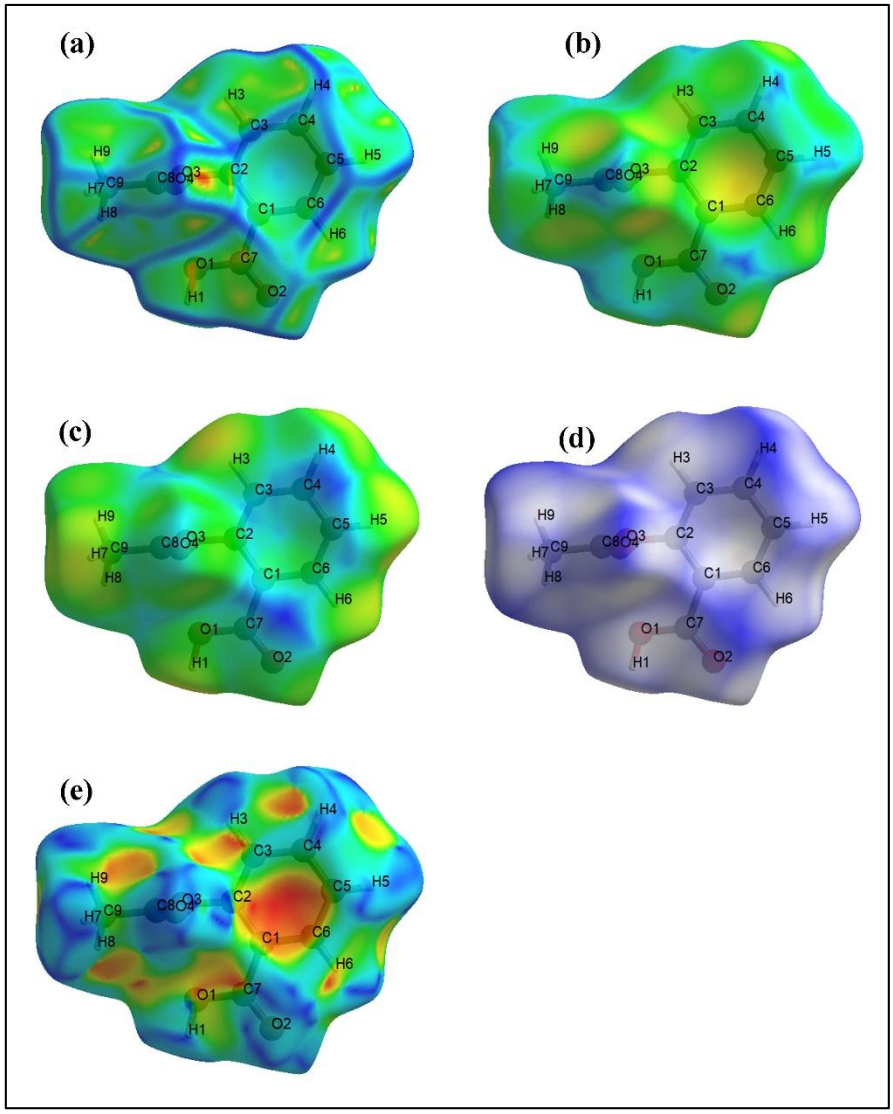


Figure 2. Hirshfeld surfaces mapped with **(a)** curvedness **(b)** de **(c)** di **(d)** dnorm and **(e)** shape-index for for the molecule investigated

Figure 2(a) shows the curvedness map of the aspirin molecule. This map expresses the geometrical features of the surface of the molecule under investigation and visualises waviness or roughness on the surface of the molecule in colours to understand the chemical and physical properties of the molecule. The curvature map provides information about how open regions are to molecular interactions. The different levels of curvature around regions such as carboxyl acid (C7, O1) and ester group (C7, O2) are striking. Low curvature levels are coloured "blue" on the map. The blue areas show areas where the molecule is relatively flat on its surface and less rough parts. At the same time, these regions may be less active for molecular interactions and form stable molecular structures. Regarding molecular dynamics, these areas may undergo less deformation or play a lesser role in environmental interactions. Regions showing moderate curvature are represented by the colours "Green" and "Yellow". These regions of the molecule represent regions where the molecule is potentially more open to interaction for certain chemical interactions. Reactive regions of the molecule may be marked by these colours. In Figure 2(a), the red areas are regions of high curvature. They are the roughest and most wavy areas on the surface of the molecule and are potentially active sites for molecular interactions and reactions, and may be regions where the molecule can interact with surrounding molecules. High curvature regions can be reactive sites in molecular dynamics simulations. It provides important information to determine the potential of the molecule to participate in various reaction mechanisms.

Figure 2(b) shows the electron density map of the molecule. This map provides information about the electronic structure of the molecule. The electron densities of each atom and their bonds with each other are visualised and described in colours. The atoms in the molecule and the hydrogen atoms bonded to their carbon and oxygen atoms have density regions in various colours. The colours represent the electron density in different regions of the molecule; usually blue indicates low-density areas, green medium-density areas and yellow or red high-density areas. The electron densities of carbon (C1, C2, C3, C4, C5, C5, C6, C7, C8, C9) atoms are usually

green to yellow, which means medium to high density. Oxygen (O1, O2, O3) atoms are usually represented by reddish or yellow colours because of their high electron density. Because oxygen is an electronegative element, it attracts electrons from the hydrogen atoms to which it is bonded, thus causing the density regions to be more pronounced. These regions are generally more reactive areas. But blue regions where the electron density is relatively low are more reactive areas.

The di map of the Hirshfeld surface is shown in Figure 2(c). di map gives the fraction of the electron density from the molecule at a point in the molecule. The blue and green areas on the map are the less reactive parts of the molecule and indicate the regions where the electron density is low. These regions can be said to be more electronically stable and inert. Yellow regions on the map are areas with high electron density. The interactions between carbon and oxygen atoms can be seen in this density map. Oxygen atoms (O1, O2, O3) generally have high electron density due to their electron-withdrawing properties, which makes them effective in attracting electrons from the surrounding atoms.

Figure 2(d) shows the dnorm (normalised distance) map of the molecule. In the dnorm map, the potential surrounding the surface of the molecule, the Van der Waals volume and the distance to its nearest neighbours are expressed in colours. In the blue and purple regions, the molecule has minimal interaction with neighbouring molecules. Darker colours (grey or black tones) represent densely packed regions where the molecule interacts more tightly with neighbouring molecules. On norm surfaces, large circular depressions indicate hydrogen bond contacts, while other visible spots are due to H-H contacts.

Figure 2(e) shows the shape index on the surface of the molecule as a coloured map. The hollow regions on the surface of the molecule are shown in blue. The less reactive parts of the molecule show flat areas and are represented by the green colour. The red regions represent raised areas and are where the molecule interacts strongly with other molecules around it.

D. Fingerprint Plots

It helps to fingerprint the types and frequencies of intermolecular interactions in the crystal and simplifies the complex chemical information of the structures and helps to present them numerically or graphically. In addition, it is possible to make comparisons by comparing the similarities and differences of different molecules. For each molecule, a characteristic shape is produced [3]. Fingerprint graphs are unique for any molecule and their size is independent of atoms in the molecule. The fingerprint graph indicating the important intermolecular interactions in the molecule of interest is shown in Figure 3.

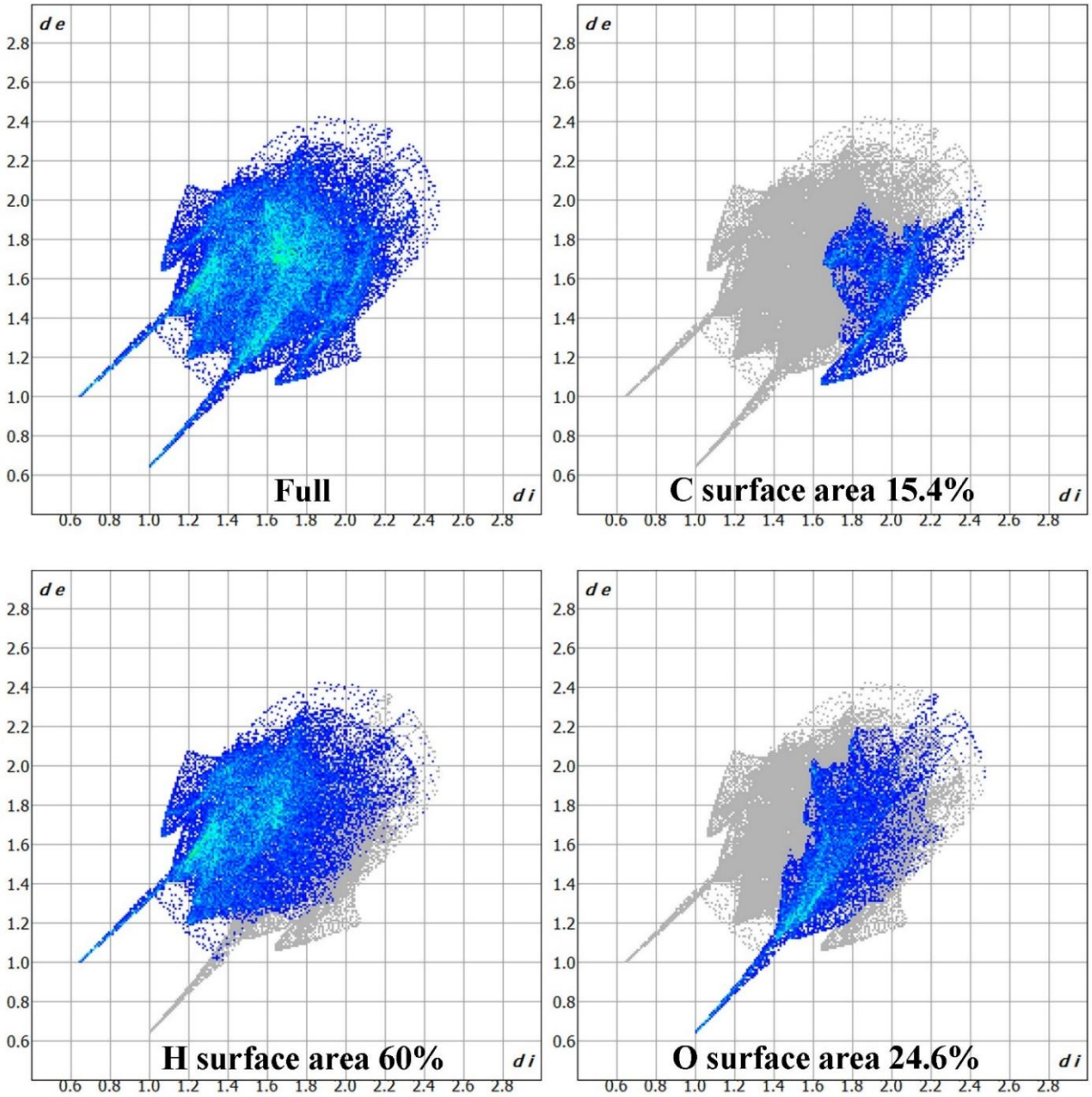


Figure 3. Fingerprint graphics

In the fingerprint graphs shown in Figure 3, each graph visualises a different aspect of the molecule. The first graph (top left) represents the entire molecule. Areas of high density in the molecule are coloured blue. These areas indicate that the interactions between the atoms that make up the molecule are high. The relatively less dense areas are painted in a less blue and grey tone. The Carbon (C) Surface Area graph (top right) shows the three-dimensional structural distribution and density of carbon atoms in the molecule and shows that 15.4% of the molecule consists of carbon atoms. The areas occupied by C atoms in the molecule are shown in grey. In the hydrogen (H) surface area graph, hydrogen atoms (60%) in the molecule cover a large area. It indicates that the effect of hydrogen on the molecule is more than other atoms.

Oxygen (O) surface area constitutes 24.6% of the surface area of the molecule. Therefore, considering the structural properties of oxygen, it states they can have a great effect on the chemical reactivity and polarity of the molecule. Oxygen increases electronegativity and polarity in molecules.

E. X-Ray Diffraction Analysis (XRD)

XRD analysis is often used to determine the crystal structure of a substance. The XRD spectrum of the crystal structure of the molecule is given in Figure 4. Due to the regular and repeated structure of aspirin crystals, sharp peaks with pronounced intensity are observed in the spectrum. These peaks indicate substantial crystallinity. The molecule has a highly ordered crystal structure, indicating that the sample largely consists of a uniform

crystalline phase. The background level and other peaks with low intensity in the spectrum can give information about the purity of the sample, small amounts of impurities or multiple phases. The position of the peaks at 2 Theta indicates the spacing and orientation of the planes in the crystal structure. Significant increases in 2 Theta values of 10°, 20°, 30° are usually observed. These are characteristic reflections of the crystal structure of the molecule and are used to determine the crystal cell parameters.

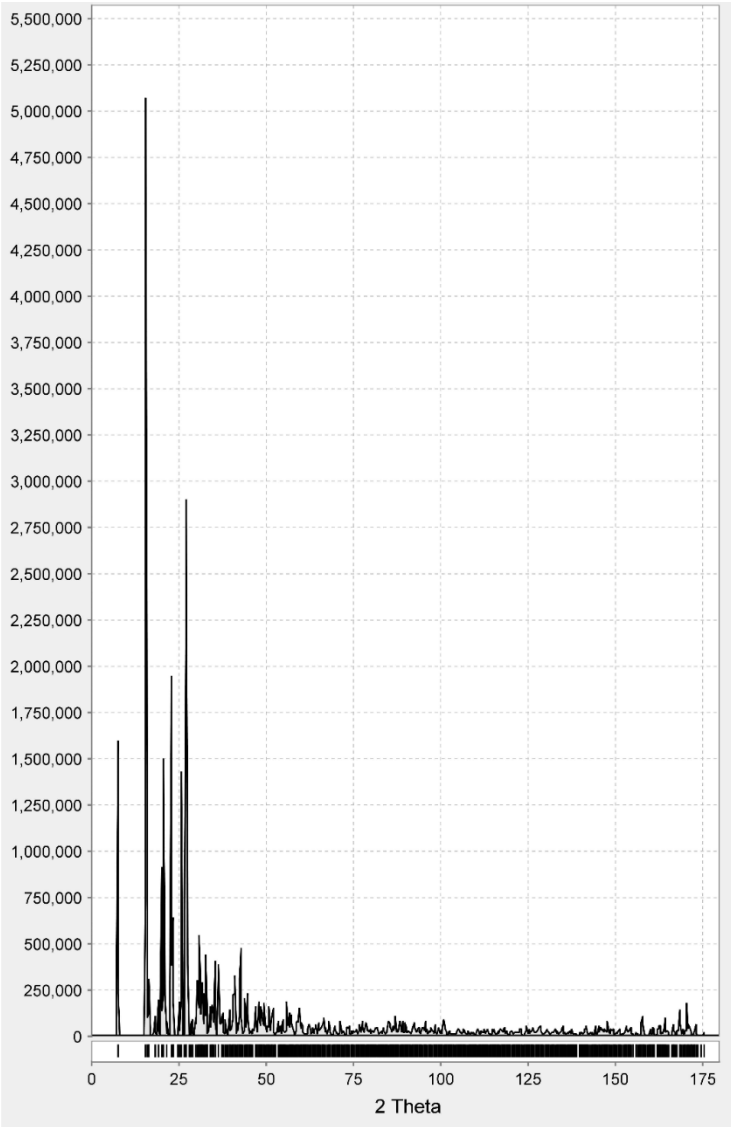


Figure 4. XRD spectrum of the molecule

III. CONCLUSIONS

In this work, we have studied the complex molecular interactions and crystal structure of 2-acetoxybenzoic acid along with its chemical and physical properties. Using advanced analytical techniques such as XRD and Hirshfeld surface analysis, the arrangement of atoms was detailed and the molecular interactions underpinning the stability and reactivity of the molecule were visualized. We found that oxygen atoms play the critical role of forming polar features and hydrogen bonds, which facilitate the molecule's interaction with its environment. Hirshfeld surface analysis has provided a deeper understanding of how these interactions affect the behavior of the molecule in different solvent conditions, which is vital for predicting its reactivity and pharmacological potential. Detailed mapping of the electron density, curvature and surface shape indices not only confirmed the high crystallinity of 2-acetoxybenzoic acid, but also illuminated potential sites of chemical activity and interactions. These insights are valuable for theoretical and computational modeling of similar molecular systems and can guide practical applications in materials science and pharmaceuticals.

REFERENCES

[1] Klemperer, W. (1992). Intermolecular interactions. *Science*, *257*(5072), 887-888.
[2] Kaplan, I. G. (2006). *Intermolecular interactions: physical picture, computational methods and model potentials*. John Wiley & Sons.
[3] Spackman, M. A., & McKinnon, J. J. (2002). Fingerprinting intermolecular interactions in molecular crystals. *CrystEngComm*, *4*(66), 378-392.
[4] Hunter, C. A. (2004). Quantifying intermolecular interactions: guidelines for the molecular recognition toolbox. *Angewandte Chemie International Edition*, *43*(40), 5310-5324.
[5] Dunitz, J. D. (1995). Win some, lose some: enthalpy-entropy compensation in weak intermolecular interactions. *Chemistry & biology*, *2*(11), 709-712.
[6] Fox, J. M., Zhao, M., Fink, M. J., Kang, K., & Whitesides, G. M. (2018). The molecular origin of enthalpy/entropy compensation in biomolecular recognition. *Annual Review of Biophysics*, *47*(1), 223-250.
[7] Muz, I., & Kurban, M. (2022). Zinc oxide nanoclusters and their potential application as CH4 and CO2 gas sensors: insight from DFT and TD-DFT. *Journal of Computational Chemistry*, *43*(27), 1839-1847.
[8] Ullah, Z., Sattar, F., Kim, H. J., Jang, S., Mary, Y. S., Zhan, X., & Kwon, H. W. (2022). Computational study of Pd–Cd bimetallic crystals: spectroscopic properties, hirshfeld surface analysis, non-covalent interaction, and sensor activity. *Journal of Molecular Liquids*, *365*, 120111.
[9] Zhang, Y., Luo, Y., Tang, L., & Hu, J. (2024). Unveiling regularities of B12N12-X nanocages as a drug delivery vehicle for the nitrosourea: the influence of periods and groups. *Journal of Molecular Liquids*, *393*, 123607.
[10] Spackman, M. A., & Jayatilaka, D. (2009). Hirshfeld surface analysis. *CrystEngComm*, *11*(1), 19-32.
[11] Seth, S. K. (2014). Structural elucidation and contribution of intermolecular interactions in O-hydroxy acyl aromatics: Insights from X-ray and Hirshfeld surface analysis. *Journal of molecular structure*, *1064*, 70-75.
[12] Suda, S., Tateno, A., Nakane, D., & Akitsu, T. (2023). Hirshfeld surface analysis for investigation of intermolecular interaction of molecular crystals. *International Journal of Organic Chemistry*, *13*(2), 57-85.
[13] Clausen, H. F., Chevallier, M. S., Spackman, M. A., & Iversen, B. B. (2010). Three new co-crystals of hydroquinone: crystal structures and Hirshfeld surface analysis of intermolecular interactions. *New Journal of Chemistry*, *34*(2), 193-199.
[14] Kebiroglu, H., & Ak, F. (2023). Molecular structure, geometry properties, HOMO-LUMO, and MEP analysis of acrylic acid based on DFT calculations. *Journal of Physical Chemistry and Functional Materials*, *6*(2), 92-100.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 175-195, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1482017
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Asenkron Motor İç Bilezik ve Dış Bilezik Rulman Arızalarının Dalgacık Dönüşümü Tabanlı Entropi Analizleri

Entropy Analyses of Inner Race and Outer Race Bearing Faults of Induction Motor Based on Wavelet Transform

Ahmet Kabul[1*]

Geliş / Received: 10/05/2024 ***Revize / Revised: 03/07/2024*** ***Kabul / Accepted: 08/07/2024***

ÖZ

Rulman arızaları, üç fazlı asenkron motorlarda karşılaşılan baskın arıza tipidir. Titreşim sinyalleri rulman arızalarının tespiti için yaygın olarak analiz edilen sinyallerdir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT-Discrete Wavelet Transform) asenkron motor arızalarının tespitinde kullanılan popüler sinyal işleme yöntemlerinden bir tanesidir. DWT, titreşim sinyallerini frekans bileşenlerine ayırarak her bir bileşeni belirlenen ölçekte analiz eden bir yöntemdir. DWT, özellik çıkarma tabanlı arıza tespit uygulamalarında pratik bir yaklaşım sağlamaktadır. DWT analizlerinde genellikle birden çok istatistiki parametrenin çıkarımı yapılmakta, bu durum da hesaplama karmaşıklığına yol açabilmektedir. Asenkron motor iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları, titreşim sinyalleri standart sapmalarında motorun sağlam çalışma durumuna göre küçük değişimler meydana getirmektedir. Entropi hesaplamaları ile bu küçük değişimler anlamlı çıktılara dönüştürülerek asenkron motor durum izleme çalışmaları yapılabilmektedir. Bilgi teorisi bir veri kümesindeki belirsizlikleri/düzensizlikleri hesaplayan istatistiksel hesaplama tabanlı bir yöntemdir. Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri literatürde öne çıkan bilgi teorisi yaklaşımlarıdır. Bu çalışmada entropi hesaplamalarının ihtiyaç duyduğu istatistiki parametre, titreşim sinyallerine uygulanan DWT sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyali standart sapmasıdır. Bu çalışmada Mendeley veri portundaki açık-kaynak titreşim verileri kullanılarak rulman arızaları tespiti yapılmıştır. Entropi ile rulman arıza durumları arasındaki geçişe bağlı olarak bir eğim açısı hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki Renyi entropi ile asenkron motorun farklı şiddetlerdeki iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarında **75°** ve üzerinde eğim açıları elde edilmektedir. Bu yüksek değer, tek bir özellik çıkarma ve Renyi entropisine dayalı DWT analizinin asenkron motor rulman arızası tespitinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler- Rulman Arızaları, Üç Fazlı Asenkron Motorlar, Titreşim Sinyalleri, DWT, Renyi Entropi

ABSTRACT

Bearing faults are the dominant fault of three phase induction motors. Vibration signals are commonly analysed signals for the detection of bearing faults. The Discrete Wavelet Transform (DWT) is one of the popular signal processing methods that is used to detect induction motor faults. DWT is a method that decomposes vibration signals into frequency components and analyses each component at a specified scale. DWT provides a practical approach in fault detection applications based on the feature extraction. Multiple statistical parameters are typically

[1]*Sorumlu yazar iletişim: ahmetkabul@mehmetakif.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-9579-2757)
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Burdur, Türkiye

extracted in DWT analyses which can lead to computational complexity. Inner race and outer race bearing faults of induction motors cause slight variations in the standard deviations of the vibration signals if they are compared with the healthy operating condition of induction motor. Through entropy calculations, these small variations can be transformed into meaningful outputs for condition monitoring operations of induction motors. Information theory is a statistical based computational method that calculates the uncertainties/irregularities within a dataset. Shannon, Renyi and Tsallis entropies are prominent approaches of information theory found in the literature. In this paper, the statistical parameter required for entropy calculations is the standard deviation of the 6th level detail coefficients obtained from DWT that applied to the vibration signals. In this study, open-source vibration signals dataset from the Mendeley data port were used for bearing faults detection. A slope angle which depends on the change of the bearing fault conditions is calculated by applying entropy. The results show that slope angles of $\mathbf{75°}$ and above are obtained for inner race and outer race bearing faults of varying severity in the induction motor by applying Renyi entropy. These high slope values suggest that Renyi entropy, in conjunction with single-feature DWT analysis, is a viable method for detecting bearing faults in induction motors.

Keywords- Bearing Faults, Three Phase Induction Motors, Vibration Signals, DWT, Renyi Entropy

I. GİRİŞ

Asenkron motorlar güvenilirlikleri, sağlam yapıları ve bakım kolaylıkları nedeniyle pompa, fan, konveyör bant vb. endüstriyel yüklere mekanik enerji sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımlarından dolayı endüstriyel üretim yapan işletmelerin bakım operasyonlarının temel öznelerinden bir tanesini; asenkron motorların reaktif, periyodik, koruyucu ve kestirimci bakım izlemleri oluşturmaktadır. Reaktif bakım, asenkron motor arızalarının katastrofik boyuta ulaşması sonucu uygulanırken; periyodik ve koruyucu bakım teknikleri asenkron motorların sağlıklı çalışma ömürlerini uzatmak için uygulanan bakım tekniklerdir. Bu bakım tekniklerinin yanında asenkron motorların durum izlemesini yaparak motor arızalarını erken evrelerde tespit etmeyi hedefleyen kestirimci bakım tekniği de günümüzde uygulanan veri analizi temelli akıllı bakım tekniklerine yol göstermektedir. Veri analizi temelli akıllı bakım tekniklerinde sıklıkla analiz edilen sinyaller stator akım ve titreşim sinyalleridir [1-3].

Asenkron motor arızaları elektriksel ve mekanik arızalar olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Asenkron motor arıza dağılımlarına yönelik yapılan çalışmalarda baskın arızanın %44 ile rulman arızalarına ait olduğu tespit edilmiştir. Rulman arızalarını sırasıyla %26 ile stator sargı kısa devre arızaları, %18 ile kırık rotor çubukları ve %12 ile diğer arızalar takip etmektedir [4]. Baskın arıza olarak ortaya çıkan rulman arızalarının nedenleri arasında yağlanma periyodundaki eksiklikler/hatalar, aşırı yük altında çalışmaları, gerilim dalgalanmaları, vb. sayılabilir. Bu tarz ve benzeri sebepler asenkron motor rulmanlarının sıklıkla arızalanmasına ve birçok rulmanın $L10$ ömrüne ulaşamadan değiştirilmesine neden olmaktadır [5]. Rulman arızaları dış bilezik, iç bilezik, kafes ve bilye arızaları olarak incelenmekte ve analiz edilmektedir [6].

Rulman arızalarının tespitini yapan birçok kestirimci bakım cihazı sinyal işleme yöntemi olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform) tabanlı analizler yapmaktadır. Bu cihazların genellikle titreşim sinyali analizi ile rulman arızalarını tespit etmesi ve analizler için belli bir süredeki sinyal kayıtlarını kullanmaları, durağan sinyal analizlerinde etkili ve hızlı sonuçlar sunan FFT yöntemini tercih edilebilir kılmaktadır. Ancak durum izleme tabanlı kestirimci bakım tekniğinde sinyal yapılarının durağan olmayan sinyallerden oluşması, tek başına FFT analizini başta çözünürlük olmak üzere birçok konuda yetersiz kılmaktadır [7-8]. Araştırmacılar on yıllardır FFT analizine alternatif olabilecek Hilbert-Huang Dönüşümü (HHT-Hilbert-Huang Transform), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT-Short Time Fourier Transform), Deneysel Mod Ayrıştırma (EMD-Empirical Mode Decomposition), vb. farklı sinyal işleme yöntemleri üzerinde çalışmaktadırlar [9]. Önerilen bu yöntemlerin ortak noktası özellik çıkarımı tabanlı sinyal işleme yöntemleri olmalarıdır. Dalgacık Dönüşümü (WT-Wavelet Transform) yöntemi de özellik çıkarımlı bir yöntem olarak asenkron motor arızalarının tespitinde tercih edilen zaman-frekans tabanlı bir sinyal işleme yöntemidir [10-12]. WT yönteminde analiz edilen sinyallerin özellik çıkarımı için genellikle sinyallere ait birden fazla istatistiki özelliğin çıkarımı yapılmaktadır. Tobi vd. tarafından santrifüj pompa arızalarını tespit etmek için yapılan bir çalışmada tercih edilen WT yönteminin analizi için pompaya ait motor titreşim sinyallerine ait altı adet özellik çıkarımı (basıklık, etkin değer, tepe değer, tepe faktörü, darbe faktörü ve biçim faktörü) yapılmıştır [13]. Chikham ve Singh tarafından asenkron motor kırık rotor çubuğu ve rulman arızalarını tespit etmek için yapılan bir çalışmada kullanılan WT yönteminin analizi için asenkron motor stator akım sinyallerine ait enerji, standart sapma, çarpıklık, etkin değer ve varyans değerleri hesaplanmıştır [14]. Ali vd. tarafından asenkron motor kırık rotor çubuğunun tespiti için akım ve titreşim sinyallerine Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT-Discrete Wavelet Transform) uygulanarak; ilgili sinyallere ait ortalama, medyan, standart sapma, medyan mutlak sapma, ortalama mutlak sapma, ortalama norm ($L1$ norm), ortalama-kare norm ($L2$ norm) ve maksimum norm istatistiki parametreleri hesaplanmıştır [15]. Dhamande ve Chaudhari tarafından dişli

arızalarının tespiti için yapılan çalışmada titreşim sinyalleri Sürekli Dalgacık Dönüşümü (CWT-Continuous Wavelet Transform) ve DWT ile analiz edilmiştir. Çalışmada zaman tanım aralığındaki sinyallere ait on üç farklı istatistiksel parametre, frekans tanım aralığındaki sinyallere ait on dört farklı istatistiki parametre için özellik çıkarımı yapılmıştır [16]. Dişli arızalarının tespitine yönelik Inturi vd. tarafından yapılan bir başka çalışmada DWT ile EMD sinyal işleme yöntemleri birlikte kullanılarak, titreşim sinyallerine ait enerji, minimum değer, etkin değer ve basıklık parametrelerinin istatistiksel çıkarımları yapılmıştır [17].

Birden fazla istatistiki parametrenin özellik çıkarımının yapıldığı çalışmalarda temel hedef, asenkron motor arızalarının analiz edilen sinyal/sinyaller üzerinden neden olduğu değişimleri ve değişim oranlarını tespit ederek motor arızalarının tespitini ve sınıflandırmasını yapabilmektir. Asenkron motorların erken evre arızalarında bu sinyallerin istatistiki parametre değişimleri de minimum düzeydedir. Bu nedenle istatistiki parametre tabanlı yapılan arıza tespit çalışmalarında birden fazla parametrenin analiz edilme durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durum da hesaplama sürelerinin uzamasına ve hesaplama karmaşıklığının artmasına neden olabilmektedir. Entropi tabanlı sinyal işleme yöntemleri, özellik çıkarımı tabanlı arıza tespiti yapan sinyal işleme yöntemlerinin bu önemli kısıtına etkili bir çözüm önerebilmektedir [18].

Shannon tarafından gürültülü haberleşme sinyallerindeki bilgi kayıplarını hesaplamak için literatüre kazandırılan entropi, Jayne tarafından termodinamiğe, Boltzmann tarafından da istatistik bilimine uyarlanmıştır. Günümüzde en geniş anlamıyla bir sistemdeki/bilgi paketindeki düzensizliği ifade eden entropi kavramı, birçok bilim dalında yaygın bir kullanıma sahiptir [19-21]. Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar analiz edilen sinyaller üzerinde bozulmalara ve değişimlere neden olmaktadır. Entropi, düzensizlik tespitinde kullanılan bir yaklaşım olduğu için arıza durumlarında sinyallerde ortaya çıkan bu düzensizliklerin analizleri de entropi ile yapılabilmektedir. Guo ve arkadaşları tarafından asenkron motor rulman arızalarının tespiti için önerilen sinyal işleme yönteminin özellik çıkarımında entropiden yararlanılmıştır [22]. Maden sektöründe kullanılan asenkron motorlardaki kırık rotor çubuğu, statik ve dinamik eksenel kaçıklık arızalarının tespitini amaçlayan bir başka çalışmada da yine entropiden yararlanılmıştır [23]. Ünsal tarafından yapılan bir başka çalışmada da asenkron motorlardaki paralel hizalama hatalarının analizi ve tespiti entropi hesaplamalarından yararlanılarak yapılmıştır [24].

WT ile entropinin asenkron motor arıza tespitinde birlikte kullanıldığı çalışmalar da güncel çalışma konuları arasındadır. Han vd. tarafından asenkron motor rulman arızalarının tespitine yönelik yapılan bir çalışmada titreşim sinyallerine Shannon entropisi ve WT tabanlı bir sinyal işleme yöntemi uygulanmıştır [25]. Sharma vd., WT ve Permütasyon entropisi yöntemlerini kullanarak titreşim sinyallerini analiz etmişler ve asenkron motor rulman arızalarını tespit etmişlerdir [26]. Malhotra vd. tarafından yapılan bir başka çalışmada WT ile Bulanık entropi birlikte kullanılarak asenkron motor rulman arızaları tespit edilmiştir [27]. Entropi analizleri ile birlikte kullanılan WT yönteminde çoklu özellik çıkarımı yapılan çalışmalara literatürde rastlansa da tekil özellik çıkarımlı entropi analizlerinin yapıldığı çalışmalara oldukça az rastlanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron motor iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının oluşturulduğu bir deney düzeneğinden elde edilen titreşim sinyalleri analiz edilmiştir. Veri analizi için "Mendeley Data" kütüphanesinde açık kaynak olarak sunulan "Triaxial Bearing Vibration Dataset of Induction Motor under Varying Load Conditions" adlı çalışmadaki titreşim sinyalleri kullanılmıştır [28].

Bu çalışmada DWT sonucu elde edilen detay katsayıları sinyalinin seçilen tekil istatistiki parametresine sırasıyla Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri uygulanarak hesaplanan sonuçlar yorumlanmaktadır. Farklı arıza seviyelerinin her birisi için entropi sonuçları elde edilerek, arıza seviyeleri arasındaki geçişi tanımlayan eğim açıları hesaplanmaktadır. Hesaplanan eğim açılarına göre de en uygun entropi yöntemi önerilmektedir. Makalenin organizasyonu şu şekildedir. Çalışmanın 2. Bölümünde kullanılan yöntemlerin teorik bilgileri, 3. Bölümünde açık kaynak olarak kullanılan verilere ait bilgiler ve 4. Bölümünde analiz sonuçları sunulmaktadır. Çalışma, analiz sonuçlarının değerlendirildiği Sonuçlar Bölümü ile sonlandırılmaktadır.

II. DWT VE ENTROPİ

A. DWT

DWT, zaman-frekans tanım aralığı analizlerinde tercih edilen, ana dalgacık ve bu dalgacığa bağlı seçilen alt dalgacık kümelerinin birlikte kullanıldığı bir sinyal işleme yöntemidir. DWT yönteminde analiz edilen sinyal frekans bileşenlerine bölünür. Sinyalin düşük frekans bileşenleri yaklaşık, yüksek frekans bileşenleri ise detay olarak adlandırılan iki seviyeye bölünür. Pratikte ise bu işlem düşük-geçiren ve yüksek-geçiren filtre blokları yardımıyla gerçekleşir. Alçak ve yüksek geçiren filtrelerin DWT yönteminde temsili, "j" ölçeği ve "k" kaydırma parametrelerinin tanımlanmasıyla yapılmaktadır. j ve k parametreleri tamsayı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 1'te ana dalgacığın ikinci dereceden hesaplanmasında kullanılan denklem sunulmaktadır [29].

$$\varphi(j,k)(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}}\varphi(\frac{(t-k2^j)}{2^j}) \quad (1)$$

Eşitlik 1'de t zamanı, $\varphi(t)$ ise fonksiyonun ana (temel) dalgacığını temsil etmektedir. DWT, yüksek frekanslarda ve düşük frekanslarda sırasıyla iyi frekans ve zaman çözünürlüğüne sahiptir. DWT analizinde analiz edilen sinyal ana dalgacıkla çarpılarak bileşenlerine ayrıştırılır. Analiz edilen sinyalin uzunluğu 2^N olarak tanımlanırsa, $x(t)$ sinyalinin ana dalgacık ile konvolüsyonu sonucu alt dalgacıklar kümesi Eşitlik 2'teki gibi hesaplanır. Konvolüsyon işleminin sonucu Eşitlik 3'te verilmektedir [29].

$$y[n] = \big(x * \varphi(j,k)(t)\big)[n] \quad (2)$$

$$dwt(j,k)(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}}\int x(t)\,\varphi(\frac{(t-k2^j)}{2^j})dt \quad (3)$$

DWT analizinde ölçekleme ($\emptyset$) fonksiyonu da Eşitlik 1'de tanımlanan temel dalgacığa bağlı olarak türetilir. Ölçekleme fonksiyonu ($\emptyset$) Eşitlik 4'teki gibi hesaplanır [30].

$$\emptyset(j,k)(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}}\emptyset(\frac{t-k2^j}{2^j}) \quad (4)$$

Ölçekleme ($\emptyset$) ve dalgacık (φ) fonksiyonlarının tanımlanmasında sırasıyla $h[n]$ ve $g[n]$ bileşenleri kullanılmaktadır. n örnek sayısı olmak üzere, h alçak geçiren filtreyi (AGF) ve g yüksek geçiren filtreyi (YGF) temsil etmektedir. Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da sırasıyla AGF yaklaşık katsayıları (A) ve YGF detay katsayıları (D) hesaplamaları sunulmaktadır [31].

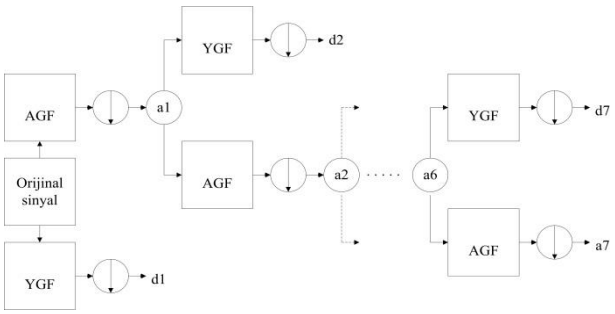
$$A_{j+1}(k) = \sum_n h(n-2k)A_j(n) \quad (5)$$

$$D_{j+1}(k) = \sum_n g(n-2k)A_j(n) \quad (6)$$

Dalgacığın çözümleme seviyesine Eşitlik 7 kullanılarak karar verilmektedir [32, 33].

$$N_{seviye} = int(\frac{\log(\frac{f_s}{f})}{\log(2)}) \quad (7)$$

Çalışmada kullanılan açık kaynak verilerin künye bilgileri [28] incelendiğinde örnekleme frekansı (f_s) 10 kHz, motor besleme gerilimi frekansı 50 Hz olarak verilmiştir. Eşitlik 7 çözüldüğünde 7 veya 8 seviyeli bir çözümlemenin analiz için yeterli olacağı hesaplanmaktadır. Çalışmada tercih edilen DWT'ye ait çözümleme aşamaları Şekil 1'de sunulmaktadır [32]. Çözümleme aşamaları Eşitlik 7'de hesaplanan 7. seviyeye kadar devam etmektedir.



Şekil 1. DWT'ye ait sinyal çözümleme aşamaları

Çalışmada titreşim sinyallerinin DWT analizi yapılmaktadır. Her bir yaklaşık ve detay sinyalleri sırasıyla Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'ta verilen frekans bantlarına göre hesaplanmaktadır [32].

$$f_{Aj} = [(0) \rightarrow (\frac{f_s}{2^{j+1}})] \quad (8)$$

$$f_{Dj} = [(\frac{f_s}{2^{j+1}}) \rightarrow (\frac{f_s}{2^j})] \quad (9)$$

Her bir yaklaşık ve detay sinyalinin frekans bantları Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Frekans bantlarının çoklu seviye çözümlemeleri.

Seviyeler, j	Yaklaşık Sinyaller, A_j (Hz)	Detay Sinyaller, D_j (Hz)
1	0-4480	4480-8960
2	0-2240	2240-4480
3	0-1120	1120-2240
4	0-560	560-1120
5	0-280	280-560
6	0-140	140-280
7	0-70	70-140

B. Shannon Entropi

Shannon entropi bir bilgi paketindeki belirsizlik ve düzensizliğin ölçüsüdür. Asenkron motor arızaları motordan ölçülen sinyalin beklenen değerinde belirsizliğe yol açtığı için Shannon entropi hesaplamalarında kullanılabilme potansiyeli barındırmaktadır. Shannon entropi ile doğruluğundan emin olunan durumlar 0 $(sıfır)$ değerini almaktayken, belirsizliğin maksimum olduğu durumlarda entropi değeri 1 (bir) olarak hesaplanmaktadır. Entropi veri/sinyal paketindeki belirsizliği olasılık temelli hesaplamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan bütün entropi hesaplamalarında motorun arızalı olma olasılığı (q_i) kullanılmaktadır. Entropi sinyaldeki belirsizliğe odaklandığı için hesaplamalar sırasında referans değerlere ihtiyaç duymaktadır.

Entropi hesaplaması bu çalışmada DWT ile birlikte kullanılmaktadır. DWT, sağlam motor ve iç bilezik rulman veya dış bilezik rulman arızalarının oluşturulduğu test düzeneğinden elde edilen farklı arıza şiddetlerindeki titreşim sinyallerine uygulanmaktadır (Bu çalışmada açık-kaynak veri kullanılmıştır [28]). Entropi, titreşim sinyallerindeki arıza kaynaklı değişimlere odaklanmaktadır. Entropi, olasılık temelli bir hesaplama yöntemi kullandığı için entropi analizi yapılacak sinyale ait istatistiki bir parametrenin özellik çıkarımı yapılmalıdır. Literatürdeki çalışmalarda DWT analizi sonucu elde edilen sinyallere ait genellikle birden çok istatistiki parametrenin çıkarımının yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyaline ait sadece standart sapma değerleri özellik çıkarımı amaçlı kullanılmaktadır.

Entropi analizi bu çalışmada rulmanın sağlam çalışma durumunda ve rulmanda meydana gelen altı farklı arıza şiddeti altında yapılmaktadır. Her bir durumda entropi hesabının yapılabilmesi için titreşim sinyali DWT analizinin standart sapma değerinin olasılık hesabına ihtiyaç vardır. Olasılık hesabında asenkron motorun sağlam çalışma durumuna ait standart sapma değerleri referans değer olarak kullanılmaktadır. Asenkron motorun sağlam olarak çalıştırıldığı durumda motorun sağlam olma olasılığı 1 $(p_i = 1)$, arızalı olma olasılığı ise 0'dır $(q_i = 0)$. Shannon entropi hesaplamasında motorun arızalı olma olasılık değeri kullanıldığı için buradaki q_i değerine küçük bir sabit sayı eklemesi $(\varepsilon = 0{,}0001)$ yapılmaktadır. Motorun sağlam olarak çalıştırıldığı durumda motorun arızalı olma olasılığı (q_i) $0{,}0001$ olarak kabul edilmektedir.

Entropi analizi için kullanılacak referans veri motorun sağlam çalıştığı durumda kaydedilen titreşim sinyallerinin DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay katsayıları sinyali standart sapmasıdır. Standart sapma (SS) hesaplaması Eşitlik 10 ile yapılmaktadır [34].

$$SS = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da sunulan ifadede N, örneklem sayısını; x_i, hesaplanan değeri; $\bar{x}$ hesaplanan verilerin ortalama değerini ifade etmektedir. Standart sapma hesaplaması sırasıyla motorun altı farklı rulman arızası şiddeti için de yapılmaktadır. Dolayısıyla motor toplamda yedi farklı durumda çalıştırılmaktadır. Motorun her bir çalışma durumu i katsayısıyla ifade edilirse, motorun çalışma durumlarına göre kullanılan i değerleri Tablo 2'deki gibi olmaktadır.

Tablo 2. Motorun çalışma durumuna göre entropi hesaplamasında kullanılan notasyonlar.

	Sağlam Çalışma Durumu	1. Seviye Arıza Şiddeti	2. Seviye Arıza Şiddeti	3. Seviye Arıza Şiddeti	4. Seviye Arıza Şiddeti	5. Seviye Arıza Şiddeti	6. Seviye Arıza Şiddeti
i	0	1	2	3	4	5	6

Standart sapma değerleri kullanılarak istenilen çalışma durumu için motorun sağlam olma olasılığı (p_i) Eşitlik 11 ile hesaplanmaktadır.

$$p_i = \frac{SS_0}{SS_i} \tag{11}$$

Aynı çalışma durumu için motorun arızalı olma olasılığı (q_i) Eşitlik 12 ile hesaplanmaktadır.

$$q_i = 1 - p_i \tag{12}$$

Motorun arızalı olma olasılık değerine göre Shannon entropi (SE) Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanmaktadır [35].

$$SE = -\sum_{i=1}^{N} q_i * (\log_2 q_i) \tag{13}$$

Bu çalışmada arıza şiddeti kademeli olarak arttırılarak Tablo 3'te belirtilen geçiş durumları oluşturulmaktadır.

Tablo 3. Motorun çalışma durumuna göre elde edilen geçiş durumları.

Entropi Geçiş Durumları Hesabı
Sağlam→1. Seviye Arıza Şiddeti
1. Seviye Arıza Şiddeti→2. Seviye Arıza Şiddeti
2. Seviye Arıza Şiddeti→3. Seviye Arıza Şiddeti
3. Seviye Arıza Şiddeti→4. Seviye Arıza Şiddeti
4. Seviye Arıza Şiddeti→5. Seviye Arıza Şiddeti
5. Seviye Arıza Şiddeti→6. Seviye Arıza Şiddeti

Çalışmada entropi değerlerinin hesaplamasındaki temel amaç asenkron motorun arıza tespitinde kullanılabilecek nümerik bir çıktı sağlamaktır. Bu nümerik değer hesabı için Tablo 3'te sunulan her bir geçiş durumunun eğim açısı hesaplanmaktadır. Eğim açısı hesabı için iki değişken parametreye ihtiyaç vardır. Birinci değişken parametre hesabı her bir geçiş durumunda ifade edilen iki farklı rulman çalışma durumu için hesaplanan entropi değerleri farkı (ΔSE_i); ikinci değişken parametre ise her bir geçiş durumunda ifade edilen iki farklı rulman çalışma durumu için hesaplanan motorun arızalı olma olasılık değerleri farkıdır (Δq_i). ΔSE_i ve Δq_i hesaplamaları sırasıyla Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak yapılmaktadır.

$$\Delta SE_i = |SE_i - SE_{i-1}| \tag{14}$$

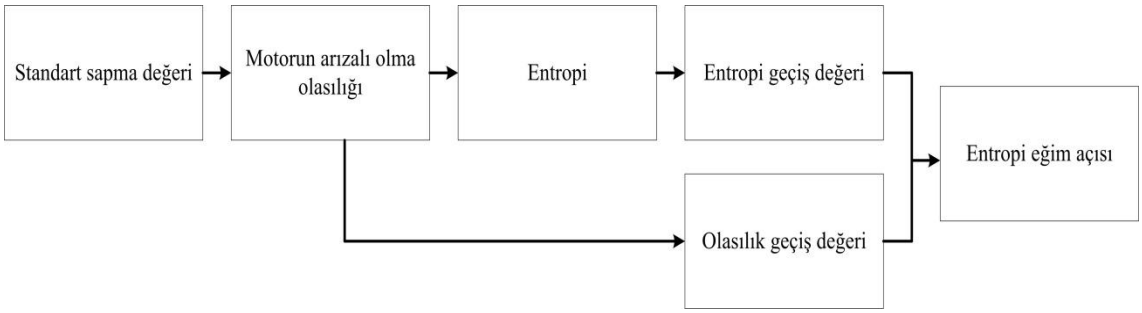
$$\Delta q_i = |q_i - q_{i-1}| \tag{15}$$

Entropi eğim açısı hesabı Eşitlik 16 ile yapılmaktadır [35].

$$\propto = \tan^{-1} \frac{\Delta SE_i - \Delta SE_{i-1}}{\Delta q_i - \Delta q_{i-1}} \tag{16}$$

Arıza tespiti amaçlı kullanılacak entropi eğim açısı hesaplamasının akış diyagramı Şekil 2'de sunulmaktadır. Çalışmada bilgi kuramı teorisi altında değerlendirilen Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri

hesaplamaları yapılmaktadır [36]. Sunulan akış diyagramı bir sonraki bölümlerde sırasıyla anlatılacak Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları için de kullanılmaktadır.



Şekil 2. Entropi eğim açısı hesaplama aşamaları

C. Renyi Entropi

Shannon entropinin özelleşmiş bir versiyonu olan ve bilgi teorisi kuramı içerisinde yer alan Renyi entropi (RE) Eşitlik 17 ile hesaplanmaktadır [37].

$$RE = \frac{1}{1-\alpha}\log_2\left(\sum_{i=1}^{N} q_i^{\alpha}\right) \tag{17}$$

Renyi entropi, α dereceli entropi olarak da bilinmektedir. α derecesinin artması Renyi entropi değerindeki sapmayı arttırırken, bu derece sıfıra yaklaştıkça çok daha net sonuçlar alınabilmektedir. α derecesinin matematiksel doğruluk açısından 1'den büyük seçilmesi gerekmektedir [38-39]. Çalışmada α derece katsayısı 2 olarak tercih edilmiştir.

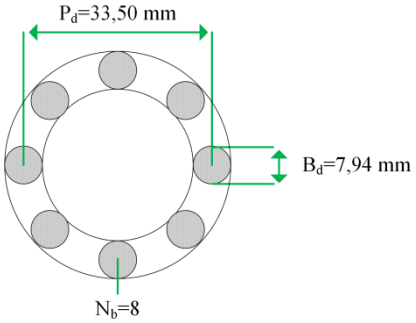
D. Tsallis Entropi

Shannon entropinin bir başka özelleşmiş versiyonu olan ve bilgi teorisi kuramı içerisinde yer alan Tsallis entropi (TE) Eşitlik 18 ile hesaplanmaktadır [40].

$$TE = \frac{1}{\alpha-1}\left(1 - \sum_{i=1}^{N} q_i^{\alpha}\right) \tag{18}$$

III. YÖNTEM

Makale çalışmasında MendeleyData kütüphanesinde Kumar vd. tarafından 2022 yılında yapılan çalışma sonucu elde edilen açık-kaynak titreşim verileri analiz amaçlı kullanılmıştır. Söz konusu çalışma kapsamında üç eksenli titreşim verileri Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMs-Micro Electromechanical Systems) tabanlı bir ivmeölçer ile ölçülmüştür. Titreşim verileri 12 farklı rulman durumu için 3 farklı yük kademesinde $10.000\ Hz$ örnekleme frekansı ile kaydedilmiştir [41]. İlgili çalışmada analizi yapılan rulman; $6204-2Z/C3$ kodlu rulmandır. Rulman boyutları Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 3. 6204-2Z/C3 rulman boyutları

Şekil 3'te P_d aynı merkezli iki bilye arasındaki mesafeyi, B_d bilyelerin çapını ve N_b bilye sayısını belirtmektedir. Çalışmada iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları incelenmektedir. Analizi yapılan rulman durumlarına ait bilgiler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Motor rulman arızaları bilgileri.

Rulman Durumu	Rulman Arızası Yeri	Rulman Arızası Derinliği (mm)	Asenkron Motor Yük Değeri (W)
Sağlam		---	Yüklü
Arızalı	İç Bilezik	0,7	300
Arızalı	İç Bilezik	0,9	300
Arızalı	İç Bilezik	1,1	300
Arızalı	İç Bilezik	1,3	300
Arızalı	İç Bilezik	1,5	300
Arızalı	İç Bilezik	1,7	300
Arızalı	Dış Bilezik	0,7	300
Arızalı	Dış Bilezik	0,9	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,1	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,3	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,5	300
Arızalı	Dış Bilezik	1,7	300

Çalışmada iç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının analizi yapılmaktadır. Döner mekanik sistemlerde rulman arızaları karakteristik harmonik bileşenleri Eşitlik 19 ve Eşitlik 20 kullanılarak yapılmaktadır [42].

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos\gamma\right) \tag{19}$$

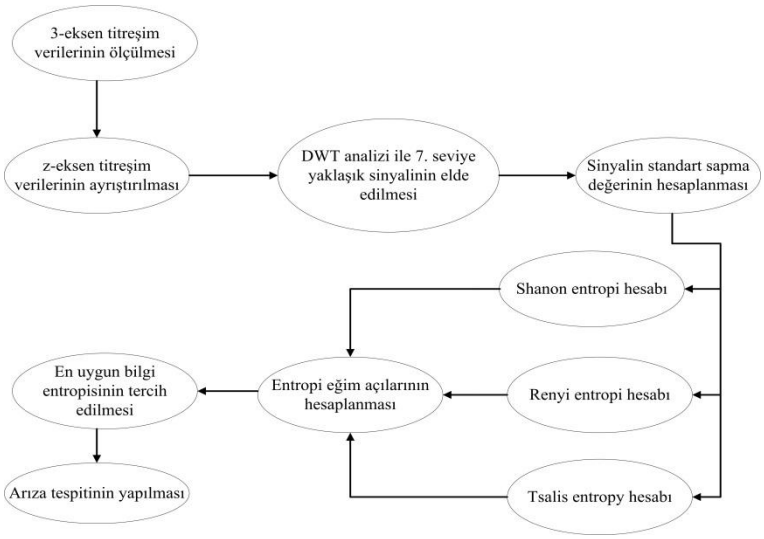
$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\gamma\right) \tag{20}$$

f_i ve f_o sırasıyla iç bilezik ve dış bilezik rulman arızası titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşenlerini; f_r rotor frekansını; γ ise rulman içindeki bilyelerin temas açısını ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan açık-kaynak titreşim sinyallerinin rotor frekansı 49,5 Hz; rulman içindeki bilyelerin temas açısı ise 0° olarak kabul edilmiştir. Şekil 3'te sunulan rulman ölçüleri kullanılarak hesaplanan titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşenleri Eşitlik 21 ve Eşitlik 22'de verilmektedir.

$$f_i = \frac{8}{2} * 49{,}5 * \left(1 + \frac{7{,}94}{33{,}50} \cos 0\right) = 245\ Hz \tag{21}$$

$$f_o = \frac{8}{2} * 49{,}5 * \left(1 - \frac{7{,}94}{33{,}50} \cos 0\right) = 151\ Hz \tag{22}$$

Çalışmada entropi tabanlı DWT arıza tespiti amaçlı kullanılmaktadır. Geliştirilen yöntemde deney düzeneğinde kullanılan asenkron motor üzerinden ölçülen üç eksenli titreşim sinyalleri giriş verisi olarak kullanılmaktadır. Titreşim sinyallerinin z-eksen verileri daha yüksek standart sapma sonuçları verdiği için analizde tercih edilmektedir. z-eksen titreşim verileri DWT analizi ile 7. seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Eşitlik 21 ve Eşitlik 22'de hesaplanan iç bilezik ve dış bilezik rulman arızaları karakteristik harmonik bileşenleri dikkate alındığında, 6. seviye detay katsayıları sinyalinin standart sapmaları sırasıyla Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri için özellik çıkarımı verisi olarak kullanılmaktadır. Çalışmada önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 4'te sunulmaktadır.

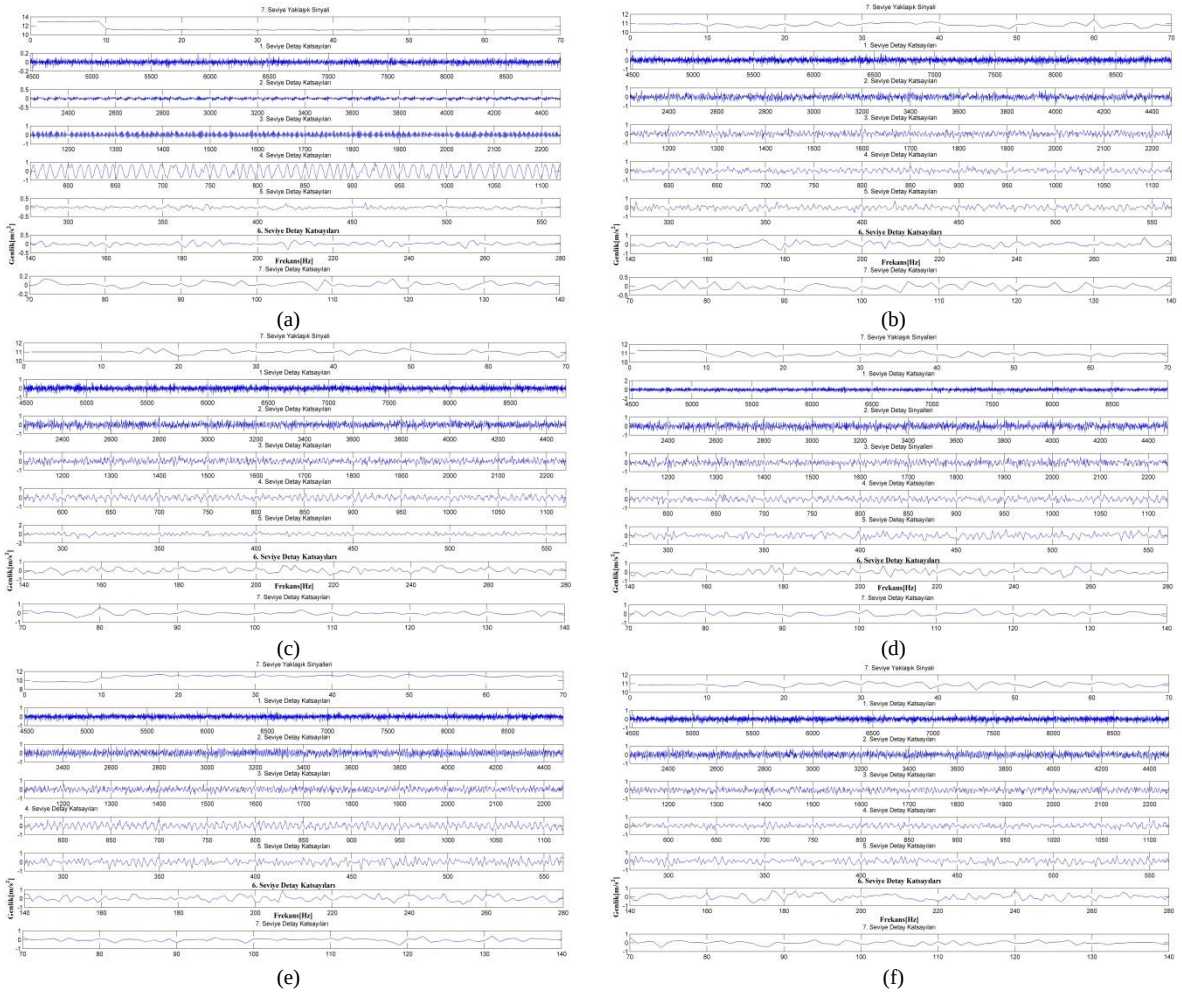


Şekil 4. Önerilen yöntemin akış diyagramı

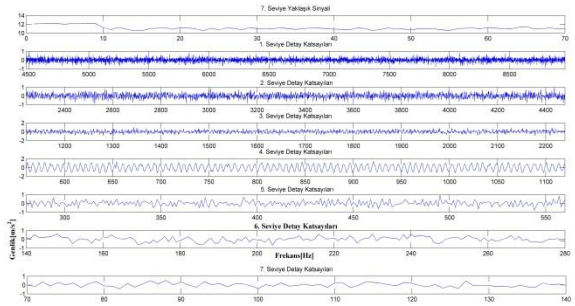
IV. ÖNERİLEN YÖNTEMİN SONUÇLARI

A. İç Bilezik Rulman Arızaları

Önerilen yöntemde titreşim sinyallerine DWT uygulanmaktadır. DWT ile titreşim sinyalleri 7. Seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Tablo 4'te belirtilen sağlam rulman ve altı farklı iç bilezik rulman arızası için elde edilen sonuçlar Şekil 5'te sunulmaktadır.



(a) (b) (c) (d) (e) (f)



(g)

(a) sağlam rotor, (b) 0,7 mm iç bilezik rulman arızası, (c) 0,9 mm iç bilezik rulman arızası, (d) 1,1 mm iç bilezik rulman arızası, (e) 1,3 mm iç bilezik rulman arızası, (f) 1,5 mm iç bilezik rulman arızası, (g) 1,7 mm iç bilezik rulman arızası

Şekil 5. z-ekseni titreşim sinyalleri iç bilezik rulman arızası DWT analiz sonuçları

DWT analizi tamamlanan z-ekseni titreşim sinyallerinin 6. seviye detay sinyallerinin standart sapma değerleri Eşitlik 10 kullanılarak Tablo 5'teki gibi hesaplanır.

Tablo 5. Motor rulman durumuna göre titreşim sinyalleri SS değerleri.

Rulman Durumu	Standart Sapma Değerleri
Sağlam	0,0987
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,2306
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,2515
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,2652
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,2757
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,2854
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,3055

Titreşim sinyalleri standart sapma değerleri kullanılarak asenkron motorun p_i ve q_i değerleri Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 kullanılarak Tablo 6'daki gibi hesaplanır.

Tablo 6. Motor rulman durumuna göre motorun sağlam ve arızalı olma olasılıkları.

Rulman Durumu	p_i	q_i
Sağlam	1	0,0001
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,4280	0,5720
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,3924	0,6076
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,3721	0,6279
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,3580	0,6420
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,3458	0,6542
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,3230	0,6770

Entropi hesaplamalarında belirsizlik durumunun ortaya çıkmaması için rulmanın sağlam olduğu çalışma durumunda $\varepsilon = 0{,}0001$ sabiti q_i hesaplamasına eklenmektedir ($q_i = 1 - p_i + \varepsilon$).

1) Shannon entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerleri bilgi entropisi hesaplamalarında kullanılmaktadır. Shannon entropi (SE), Eşitlik 13 kullanılarak Tablo 7'deki gibi hesaplanır.

Tablo 7. Motor rulman durumuna göre Shannon entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	SE
Sağlam	0,0001	0,0013
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	0,4610
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	0,4368
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	0,4216
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	0,4104
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	0,4005
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	0,3810

Rulman çalışma durumları arasındaki geçişler entropi hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır. Entropi hesaplamalarındaki değişimler rulman çalışma durumlarına göre analiz edildiği için Tablo 3'te sunulan geçişler baz alınmaktadır. Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔSE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 8'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 8. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔSE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	0,4596
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,0242
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0152
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0112
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0099
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0195

Geçiş değerlerinin arıza tespitinde kullanılabilir sonuçlar üretebilmesi için her bir geçiş durumuna ait entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 9'da sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 9. Geçiş değerlerine göre Shannon entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	38,79
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	34,25
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	36,79
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	38,22
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	39,25
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	40,54

2) Renyi entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman durumuna göre hesaplanan q_i ile Renyi entropi (RE), Eşitlik 17 kullanılarak Tablo 10'daki gibi hesaplanır.

Tablo 10. Motor rulman durumuna göre Renyi entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	RE
Sağlam	0,0001	26,5754
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	1,6117
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	1,4376
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	1,3429
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	1,2785
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	1,2244
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	1,1257

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun ve Δq_i ve Renyi entropi farkları (ΔRE_i) Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 11'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 11. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔRE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	24,9637
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,1740
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0947
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0644
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0542
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0986

Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Renyi entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 12'de sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 12. Geçiş değerlerine göre Renyi entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	88,69
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	78,45
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	77,92
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	77,59
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	77,34
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	77,01

3) Tsallis entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman durumuna göre hesaplanan q_i ile Tsallis entropi (TE), Eşitlik 18 kullanılarak Tablo 13'teki gibi hesaplanır.

Tablo 13. Motor rulman durumuna göre Tsallis entropi hesabı..

Rulman Durumu	q_i	TE
Sağlam	0,0001	1,0000
0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5720	0,6728
0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,6076	0,6308
1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,6279	0,6058
1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,6420	0,5878
1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,6542	0,5720
1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,6770	0,5417

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve Tsallis entropi farkları (ΔTE_i) Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 14'teki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 14. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔTE_i
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,5719	0,3272
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	0,0356	0,0420
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	0,0203	0,0250
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	0,0142	0,0180
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	0,0122	0,0158
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	0,0228	0,0303

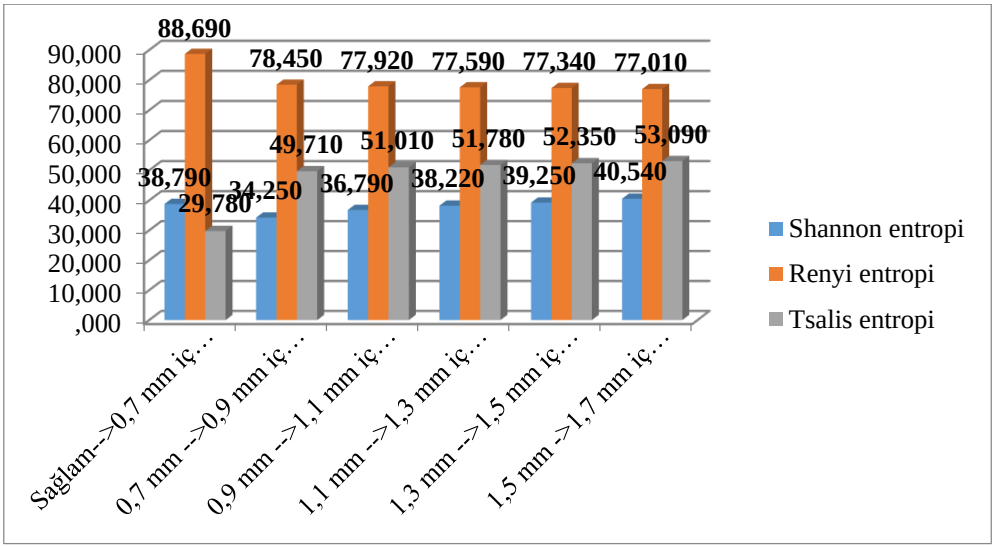
Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Tsallis entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 15'te sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 15. Geçiş değerlerine göre Tsallis entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm iç bilezik rulman arızası	29,78
0,7 mm iç bilezik rulman arızası→0,9 mm iç bilezik rulman arızası	49,71
0,9 mm iç bilezik rulman arızası→1,1 mm iç bilezik rulman arızası	51,01
1,1 mm iç bilezik rulman arızası→1,3 mm iç bilezik rulman arızası	51,78
1,3 mm iç bilezik rulman arızası→1,5 mm iç bilezik rulman arızası	52,35
1,5 mm iç bilezik rulman arızası→1,7 mm iç bilezik rulman arızası	53,09

4)Bilgi teorisi yöntemlerinin karşılaştırılması

Shannon, Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları baz alınarak elde edilen eğim açılarının grafiksel sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır.

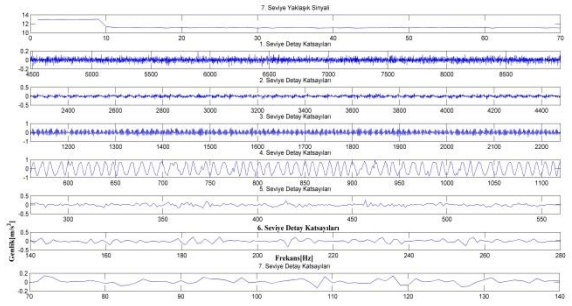


Şekil 6. Bilgi entropisi eğim açıları sonuçları

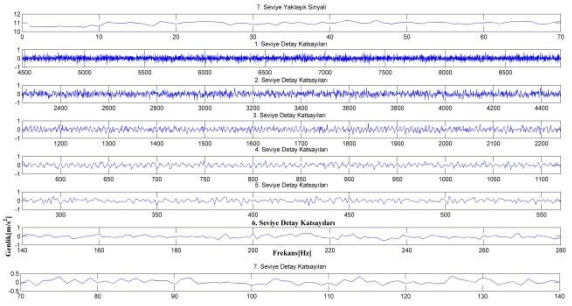
Elde edilen sonuçlar erken evre arıza durumu (Sağlam rulman→0,7 mm iç bilezik rulman arızası geçişi) ve her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar baz alınarak iki farklı kategoride incelenmektedir. Erken evre arıza durumunda Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri sırasıyla 39°, 89° ve 30°'lik eğim açıları vermektedir. Renyi entropi burada sunduğu yüksek eğim açısı ile iç bilezik rulman arızasının erken evre arıza tespitinde diğer bilgi entropilerine göre önemli bir kolaylık sunmaktadır. Her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar incelendiğinde Shannon entropi $35° - 40°$, Renyi entropi $75° - 80°$ ve Tsallis entropi $50° - 55°$ arasında eğim açıları sunmaktadır. Bilgi teorileri içerisinde Renyi entropi sağlamış olduğu yüksek ve sabit sonuçlar ile iç bilezik rulman arızalarının tespitinde Shannon ve Tsallis entropilerine göre daha güvenilir bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Mevcut çalışmada eğim açıları birbirini takip eden arıza şiddetlerine göre hesaplanmaktadır. Arıza şiddetinin belirgin şekilde değişeceği durum senaryolarında (örneğin sağlam rulman→1,3 mm iç bilezik rulman arızası gibi) elde edilen Renyi eğim açıları çok daha yüksek olacaktır.

B. Dış Bilezik Rulman Arızaları

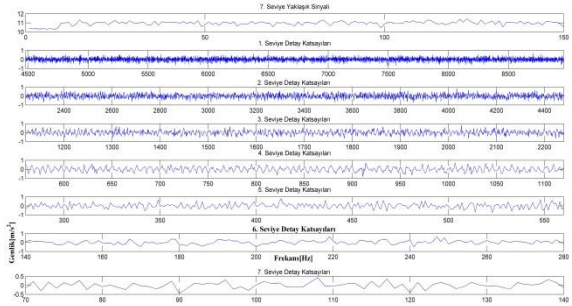
Titreşim sinyallerine uygulanan DWT ile titreşim sinyalleri 7. Seviye yaklaşık ve detay sinyallerine ayrıştırılmaktadır. Tablo 4'te belirtilen sağlam rulman ve altı farklı dış bilezik rulman arızaları için elde edilen sonuçlar Şekil 7'de sunulmaktadır.



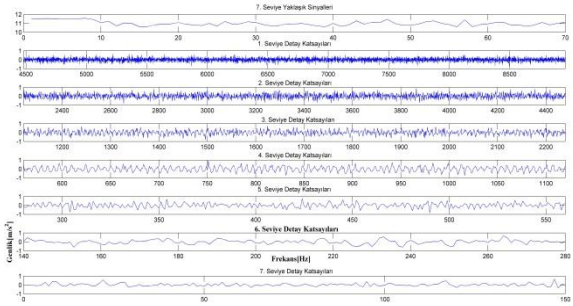
(a)



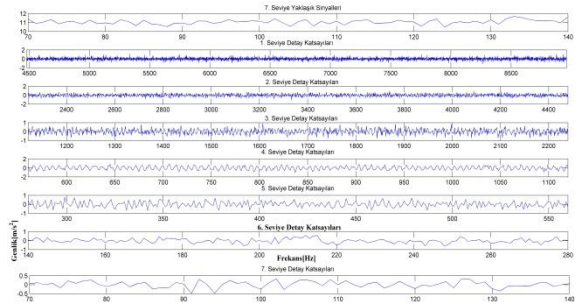
(b)



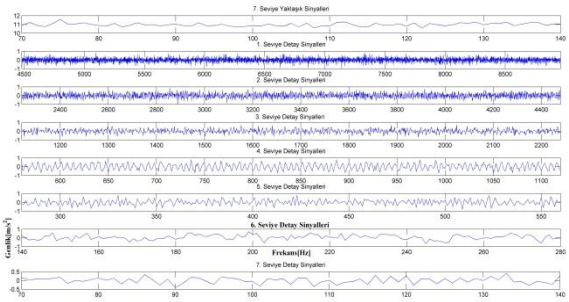
(c)



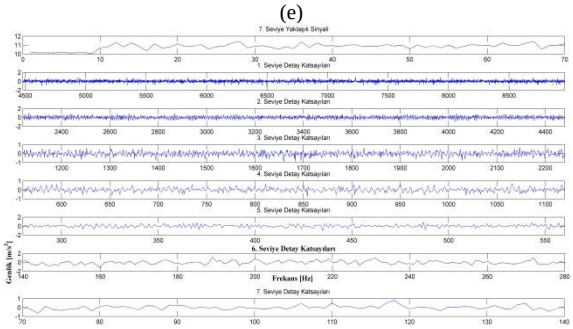
(d)



(e)



(f)



(g)

(a) sağlam rotor, (b) 0,7 mm dış bilezik rulman arızası, (c) 0,9 mm dış bilezik rulman arızası, (d) 1,1 mm dış bilezik rulman arızası, (e) 1,3 mm dış bilezik rulman arızası, (f) 1,5 mm dış bilezik rulman arızası, (g) 1,7 mm dış bilezik rulman arızası

Şekil 7. z-ekseni titreşim sinyalleri dış bilezik rulman arızası DWT analiz sonuçları

DWT analizi sonucu elde edilen 6. seviye detay sinyallerinin standart sapma değerleri Eşitlik 10 kullanılarak Tablo 16'daki gibi hesaplanır.

Tablo 16. Motor rulman durumuna göre titreşim sinyalleri standart sapma değerleri.

Rulman Durumu	Standart Sapma Değerleri
Sağlam	0,0987
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,1762
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,2217
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,2307
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,2576
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,3092
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,3769

Titreşim sinyalleri SS değerleri kullanılarak asenkron motorun p_i ve q_i değerleri Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 kullanılarak Tablo 17'deki gibi hesaplanır.

Tablo 17. Motor rulman durumuna göre motorun sağlam ve arızalı olma olasılıkları.

Rulman Durumu	p_i	q_i
Sağlam	1	0,0001
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,5601	0,4399
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,4452	0,5548
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,4278	0,5722
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,3831	0,6169
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,3192	0,6808

1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,2618	0,7382

1) Shannon entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Shannon entropi (SE), Eşitlik 13 kullanılarak Tablo 18'deki gibi hesaplanır.

Tablo 18. Motor rulman durumuna göre Shannon entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	SE
Sağlam	0,0001	0,0013
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	0,5212
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	0,4715
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	0,4608
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	0,4299
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	0,3776
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,3233

Tablo 3'te sunulan her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔSE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 19'daki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 19. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔSE_i
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	0,5198
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,0496
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0107
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,0309
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,0523
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,0543

Her bir geçiş durumuna ait entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 20'de sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 20. Geçiş değerlerine göre Shannon entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	49,77
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	23,36
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	31,60
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	34,69
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	39,29
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	43,45

2) Renyi entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Renyi entropi (RE), Eşitlik 17 kullanılarak Tablo 21'deki gibi hesaplanır.

Tablo 21. Motor rulman durumuna göre Renyi entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	RE
Sağlam	0,0001	26,5754
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	2,3695
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	1,6997
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	1,6107
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	1,3938
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	1,1093
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,8760

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔRE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 22'deki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 22. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔRE_i
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	24,2059
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,6699
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0889
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,2169
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,2845
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,2333

Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Renyi entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 23'te sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 23. Geçiş değerlerine göre Renyi entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	88,96
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	80,26
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	78,95
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	78,36
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	77,34
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	76,19

3) Tsallis entropi hesaplamaları

Asenkron motorun rulman çalışma durumuna göre hesaplanan q_i değerlerine göre Tsallis entropi (TE), Eşitlik 18 kullanılarak Tablo 24'teki gibi hesaplanır.

Tablo 24. Motor rulman durumuna göre Tsallis entropi hesabı.

Rulman Durumu	q_i	TE
Sağlam	0,0001	1,0000
0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4399	0,8065
0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,5548	0,6921
1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,5722	0,6726
1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,6169	0,6195
1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,6808	0,5365
1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,7382	0,4551

Her bir geçiş durumu için asenkron motorun Δq_i ve ΔTE_i değerleri Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak Tablo 25'teki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 25. Motor rulman durumuna göre fark (geçiş değeri) hesaplamaları.

Rulman Durumu	Δq_i	ΔTE_i
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,4398	0,1935
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	0,1150	0,1143
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	0,0174	0,0196
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	0,0447	0,0531
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	0,0639	0,0830
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	0,0573	0,0814

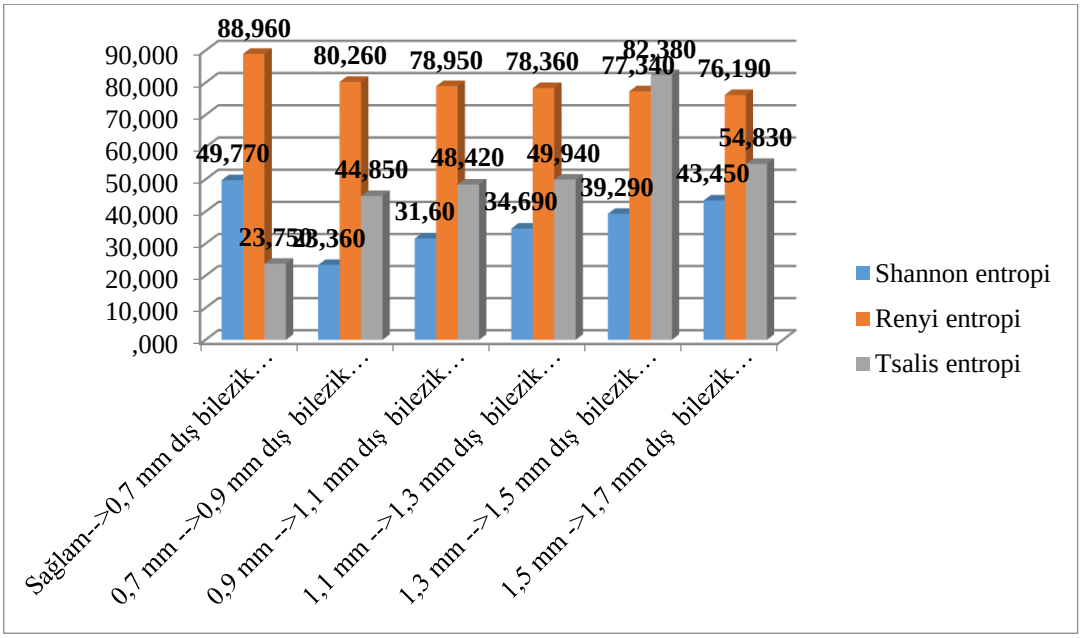
Geçiş değerlerinin kullanılarak her bir geçiş durumuna ait Tsallis entropi eğim açıları ($\alpha°$) Eşitlik 16 kullanılarak Tablo 26'da sunulduğu şekliyle hesaplanmaktadır.

Tablo 26. Geçiş değerlerine göre Tsallis entropi eğim açıları.

Rulman Durumu	$\alpha°$
Sağlam→0,7 mm dış bilezik rulman arızası	23,75
0,7 mm dış bilezik rulman arızası→0,9 mm dış bilezik rulman arızası	44,85
0,9 mm dış bilezik rulman arızası→1,1 mm dış bilezik rulman arızası	48,42
1,1 mm dış bilezik rulman arızası→1,3 mm dış bilezik rulman arızası	49,94
1,3 mm dış bilezik rulman arızası→1,5 mm dış bilezik rulman arızası	52,38
1,5 mm dış bilezik rulman arızası→1,7 mm dış bilezik rulman arızası	54,83

4) Bilgi entropisi yöntemlerinin karşılaştırılması

Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri baz alınarak elde edilen eğim açılarının grafiksel sonuçları Şekil 8'de sunulmaktadır.



Şekil 8. Bilgi entropisi eğim açıları sonuçları

Elde edilen sonuçlar erken evre arıza durumu için ve her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar için iki farklı kategoride değerlendirilmektedir. Erken evre arıza durumunda Shannon, Renyi ve Tsallis entropileri sırasıyla $50°, 89°$ ve $24°$'lik eğim açıları vermektedir. Renyi entropi burada sunduğu yüksek eğim açısı ile dış bilezik rulman arızasının erken evre arıza tespitinde diğer bilgi entropilerine göre önemli bir kolaylık sunmaktadır. Her bir arıza şiddetinin artış gösterdiği ardışıl durumlar incelendiğinde Shannon entropi $20° - 45°$, Renyi entropi $75° - 80°$ ve Tsallis entropi $45° - 55°$ arasında eğim açıları sunmaktadır. Bilgi teorileri içerisinde Renyi entropi sağlamış olduğu yüksek ve sabit değerler ile dış bilezik rulman arızalarının tespitinde Shannon ve Tsallis entropilerine göre daha güvenilir bir analiz yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca arıza şiddetinin belirgin şekilde değişeceği durumlarda elde edilen Renyi eğim açıları değerleri çok daha yüksek olacaktır.

V. SONUÇLAR

Asenkron motorların endüstriyel uygulamalardaki yaygın kullanımları bu motorlardaki baskın arıza olan rulman arızalarının güvenilir ve hızlı yöntemlerle tespit edilmesini gerekli kılmaktadır. İç bilezik ve dış bilezik rulman arızalarının titreşim sinyalleri üzerinden analiz edildiği bir çalışmadaki açık-kaynak verilerin [41] kullanıldığı bu çalışmada, rulman arızalarının tespitine yönelik alternatif bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemde DWT tabanlı sinyal işleme yöntemlerindeki çoklu özellik çıkarımlarına alternatif olabilecek entropi hesaplamasına dayalı tek bir parametre analizi üzerinde durulmaktadır. Asenkron motorun rulmanındaki arıza şiddeti arttıkça titreşim sinyallerinin standart sapma değerleri de yükselmektedir. Entropi yaklaşımları çerçevesinde bu çalışmada titreşim sinyalleri standart sapmalarına bilgi teorisi altında incelenen Shannon, Renyi ve Tsallis entropi hesaplamaları uygulanmaktadır. Şekil 6'da ve Şekil 8'de sunulan sonuçlara göre Renyi entropi yaklaşımı ile sağlam motorun arızaya geçtiği ilk durum olan $0,7\ mm$ rulman arızası durumu için $89°$'lik bir eğim açısı hesaplanmaktadır. Benzer şekilde arıza şiddetlerinin arttığı durumlar değerlendirildiğinde de hem iç bilezik hem de dış bilezik rulman arızaları için Renyi entropi temelli hesaplamalarda $75° - 80°$ arasında değişen eğim açıları elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre DWT tabanlı asenkron motor iç bilezik rulman ve dış bilezik rulman arızalarının titreşim sinyalleri analizi ile tespitinde Renyi entropi yaklaşımı özellik çıkarımı amaçlı kullanılabilecek bir analiz yöntemi olarak önerilmektedir. Çalışmada önerilen yöntem alternatif bir yaklaşım olarak öne çıkmakta olup durum izleme tabanlı online bakım yöntemlerinde kullanılması daha uygundur. Bu yöntemin kestirimci bakım uygulamalarında kullanılabilmesi için asenkron motorun sağlam rulmanla çalışma durumuna ait titreşim sinyalleri önceden kaydedilmelidir. Ayrıca çalışmada önerilen entropi tabanlı DWT sinyal işleme yöntemine eklenebilecek FFT, Hilbert Dönüşümü gibi yöntemlerle, titreşim sinyalleri karakteristik harmonik bileşen frekansları da tespit edilerek arızanın hangi tip arıza olduğu da tanımlanabilir. Gelecek çalışmalarda farklı güç kapasitesindeki asenkron motorların titreşim/akım sinyalleri analizleri de önerilen yöntemle test edilerek elde edilen mevcut bulguların kıyaslaması yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Choudhary, A., Goyal, D., Shimi, S. L., & Akula, A. (2019). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *26*, 1221-1238.

[2] Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal, 13(3),* 2213-2227.
[3] Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing, 144,* 106908.
[4] Yatsugi, K., Pandarakone, S. E., Mizuno, Y., & Nakamura, H. (2023). Common diagnosis approach to three-class induction motor faults using stator current feature and Support Vector Machine. *IEEE Access*, 11, 24945-24952.
[5] Peeters, C., Guillaume, P., & Helsen, J. (2018). Vibration-based bearing fault detection for operations and maintenance cost reduction in wind energy. *Renewable Energy, 116(B),* 74-87.
[6] Kaya, K., & Ünsal, A. (2022). Yapay sinir ağlarıyla asenkron motor çoklu arızalarının tespiti ve sınıflandırılması. *Politeknik Dergisi, 25(4),* 1687-1699.
[7] Romero-Troncoso, R. D. J. (2017). Multirate signal processing to improve FFT-Based analysis for detecting faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(3),* 1291-1300.
[8] Himani, & Dahiya, R. (2018). Condition monitoring of wind turbine for rotor fault detection under non stationary conditions. *Ain Shams Engineering Journal, 9(4),* 2441-2452.
[9] Lee, C.-Y., Le, T.-A., & Lin, Y. T. (2022). A feature selection approach Hybrid Grey Wolf and Heap-Based optimizer applied in bearing faults. *IEEE Access, 10*, 56691-56705.
[10] Fan, W., Zhou, Q., Li, J., & Zhu, Z. (2018). A Wavelet-Based statistical approach for monitoring and diagnosis of compound faults with application to rolling bearings. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15(4),* 1563-1572.
[11] Bessous, N., Sbaa, S., & Megherbi, A.C. (2019). Mechanical fault detection in rotating electrical machines using MCSA-FFT and MCSA-DWT techniques. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, 67(3),* 571-582.
[12] Polat, A., & Yılmaz, A. (2018). Investigation of the effects of eccentricity on induction motor via Multi-Resolution Wavelet Analysis. *Electrica, 18(2),* 187-197.
[13] Tobi, M. A., Bevan, G., Wallace, P., Harrison, D., & Okedu, K.E. (2021). Faults diagnosis of a centrifugal pump using multilayer perceptron genetic algorithm back propagation and support vector machine with discrete wavelet transform-based feature extraction. *Computational Intelligence, 37(1),* 21-46.
[14] Chikkam, S., & Singh, S. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using DWT and ANN. *Arab J Sci Eng 48*, 6237–6252.
[15] Ali, M. Z., Shabbir, M, N. S. K., Liang, X., Zhang, Y., & Hu, T. (2019). Machine learning-based fault diagnosis for single- and multi-faults in induction motors using measured stator currents and vibration signals. *IEEE Transactions on Industry Applications, 55(3),* 2378-2391.
[16] Dhamande, L. S., & Chaudhari, M. B. (2018). Compound gear-bearing fault feature extraction using statistical features based on time-frequency method. *Measurement, 125*, 63-77.
[17] Inturi, V., Pratyush, A. S., & Sabareesh, G. R. (2021). Detection of local gear tooth defects on a multistage gearbox operating under fluctuating speeds Using DWT and EMD analysis. *Arab J Sci Eng, 46*, 11999-12008.
[18] Shi, E. (2022). Single feature extraction method of bearing fault signals based on slope entropy. *Shock and Vibration, 2022*, 6808641.
[19] Ghosh, A., & Basu, A. (2021). A scale-invariant generalization of the Rényi Entropy, Associated divergences and their optimizations under Tsallis' nonextensive framework. *IEEE Transactions on Information Theory, 67(4),* 2141-2161.
[20] Tsallis, C. (2022). Entropy. *Encyclopedia, 2(1),* 264-300.
[21] Göktaş, F. (2023). Robust versions of the lower and upper possibilistic mean-variance models for the one period or two periods cases. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10(2),* 373-382.
[22] Guo, Z., Liu, M., Wang, Y., & Qin, H. (2020). A new fault diagnosis classifier for rolling bearing united multi-scale permutation entropy optimize VMD and Cuckoo Search SVM. *IEEE Access, 8*, 153610-153629.
[23] Yang, Z., Kong, C., Wang, Y., Rong, X., & Wei, L. (2021). Fault diagnosis of mine asynchronous motor based on MEEMD energy entropy and ANN. *Computers & Electrical Engineering, 92,* 107070.
[24] Ünsal, A. (2020). Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi. *Politeknik Dergisi, 23(4),* 1037-1050.
[25] Han, T., Gong, J. -C., Yang, Q., & An, L. -Z. (2022). Fault Diagnosis of Rolling Bearings Using Dual-Tree Complex Wavelet Packet Transform and Time-Shifted Multiscale Range Entropy. *IEEE Access, 10,* 59308-59326.
[26] Sharma, S., Tiwari, S. K., & Singh, S. (2021). Integrated approach based on flexible analytical wavelet transform and permutation entropy for fault detection in rotary machines. *Measurement, 169,* 108389.

[27] Malhotra, A., Minhas, A. S., Singh, S., Zuo, M. J., Kumar, R., & Kankar, P. K. (2021). Bearing fault diagnosis based on flexible analytical wavelet transform and fuzzy entropy approach. *Materials Today: Proceedings, 43*, 629-635.

[28] Kumar, D., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Hussain, M., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2022). "Triaxial bearing vibration dataset of induction motor under varying load conditions", *Mendeley Data, V2*.

[29] Zuhaib, M., Shaikh, F. A., Tanweer, W., Alnajim, A. M., Alyahya, S., Khan, S., Usman, M., Islam, M., & Hasan, M. K. (2022). "Faults feature extraction using Discrete Wavelet Transform and Artificial Neural Network for induction motor availability monitoring-Internet of Things enabled environment", *Energies, 15(21),* 7888.

[30] Khusbaba, R. N., Kodagoda, S., Lal, S., & Dissanayake, G. (2011). "Driver drowsiness classification using fuzzy wavelet-packet-based feature-extraction algorithm", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 58(1),* 121-131.

[31] Erişti, B. (2023). "Dalgacık paket dönüşümü, reliefF özellik seçimi ve topluluk öğrenme algoritması tabanlı bir kısmi deşarj arızası tespit yöntemi", *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 35(2)*, 505-516.

[32] Ali, M. Z., & Liang, X. (2020). "Threshold-based induction motors single- and multifaults diagnosis using Discrete Wavelet Transform and measured stator current signal," *Canadian Journal of Electrical and Computer* Engineering, 43(3), 136-145.

[33] Bouzida, A., Touhami, O., Ibtiouen, R., Belouchrani, A., Fadel, M., & Rezzoug, A. "Fault diagnosis in industrial induction machines through Discrete Wavelet Transform," *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 58(9),* 4385-4395.

[34] Vashishtha, G., Kumar, R. (2022). "Pelton wheel bucket fault diagnosis using improved Shannon entropy and expectation maximization principal component analysis," *J. Vib. Eng. Technol. 10,* 335–349.

[35] Sönmez, D. (2013). Asenkron motor rulman arızasının titreşim işaretleri üzerinden entropi tabanlı analizi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü/Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği ABD, İstanbul.

[36] Huo, Z., Martinez-Harcia, M., Zhang, Y., Yan, R., & Shu, L. (2020). "Entropy Measures in Machine Fault Diagnosis: Insights and Applications", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 69(6),* 2607-2620.

[37] Renyi, A. (1961). On measures of entropy and information. 4th Berkeley Symposium on Mathematics, Statistics and Probability, 1961, 1, 547-561.

[38] Crooks, G. A. (2021). On Measures of Entropy and Information. Tech. Note 009 v0.8, http://threeplusone.com/info, (10.01.2024).

[39] Nicolis, O., Mateu, J., & Contreras-Reyes, J. E. (2020). "Wavelet-based entropy measures to characterize two-dimensional fractional brownian fields," *Entropy, 22(2),* 196.

[40] Tsallis, C. (1988). "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics," *J Stat Phys 52*, 479–487.

[41] Kumar, D., Mehran, S., Shaikh, M. Z., Hussain, M., Chowdhry, B. S., & Hussain, T. (2022). "Triaxial bearing vibration dataset of induction motor under varying load conditions," *Data in Brief, 42,* 108315.

[42] Kompella, K. C. D., Mannam, V. G. R., & Rayapudi, S. R. (2016). "DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation", *Journal of Electrical Systems and Information Technology, 3(3),* 411-427.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 196-205, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1491435
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Chaotic Image Encryption with Normal Sinus Rhythm ECG Signal and Chaoticity in ECG Signal

Normal Sinüs Ritmi EKG Sinyali ile Kaotik Görüntü Şifreleme ve EKG Sinyalinde Kaotiklik

Zehra Gülru Çam Taşkıran[1*], Ramazan Cenker[2]

Geliş / Received: 28/05/2024 ***Revize / Revised: 04/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 18/08/2024***

ABSTRACT

In this study, the use of ECG data in the field of secure communication was examined by using a chaotic encryption method that has proven its reliability in the literature. ECG data, the chaoticity of which is a controversial issue in the literature, was used directly instead of chaotic number sequences in this method, and a security analysis was made over the NPCR, UACI, and entropy values of the encrypted images. While NPCR and UACI values indicate the security of the system against plaintext attacks by revealing the dissimilarity rate at the pixel level between two images encrypted with different keys, the entropy value indicates the encryption performance by giving information about how close the encrypted image is to the random appearance. In addition, phase portraits and Lyapunov exponents were examined, and the chaotic components in ECG were shown. According to the results, it has been observed that the sequence of numbers obtained by determining the person, the phase shift samples count, and the time of ECG taken can be used as the key with this method. In addition to the periodicity of healthy ECG data, the chaotic properties it contains have been shown to be sufficient for encryption applications.

Keywords- ECG Signal, Chaoticity, Image Encryption, Chaotic Encryption

ÖZ

Bu çalışmada literatürde güvenilirliği kanıtlanmış kaotik bir şifreleme yöntemi kullanılarak EKG verilerinin güvenli iletişim alanında kullanımı incelenmiştir. Kaotikliği literatürde tartışmalı bir konu olan EKG verileri bu yöntemde kaotik sayı dizileri yerine doğrudan kullanılmış ve şifrelenmiş görüntülerin NPCR, UACI ve entropi değerleri üzerinden güvenlik analizi yapılmıştır. NPCR ve UACI değerleri farklı anahtarlarla şifrelenmiş iki görüntü arasındaki piksel düzeyindeki farklılık oranını ortaya koyarak sistemin düz metin saldırılarına karşı güvenliğini gösterirken, entropi değeri ise şifrelenmiş görüntünün rastgele görünüme ne kadar yakın olduğu hakkında bilgi vererek şifreleme performansını göstermektedir. Ayrıca faz portreleri ve Lyapunov üstelleri incelenerek EKG'deki kaotik bileşenler gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kişi, faz kayması örnek sayısı ve EKG çekim zamanı belirlenerek elde edilen sayı dizisinin bu yöntemle anahtar olarak kullanılabileceği görülmüştür. Sağlıklı EKG verilerinin periyodikliğinin yanı sıra içerdiği kaotik özelliklerin de şifreleme uygulamaları için yeterli olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler- EKG sinyali, Kaotiklik, Görüntü Şifreleme, Kaotik Şifreleme

[1]*Sorumlu yazar iletişim: zgcam@yildiz.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-7996-7948)
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 34220, İstanbul, Türkiye
[2]İletişim: ramazancenker@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-0740-2291)
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 34220, İstanbul, Türkiye

I. INTRODUCTION

The chaoticity of ECG signals is a controversial issue in the literature [1]. However, the generally accepted approach is that in case of arrhythmia, heart attack, tachycardia, and atrial fibrillation, ECG signals are chaotic, while healthy rhythm signals are periodic. In the literature, chaotic analyses have been made to recognize arrhythmia and atrial fibrillation and have been successful [2, 3]. Using chaotic methods while detecting R-peak in ECG signals shows that this signal carries chaotic components [4]. A similar study has been done for QRS detection [5]. In these cases, chaotic features are observed more dominantly in the signals. However, healthy rhythm signals also contain non-periodic components because the biomedical signal is a product of an interaction of a large number of different biological systems, the noise of the measurement mechanism, and the nature of the ECG itself. When Lyapunov exponents of healthy individuals' ECG signals are calculated, chaotically contradictory results are obtained. Chaotic signals produce positive Lyapunov exponents. It has also been shown that the exponents of ECG signals from healthy people are smaller than people with heart disease [6]. However, the adequacy of the chaotic components in it in terms of encryption security is open to examination. This study aims to examine whether these components in the ECG signals of healthy people can be used as cryptological keys.

Multimedia data consists of text, audio, video, graphics, and images. In recent years, there has been rapid development in multimedia, including video, image, and audio. With the increasing use of multimedia data over the internet, the demand for secure multimedia data arises. Chaos-based methods have recently become attractive to secure image content. Based on some unique properties such as sensitivity to initial conditions, non-periodicity, convergence, and control parameters, chaos has become the latest trend in image encryption. The basic requirement in chaotic encryption algorithms is a good encryption scheme and keys that will be produced with sufficient length and sufficient complexity, that is, chaotic sequences. In the chaotic encryption algorithms proposed in the literature, time series produced by dynamic systems such as Lorenz, Rössler, and Henon maps, which are generally defined by ordinary differential equations, are used as the key [7-10].

The use of ECG signals in the field of information security is quite limited. In general, studies have been conducted for the secure transmission and storage of ECG signals [11-13]. In this study, unlike these, the use of the ECG signal instead of the chaos signal in chaotic coding methods is examined.

In a study using ECG signals for a similar purpose, a dynamic key based on ECG signal was created and used by continuously measuring the distance between the QRS waves [14]. The results obtained in this study are insufficient in terms of plain-text security. In a different study, residual signals were obtained by filtering long-term trends for key generation from ECG signals. Because it has been determined that there are chaotic components in short-term changes in the ECG. The P wave represents the depolarization impulse of the atrium; the QRS complex represents ventricular depolarization, while the T wave represents the repolarization of the ventricles. The R-peak, the most noticeable feature of the ECG waveform, is often used to represent the heartbeat. These keys are created by using the time delays between these waves [15]. In a similar study, finite-length keys were created by using some distinguishing features in the ECG signal [16].

In the mentioned studies, time-invariant metrics of the person's ECG were obtained and these constants were used as keys in encryption. Chaotic components in the ECG were not used intentionally, but their existence was emphasized in all studies. In this study, unlike the mentioned studies, the focus was directly on these chaotic components. For the encryption method used, 3 different chaotic series are needed. Instead of producing personalized series using a different dynamic system with ECG metrics, different series were created by shifting the person's ECG signal at different phase shifts and encryption was performed by using these series directly instead of the chaotic series. The ECG signals used were obtained from the MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database [17]. In this way, it was examined whether the chaotic components contained in the ECG were sufficient in terms of encryption security, whether healthy ECG data constituted personal biometric data, and whether the phase shift count was a key in this encryption method.

II. USED CHAOTIC IMAGE ENCRYPTION ALGORITHM

A chaotic encryption algorithm, which has been proven to be reliable before in the literature, was chosen to check the suitability of the data to be used [18]. The encryption algorithm used basically consists of 4 steps: Histogram Equalization, Row Rotation, Column Rotation, XOR Operation. The flow chart of the encryption algorithm is given in Figure 1.

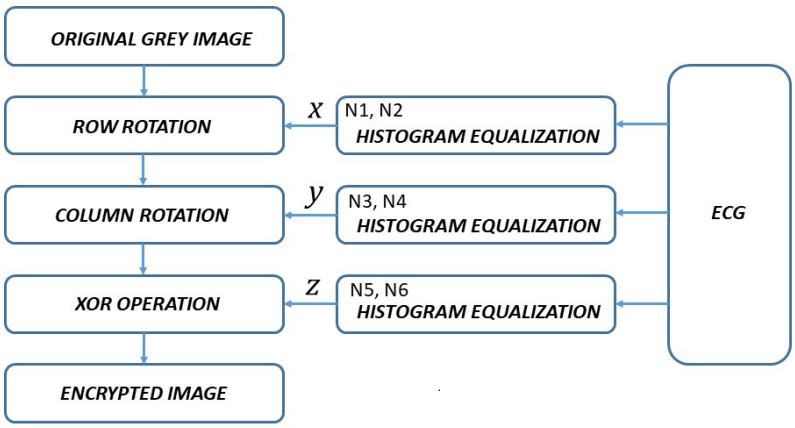


Figure 1. The flow chart of the encryption algorithm.

A. Histogram Equalization

As seen in Figure 2, it is clear that the histograms of 3 different chaotic signals, called x, y, z, have an inhomogeneous distribution. For higher security, the histogram needs to be equalized. If there is a gray image of size $M \times N$, M represents the number of rows and N represents the number of columns. The histogram is then equalized using Eq. 1.

$$x = integer(x \times N2) mod N \tag{1a}$$

$$y = integer(y \times N4) mod M \tag{1b}$$

$$z = integer(z \times N6) mod 256 \tag{1c}$$

Here, $N2$, $N4$, $N6$ is a large random number usually greater than 10000. For simplicity, $N2$, $N4$, and $N6$ can also be considered equal. Figure. 1(g), (h), and (i) show the equalized histogram using random numbers $N2$ = $N4$ = $N6$ =100000, M = N = 256. The aim here is to approximate the 3 series to be used to a uniform distribution. In this algorithm, the equivalence of the odd and even distributions in x and y, and the approximation of z to a random distribution in the range of pixel values in the grayscale image, as much as possible are essential.

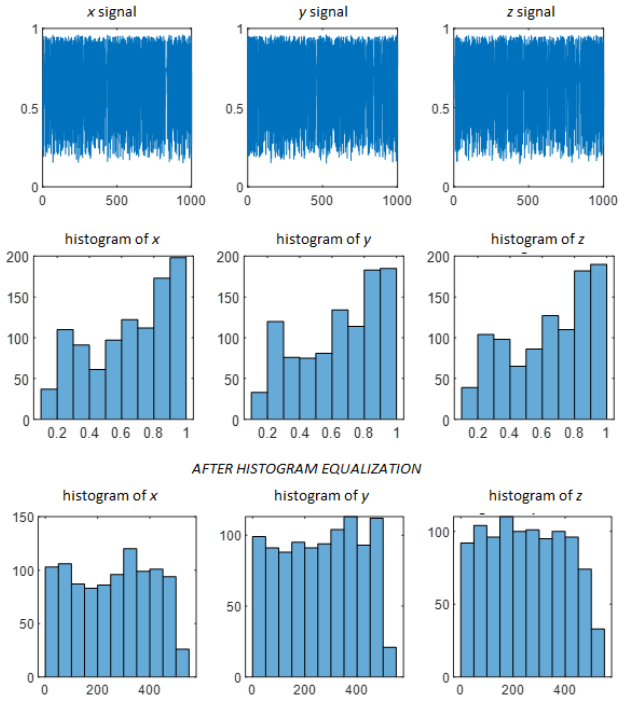


Figure 2. ECG signal histogram equalization.

B. Row Rotation

Row rotation is performed for image pixel permutation. Since there are M pixel elements in a row, a M length chaotic sequence is used to rotate the row of a gray image of size $M \times N$. To increase the security, according to the randomly determined $N1$ number of the x-sequence obtained using the ECG signal, a total of M elements are taken from the $N1$st ($N1 = 500$) element. In the selected row, when the key value corresponding to the row number is even, the entire row is rotated to the left, and when it is odd, the entire row is rotated to the right.

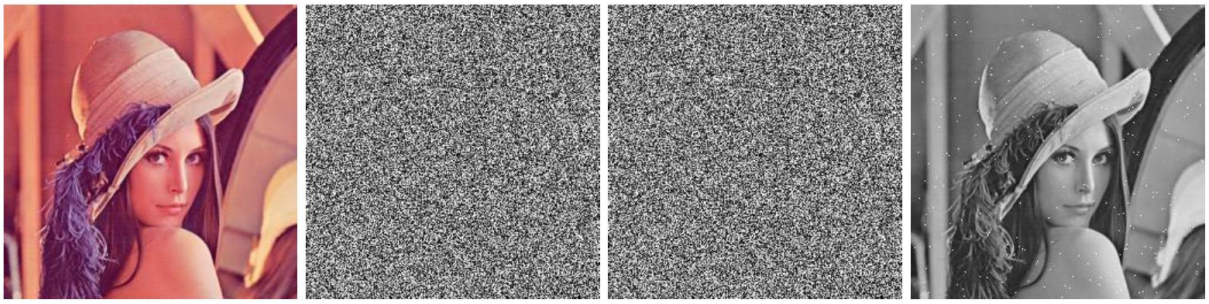
C. Column Rotation

This step is performed after the row rotation is complete. Since there are N pixel elements in a column, a N length of the chaotic sequence is used to rotate the column of a gray image of size $M \times N$. To increase the security, according to the randomly determined $N3$ number of the y-sequence obtained by using the ECG signal, a total of N elements are taken from the $N3$rd ($N3 = 600$) element. In the selected column, when the key value corresponding to the number of columns is even, it is rotated up and if the value is odd, it is rotated down.

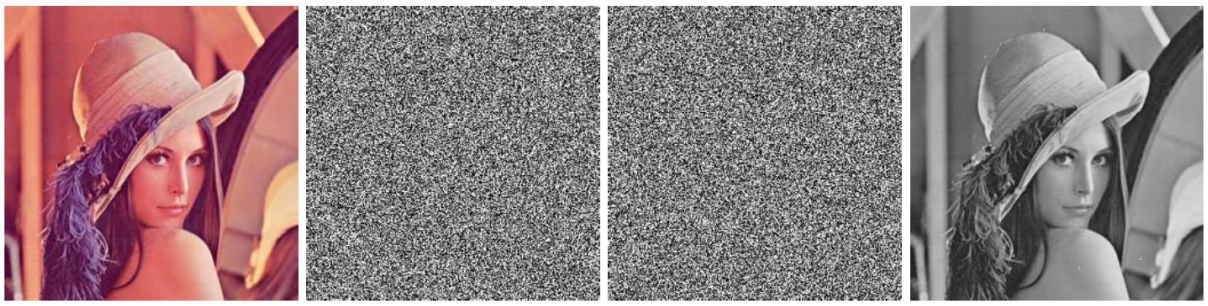
D. XOR Operation

The last step of the encryption process is the XOR operation. The XOR operation changes the pixel value to the new value, and the new value cannot be reversed without knowing the key obtained using the ECG signal. First, random number $N5$ value is entered, and $M \times N$ image is converted to $1 \times MN$ image. After that, the row-column rotated image ais XORed with the ECG signal (starting from the $N5$th ($N5 = 700$) element of the sequence), and finally, the encrypted image is obtained.

The original versions of the used benchmark image Lena, its encrypted versions with 3 and 10 phase shifts of Subject 1, and the decrypted version are given in Fig. 3. In order to compare the encryption patterns, the Lorenz system, known in the literature for its dominant chaotic feature, was used [19]. The benchmark image Lena, encrypted with two different chaotic sequences obtained by slightly changing the initial conditions, and the decrypted Lena are given in Figure 3.a. The Lena images encrypted with two different ECG sequences obtained from the 3 and 10 phase shift spaces of Subject 1 and the decrypted version are given in Figure 3.b.



a. Image examples obtained by using chaotic Lorenz system.



b. Image examples obtained by using ECG signals of Subject 1.

Figure 3. Original image, two encrypted images with different keys, and decrypted image.

III. SECURITY ANALYSIS

It has been investigated whether it is appropriate to use ECG signals directly as a chaotic sequence in encrypting benchmark images frequently used in the literature. Some common metrics are used to evaluate the security of the algorithm used.

Using a computer equipped with an Intel(R) Core (TM) i5-8265U 1.80 GHz CPU; all simulations were performed by Matlab R2022a. The security of the encrypted images was examined by making analyzes with the healthy human ECG data, the chaoticity of which is controversial. Long-term ECG recordings of 3 healthy subjects referred to the Arrhythmia Laboratory at Beth Israel Hospital in Boston were used for analysis [17]. The subjects do not have a dominant arrhythmia or infarction. Two metrics are used to evaluate the sensitivity of plain-text attacks, the Number of Pixels Change Rate (NPCR) and the Unified Average Changing Intensity (UACI). It is expressed as in Eq. 2, NPCR is defined as the percentage of different pixel numbers between two encrypted images. UACI; $M \times N$ is defined as the mean intensity of the differences between the two encrypted images as in Eq. 3. Here $C1$ and $C2$ are two different encrypted images encrypted using different keys [20]. Each of these metrics is obtained by comparing all values of two images encrypted with different keys but the same method, pixel by pixel. To build a near-ideal image encryption algorithm, NPCR values must be greater than 99% and UACI values must be around 33% [21].

$$NPCR = \frac{\sum D(i,j)}{M \times N} 100\% \tag{2a}$$

$$D(i,j) = \begin{matrix} 1 \; if \; C1(i,j) \neq C2(i,j) \\ 0 \; if \; C1(i,j) = C2(i,j) \end{matrix} \tag{2b}$$

$$UACI = \frac{1}{M \times N} \sum \frac{|C1(i,j) - C2(i,j)|}{255} 100\% \tag{3}$$

The information entropy value is a measure of the randomness of the given data. For a good image encryption algorithm, the encrypted image should have equiprobable gray levels. For example, for a gray-scale image of 256 levels, if each gray level is assumed to be equiprobable, the image entropy will be theoretically equal to 8 bits. It is desired that this value be as close as possible to 8 for cryptological applications, in the sense that the probability of all pixel values is equal. It is calculated as in Eq. 4 where n represents the total number of symbols, Si is the pixel value and P (Si) represents the probability of occurrence of Si [22].

$$H(s) = \sum_{i=0}^{n-1} P(S_i) \log_2 \frac{1}{P(S_i)} \tag{4}$$

IV. SIMULATION RESULTS

To obtain the 3 different number sequences required for the used encryption algorithm, the time series consisting of ECG data was shifted by a different number of samples, and phase-shifted spaces were formed. For this purpose, to create a new sequence within the collected one-dimensional ECG data, the previous sequence is shifted at the specified phase shift count [23]. This shifting process is performed twice, resulting in 3 different sequences.

Table 1. Effect of Raw ECG Data From Different People on NPCR and UACI

Phase Shift Count	Subjects	NPCR	UACI
1	Subject 1&2	99,6368	33,9043
	Subject 1&3	99,6140	33,4521
	Subject 2&3	99,6384	33,4144
10	Subject 1&2	99,6185	33,6864
	Subject 1&3	99,6307	33,4053
	Subject 2&3	99,5972	33,3632
17	Subject 1&2	99,6216	33,6640
	Subject 1&3	99,6094	33,3917
	Subject 2&3	99,6017	33,4743

Firstly, the NPCR and UACI values of the same images encrypted using ECG signals belonging to different people were compared to examine whether ECG signals could be secure keys and the results are presented in Table 1. Since all these data were collected from healthy people, it was proven that images encrypted with 2 different signals accepted as periodic in the literature, were different from each other. UACI was obtained as 33.9043% at most. This shows that individual ECG data can be applied to chaotic encryption methods as biometric keys. Here, it is seen that although it is accepted as a periodic signal, it contains a randomness that can be used for

encryption. Despite the different phase shift numbers, it is seen that NPCR and UACI values give a value that confirms secure encryption every time. As a result of the tests carried out with the method used, it was understood that ECG keys have high sensitivity in image encryption, and healthy ECG signals belonging to different people create different keys. This proves that the chaotic components in the ECG create sufficient randomness, that people's ECGs create a unique biometric series, and that an image encrypted with one cannot be encrypted with the other.

After observing that individuals produce different keys from each other, different spaces were obtained by shifting the ECG data taken from the same person at different times by different sample numbers, and the same analyzes were made for these samples. As can be seen in Table 2, different spaces obtained with different signals yielded successful results in terms of encryption security as they produce completely different time series. In this way, it has been shown that although healthy ECG data are accepted periodic in the literature, ECG data taken from the same person at different times does not produce the same key. Even when the number of phase shifts is the same, encryptions made with samples taken at different times are completely secure. It constantly produces safe keys with the ECGs of even healthy people. This shows that besides the periodicity of the ECG signal, the components it contains create a continuous randomness.

Table 2. Effect of Raw ECG Data Generated with Different Sample Shifts on NPCR and UACI

Subject	Phase Shift Count		NPCR	UACI
Subject 1	1	10	99,5773	33,2148
	10	10	99,5514	33,2321
	17	10	99,5422	33,1516
Subject 2	1	10	99,5331	33,6405
	10	10	99,5285	33,7338
	17	10	99,5850	33,5854

The information entropy values for all encrypted images were also calculated and given in Table 3. It is seen that the (S) values are quite close to the ideal value of 8. That means that the amount of unpredictable randomness in encrypted images is extremely close to the ideal value, meaning that successful encryption has been performed.

Table 3. Entropy Values of the Obtained Encrypted Images with Raw ECG Data

Subject	Phase Shift Count		
	1	10	17
Subject 1	7,9849	7,9856	7,9845
Subject 2	7, 9842	7,9845	7,9831
Subject 3	7,9871	7,9869	7,9868

Since the used chaotic encryption algorithm deals with numerical values in decimals with high precision, it is necessary to control whether encryption performance is achieved only by noise on the signal. For this reason, the Low Pass FIR filter is used to remove high-frequency noises in ECG signals obtained from the database. The stopband attenuation of the FIR filter is at 60 Db. A notch filter has been applied to eliminate network noises. In addition, the maximum fluctuation was tried to be minimized for all frequencies with the Parks-McClellan algorithm [24]. The analyzes performed in the previous steps were also repeated for the refiltered ECG signals.

The NPCR and UACI results of the encryptions with the filtered signals taken from the subjects in different phase-shifted spaces are given in Table 4. It is seen that the results obtained are very close to the results obtained with the original ECG data.

The NPCR and UACI data obtained for the filtered data of the same individuals taken at different times are given in Table 5. Accordingly, it has been shown that secure encryption continues even when the data is filtered, that is, the components that can be called random or chaotic are not only caused by noise, they are in the nature of the ECG.

Table 4. Effect of Filtered ECG Data From Different People on NPCR and UACI

Phase Shift Count	Subjects	NPCR	UACI
1	Subject 1&2	99,5651	33,4999
	Subject 1&3	99,5789	33,4520
	Subject 2&3	99,6445	33,5592
10	Subject 1&2	99,6124	33,3905
	Subject 1&3	99,6017	33,4610
	Subject 2&3	99,6216	33,4637
17	Subject 1&2	99,5880	33,3792
	Subject 1&3	99,5865	33,4532
	Subject 2&3	99,6017	33,5665

Table 5. Effect of Filtered ECG Data Generated with Different Sample Shifts on NPCR and UACI

Subject	Phase Shift Count		NPCR	UACI
Subject 1	1	10	99,6246	33,5080
	10	10	99,6277	33,4162
	17	10	99,6231	33,4896
Subject 2	1	10	99,5331	33,5339
	10	10	99,6231	33,4143
	17	10	99,6124	33,3777

The entropy values of images encoded using filtered signals are given in Table 6. Again, values very close to the ideal value of 8 can be used to evaluate the encryption performance.

Table 6. Entropy Values of the Obtained Encrypted Images with Filtered ECG Data

Subject	Phase Shift Count		
	1	10	17
Subject 1	7,9895	7,9891	7,9899
Subject 2	7, 9892	7,9896	7,9885
Subject 3	7,9895	7,9882	7,9893

In order to compare the obtained numerical values, the metrics of Lena image encrypted with the same method using Lorenz system can be used. The NPCR value of Lena images encrypted with 2 different chaotic sequences obtained by slightly changing the initial conditions in Lorenz system was obtained as 99.6002 and UACI value as 33.3708. The entropy values of the encrypted images used were 7.9898 and 7.9999. It has been observed that the encryption performances obtained using a proven chaotic sequence in the literature or an ECG signal are approximately equal.

V. CHAOTICITY ANALYSIS

Although there is not a universally accepted definition for a time series to be chaotic, the common approach in the literature is Lyapunov analysis. Lyapunov exponents are a measure of the rate at which infinitesimally adjacent trajectories in the phase space of a dynamical system separate from each other with each iteration or unit of time. Dynamical systems with a positive largest Lyapunov exponent are described as chaotic since the trajectory does not converge to a single point [25]. The largest Lyapunov exponents (LLE) calculated in different phase-shifted spaces of the ECG signals used with the method proposed by Wolf are given in Table 7 [23]. Accordingly, all of the filtered signals give positive exponents. In the original signals, it is not possible to calculate with this method for the time series containing all the samples used, and all exponents go to $-\infty$ due to divergence. The largest exponent values calculated for the sample before the divergence are given in parentheses and they are also seen to be positive. In other words, it is clearly seen by Lyapunov analysis that the signals are chaotic.

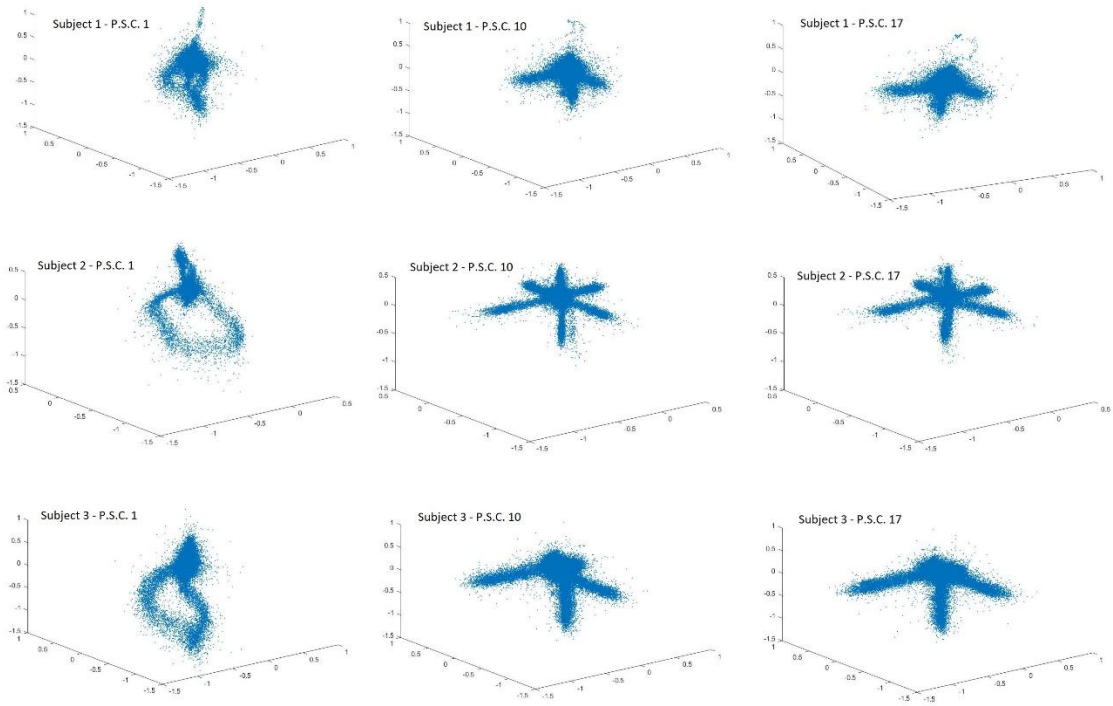


Figure 4. Phase portraits of raw ECG signals.

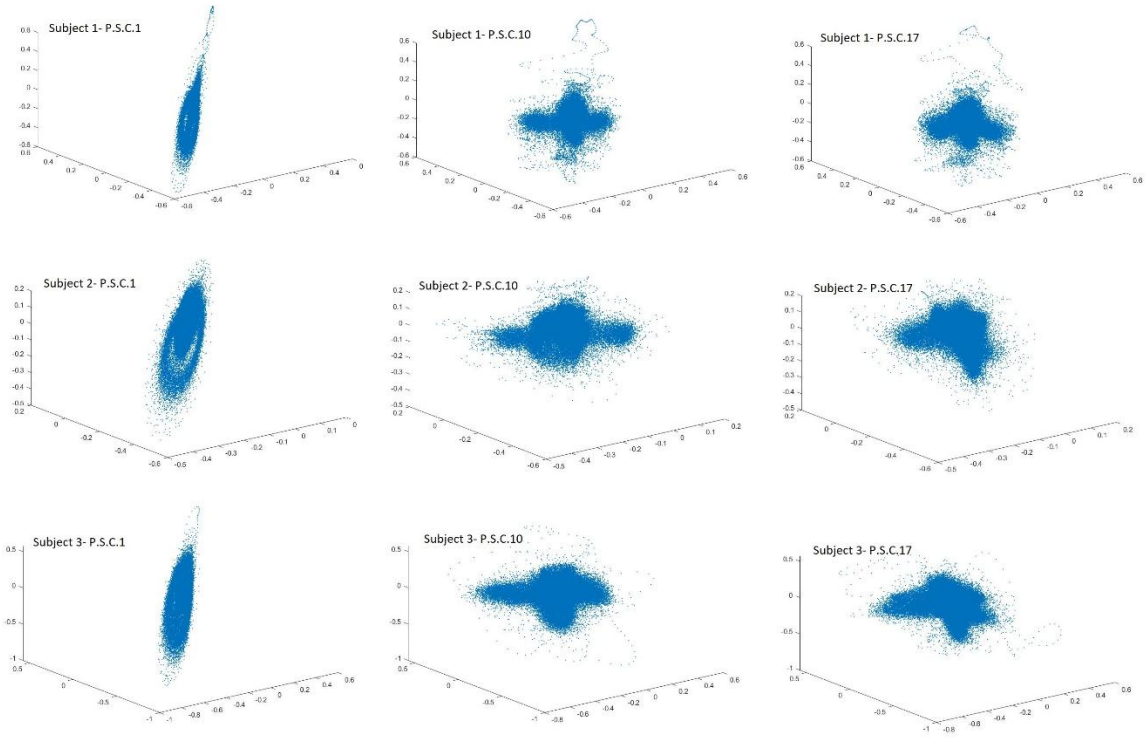


Figure 5. Phase portraits of filtered ECG signals.

Table 7. The Largest Lyapunov Exponents of ECG Signals

Subject	Phase Shift Count	LLE of Raw ECG	LLE of Filtered ECG
Subject 1	1	-∞ (1.3347)	1.2074
	10	1.7746	0.663
	17	-∞ (2.5629)	0.7245
Subject 2	1	-∞ (2.2889)	1.0992
	10	-∞ (2.6308)	0.5139
	17	-∞ (2.7224)	0.4915
Subject 3	1	-∞ (4.2213)	2.8335
	10	-∞ (4.4326)	2.901
	17	-∞ (4.8424)	3.0148

Phase portraits can be drawn and their attractors compared to visually check the chaotic signals. Phase portraits formed by the original ECG signals can be observed in Figure 4, and phase portraits formed by the filtered ECG signs in Figure 5. Orbits formed outside the dominant periodic orbit can be observed through these phase portraits.

VI. CONCLUSION

This study has tested whether the ECG data can be used in chaotic encryption methods by calculating NPCR, UACI values, which are a measure of security against plain-text attacks, and the entropy of the encrypted image. In addition, the chaoticity of normal rhythm ECG signals was also examined with phase portraits, and Lyapunov exponents. In a chaotic encryption method, which is known to be reliable in the literature, ECG data was substituted for chaotic number sequences, and according to the simulation results, although normal ECG signals cannot be defined as chaotic, they allow secure encryption when used in chaotic encryption methods. Not only the ECG data of different people, but also the data of the same person recorded at different times, or the ECG data subjected to different phase shifts, provide different secure sequences. The collected ECG data can also be used for secure encryption when used raw or filtered to remove noise. It has been shown that the periodic ECG signals of individuals can be used as a continuous chaotic key generator.

KAYNAKLAR

[1] Glass, L. (2009). Introduction to controversial topics in nonlinear science: Is the normal heart rate chaotic?. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, *19*(2).
[2] Gupta, V., Mittal, M., & Mittal, V. (2020). Chaos theory: an emerging tool for arrhythmia detection. *Sensing and Imaging*, *21*(1), 10.
[3] Gorshkov, O., & Ombao, H. (2021). Multi-chaotic analysis of inter-beat (RR) intervals in cardiac signals for discrimination between normal and pathological classes. *Entropy*, *23*(1), 112.
[4] Gupta, V., Mittal, M., & Mittal, V. (2019). R-peak detection using chaos analysis in standard and real time ECG databases. *Irbm*, *40*(6), 341-354.
[5] Gupta, V., & Mittal, M. (2019). QRS complex detection using STFT, chaos analysis, and PCA in standard and real-time ECG databases. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, *100*(5), 489-497.
[6] Casaleggio, A., & Braiotta, S. (1997). Estimation of Lyapunov exponents of ECG time series—the influence of parameters. *Chaos, Solitons & Fractals*, *8*(10), 1591-1599.
[7] Liu, Y., Tong, X., & Ma, J. (2016). Image encryption algorithm based on hyper-chaotic system and dynamic S-box. *Multimedia Tools and Applications*, *75*, 7739-7759.
[8] Akgül, A., Yıldız, M. Z., Boyraz, Ö. F., Güleryüz, E., Kaçar, S., & Gürevin, B. (2020). Doğrusal olmayan yeni bir sistem ile damar görüntülerinin mikrobilgisayar tabanlı olarak şifrelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *35*(3), 1369-1386.
[9] Abundiz-Pérez, F., Cruz-Hernández, C., Murillo-Escobar, M. A., López-Gutiérrez, R. M., & Arellano-Delgado, A. (2016). A fingerprint image encryption scheme based on hyperchaotic Rössler map. *Mathematical Problems in Engineering*, *2016*.
[10] Murillo-Escobar, M. A., Cardoza-Avendaño, L., López-Gutiérrez, R. M., & Cruz-Hernández, C. (2017). A double chaotic layer encryption algorithm for clinical signals in telemedicine. *Journal of medical systems*, *41*, 1-17.
[11] Mathivanan, P., Ganesh, A. B., & Venkatesan, R. (2019). QR code–based ECG signal encryption/decryption algorithm. *Cryptologia*, *43*(3), 233-253.

[12] Algarni, A. D., Soliman, N. F., Abdallah, H. A., & Abd El-Samie, F. E. (2021). Encryption of ECG signals for telemedicine applications. *Multimedia Tools and Applications*, *80*, 10679-10703.
[13] Sufi, F., & Khalil, I. (2008). Enforcing secured ecg transmission for realtime telemonitoring: A joint encoding, compression, encryption mechanism. *Security and Communication Networks*, *1*(5), 389-405.
[14] Wang, H., Bai, T., Pang, Y., Wang, W., Lin, J., Li, G., ... & Jiang, X. (2018). The dynamic encryption method based on ecg characteristic value. In *Communications, Signal Processing, and Systems: Proceedings of the 2016 International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems* (pp. 431-438). Springer Singapore.
[15] Zheng, G., Fang, G., Shankaran, R., & Orgun, M. A. (2015). Encryption for implantable medical devices using modified one-time pads. *IEEE Access*, *3*, 825-836.
[16] Huang, P., Li, B., Guo, L., Jin, Z., & Chen, Y. (2016, December). A robust and reusable ecg-based authentication and data encryption scheme for ehealth systems. In *2016 IEEE global communications conference (GLOBECOM)* (pp. 1-6). IEEE.
[17] Goldberger, A. L., Amaral, L. A., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Mark, R. G., ... & Stanley, H. E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *circulation*, *101*(23), e215-e220.
[18] Hossain, M. B., Rahman, M. T., Rahman, A. S., & Islam, S. (2014, May). A new approach of image encryption using 3D chaotic map to enhance security of multimedia component. In *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)* (pp. 1-6). IEEE.
[19] Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, *20*(2), 130-141.
[20] Ye, G., Zhao, H., & Chai, H. (2016). Chaotic image encryption algorithm using wave-line permutation and block diffusion. *Nonlinear Dynamics*, *83*, 2067-2077.
[21] Loukhaoukha, K., Nabti, M., & Zebbiche, K. (2013, May). An efficient image encryption algorithm based on blocks permutation and Rubik's cube principle for iris images. In *2013 8th International workshop on systems, signal processing and their applications (WoSSPA)* (pp. 267-272). IEEE.
[22] Kumari, M., Gupta, S., & Sardana, P. (2017). A survey of image encryption algorithms. *3D Research*, *8*, 1-35.
[23] Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D: nonlinear phenomena*, *16*(3), 285-317.
[24] McClellan, J. H., & Parks, T. W. (2005). A personal history of the Parks-McClellan algorithm. *IEEE signal processing magazine*, *22*(2), 82-86.
[25] Stefanski, A., Dabrowski, A., & Kapitaniak, T. (2005). Evaluation of the largest Lyapunov exponent in dynamical systems with time delay. *Chaos, Solitons & Fractals*, *23*(5), 1651-1659.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 206-223, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1495751
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Hipertansiyon Tedavisi İçin Yeni Ace İnhibitörlerinin Tasarımı, Sentezi, Moleküler Doking-Dinamik Çalışmaları

Design, Synthesis, Molecular Doking-Dynamic Studies of New Ace Inhibitors For Hypertension Treatment

Derya Osmaniye[1,2*], Bedriye Çelik[3]

Geliş / Received: 04/06/2024 ***Revize / Revised: 10/09/2024*** ***Kabul / Accepted: 10/09/2024***

ÖZ

Hipertansiyon günümüzde yaş fark etmeksizin sıklıkla karşılaşılan bir hastalık haline gelmiştir. Tedavi edilmediği durumlarda ciddi sonuçlar doğurmaktadır. Hipertansiyon tedavisinde etkili olabilecek yeni ACE inhibitörlerinin tasarımı ve sentezi, hipertansiyonun kontrol altına alınması ve kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi için önemli bir araştırma alanıdır. Bu çalışma kapsamında 3 yeni piperidin türevi sentezlenmiş ve antihipertansif etkileri *in silico* yöntemler ile araştırılmıştır. Sentezlenen bileşiklerin yapıları, ^{1}H-NMR, ^{13}C-NMR ve HRMS spektrumları ile doğrulanmıştır. Sentezlenen bileşenlerin moleküler doking çalışmaları yapılarak yapı-etki ilişkileri hakkında fikir elde edilmiştir. Bileşiklerin ADME parametreleri hesaplanmıştır. Moleküler doking çalışmaları sonucunda bileşik 2a'nın kaptopril ve enalapril arasında bir doking skoruna (-8.042) sahip olduğu saptanmıştır. Bileşik 2a için gerçekleştirilen moleküler dinamik çalışmaları bileşiğin hem stabilite hem de etkileşim potansiyelini göstermektedir. Bileşik 2a+1UZE kompleks yapısı 1.8 Å RMSD değerine sahiptir. Bileşik 2a üzerindeki karboksilat anyonu çinko ile %100 etkileşim kurmuştur.

Anahtar Kelimeler- Hipertansiyon, Piperidin, Moleküler Doking

ABSTRACT

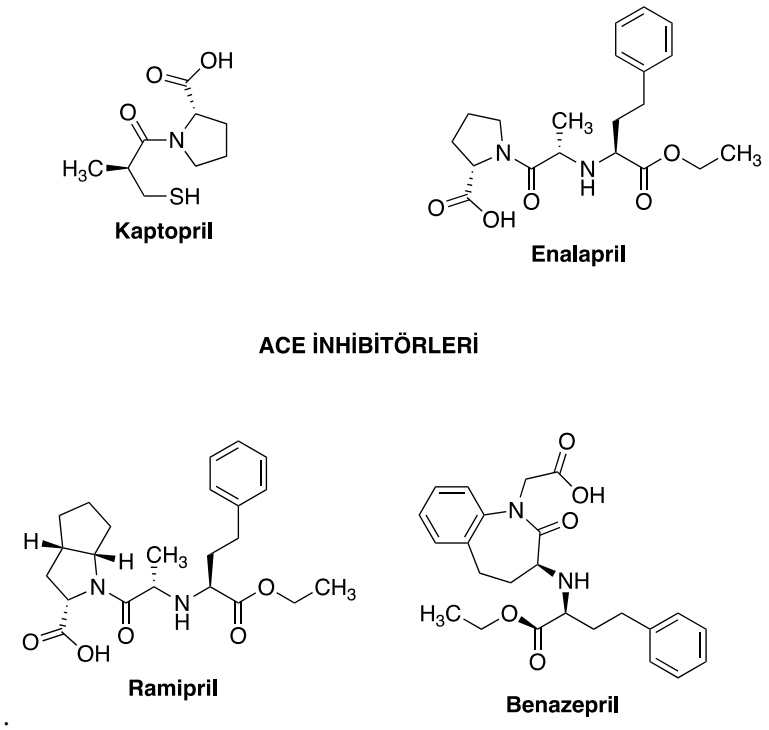
Hypertension has become a frequently encountered disease today, regardless of age. If left untreated, it causes serious consequences. The design and synthesis of new ACE inhibitors that may be effective in the treatment of hypertension is an important research area for controlling hypertension and preventing cardiovascular diseases. Within the scope of this study, 3 new piperidine derivatives were synthesized and their antihypertensive effects were investigated by in silico methods. The structures of the synthesized compounds were confirmed by ^{1}H-NMR, ^{13}C-NMR and HRMS spectra. Molecular docking studies of the synthesized components were carried out to obtain an idea about the structure-activity relationships. ADME parameters of the compounds were calculated. As a result of molecular docking studies, it was determined that compound 2a has a docking score (-8.042) between captopril and enalapril. Molecular dynamics studies performed for compound 2a show both stability and interaction potential of the compound. Compound 2a+1UZE complex structure has 1.8 Å RMSD value. Carboxylate anion on compound 2a has 100% interaction with zinc.

Keywords- Hypertension, Piperidine, Molecular Docking

[1]*Sorumlu yazar iletişim: dosmaniye@anadolu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-0499-436X)
Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmacy, Anadolu University, 26470 Eskişehir, Turkey
Central Research Laboratory (MERLAB), Faculty of Pharmacy, Anadolu University, 26470 Eskişehir, Turkey
[3]İletişim: bedriyecelik@anadolu.edu.tr (https://orcid.org/0009-0002-1321-5994)
Faculty of Pharmacy, Anadolu University, 26470 Eskişehir, Turkey

I. GİRİŞ

Kronik bir hastalık olan hipertansiyon, dünya çapında ölümlerin önde gelen nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. Ayrıca birçok faktörün rol oynadığı bir hastalıktır. Bu kronik hastalığın her yıl dokuz milyondan fazla insanı öldürdüğü ve yaklaşık 1,13 milyar insanı etkilediği bilinmektedir. Dünya Sağlık Örgütü'nün hipertansiyonun küresel yüküne ilişkin raporuna göre, 2025 yılına kadar 1,6 milyardan fazla insan hipertansiyona sahip olacaktır [1]. Hipertansiyon hastalığının toplumda sık görülmesi, sıklığının yaşla birlikte artması, ek hastalıklar ile birlikte olması; kronik bir hastalık olduğu için sürekli ilaç kullanımı ve takibi gerektirmesi nedeniyle önemli bir sağlık sorunudur. Gerek hastalığın ilk tanısının konması aşamasında, gerekse kontrollerde hipertansiyonun kontrol altında olup olmadığının tespitinde kan basıncına etki eden sekonder nedenlerin değerlendirilmesi önem arz etmektedir [2]. ACE (Anjiotensin dönüştürücü enzim), kan basıncının kontrol edilmesinde ve sıvı dengesinin korunmasında karmaşık bir şekilde yer alan düzenleyici bir mekanizma olan renin-anjiyotensin sisteminin (RAS) yapısında çok önemli ve önemli bir rol oynar [3]. ACE çinko içeren bir enzimdir [4]. Damar, kalp, akciğer ve beyin dokularında bulunur. Anjiotensin-I ACE katalizli bir reaksiyon ile anjiotensin-II'ye dönüşmektedir. ACE inhibe edilerek anjiotensin-II oluşumu engellenmekte ve böylece kan basıncının kontrol edilmesi ve antihipertansif etkinin ortaya çıkması, tansiyon tedavisi için bir strateji olarak kabul edilmektedir. Kaptopril, enalapril, ramipril ve benazepril (Şekil 1) dahil olmak üzere sentetik ACE inhibitörleri, insanlarda esansiyel hipertansiyonun tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5].



Şekil 1. Klinikte kullanılan ACE inhibitörlerinin kimyasal yapısı

ACE inhitörlerinin yapı etkileri net bir şekilde aydınlatılmıştır, bu yapı-etki ilişkileri şu şekilde özetlenebilir. Azot taşıyan halka karboksilik asit içermelidir. Burada amaç bileşiğin ACE subtratlarındaki C-terminal gruba benzemesidir. Sülfidril grubu içeren bileşikler çinko iyonlarına bağlanmada üstünlük gösterir fakat sülfidril grubu içeren bileşiklerin dimer ve disülfitler oluşturma potansiyeli vardır. Bu ise etki süresinin azalması demektir. Çinko iyonlarını bağlayan karboksilat ve fosfinik asit türevleri peptit hidrolizini ve bağlanmayı değiştirir. Bunların ester formları oral biyoyararlanımı arttırır. Bileşikler amid yapısının alfa karbonunda metil içerirler. Bu bileşiklerin molekül şekillerini alanine benzetmektedir [6].

Yukarıda anlatılan bilgiler ışığında bu çalışma kapsamında piperidin halkası üzerinde karboksilik asit fonksiyonel grubu taşıyan yeni bileşikler sentezlenmiştir. 3 adet yeni bileşik elde edilmiştir. Elde edilen bileşiklerin yapıları ^{1}H-NMR (hidrojen nükleer magnetik rezonans), ^{13}C-NMR (karbon nükleer magnetik rezonans) ve HRMS (yüksek çözünürlüklü kütle spektrokopisi) yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Bileşiklerin hepsi yapı-etki ilişkilerinde bahsedilen azotlu halka üzerinde karboksilik asit taşımaktadır. Azotlu halka olarak piperidin halkası seçilmiştir. Bileşiklerden bir tanesi (2a) alfa karbonu üzerinde metil taşımaktadır. Elde edilen bileşikler ve referans ilaç olan kaptopril ve enalapril moleküler doking çalışmalarına tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar çalışmanın sonuç kısmında sunulmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Sentez Çalışmaları

Sodyum 3-karboksi piperidin-1-karboditiyoat sentezi (1)

Piperidin 3-karboksilik asit (5 gr, 0.038 mol), karbon disülfür (3.46 gr, 0.045 mol)ve sodyum hidroksit (NaOH) (1.8 gr, 0.045 mol) etanol (99%, 30 mL) içinde çözülmüştür. Reaksiyon karışımı, 24 saat boyunca buz banyosunda karıştırılmıştır. İTK (ince tabaka kromatografisi) analizi yapılarak reaksiyon içeriği sonlandırılmıştır. Ham ürün, dietileter ile yıkanarak alınmış, kurutulmuş ve etanolden yeniden kristallendirilmiştir

Hedef bileşiklerin sentezi (2a-2c)

1-(((3-Oksobütan-2-il) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit sentezi (2a)

Sodyum 3-karboksi piperidin-1-karboditiyoat (1) (0.5 gr, 0.002 mol) ve 3-klorobutan-2-on (0.233 gr, 0.002 mol) aseton (20 mL) içinde çözülmüştür. Reaksiyon karışımı, 24 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılmıştır. İTK analizi yapılarak reaksiyon içeriği sonlandırılmıştır. Ham ürün, suyla yıkanarak alınmış, kurutulmuş ve etanolden yeniden kristallendirilmiştir.

1- (((2-Metoksi-2-oksoetil) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit sentezi (2b)

Sodyum 3-karboksi piperidin-1-karboditiyoat (1) (0.5 gr, 0.002 mol) ve metil 2-kloroasetat (0.216 gr, 0.002 mol) aseton (20 mL) içinde çözülmüştür. Reaksiyon karışımı, 24 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılmıştır. İTK analizi yapılarak reaksiyon içeriği sonlandırılmıştır. Ham ürün, suyla yıkanarak alınmış, kurutulmuş ve etanolden yeniden kristallendirilmiştir.

1- (((2-Etoksi-2-oksoetil) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit sentezi (2c)

Sodyum 3-karboksi piperidin-1-karboditiyoat (1) (0.5 gr, 0.002 mol) ve etil 2-kloroasetat (0.244 gr, 0.002 mol) aseton (20 mL) içinde çözülmüştür. Reaksiyon karışımı, 24 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılmıştır. İTK analizi yapılarak reaksiyon içeriği sonlandırılmıştır. Ham ürün, suyla yıkanarak alınmış, kurutulmuş ve etanolden yeniden kristallendirilmiştir.

B. Moleküler Doking Çalışmaları

Moleküler doking çalışmaları Schrödinger 2020 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bileşiklerin molekül şekilleri çizildikten sonra Ligprep modülü ile pH:7.4±1 değeri ile ligandlar hazırlanmıştır. Protein veri bankası (PDB) aracılığı ile ACE enziminin kristal yapısı elde edilmiştir. PDB ID:1UZE kristali [7]kullanılarak protein hazırlanmıştır. Optimizasyon ve minimizasyonu yapılan protein üzerinden Glide modülü kullanılarak glide dosyası hazırlanmıştır. Elde edilen veriler ile standart doking prosedürü gerçekleştirilmiş ve elde edilen pozların iki boyutlu, üç boyutlu görselleri ve doking skorları elde edilmiştir [8–10]. Doking prosedürleri hem elde edilen bileşikler (**2a-2c**) hem de kaptopril ve enalapril için gerçekleştirilmiştir.

C. Moleküler Dinamik Çalışmaları

Moleküler dinamik (MD) simülasyonları bir ilaç-reseptör kompleksi için aktif bir bölgedeki bir ligandın zamana bağlı stabilitesini değerlendirmek için önemli bir hesaplama aracı olarak kabul edilmektedir, bu çalışma kapsamında ise bileşik **2a** için yapılmıştır [11]. Yerleştirme sonucundan belirlenen komplekslerin kararlılığını sağlamak için 100 ns boyunca MD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Dinamik çalışmaları, desmond uygulamasını [12]3 noktalı (TIP3P) bir su modeli ve ardından kompleksin enerji minimizasyonu [13] ile transfer edilebilir bir moleküller arası potansiyele sahip *Schrödinger Suite*'in standart kuvvet alanı (OPLS3e) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek değerli iyonların fizyolojik konsantrasyonunu simüle ederken bir yandan da sistemin nötralizasyonunu sağlamak amacıyla Na^+ ve Cl^- iyonları kullanılarak 0.15 M'lik bir nihai tuz konsantrasyonu sağlar. Sabit sıcaklık (310.55 K) ve basınç (1.01325 bar), topluluk sınıfı olarak NPT (sabit sayıda parçacık, basınç ve sıcaklık) ile kullanılmıştır. Hareket denklemlerini bütünleştirmek için RESPA entegratörü [14] kullanılmıştır. Simülasyon sıcaklığını sabit tutmak için NH termostatları [15] kullanılmış ve basıncı kontrol etmek için MTK yöntemi [16] uygulanmıştır. Uzun menzilli elektrostatik etkileşimler, pmE yöntemi [17] ile hesaplanmıştır. Van der Waals ve kısa menzilli elektrostatik etkileşimler için sınır 9,0 Å olarak ayarlanmıştır. Sistemin dengelenmesi, sistemi yavaşça gevşetmek için kullanılan bir dizi sınırlandırılmış minimizasyon ve moleküler dinamik simülasyonlarından oluşan Desmond'da sağlanan varsayılan protokolle gerçekleştirilmiştir. MD simülasyonu, yukarıdaki ayarlar kullanılarak ve sistem kurulumunun tamamlanmasının ardından gerçekleştirilmiştir. Rg (dönme yarıçapı), kök ortalama kare dalgalanma (RMSF) ve kök ortalama kare sapma (RMSD) değerleri Desmond uygulaması tarafından hesaplanmıştır.

D. Tahmini ADME Parametreleri

Bileşikler **2a-2c** için ADME (Absorbsiyon, Dağılım, Metabolizasyon, Atılım) ile ilgili parametreler online SwissADME programı kullanılarak hesaplanmıştır [18].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

1-(((3-oksobütan-2-il) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit (2a)

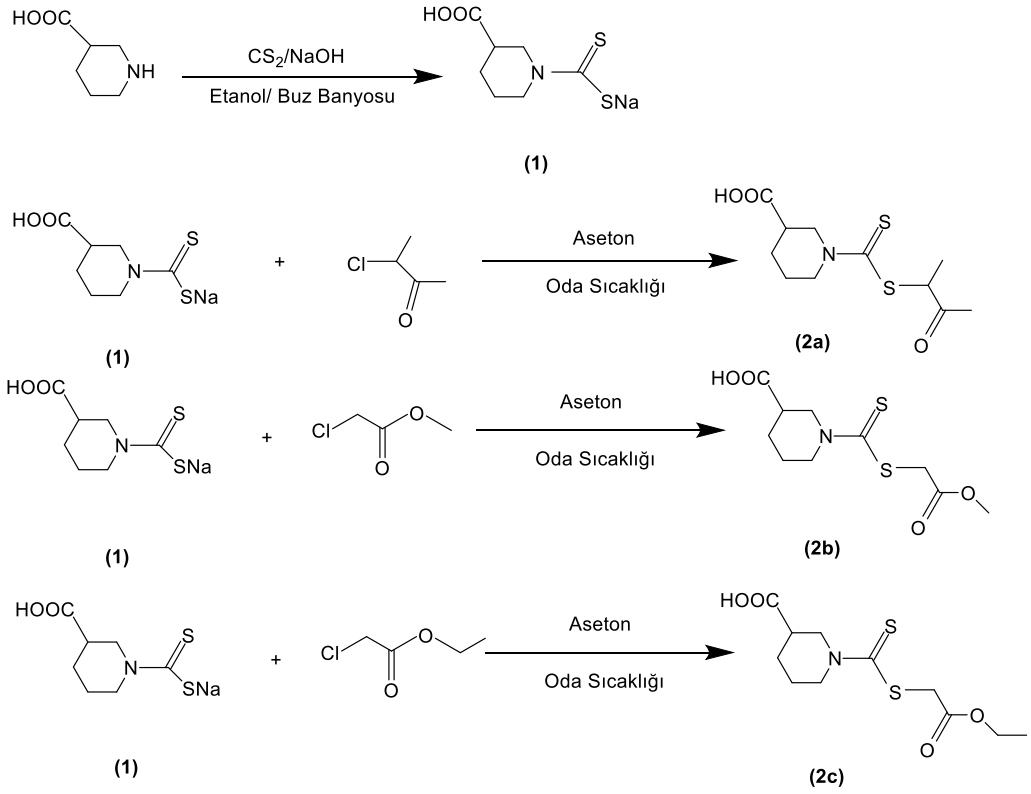
Verim:%62, yarı katı, ^{1}H-NMR (300 MHz, DMSO-d_6): 1.38 (3H, d, *J*=7.3 Hz, -CH_3), 1.72-1.77 (3H, m, piperidin), 1.99-2.03 (1H, m, piperidin), 2.25 (3H, s, -CH_3), 3.41-3.62 (5H, m, Al-H), 4.33-4.39 (1H, m), 4.73 (1H, q, *J*=7.2 Hz, -CH-). ^{13}C-NMR (75 MHz, DMSO-d_6): 15.8, 24.1, 24.9, 26.8, 28.3, 51.1, 52.1, 53.4, 55.1, 174.2, 193.5, 205.5. HRMS: Kapalı formül; $C_{11}H_{17}NO_3S_2$ hesaplanan kütle: 276.0723 ölçülen kütle: 276.0711

1- (((2-metoksi-2-oksoetil) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit (2b)

Verim:%60, yarı katı, ^{1}H-NMR (300 MHz, DMSO-d_6): 1.23-1.29 (2H, m), 1.45-1.50 (2H, m), 1.99-2.02 (1H, m), 2.49-2.50 (1H, m), 3.37-3.45 (2H, m), 3.63 (3H, s), 3.63-3.67 (1H, m), 4.18 (2H, s), 4.39-4.42 (1H, m). ^{13}C-NMR (75 MHz, DMSO-d_6): 24.2, 24.9, 26.9, 43.9, 52.7, 52.8, 65.0, 169.1, 174.2, 174.3, 194.1 HRMS: Kapalı formül; $C_{10}H_{15}NO_4S_2$ hesaplanan kütle: 300.0335 ölçülen kütle: 300.0325.

1- (((2-etoksi-2-oksoetil) tiyo) karbonotiyoil) piperidin-3-karboksilik asit (2c)

Verim:%70, yarı katı, ^{1}H-NMR (300 MHz, DMSO-d_6): 1.18-1.21 (3H, m), 1.46-1.55 (1H, m), 1.67-1.71 (2H, m), 1.99-2.03 (1H, m), 2.44 (1H, y), 3.35-3.62 (4H, m), 4.08-4.16 (2H, m), 4.16-4.17 (2H, m), 4.36-4.41 (1H, m). ^{13}C-NMR (75 MHz, DMSO-d_6): 14.5, 24.1, 24.9, 26.9, 50.9, 53.4, 58.4, 61.5, 168.5, 173.9, 174.1, 194.3 HRMS: Kapalı formül; $C_{11}H_{17}NO_4S_2$ hesaplanan kütle: 292.0672 ölçülen kütle: 292.0657.



Şekil 2. Bileşikler 2a-2c için sentez şeması

Hedef bileşiklerin sentezlenmesi iki basamaklı bir reaksiyon ile gerçekleştirilmiştir. İlk basamakta piperidin-3-karboksilik asitten hareketle ditiyokarbamat tuzu oluşturulmuştur. Reaksiyon buz banyosunda gerçekleştirilmiş ve ham ürün çöktükten sonra karbon disülfin fazlasının uzaklaştırılması için dietil eter (20 mL) ile üç tur yıkama yapılmıştır. İkinci basamakta halojenli bileşikler ile ditiyokarbamat tuzu (bileşik 1) reaksiyona sokulmuş aseton uçulurup su ile yıkama yapıldıktan sonra ürün katılaşmamıştır. Su fazı sodyum bikarbonat ile doyurulup etil asetat ile ekstraksiyon yapılmış, etil asetatlı faz uçurulup ham ürün kazınarak alınmıştır.

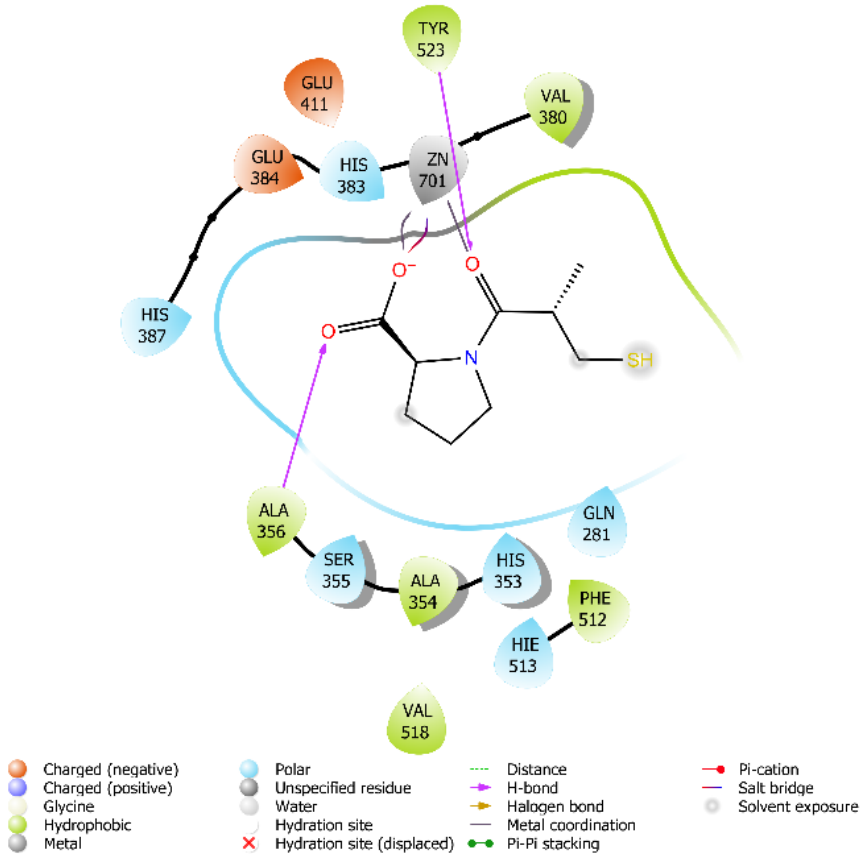
Bileşiklerin analizleri ^{1}H-NMR, ^{13}C-NMR ve HRMS spektroskopik metotları kullanılarak incelenmiştir. İlgili raporlar EK dosyasında spektra 1-9 arasında sunulmuştur. Elde edilen bileşiklerin doking çalışmaları Schrödinger 2020 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ACE enziminin kristal yapısına protein veri bankası

aracılığı ile ulaşılmıştır. PDB ID:1UZE olan kristal kullanılmıştır. Bileşikler 2a-2c, kaptopril ve enalapril için doking çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen doking skorları Tablo 1'de sunulmuştur.

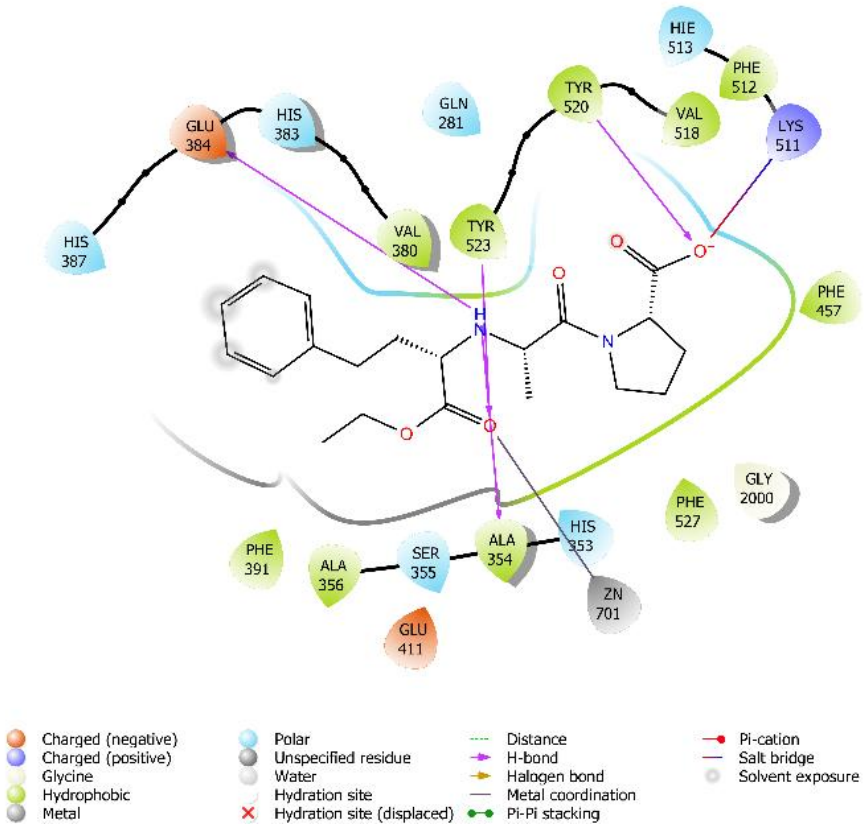
Tablo 1. Bileşikler 2a-2c, kaptopril ve enalapril için doking skorları

Bileşik	Doking Score	Glide Score	Glide e model
2a	-8.042	-8.042	-66.758
2b	-6.342	-6.342	-63.450
2c	-6.804	-6.804	-74.050
Kaptopril	-7.754	-7.758	-60.222
Enalapril	-8.537	-8.618	-87.763

Doking skorları incelendiğinde kaptopril -7.754 kcal/mol, enalapril ise -8.537 kcal/mol doking skoruna sahip oldukları görülmektedir. Bileşikler 2a, 2b ve 2c için doking skorları incelendiğinde sırası ile -8.042, -6.342 ve -6.804 kcal/mol doking skoruna sahip oldukları görülmektedir.Bileşik 2a kaptopril ile enalapril arasında bir doking skoruna sahiptir. Bu bileşiğin affinitesini göstermektedir. Şekil 3-7 arasında bileşiklerin ACE-2 enzim aktif bölgesinde bileşikler 2a-2c, kaptopril ve enalapril etkileşimlerini sunmaktadır. Şekil 3 incelendiğinde kaptopril molekülünün etkileşimleri görülmektedir. Bu etkileşimler şu şekilde sıralanabilir; karboksilat anyonu ile Zn atomu arasında ikili tuz köprüsü oluşturmaktadır, pirolidin halkasının ikinci konumuna bağlı karbonil grubu ile Ala356 arasında bir hidrojen bağı oluşmaktadır, pirolidin halkasının birinci konumuna bağlı karbonil Zn ile metal koordinasyonu yaparken Tyr523 ile hidrojen bağı oluşturmuştur.



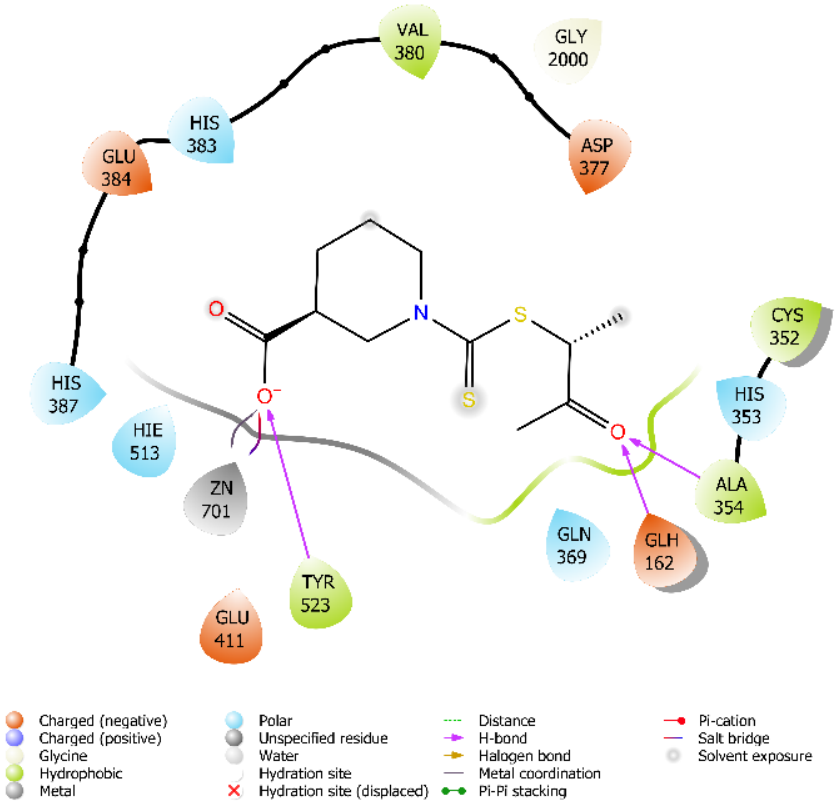
Şekil 3. Kaptopril'e ait iki boyutlu doking pozu (PDB ID:1UZE)



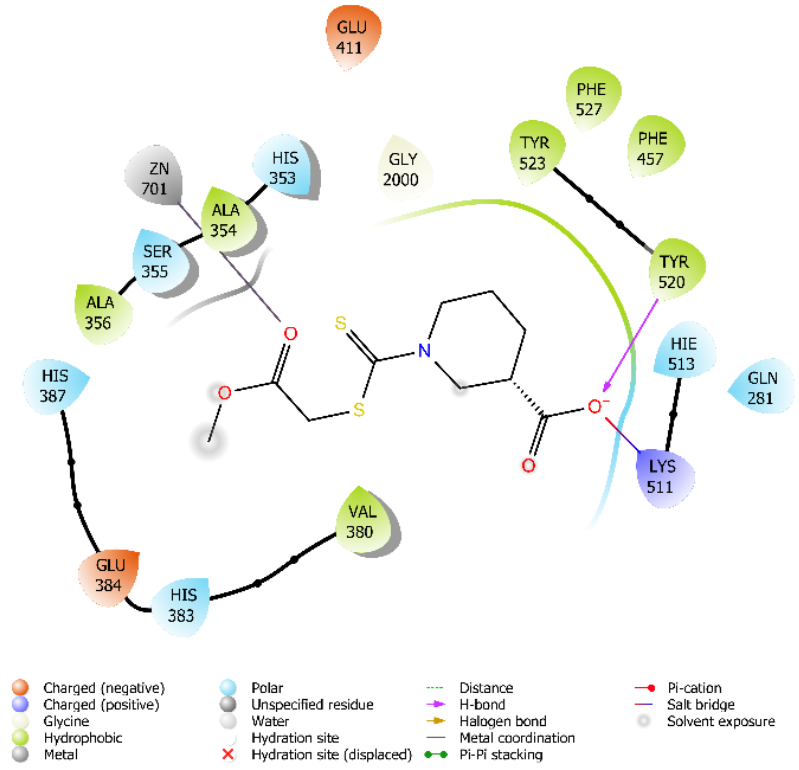
Şekil 4. Enalapril'e ait iki boyutlu doking pozu (PDB ID:1UZE)

Şekil 4 incelendiğinde enalapril molekülünün etkileşimleri görülmektedir. Bu etkileşimler şu şekilde sıralanabilir; karbonil grubu ile Zn atomu arasında metal koordinasyon bağı, Tyr523 ile hidrojen bağı oluşmaktadır, amin grubu ile Ala354 ve Glu384 arasında iki adet hidrojen bağı oluşmaktadır, karboksilat anyonu ile Tyr520 arasında hidrojen bağı oluşuken Lys511 ile tuz köprüsü oluşturmaktadır. Şekil 5 incelendiğinde bileşik 2a'nın ACE enzim aktif bölgesindeki etkileşimleri görülmektedir. Bu etkileşimler şu şekilde sıralanabilir; karboksilat anyonu ile Zn atomu arasında ikili tuz köprüsü, Tyr523 ile hidrojen bağı oluşmaktadır, bileşik 2a'nın karbonil grubu ile Glh162 ve Ala354 ile hidrojen bağı oluşturmaktadır. Şekil 6 incelendiğinde bileşik 2b'nin ACE enzim aktif bölgesindeki etkileşimleri görülmektedir. Bu etkileşimler şu şekilde sıralanabilir; karbonil grubu ile Zn atomu arasında metal koordinasyon bağı oluşmaktadır, bileşik 2b'nin karboksilat anyonu ile Lys511 ve Tyr520 arasında iki adet hidrojen bağı oluşturmaktadır. Şekil 7 incelendiğinde bileşik 2c'nin ACE enzim aktif bölgesindeki etkileşimleri görülmektedir. Bu etkileşimler şu şekilde sıralanabilir; karbonil grubu ile Zn atomu arasında metal koordinasyon bağı yaparken Tyr523 ile hidrojen bağı oluşturmaktadır, bileşik 2c'nin karboksilat anyonu ile Lys511 ve Tyr520 arasında iki adet hidrojen bağı oluşturmaktadır.

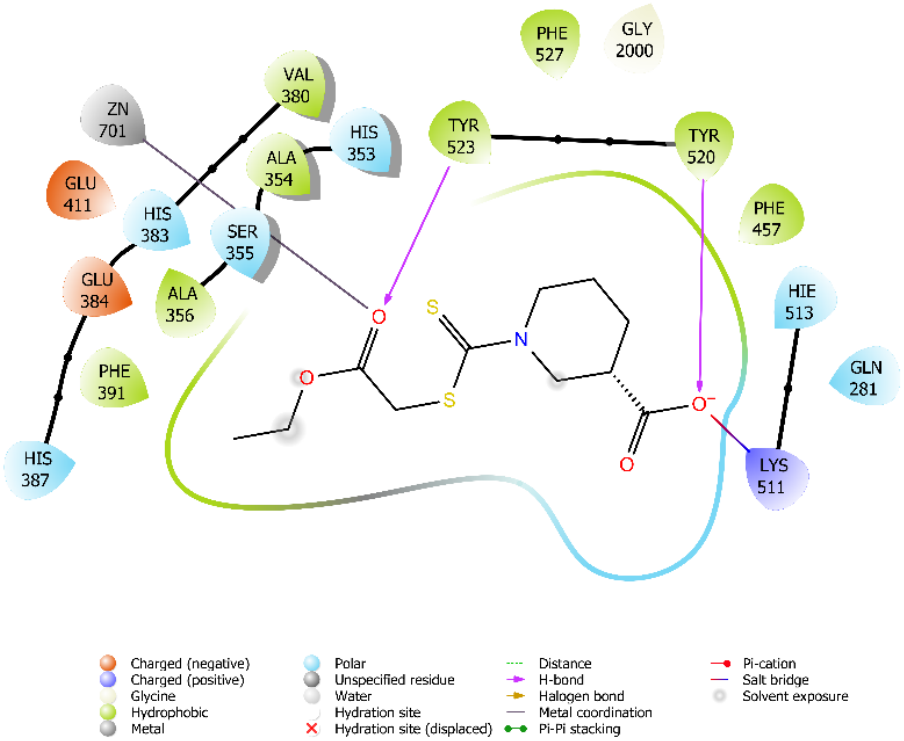
Bu bilgiler ışığında özellikle bileşik 2a'nın kaptopril ile çok benzer bir yerleşim gösterdiği belirlenmiştir. Kaptopril molekülünün gerçekleştirdiği çinko ve Tyr523 etkileşimlerini bileşik 2a'da gözlenmiştir. Ayrıca ek olarak enalapril de görülen Ala354 ile olan etkileşimi de sağlamıştır.



Şekil 5. Bileşik 2a'ya ait iki boyutlu doking pozu (PDB ID:1UZE)

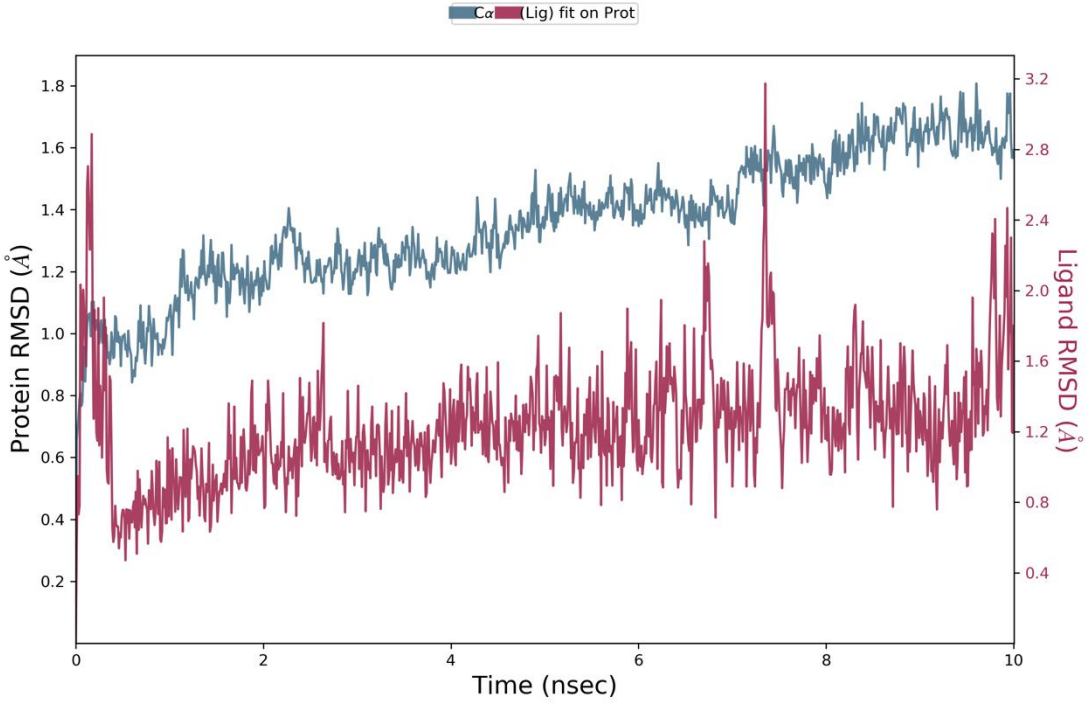


Şekil 6. Bileşik 2b'ye ait iki boyutlu doking pozu (PDB ID:1UZE)



Şekil 7. Bileşik 2c'ye ait iki boyutlu doking pozu (PDB ID:1UZE)

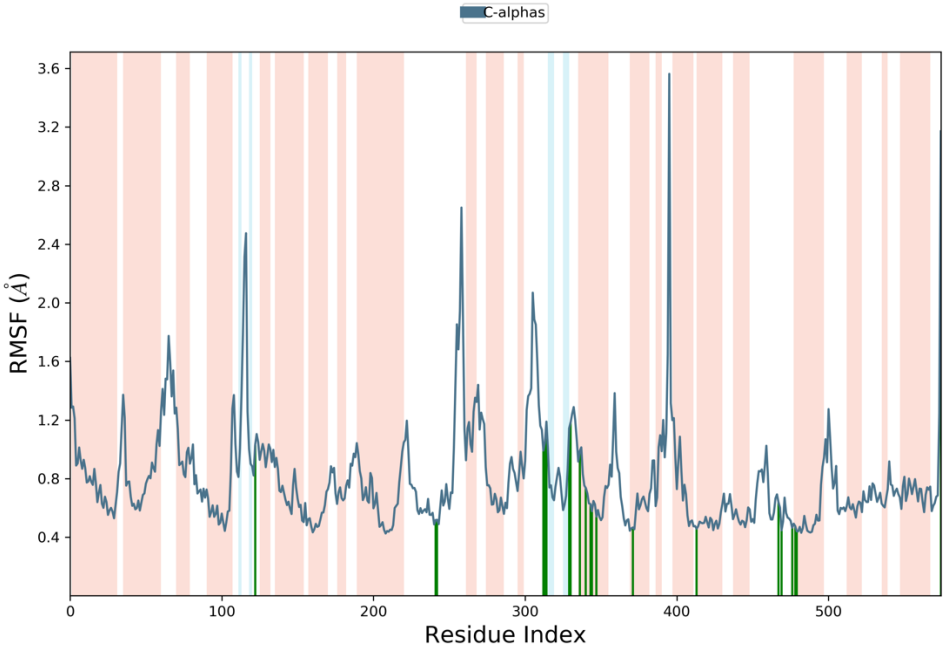
Moleküler doking çalışmaları bileşiğin anlık enzim aktif bölgesindeki etkileşimlerini göstermektedir. Dinamik çalışmaları ise bir süre boyunca bileşiğin enzim aktif bölgesinde nasıl davrandığının göstergesidir. Dolayısıyla bileşiğin stabilitesi ve aktivite potansiyeli hakkında daha net bilgi verir. RMSD (kök ortalama kare sapma) değeri bir stabilite göstergesidir. Bu değerin 1-3 Å arasında olması bileşiğin enzim aktif bölgesinde stabil bir şekilde durduğunu gösterir. Şekil-8 incelendiğinde bileşik 2a'da bu değer maksimum 1.8 Å olmuştur. Bu bileşik 2a'nın 1UZE kristali ile yaptığı kompleksin enzim aktif bölgesinde stabil olduğunu göstermektedir.



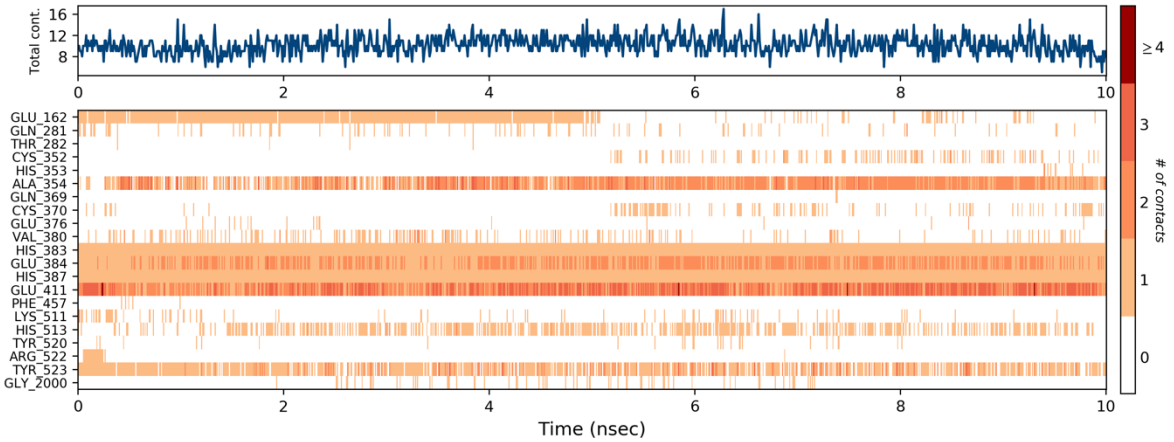
Şekil 8. Bileşik 2a+1UZE kompleksine ait RMSD grafiği

RMSF (Ortalama karekök dalgalanma) ise bileşik 2a+1UZE kompleksinin dinamik süresi içerisinde aminoasitler ile yaptığı etkileşimlerin dalgalanmalarını göstermektedir. Elde edilen RMSF verileri şu şekilde

listelenebilir; Leu161 (0.82 Å), Gln281 (0.52 Å), Thr282 (0.52 Å), Cys352 (0.99 Å), His353 (1.04 Å), Ala354 (1.19 Å), Gln369 (1.14 Å), Cys370 (1.19 Å), Glu376 (0.99 Å), Val380 (0.73 Å), His383 (0.63 Å), Glu384 (0.58 Å), His387 (0.54 Å), His410 (0.46 Å), Phe457 (0.46 Å), Lys511 (0.64 Å), Ile514 (0.51 Å), Pro519 (0.51 Å), Ile521 (0.49 Å), Tyr523 (0.44 Å). Şekil-9 bileşik 2c+1UZE kompleksinin RMSF analizini sunmaktadır. Burada pembe alanlar a-heliks bölgelerini mavi alanlar b-sarmal yapıları beyaz alanlar ise loop bölgelerini ifade etmektedir. Bileşik pembe ve mavi alanlarda stabil iken loop bölgelerinde dalgalanma göstermiştir. Bu kabul edilebilirdir.

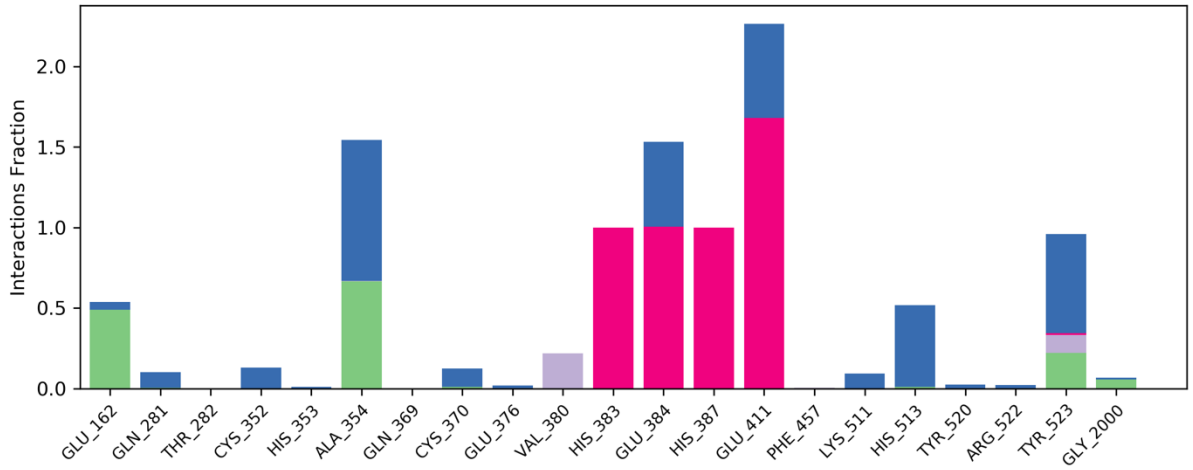


Şekil 9. Bileşik 2a+1UZE kompleksine ait RMSF grafiği



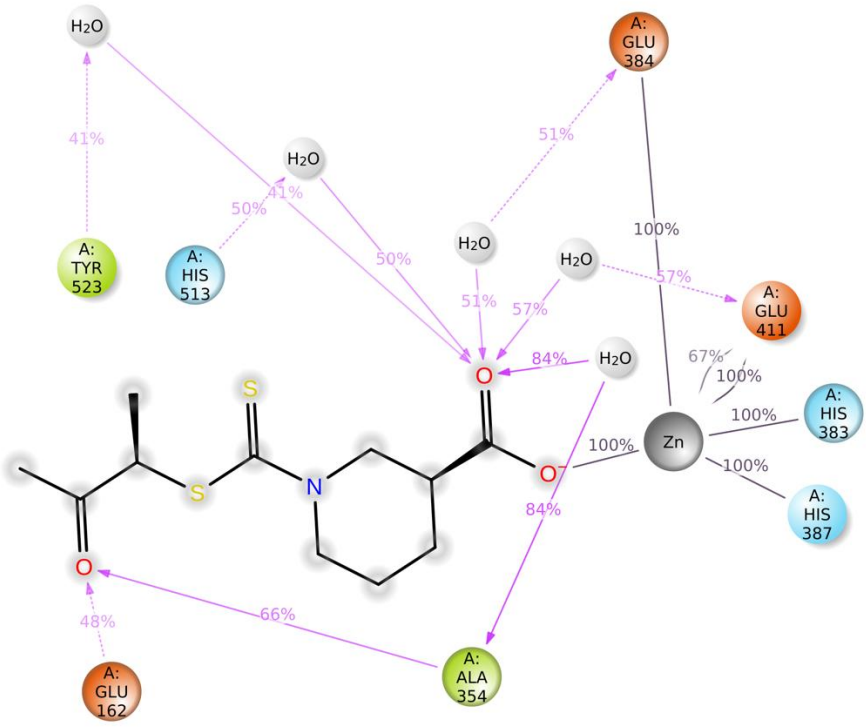
Şekil 10. Bileşik 2a+1UZE kompleksine ait zamana bağlı aminoasit etkileşim grafiği (turuncu bölgeler etkileşim olduğunu göstermektedir.)

Şekil 10 incelendiğinde bileşiğin dinamik çalışmaları boyunca etkileşim içerinde olduğu aminoasitler görülmektedir. Burada özellikle Ala354, His383, Glu384, His387, Glu411 ve Tyr523 ile yapılan kesintisiz etkileşimler dikkat çekicidir. Bu etkileşimlerin bileşiğin stabilitesinde primer rol oynadıkları düşünülebilir. Şekil-11 ise etkileşim tiplerini özetlemektedir. Burada yeşil renk hidrojen bağını, mavi renk su aracılı hidrojen bağını, pembe renk iyonik etkileşimleri, mor renk ise hidrofobik etkileşimleri göstermektedir. Burada bileşik 2a'nın Glu162, Thr282, Ala354, Cys370, His513, Tyr523 ve Gly2000 ile hidrojen bağı; Glu162, Gln281, Cys352, His353, Ala354, Cys370, Glu376, Glu384, Glu411, Lys511, His513, Tyr520, arg522, Tyr523, Gly2000 ile su aracılı hidrojen bağı, His383, Glu384, His387, Glu411 ve Tyr523 ile iyonik bağ ve Val380, Tyr523 ile hidrofobik etkileşim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 11. Bileşik 2a+1UZE kompleksine ait zamana bağlı aminoasit etkileşim türleri

Şekil 12 ise bileşik 2c'nin enzim aktif bölgesindeki etkileşiminin iki boyutlu görselini sunmaktadır. ACE inhibisyonu için en önemli etkileşiminin çinko ile yapılan etkileşim olduğu bilinmektedir. Bu etkileşimin 100% şeklinde gözlenmesi bileşiğin etki gücünü gözler önüne sermektedir. Ayrıca çinko atomunun karboksilat ile etkileşmiş hali de His383, His387 ve Glu411 ile 100% etkileşim sergilemiştir. Ala354 her iki karbonil atomu ile 84% ve 66% etkileşim oranlarına sahiptir.



Şekil 12. Bileşik 2c+1UZE kompleksine ait yüzde etkileşim oranları

Bileşiklerin fizikokimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ADME parametreleri incelenmiştir. İlgili sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Elde edilen bileşiklerin (2a-2c) oral biyoyararlanım radarları hesaplanmış ve görselleri Şekil 13'de sunulmuştur. Burada bileşiğin parametrelerinin pembe alan içerisinde kalması bileşiklerin oral biyoyararlanım oranlarının iyi olduğunu göstermektedir. Tablo-2 incelendiğinde bileşiklerin her biri için gastrointestinal sistem (GI) geçirgenliğinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu Şekil-13'yi de destekler niteliktedir. Kan beyin bariyeri (KBB) geçirgenliği üç bileşik içinde saptanamamıştır. Bu merkezi sinir sistemi ile ilgili yan etkilerin görülmemesi açısından önemli bir bulgudur. SwissADME programı kullanılarak hesaplanan parametreler sonucunda üç bileşik (2a-2c) içinde ilaç benzerlik parametresi de pozitif çıkmıştır. Bu bilgi bileşiklerin ilaç adayı olma potansiyellerini göstermektedir.

Tablo 2. Bileşikler 2a-2c, için ADME parametreleri

Bileşik	Molekül Ağırlığı g/mol	TPSA Å²	logPo/w	GI Absorbsiyon	KBB Geçirgenliği	İlaç Benzerlik
2a	275.39	115.00	2.04	Yüksek	Yok	Evet
2b	277.36	124.23	2.02	Yüksek	Yok	Evet
2c	291.39	124.23	2.35	Yüksek	Yok	Evet



Şekil 13. Bileşik 2a-2c'nin oral biyoyararlanım radarları

IV. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında üç adet yeni piperidin-3-karboksilik asit (2a-2c) türevi bileşikler sentezlenmiştir. Bileşiklerin yapı analizleri için ^{1}H-NMR, ^{13}C-NMR ve HRMS spektroskopi yöntemleri kullanılmıştır. Bileşiklerin tasarımı sırasına ACE inhibitörlerinin yapıları ve yapı-etki ilişkileri baz alınmıştır. Bu sebeple elde edilen bileşiklerin yapıları doğrulandıktan sonra kaptopril ve enalapril bileşikleri kullanılarak moleküler doking ve moleküler dinamik çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kristal olarak PDB ID:1UZE kristali kullanılmıştır. Elde edilen bileşik 2a'nın potansiyel ACE inhibitörü etkilerini gösterir niteliktedir. Bileşik 2a,-8.042 kcal/mol doking skoru ile kaptopril ile enalapril arasında bir etkinlik potansiyeli sergilemiştir. İlgili doking pozları bileşik 2a'nın kaptopril ile etkileşimlerine ek olarak enalaprilin yaptığı bazı ekstra etkileşimleri de yaptığını göstermektedir. Elde edilen bulgular azotlu halka üzerindeki karboksilik asit grubunun önemini bir kez daha göstermiştir. Azotlu halkanın kaptopril ve enalaprile göre daha büyük olması *in silico* yerleşme açısından çok büyük bir fark yaratmamıştır. Bileşik 2a'nın yapısını alanin aminoasidine benzeten metil dallanması onun kaptoprile daha çok benzemesine ve enzim aktif bölgesine daha iyi lokalize olmasına yardımcı olmuştur. Bileşik 2b ve 2c ise yine potansiyel inhibitör bileşiklerdir. Bu bileşiklerin ester grupları *in vivo* ortamda karboksilik aside parçalanırsa daha yüksek inhibitör potansiyel göstermeleri beklenmektedir. İleri çalışmalarda bu bileşiklerin *in vitro* enzim çalışmaları yanında bileşik 2b ve 2c için metabolizma çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

Bileşik 2a ile gerçekleştirilen dinamik çalışmaları bileşik 2a'nın enzim aktif bölgesinde stabilitesini koruduğunu göstermektedir. Bileşiğin 10 ns boyunca Zn ile 100% etkileşim içerisinde olması da enzim aktif bölgesinde güçlü inhibisyon potansiyelini göstermektedir. İleriki çalışmalarda bileşik 2a ve türevleri sentezlenerek *in vitro* ve *in vivo* aktivite potansiyellerinin incelenmesi hedeflenmektedir.

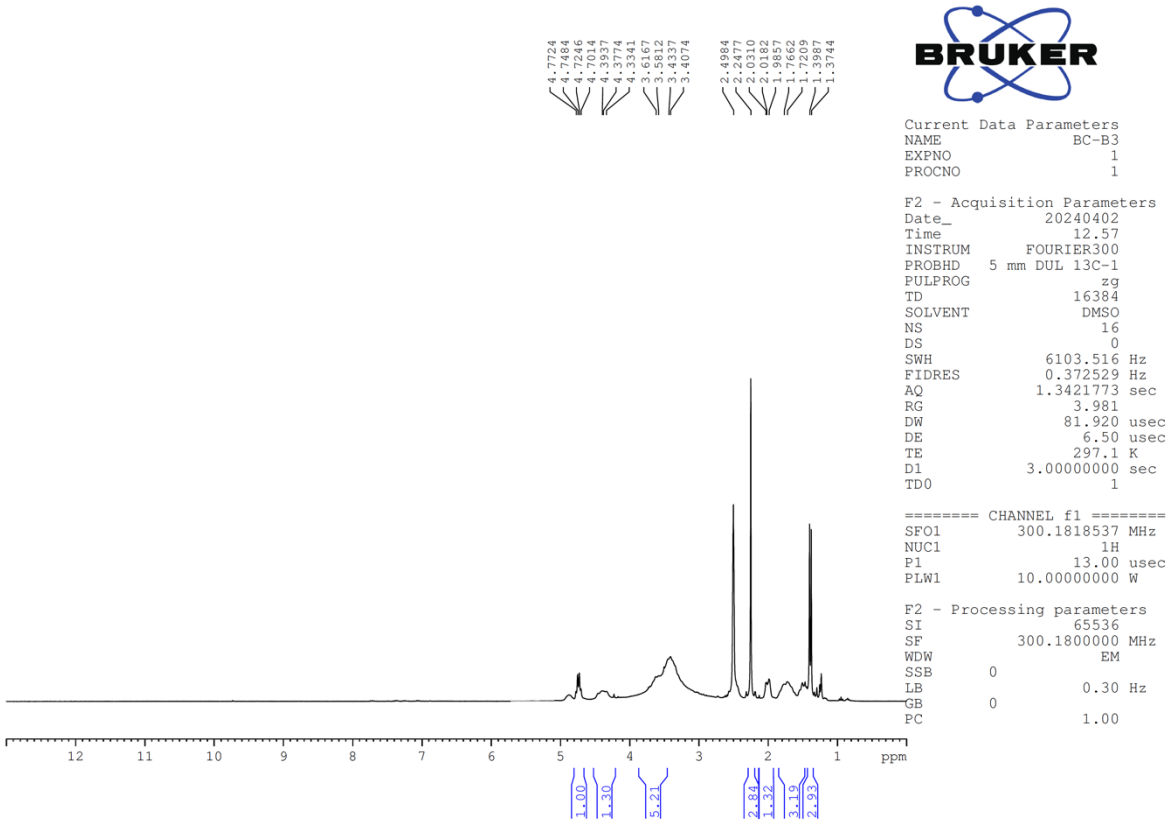
TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yazarları olarak Anadolu Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına ve Anadolu Üniversitesi BAP Birimine teşekkürlerimizi sunarız.

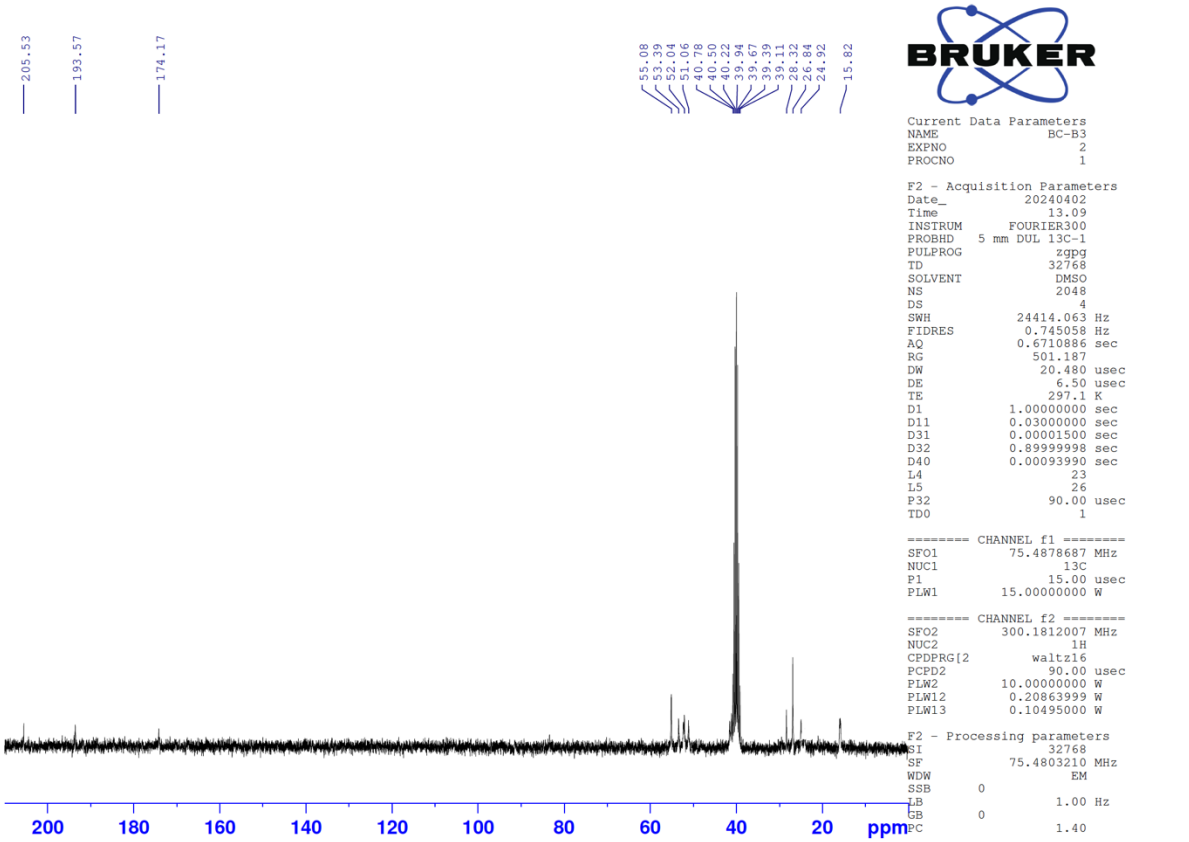
KAYNAKLAR

[1] Ali, M.Y., Jannat, S., & Chang, M.S. (2023). Discovery of potent angiotensin-converting enzyme inhibitors in pomegranate as a treatment for hypertension. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71, 11476-11490.
[2] Muntner P., Carey R.M., Gidding S., Jones D.W., Taler S.J., Wright J.T., Whelton P.K. (2018). Potential US population impact of the 2017 ACC/AHA high blood pressure guideline. *Circulation*, 137, 109-118.
[3] Gayathiri, E., Prakash, P., Selvam, K., Pratheep, T., Chaudhari, S.Y., & Priyadharshini, S.D. (2024). In silico elucidation for the identification of potential phytochemical against ACE-II inhibitors. *Journal of Molecular Modeling*, 30, 78.
[4] Wang W., McKinnie S.M.K., Farhan M., Paul M., McDonald T., McLean B., Llorens-Cortes C., Hazra S., Murray A.G., Vederas J.C., Oudit G.Y. (2016). Angiotensin-converting enzyme 2 metabolizes and partially inactivates Pyr-Apelin-13 and Apelin-17. *Hypertension*, 68(2), 365-377.
[5] Ko S.C., Kim JY., Lee J.M., Yim M.J., Kim H.S., Oh G.W., Kim C.H., Kang N., Heo S.J., Baek K., Lee D.S. (2023). Angiotensin I-converting enzyme (ACE) inhibition and molecular docking study of meroterpenoids isolated from brown alga, Sargassum macrocarpum. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 11065.
[6] Akgün, H., Balkan, A., Bilgin, A.A., et al. (2014). *Farmasötik Kimya*. Hacettepe Yayınları, Ankara, Türkiye
[7] Natesh, R., Schwager, S.L.U., Evans, H.R., Sturrock, E.D., & Acharya, K.R. **(**2004). Structural details on the binding of antihypertensive drugs captopril and enalaprilat to human testicular angiotensin I-converting enzyme. *Biochemistry*, 43(27), 8718-8724.
[8] Schrödinger, LLC. (2020). *Glide* (Version 7.1). New York, NY, USA.
[9] Schrödinger, LLC. (2020). *LigPrep* (Version 3.8). New York, NY, USA.
[10] Schrödinger, LLC. (2020). *Maestro* (Version 10.6). New York, NY, USA.
[11] Liu, X., Shi, D., Zhou, S., Liu, H., Liu, H., & Yao, X. (2018). Molecular dynamics simulations and novel drug discovery. *Expert Opinion on Drug Discovery*, 13(1), 23-37.
[12] D.E. Shaw Research. (2014). *Desmond Molecular Dynamics System* (Version 3.7). New York, NY, USA.
[13] Sureshkumar B., Mary Y.S., Resmi K.S., Varghese H.T., Panicker C.Y., Al-Saadi A.A. (2018). Spectroscopic characterization of hydroxyquinoline derivatives with bromine and iodine atoms and theoretical investigation by DFT calculations, MD simulations and molecular docking studies. *Journal of Molecular Structure*, 1167, 95-106.
[14] Humphreys, D.D., Friesner, R.A., & Berne, B.J. **(**1994). A multiple-time-step molecular dynamics algorithm for macromolecules. *Journal of Physical Chemistry*, 98(27), 6885-6892.
[15] Hoover, W.G. (1985). Canonical dynamics: Equilibrium phase-space distributions. *Physical Review A*, 31(3), 1695-1697.
[16] Martyna, G.J., Tobias, D.J., & Klein, M.L. (1994). Constant pressure molecular dynamics algorithms. *Journal of Chemical Physics*, 101(5), 4177-4189.
[17] Essmann, U., Perera, L., Berkowitz, M.L., Darden, T., Lee, H., & Pedersen, L.G. (1995). A smooth particle mesh Ewald method. *Journal of Chemical Physics*, 103(19), 8577-8593.
[18] SwissADME. (2024). *SwissADME Web Tool*. Erişim adresi: http://www.swissadme.ch/index.php

EKLER



Spektra 1. Bileşik 2a'ya ait ^{1}H-NMR spektrumu



Spektra 2. Bileşik 2a'ya ait ^{13}C-NMR spektrumu

Formula Predictor Report - BC-B-3_595.lcd Page 1 of 1

Data File: C:\LabSolutions\Data\Analiz\derya\BC-B-3_595.lcd

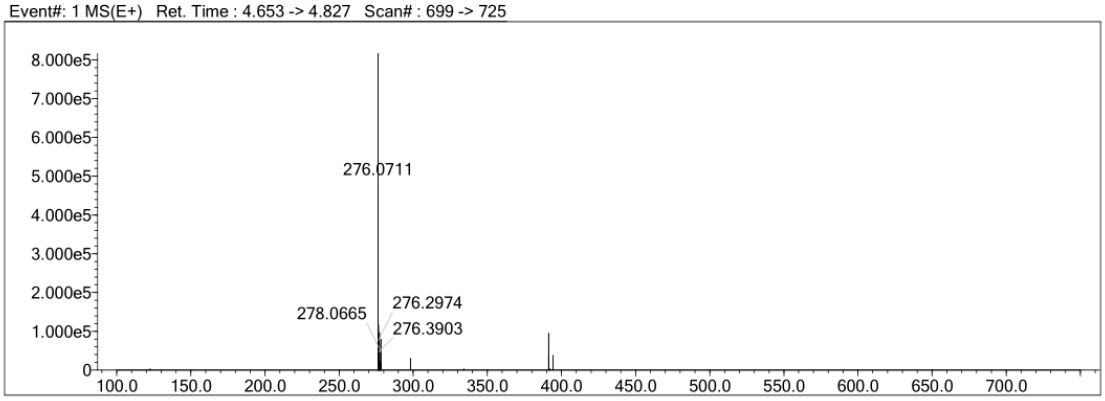
Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Use Adduct
H	1	8	33	O	2	0	4	S	2	1	2	Ru	2	0	0	H
C	4	4	11	F	1	0	0	Cl	1	0	0	Pd	2	0	0	
N	3	0	1	P	3	0	0	Br	1	0	0	I	3	0	0	

Error Margin (ppm): 10
HC Ratio: unlimited
Max Isotopes: 3
MSn Iso RI (%): 10.00

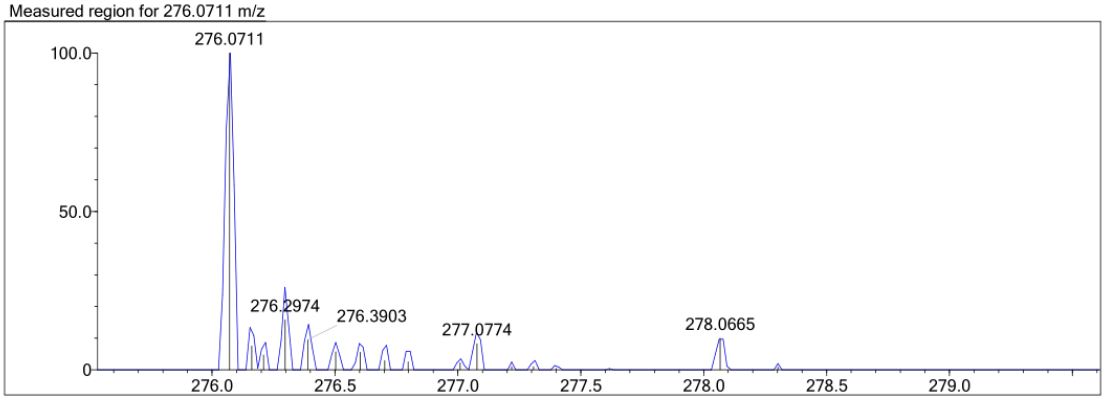
DBE Range: 0.0 - 30.0
Apply N Rule: no
Isotope RI (%): 1.00
MSn Logic Mode: AND

Electron Ions: both
Use MSn Info: yes
Isotope Res: 9000
Max Results: 50

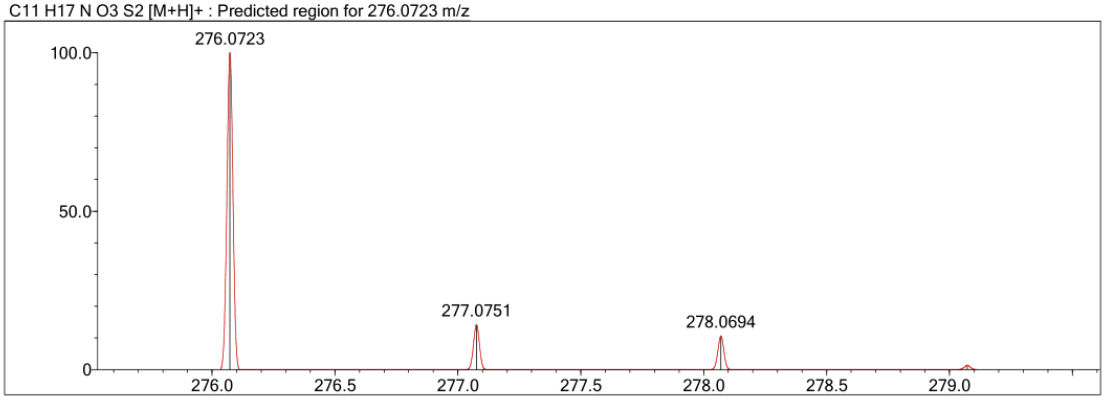
Event#: 1 MS(E+) Ret. Time : 4.653 -> 4.827 Scan# : 699 -> 725



Measured region for 276.0711 m/z

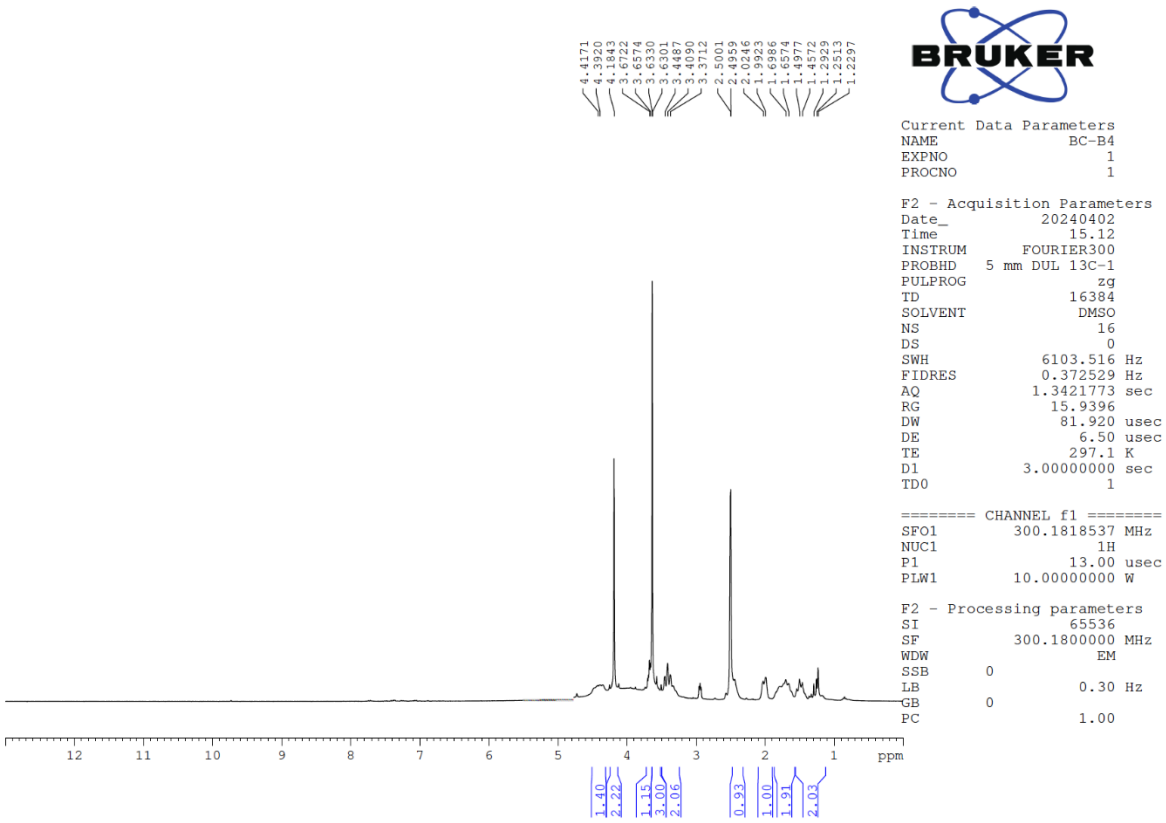


C11 H17 N O3 S2 [M+H]+ : Predicted region for 276.0723 m/z

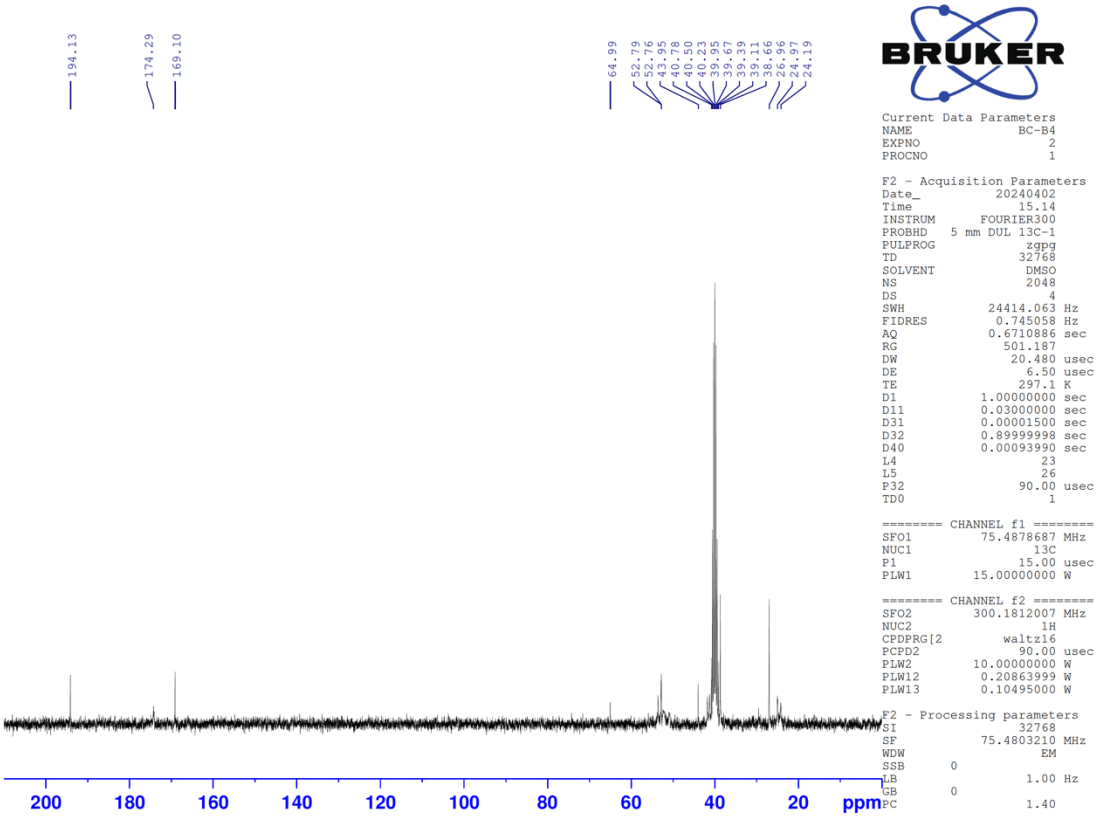


Rank	Score	Formula (M)	Ion	Meas. m/z	Pred. m/z	Df. (mDa)	Df. (ppm)	Iso	DBE
1	80.17	C11 H17 N O3 S2	[M+H]+	276.0711	276.0723	-1.2	-4.35	87.50	4.0

Spektra 3. Bileşik 2a'ya ait HRMS spektrumu



Spektra 4. Bileşik 2b'ye ait ^{1}H-NMR spektrumu



Spektra 5. Bileşik 2b'ye ait ^{13}C-NMR spektrumu

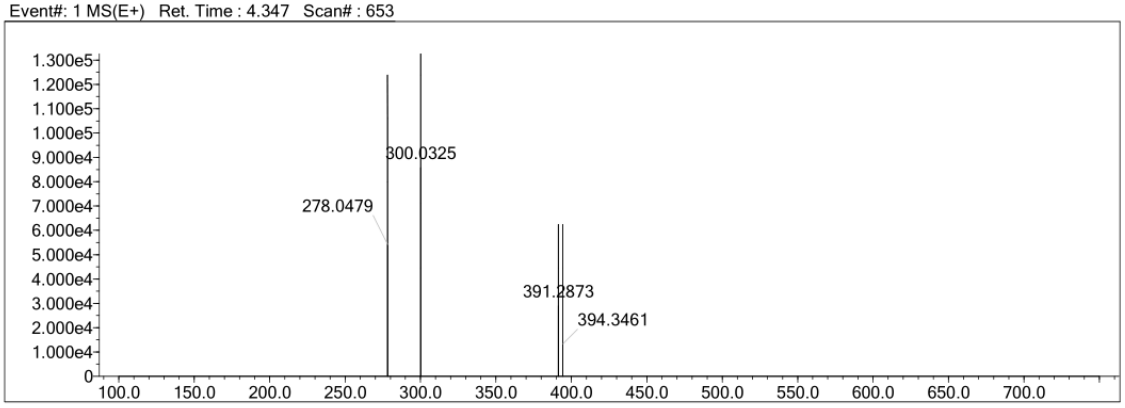
Formula Predictor Report - BC-B-4_596.lcd Page 1 of 1

Data File: C:\LabSolutions\Data\Analiz\derya\BC-B-4_596.lcd

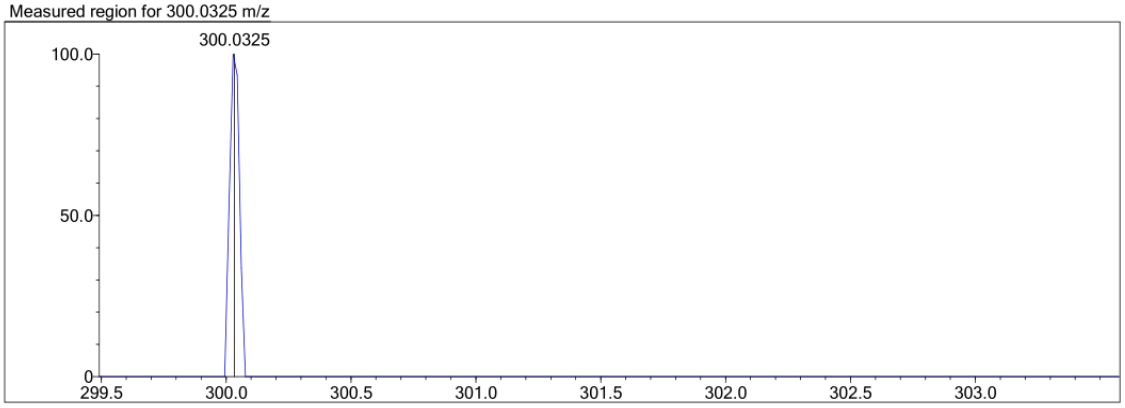
Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Use Adduct
H	1	8	33	O	2	0	4	S	2	1	2	Ru	2	0	0	H
C	4	4	11	F	1	0	0	Cl	1	0	0	Pd	2	0	0	Na
N	3	0	1	P	3	0	0	Br	1	0	0	I	3	0	0	

Error Margin (ppm): 15 DBE Range: 0.0 - 50.0 Electron Ions: both
HC Ratio: unlimited Apply N Rule: no Use MSn Info: yes
Max Isotopes: 3 Isotope RI (%): 1.00 Isotope Res: 9000
MSn Iso RI (%): 10.00 MSn Logic Mode: AND Max Results: 50

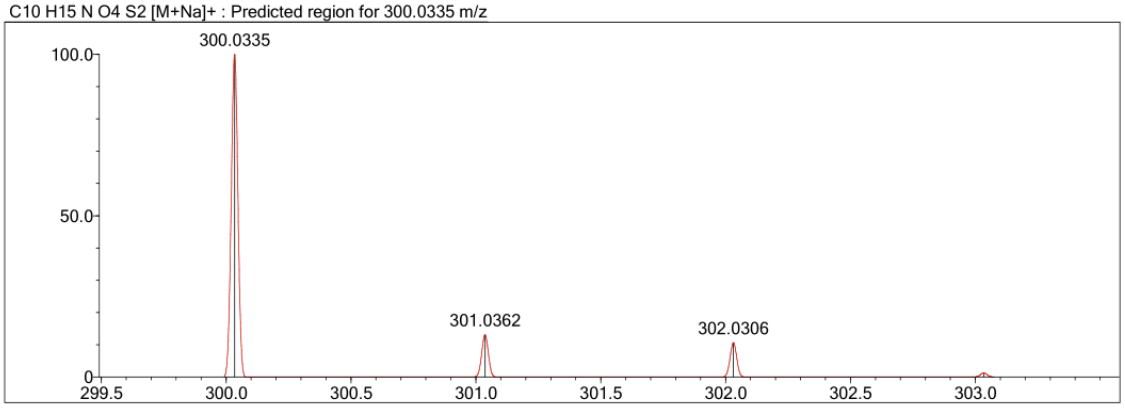
Event#: 1 MS(E+) Ret. Time : 4.347 Scan# : 653



Measured region for 300.0325 m/z

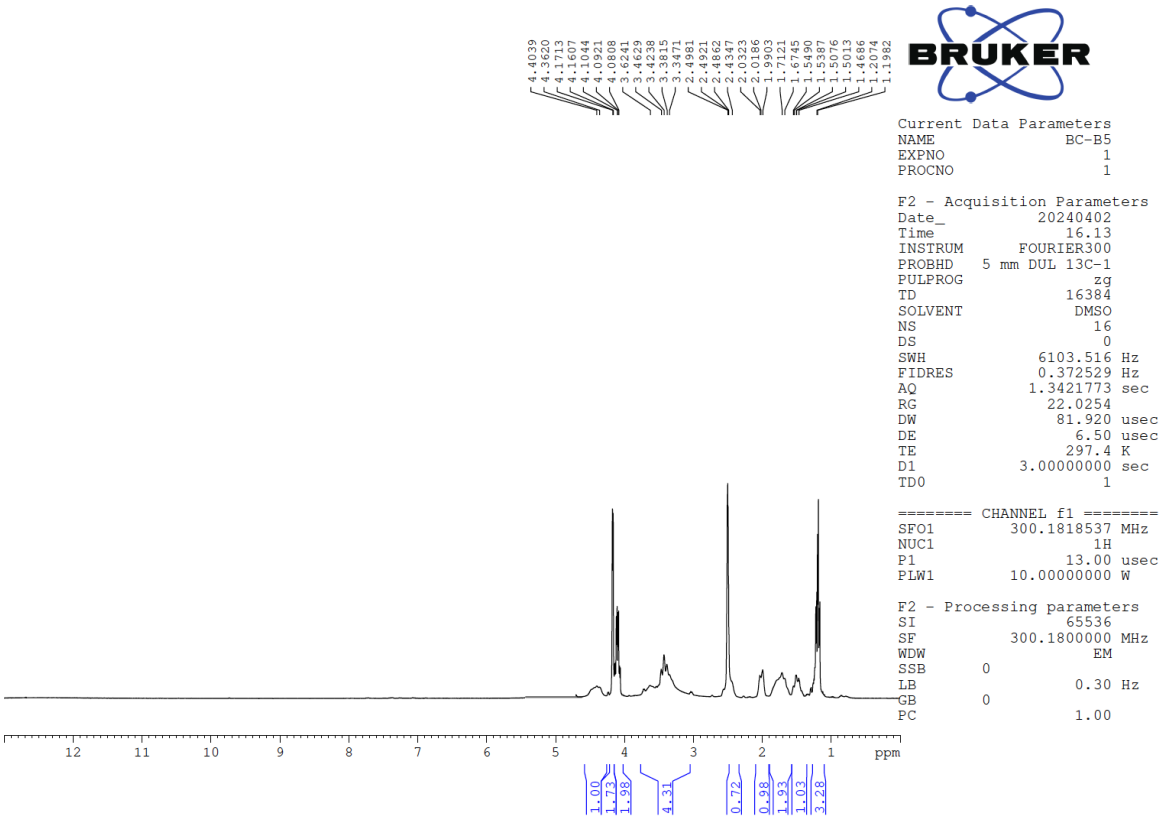


C10 H15 N O4 S2 [M+Na]+ : Predicted region for 300.0335 m/z

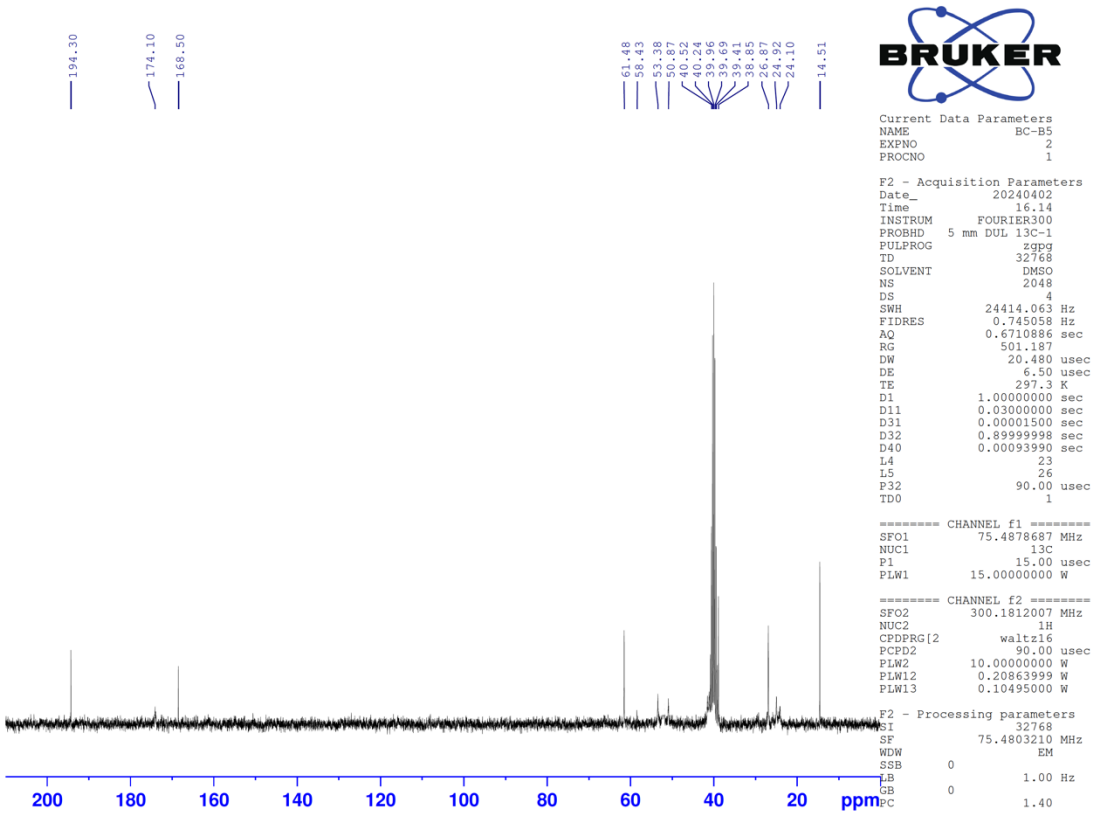


Rank	Score	Formula (M)	Ion	Meas. m/z	Pred. m/z	Df. (mDa)	Df. (ppm)	Iso	DBE
1	0.00	C10 H15 N O4 S2	[M+Na]+	300.0325	300.0335	-1.0	-3.33	0.00	4.0

Spektra 6. Bileşik 2b'ye ait HRMS spektrumu



Spektra 7. Bileşik 2c'ye ait ^{1}H-NMR spektrumu



Spektra 7. Bileşik 2c'ye ait ^{13}C-NMR spektrumu

Formula Predictor Report - BC-B-5_597.lcd Page 1 of 1

Data File: C:\LabSolutions\Data\Analiz\derya\BC-B-5_597.lcd

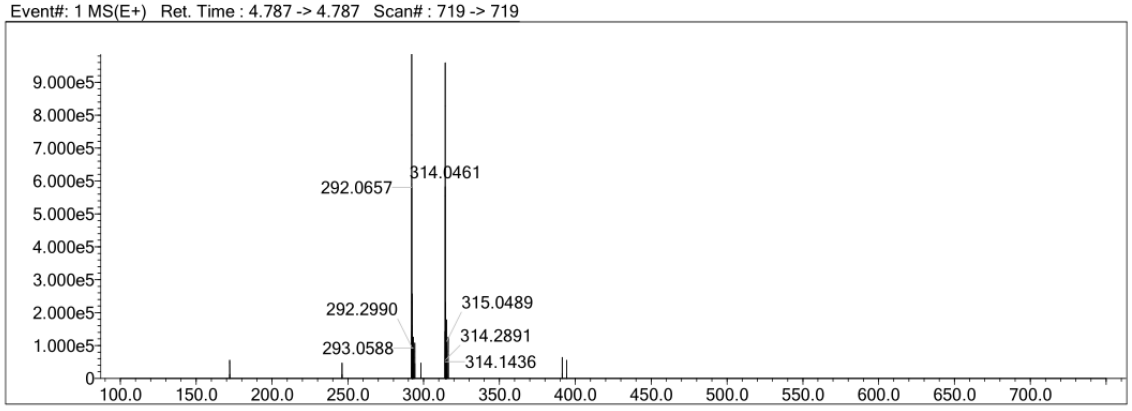
Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Elmt	Val.	Min	Max	Use Adduct
H	1	8	33	O	2	0	4	S	2	1	2	Ru	2	0	0	H
C	4	4	11	F	1	0	0	Cl	1	0	0	Pd	2	0	0	
N	3	0	1	P	3	0	0	Br	1	0	0	I	3	0	0	

Error Margin (ppm): 10
HC Ratio: unlimited
Max Isotopes: 3
MSn Iso RI (%): 10.00

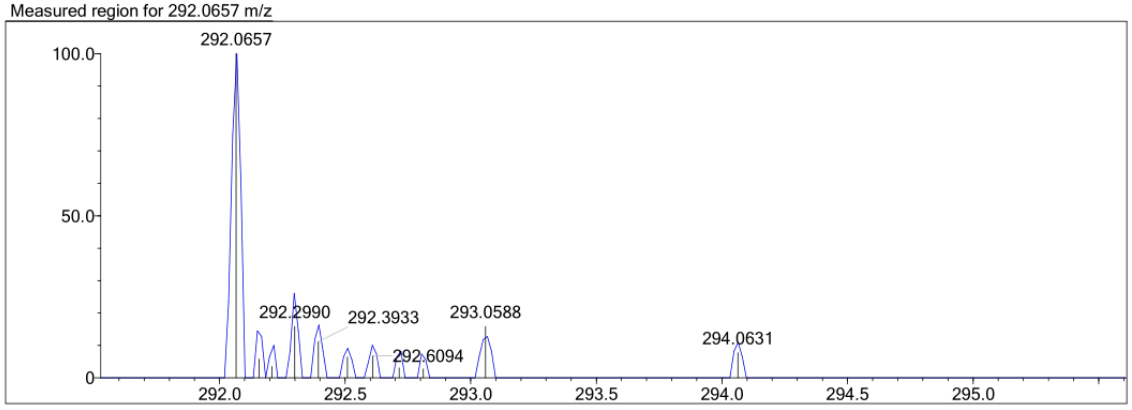
DBE Range: 0.0 - 30.0
Apply N Rule: no
Isotope RI (%): 1.00
MSn Logic Mode: AND

Electron Ions: both
Use MSn Info: yes
Isotope Res: 9000
Max Results: 50

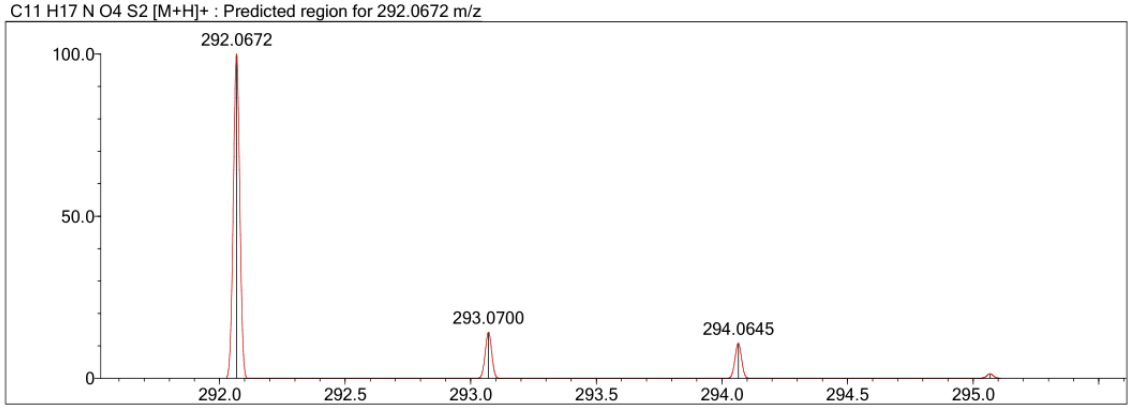
Event#: 1 MS(E+) Ret. Time : 4.787 -> 4.787 Scan# : 719 -> 719



Measured region for 292.0657 m/z



C11 H17 N O4 S2 [M+H]+ : Predicted region for 292.0672 m/z



Rank	Score	Formula (M)	Ion	Meas. m/z	Pred. m/z	Df. (mDa)	Df. (ppm)	Iso	DBE
1	62.19	C11 H17 N O4 S2	[M+H]+	292.0657	292.0672	-1.5	-5.14	70.19	4.0

Spektra 9. Bileşik 2c'ye ait HRMS spektrumu

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 224-232, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1503959
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Fonksiyonel Derecelendirilmiş İki Boyutlu Plakanın Isıl Analizi

Thermal Analysis of Functionally Graded Two-Dimensional Plate

Oğuzhan Demirel[1], Durmuş Yarımpabuç[1*]

Geliş / Received: 24/06/2024 ***Revize / Revised: 04/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 21/10/2024***

ÖZ

Kararlı durumdaki iki boyutlu heterojen bir plakanın ısı transferi probleminin kapalı form çözümü ele alınmıştır. Kararlı durumda olduğu düşünülen bu plakanın ısıl iletkenliğinin, iki yönde üstel olarak değiştiği varsayılmıştır. Bu koşullar altında elde edilen kısmi diferansiyel denklemin analitik çözümü, değişkenlerine ayırma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Çözümün doğruluğunu test etmek için sınır koşullarında verilen keyfi fonksiyonlar kullanılmıştır. Farklı ısı akı değerleri için elde edilen sonuçlar grafikler üzerinde tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Heterojen Plaka, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme, Değişkenlerine Ayırma Yöntemi

ABSTRACT

A closed form solution of the heat transfer problem of a two-dimensional heterogeneous plate under steady state condition is discussed. It is assumed that the thermal conductivity of this plate, which is in steady state, varies exponentially in two directions. The analytical solution of the partial differential equation obtained under these conditions is obtained using the separation of variables method. Arbitrary functions given in boundary conditions are used to test the accuracy of the solution. The results obtained for different heat flux values are discussed on graphs.

Keywords- Heterogeneous Plate, Functionally Graded Materials, Seperation of Variables Method

[1]İletişim: demirelemu@hotmail.com (https://orcid.org/0009-0001-2341-3401)
Matematik Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye
[2]*Sorumlu yazar İletişim: durmusyarimpabuc@osmaniye.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8763-1125)
Matematik Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye

I. GİRİŞ

Birbirine paralel iki yüzeyin sınırlandırdığı ve kalınlığı diğer boyutlara göre oldukça küçük olan düz yapılar ince plakalar olarak tanımlanır. Yapısal olarak daha hafif mühendislik elemanları oluşturması nedeniyle köprüler, hidrolik yapılar, konteynırlar, uçaklar, depolar, tanklar, basınçlı kaplar gibi mühendisliğin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı çevre koşullarına uygun malzeme ihtiyacından ortaya çıkan kompozit malzemeler başlangıçta hem sıcaklığa hem de deformasyona dayanıklı olması için üretilmişlerdir. İlerleyen süreçlerde daha yüksek sıcaklık ve dayanım süreleri için fonksiyonel dereceli malzeme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Kompozit bir malzeme türü olarak da nitelendirilen bu malzemeler, Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM) olarak literatüre geçmiştir. İlk olarak Japon malzeme bilimcilerinin farklı malzemelerin üstün özelliklerinin birleştirilmesi fikrinden doğmuş olan bu fonksiyonel dereceli malzemelerin, bu alandaki hızlı gelişmelere paralel olarak çok geniş kullanım alanları ortaya çıkmıştır. FDM uygulamaları ilk zamanlarda genel olarak metal ile seramik malzemenin kompozit olarak birleştirilmesiyle elde edilirken, günümüzde homojen ya da heterojen dağılım gösterecek şekilde bu malzemeler iç içe geçirilerek elde edilmektedir. FDM'lerde metal-seramik malzeme özellikleri bir yüzeyden diğer yüzeye geçerken bir konum fonksiyonuna bağlı olarak malzeme bileşenlerinin dağılımına göre sürekli ya da kademeli olarak değişim gösterir. Dereceli yapısı sayesinde çok yüksek sıcaklıklara dayanabilme kapasitesi, sağlamlığı, iletkenliği, düşük özgül ağırlığa sahip olması gibi daha pek çok özelliğinden dolayı uzay ve havacılık, endüstriyel malzemeler, tıp, savunma sanayi, enerji, optoelektrik vb. gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Isı iletimi olgusuna, kaynaktan son kullanıcıya ısıl enerji aktaran borulama gibi yüksek hızlarda ısı transferinin gerçekleştiği uygulamalarda yaygın olarak karşılaşılmaktadır.

Literatüre bakıldığında iki boyutlu levhaların ısı iletimi probleminin sayısal yöntemlerle çözümünün zor olduğu görülmektedir. Karmaşık tipteki problemler için ısı iletimi problemlerinin analitik çözümü mevcut değildir. Literatürde bu alanda yapılmış bazı çalışmalar sırasıyla şu şekilde verilebilir. Tornabene vd. [1] çift kavisli lamine kompozit kabukların ve panellerin statik davranışını araştırmışlardır. Yine Tornabene vd. bir başka çalışmalarında [2] ince ve kalın çift kavisli lamine kompozit kabukların ve farklı eğriliklere sahip panellerin serbest titreşimleri için 2 boyutlu yüksek dereceli eşdeğer tek katman teorisinin genel bir formülasyonunu sunmuşlardır. Kullikov vd. [3] örnekleme yüzeyleri (SaS) tekniğini kullanarak hibrit-karışık bir ANS dört düğümlü kabuk elemanı geliştirmişlerdir. Lei vd. [4] birinci dereceden kayma deformasyonu plaka teorisine dayanan lamine FD-CNT takviyeli kompozit plakaların serbest titreşim analizi için elemansız kp-Ritz yöntemini kullanmışlardır. Katman sayısını ve laminasyon açısının etkilerini de detaylı olarak incelemişlerdir. Lie vd. [5] bir başka çalışmalarında karbon nanotüp (CNT) ile güçlendirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş dönen silindirik panellerin serbest titreşimi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında elementsiz çekirdek parçacıklı Ritz yöntemini (kp-Ritz) kullanmışlardır. Dönen silindirik panelleri, panellerin kalınlık yönü boyunca farklı dağılımlara sahip tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) ile güçlendirerek elde ettikleri dönen panellerin etkin malzeme özelliklerini tahmin etmek için genişletilmiş karışım kuralını kullanmışlardır. Yine Lie vd. [6] bir başka çalışmalarında IMLS-Ritz yöntemini kullanarak Pasternak temellerine dayanan fonksiyonel derecelendirilmiş karbon nanotüp (FD-CNT) takviyeli kompozit kalın düz kenarlı dörtgen plakaların serbest titreşim davranışlarını ele almışlardır. FD-CNT takviyeli kompozit plakalar, kalınlık yönünde derecelendirilmiş malzeme özellikleri ile eksenel yönde tek eksenli olarak hizalanmış CNT takviyeli yapıya sahiptir. Geliştirilmiş hareketli en küçük kareler Ritz (IMLS-Ritz) yönteminin sayısal kararlılığını göstermek için örnek problemler ele alıp yakınsama durumlarını incelemişlerdir. Lie vd. [7] bir çalışmalarında mükemmel şekilde bağlanmış karbon nanotüp takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş (CNTR-FD) katmanlardan oluşan, karbon nanotüp takviyeli fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit lamine plakaların bükülme tepkilerini incelemişlerdir. Song Z vd. [8] yüksek dereceli CNT takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların titreşim özelliklerini, bu plakaların titreşim davranışları üzerindeki CNT dağılımlarını ve piezoelektrik yama yerleşimlerinin titreşim kontrol etkileri üzerindeki etkilerini analiz ettikleri çalışmalarında ana plakanın üst ve alt yüzeylerine bağlanan piezoelektrik aktüatör ve sensör çiftleri kullanmışlardır. Shaw LL [9] çok katmanlı ve bileşimsel olarak derecelendirilmiş plakalar ve kaplamalardaki termal artık gerilimlerin analizini yaparken çok katmanlı malzemelerde bileşim gradyanı, elastik modül, termal genleşme katsayısı ve katman sayısı dahil olmak üzere farklı malzeme bileşenlerinin artık gerilimlerin büyüklüğü ve dağılımı üzerindeki etkileri üzerine sistematik çalışmalar yapmıştır. Artık gerilimlere bağlı olarak plakaların ve kaplamaların şekilsel değişikliklerini de araştırmıştır. Reddy vd. [10] fonksiyonel derecelendirilmiş silindirlerin ve plakaların dinamik termoelastik tepkisini incelemek için termal yüklemeye maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş eksenel simetrik bir silindir problemi ve yanı sıra fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir plaka için, üç boyutlu bir ısı iletim denklemi ile birleştirilmiş enine kayma şekil değiştirmelerini ve dönmeleri hesaba katan birinci dereceden kayma deformasyonu plaka teorisini (FSDT) kullanan bir termoelastik sınır değeri problemi formüle etmişlerdir. Reddy vd. [11] fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların üç boyutlu termomekanik deformasyonlarını asimptotik bir yöntem kullanarak incelenmişlerdir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların termoelastik deformasyonlarının sonuçlarını kıyaslayarak genellikle iki boyutlu plaka teorileri tarafından yapılan sabit kalınlık boyunca sapma varsayımının termal yük durumu için geçersiz olduğu, ancak mekanik yük durumu

için iyi bir yaklaşım olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Reddy JN [12] Navier'in dikdörtgen plaka çözümleri ve üçüncü dereceden kayma deformasyonu plaka teorisine dayanan, kalınlık boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların analizi için sonlu elemanlar modelline dayanan teorik bir formülasyon üzerinde çalışmıştır. Nicholas Fantuzzi vd. [13] Genelleştirilmiş Diferansiyel Dörtlü Sonlu Elemanlar Yöntemi (GDQFEM) kullanarak geometrik süreksizliklere ve keyfi kavisli sınırlara sahip orta kalınlıkta FD plakaların dinamik davranışını araştırmışlardır. Apalak vd. [14] tarafından fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların malzeme özelliklerinin, plaka kalınlığı yönü boyunca değil, düzlem içi yön boyunca kuvvet yasasına göre değiştiği varsayılarak farklı kenar ısı akışları için yapıştırılarak birleştirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş plakaların termal artık gerilme analizleri yapılmıştır. Bağcı vd. [15], iki boyutlu termoelastik ısı iletimi ve Navier denklemlerini sonlu farklar yöntemini kullanılarak ayrıklaştırmış ve elde edilen doğrusal denklem sistemini pseudo tekil değer yöntemi kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında, farklı düzlem içi malzeme bileşimleri ve düzlem içi ısı akışları için fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş plakaların geçici termal artık gerilme analizlerini yapmışlardır. Apalak vd. [16] malzeme bileşiminin, levha kalınlığı yönü boyunca değil, düzlem içi yön boyunca kuvvet yasasına göre değişeceği varsayılarak yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş dairesel plakalarda düzlem içi bileşimsel gradyan üssünün ve yönünün termal artık gerilim ve deformasyonlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Apalak vd. [17] fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların malzeme özelliklerinin, plaka kalınlığı yönü boyunca değil, düzlem içi yön boyunca kuvvet yasasına göre değiştiği varsayılarak düzlem içi sabit iç ve dış kenar ısı akıları için fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş içi boş dairesel plakaların termal artık gerilme analizlerini yapmışlardır. Sadowski vd. [18] termal şoka maruz kalan FDM silindirik plakalarda sıcaklık alanı problemine ve ısı transfer katsayısının değerlendirilmesine çalışmışlardır. Alibeigloo A [19] termo-mekanik yüklere maruz kalan basit destekli kenarları olan fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların üç boyutlu termo-elastik analizini gerçekleştirmiştir. Sıcaklık değişiminin, uygulanan mekanik yükün, gradyan indeksinin, en boy oranının ve kalınlık/uzunluk oranının plakanın davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Apalak vd. [20] iki seramik kenarı boyunca sabit düzlem içi ısı akısına maruz kalan çift yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş plakaların termal gerilme ve deformasyon durumlarını araştırmışlardır. Apalak vd. [21] farklı kenar ısı akıları için yapıştırılarak birleştirilmiş fonksiyonel derecelendirilmiş kenetlenmiş plakaların termal artık gerilme analizini yapmışlardır. Apalak vd. [22] bir başka çalışmalarında, farklı düzlem içi malzeme bileşimleri ve düzlem içi ısı akıları için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kenetlenmiş plakaların geçici termal artık gerilme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Boggarapu vd. [23] işlevsel olarak derecelendirilmiş malzeme araştırmalarındaki son gelişmelere genel bir bakış sunmaktadır. Demirbaş vd. [24] düzlem boyunca iki yönde fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen plakaların termo-mekanik davranışını, üç boyutlu elastiklik denklemleri ile incelemişlerdir. Demirbaş vd. [25], kenetlenmiş fonksiyonel dereceli dikdörtgen plakaların iki boyutlu termoelastik analizlerini, malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğunu göz önünde bulundurarak sonlu farklar ve elemanlar yöntemleri ile çözmüşlerdir. Ghatage vd. [26] çok yönlü kademeli (kiriş/plaka/kabuk) yapıların modellenmesi ve analizi üzerine kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır. Golbahar vd. [27] tarafından belirli bir ısıtma zaman aralığında istenen alan sıcaklık dağılımlarına ulaşmak için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kalın plakaların sınırlarındaki ısı akışlarını tahmin etmek için optimal bir kontrol prosedürü sunulmaktadır. Leetsch vd. [28] yapmış oldukları çalışmada, enine termal yüklere maruz kalan fonksiyonel dereceli plakaların üç boyutlu termomekanik davranışını, bir dizi iki boyutlu sonlu plaka elemanı ile incelemişlerdir. Marchuk [29] tarafından üç boyutlu formülasyonda katmanlı, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların termal olarak gerilimli durumunu incelemek için iki yaklaşım geliştirilmiştir. İlk yaklaşımda, Reissner varyasyon ilkesini kullanarak, bir integral diferansiyel denge denklemleri sistemi ve karşılık gelen sınır koşulları, bir varsayım getirilmeden elde edilmiştir. İkinci yaklaşımda, üç boyutlu termoelastik dengenin diferansiyel denklemlerini oluşturmak için yapı kalınlığı boyunca aranan fonksiyonların polinom yaklaşımı kullanılmıştır. Matysiak vd. [30], fonksiyonel dereceli tabakanın ve kompozit malzemenin ısı iletkenliği ve geometrik özelliklerinin, cisimlerdeki sıcaklık ve ısı akısı dağılımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Pala vd. [31] sabit hızla hareket eden ısı kaynağı tarafından ısıtılan dikdörtgensel plaka üzerindeki sıcaklık dağılımının analitik çözümünü, çift katlı Fourier serisi kullanarak çözmüşlerdir. Tek doğrultuda doğrusal ve dairesel hareketli ısı kaynakları için inceleme yapmışlardır. Yarımpabuç vd. [32], homojen olmayan genel sınır koşullarına sahip iki boyutlu anizotropik bir plakanın ısı iletim analizini, sonlu eleman tabanlı ANSYS-Fluent ile ele almışlardır. Malzemenin ısıl iletkenliği ile ısı üretim parametrelerinin iki uzay değişkenine göre keyfi olarak değiştiği varsayılmıştır. Baytak vd. [33], fonksiyonel dereceli veya lamine kompozit plakalarda termal gerilim dağılımı için analitik bir formül önermişlerdir. Farklı elastik modüllere sahip deneysel modellerin üretimindeki deneysel sorunları tartışmışlardır. Yarımpabuç vd. [34], heterojen bir ortamda iki boyutlu kararlı durumdaki ısı transferi problemini, iki boyutlu pseudospektral Chebyshev yöntemi ile analiz etmişlerdir. İç ısı üretiminin iki yönde keyfi olarak değiştiği varsayılırken, malzemenin ısıl iletkenlik katsayısını Mori-Tanaka modeli ile iki yönlü (kalınlık-uzunluk) olarak derecelendirildiği varsayılmıştır.

Bu çalışmada, kararlı durumda olduğu düşünülen fonksiyonel derecelendirilmiş iki boyutlu plakanın ısı iletim analizi ele alınmıştır. Plakanın ısıl iletkenliğinin iki yönde üstel olarak fonksiyonel derecelendirildiği varsayılmıştır. Bu koşullar altında sabit katsayılı homojen kısmi diferansiyel denklem elde edilmiştir. Literatürden farklı olarak ısı iletim katsayısının iki yönde değiştiği durumun analitik çözümü, değişkenlerine ayırma yöntemi ile ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır. Çözümün doğruluğunu test etmek için sınır koşullarında verilen keyfi fonksiyonlar kullanılmıştır. Farklı ısı akı değerleri için elde edilen sonuçlar grafikler üzerinde tartışılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, dikdörtgen bir bölgede fonksiyonel derecelendirilmiş plakanın ısıl iletim katsayısının iki uzay değişkenine göre keyfi olarak değiştiği iki boyutlu bir ısı iletimi problemi ele alınmıştır. Bu koşullar altında homojen doğrusal kısmi diferansiyel denklem

$$\frac{\partial}{\partial\eta}\left(k(\eta,\xi)\frac{\partial\theta}{\partial\eta}\right)+\frac{\partial}{\partial\xi}\left(k(\eta,\xi)\frac{\partial\theta}{\partial\xi}\right)=0\,,\qquad(-L<\eta<L\,,-W<\xi<W) \tag{1}$$

şeklinde elde edilir. Bu plaka için sınır koşulları

$$\frac{\partial\theta}{\partial\eta}(-L,\xi)=-\frac{q_0''}{k(-L,\xi)}\;;\qquad\theta(L,\xi)=G(\xi) \tag{2a}$$

$$\theta(\eta,-W)=F(\eta);\qquad\frac{\partial\theta}{\partial\xi}(\eta,W)=0 \tag{2b}$$

şeklinde alınmıştır. Burada sırasıyla $\theta(\eta,\xi)$, $k(\eta,\xi)$, q_0'', θ_∞ ; sıcaklık, ısı iletim katsayısı, sabit yüzey ısı akısı ve sabit ortam sıcaklığıdır. $F(\eta)$ ve $G(\xi)$ rastgele fonksiyonları temsil etmektedir. Bütün değişkenleri aynı mertebeye getirmek ve daha etkili bir çözüm elde edebilmek için aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılmıştır:

$$x=\frac{\eta}{L}\,,\quad y=\frac{\xi}{W}\,,\quad T=\frac{\theta-\theta_\infty}{\theta_{max}-\theta_\infty} \tag{3}$$

Bu çalışmada ısıl iletkenlik katsayısının iki değişkene göre değiştiği

$$k(\eta,\xi)=k_0e^{\alpha\left(\frac{\eta}{L}\right)}e^{-\gamma\left(\frac{\xi}{W}\right)}\,, \tag{4}$$

varsayılmıştır. Boyutsuzlaştırma parametreleri (3) ve ısı iletim katsayısı (4) sistemi modelleyen kısmi diferansiyel denklem (1) ve sınır koşullarında yerine yazılırsa, ısı iletim probleminin boyutsuz denklemi ve sınır koşulları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\alpha\frac{\partial T}{\partial x}-c^2\gamma\frac{\partial T}{\partial y}+c^2\frac{\partial^2T}{\partial y^2}=0,\;(-1<x<1\,,-1<y<1) \tag{5}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(-1,y)=-ae^{\alpha}e^{\gamma y};\qquad T(1,y)=G(y) \tag{6a}$$

$$T(x,-1)=F(x);\qquad\frac{\partial T}{\partial y}(x,1)=0. \tag{6b}$$

Burada $c=L/W$ sabit, $a=q_0^{''}L/k_0(\theta_{max}-\theta_\infty)$ boyutsuz ısı akısını göstermektedir. Bu denklemin değişkenlerine ayırma yöntemi ile analitik olarak çözülebilmesi için kısmi diferansiyel denklemin homojen olmasının yanında en az bir yönde sınır koşullarının da homojen olması gerekir. Sınır koşullarının bir yönde homojen olmasını sağlamak için sıcaklık fonksiyonu

$$\mathrm{T}(x,y)=T_1(x,y)+T_2(x,y) \tag{7}$$

olacak şekilde ayrılsın. $T_1(x,y)$ için x yönündeki sınır koşulları (6a)

$$\frac{\partial T_1(-1,y)}{\partial x}=-ae^{\alpha}e^{\gamma y}\,,\quad T_1(1,y)=G(y) \tag{8}$$

şeklinde seçilirse, $T_2(x,y)$ için x yönündeki sınır koşulları

$$\frac{\partial T_2(-1,y)}{\partial x}=0,\quad T_2(1,y)=0 \tag{9}$$

olur. $T_1(x,y)$ için belirlenen sınır koşullarını (8) sağlayacak şekilde ikinci dereceden bir ifade,

$$T_1(x,y) = -ae^{\gamma y+\alpha}x + \left(\frac{x+1}{2}\right)^2 [ae^{\gamma y+\alpha}x + G(y)] \tag{10}$$

yazılabilir. Benzer şekilde $T_2(x,y)$ için y yönündeki sınır koşulları ise

$$T_2(x,-1) = F(x) - T_1(x,-1); \qquad \frac{\partial T_2}{\partial y}(x,1) = -\frac{\partial T_1}{\partial y}(x,1) \tag{11}$$

şeklinde elde edilir. $T(x,y) = T_1(x,y) + T_2(x,y)$ bağıntısı kısmi diferansiyel denklemde yerine yazılırsa, $T_2(x,y)$ ye bağlı kısmi diferansiyel denklemin

$$\frac{\partial^2 T_2(x,y)}{\partial x^2} + \alpha\frac{\partial T_2(x,y)}{\partial x} - c^2\gamma\frac{\partial T_2(x,y)}{\partial y} + c^2\frac{\partial^2 T_2(x,y)}{\partial y^2} = f_1(x,y) \tag{12}$$

x yönündeki homojen sınır koşulları (9) ve y yönündeki sınır koşulları (11) kullanılarak değişkenlerine ayırma yöntemi ile çözümü yapılabilir. Buradaki sağ taraf fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir.

$$f_1(x,y) = -\frac{\partial^2 T_1(x,y)}{\partial x^2} - \alpha\frac{\partial T_1(x,y)}{\partial x} + c^2\gamma\frac{\partial T_1(x,y)}{\partial y} - c^2\frac{\partial^2 T_1(x,y)}{\partial y^2} \tag{13}$$

$T_2(x,y)$ nin x yönündeki homojen sınır koşulları (9) kullanılarak çözümü, Fourier kosinüs serisi

$$T_2(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty}\frac{C_n(y)}{\cos(\lambda)}\cos(\lambda x+\lambda), \quad \lambda = (2n+1)\frac{\pi}{4} \tag{14}$$

formunda elde edilir. $T_2(x,y)$ nin y yönündeki sınır koşulları (11) kullanılarak $C_n(y)$ fonksiyonu bulunabilir. $T_2(x,y)$ için önerilen Fourier kosinüs serisi kısmi diferansiyel denklemde (12) yerine yazılırsa;

$$\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{c^2}{\cos(\lambda)}C''_n(y) - \frac{c^2\gamma}{\cos(\lambda)}C'_n(y) - \frac{\lambda^2}{\cos(\lambda)}C_n(y)\right]\cos(\lambda x+\lambda) - \alpha\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{\lambda C_n(y)}{\cos(\lambda)}\right]\sin(\lambda x+\lambda) = f_1(x,y)$$

(15)

elde edilir. Bu denklemin her iki tarafı $\cos(\lambda x+\lambda)$ ile çarpılıp $[-1,1]$ aralığında x değişkenine göre integrali alınırsa;

$$C''_n(y) - \gamma C'_n(y) - \left(\frac{2\lambda^2+\alpha}{2c^2}\right)C_n(y) = S_1(y) \tag{16}$$

şeklinde $C_n(y)$ fonksiyonuna bağlı sabit katsayılı homojen olmayan ikici mertebeden adi diferansiyel denklem elde edilir. Burada,

$$S_1(y) = \frac{\cos(\lambda)}{c^2}\int_{-1}^{1} f_1(x)cos(\lambda x+\lambda)dx$$

(17)

integrali ile bulunur. Bu diferansiyel denklemin çözümü

$$C_n(y) = C_n^h(y) + C_n^p(y) \tag{18}$$

biçiminde olup burada $C_n^h(y)$ homojen çözümü, $C_n^p(y)$ özel çözümü ifade etmektedir. Homojen diferansiyel denklemin karakteristik denkleminin kökleri

$$r_n^{1,2} = \frac{\gamma\pm\sqrt{\gamma^2+4P}}{2}, \quad P = \frac{2\lambda^2+\alpha}{2c^2}$$

olmak üzere homojen çözüm

$$C_n^h(y) = d_1e^{r_1y} + d_2e^{r_2y} \tag{19}$$

şeklinde elde edilir. $C_n^p(y)$ özel çözümü, sağ taraf fonksiyonu $S_1(y)$ sonlu sayıda türeve sahip ise belirsiz katsayılar metodu ile, sonlu sayıda türeve sahip değilse parametrelerin değişimi metodu ile çözülebilir. Buradaki özel çözüm metodu sınır koşullarındaki $F(x)$ ve $G(y)$ fonksiyonlarının seçimine bağlıdır. Bu fonksiyonlar özel olarak

$$F(x) = 1 - 3x, \quad G(y) = \sin(2y) \tag{20}$$

şeklinde sonlu türeve sahip birer fonksiyon olarak seçilirse özel çözüm belirsiz katsayılar metodu ile

$$C_n^p(y) = A_1 e^{\gamma y} + A_2 cos(2y) + A_3 sin(2y) \tag{21}$$

şeklinde bulunur. $F(x)$ ve $G(y)$ fonksiyonlarının sonlu türeve sahip olmayan seçimlerinde ise çözüm parametrelerin değişimi yöntemi ile bulunabilir. Buradaki A_1, A_2 ve A_3 katsayıları, özel çözümün denklemde yerine yazılması ile kolayca bulunabilir. Nihayetinde $C_n(y)$ denklemin genel çözümü

$$C_n(y) = d_1 e^{r_1 y} + d_2 e^{r_2 y} + C_n^p(y) \tag{22}$$

şeklinde elde edilir. Buradaki d_1 ve d_2 integral sabitleri y yönündeki sınır koşulları (11) kullanılarak bulunur. Öncelikle $T_2(x,-1) = f_2(x)$ sınır koşulu (14) denkleminde yerine yazılıp denklemin her iki tarafı $\cos(\lambda x + \lambda)$ ile çarpılıp $[-1,1]$ aralığında x değişkenine göre integrali alınırsa;

$$C_n(-1) = \cos(\lambda) \int_{-1}^{1} f_2(x) cos(\lambda x + \lambda) dx \tag{23}$$

bulunur. Bu koşul kullanılarak d_1 ve d_2 integral sabitlerine bağlı ilk denklem

$$d_1 e^{-r_1} + d_2 e^{-r_2} = M \tag{24}$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$M = \cos(\lambda) \int_{-1}^{1} f_2(x) cos(\lambda x + \lambda) dx - (A_1 e^{-\gamma} + A_2 \cos(2) - A_3 \sin(2)) \tag{25}$$

ile bulunur. Benzer şekilde, $\partial T_2 / \partial y(x,1) = -\partial T_1 / \partial y(x,1)$ sınır koşulu (14) denkleminde yerine yazılıp denklemin her iki tarafı $\cos(\lambda x + \lambda)$ ile çarpılıp $[-1,1]$ aralığında x değişkenine göre integrallenirse;

$$C'_n(1) = -\cos(\lambda) \int_{-1}^{1} \frac{\partial T_1(x,1)}{\partial y} cos(\lambda x + \lambda) dx \tag{26}$$

bulunur. Bu koşul kullanılarak d_1 ve d_2 integral sabitlerine bağlı ikinci denklem

$$r_1 e^{r_1} d_1 + r_2 e^{r_2} d_2 = N \tag{27}$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$N = -\cos(\lambda) \int_{-1}^{1} \frac{\partial T_1(x,1)}{\partial y} cos(\lambda x + \lambda) dx - (A_1 \gamma e^{\gamma} - 2A_2 \sin(2) + 2A_3 \cos(2)) \tag{28}$$

ile elde edilir. d_1 ve d_2 ye bağlı bu lineer denklem sistemi (24) ve (27) çözülürse, integral sabitleri kolayca bulunur. Buna göre denklemin analitik çözümü

$$T(x,y) = T_1(x,y) + T_2(x,y) \tag{29}$$

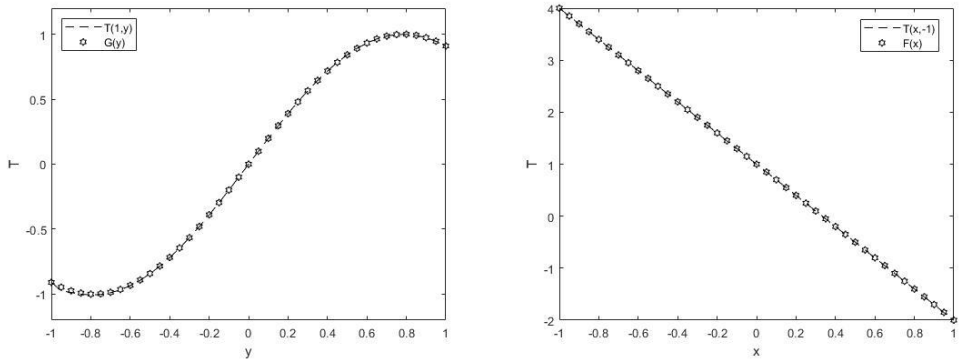
olup

$$T(x,y) = -ae^{\gamma y + \alpha} x + \left(\frac{x+1}{2}\right)^2 [ae^{\gamma y + \alpha} x + G(y)] + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n(y)}{\cos(\lambda)} \cos(\lambda x + \lambda) \tag{30}$$

şeklinde elde edilir.

III. BULGULAR

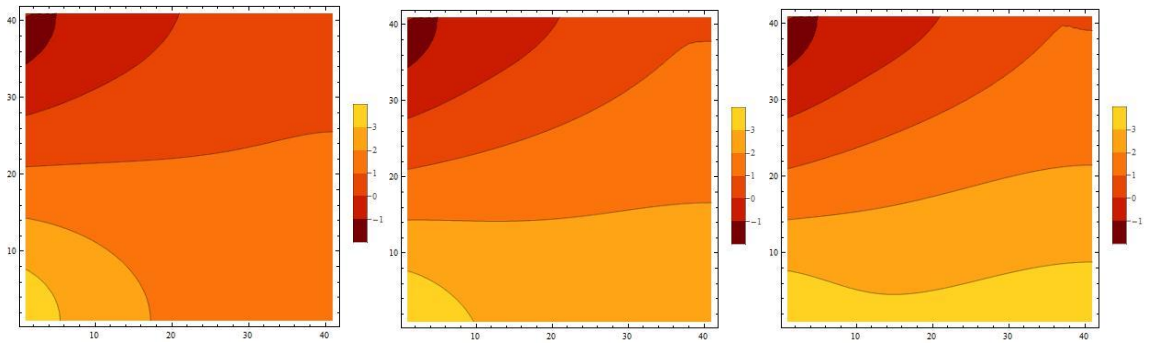
Bu çalışmada, dikdörtgen bir bölgede fonksiyonel derecelendirilmiş plakanın ısıl iletim katsayısının iki uzay değişkenine göre keyfi olarak değiştiği iki boyutlu bir ısı iletimi probleminin kapalı form çözümü ele alınmıştır. Malzeme özelliklerin eksenel yönlerdeki değişimi için $\alpha = -0.4$ ve $\gamma = 0.5$ olarak seçilmiştir. Bu malzeme gradyanı parametrelerinin sıfır alınması $(\alpha = \gamma = 0)$ durumunda, homojen metal malzemenin elde edileceği açıktır. Çalışmada elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek için, (20) denklemi ile verilmiş keyfi olarak seçilen $F(x)$ ve $G(y)$ fonksiyonlarına karşılık gelen sınır koşulları Şekil 1'de karşılaştırılmış ve sonuçların örtüştüğü görülmüştür.



(a) $x = 1$ noktasında **(b)** $y = -1$ noktasında

Şekil 1. Keyfi olarak seçilen $G(y)$ ve $F(x)$ fonksiyonlarına karşılık gelen sınır koşullarında sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması $(a = 1.5)$.

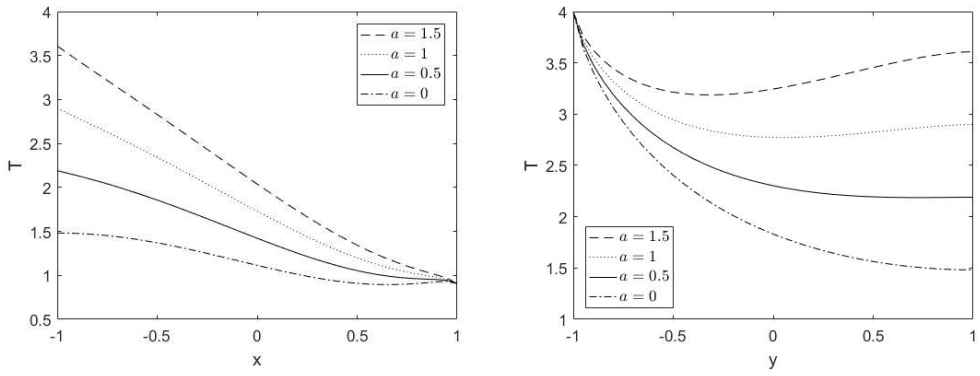
Şekil 2'de farklı boyutsuz ısı akıları $(a = 0.5, 1, 1.5)$ için plakalardaki sıcaklık dağılımının iki boyutlu grafiği verilmiştir. İzdüşüm grafiklerinde, rengin koyudan açığa doğru değişimi sıcaklığın arttığını göstermektedir. Plakanın sol tarafına $(x = -1)$ etki eden boyutsuz ısı akı değerinin artması ve plakanın alt ucundaki $(y = -1)$ sınır koşulunun etkisi ile sıcaklığın sol alt ucundan yukarı doğu arttığı gözlemlenmiştir.



(a) $a = 0$ **(b)** $a = 1$ **(c)** $a = 1.5$

Şekil 2. Farklı boyutsuz ısı akı değerleri için iki boyutlu sıcaklık dağılımları.

Şekil 3'te plakanın üst kenarı $(y = 1)$ ile sol kenarında $(x = -1)$ farklı boyutsuz ısı akı değerlerinde $(a = 0.5, 1, 1.5)$ sırasıyla x ve y yönündeki sıcaklık dağılım grafikleri verilmiştir. Şekil 3(a) da $y = 1$ noktasında ısı akı değeri arttıkça sıcaklığın arttığı ve iç cidar ile dış cidar arasındaki sıcaklık farkının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca $x = 1$ ekseninde sınır koşulunun sağlandığı da görülmüştür. Şekil 3(b) de ısı akısının plakaya uygulandığı bölgede $(x = -1)$ ısı akı değeri arttıkça sıcaklık artmış ve $y = -1$ noktasında sınır koşulu zorlamasından dolayı iç cidar ile dış cidar arasındaki sıcaklık farkının azaldığı görülmüştür.



(a) $y = 1$ noktasında **(b)** $x = -1$ noktasında

Şekil 3. Eksenlerin orta noktalarında farklı boyutsuz ısı akıları için sıcaklık dağılımları.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ısı üretimi olmadığı düşünülen fonksiyonel derecelendirilmiş iki boyutlu plakanın ısıl analizi ele alınmıştır. Plakanın ısıl iletkenliğinin iki yönde fonksiyonel derecelendirildiği varsayılmıştır. Bu koşullar altında elde edilen kısmı diferansiyel denklemin kapalı form çözümü değişkenlerine ayırma yöntemi ile elde edilmiştir. Sonuçlar, farklı ısı akı değerlerine göre elde edilen grafikler üzerinde tartışılmıştır. Isı akısının arttırılması ile sıcaklığın arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen kapalı form çözümü, literatürde yapılacak olan sayısal çözümlemeler için bir kıyaslama çözümü olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) destekli OKÜBAP-2023-PT2-022 numaralı projenin ürünüdür.

KAYNAKLAR

[1] Tornabene, F.,Fantuzzi, N., Viola, E.&Carrera,E.(2014). Static analysis of doubly-curved anistropic shells and panels using CUF approach, differantial geometry and differantial quadrature method. *Composite structures, 107(1),* 675-697.

[2] Tornabene, F., Fantuzzi, N., Bacciocchi, M.&Viola,E. (2015). Accurate inter-laminar recovery for plates and doubly-curved shells with variable radii of curvature using layer-wise theories. *Composite Structures*, *124,* 368–393.

[3] Kulikov, G.M., Mamontov, A. A., Plotnikova, S.V.& Mamontov, S.A. (2015). Exact geometry solid-shell element based on a sampling surfaces technique for 3D stress analysis of doubly curved composite shells. *Curved and Layered Structures*, *3(1),* 1–16.

[4] Lei, Z., Zhang, L. & Liew, K. (2015). Free vibration analysis of laminated FG-CNT reinforced composite rectangular plates using the kp-Ritz method. *Composite Structures, 127,* 245–259.

[5] Lei, Z., Zhang, L. & Liew, K.(2015). Vibration analysis of CNT-reinforced functionally graded rotating cylindrical panels using the element-free kp-Ritz method. *Composit Part B: Engineering, 77,* 291–303.

[6] Lei, Z., Zhang, L. & Liew, K. (2016). Vibration of FG-CNT reinforced composite thick quadrilateral plates resting on Pasternak foundations. *Engineering Analysis with Boundary Elements, 64,* 1–11.

[7] Lei, Z., Zhang, L. & Liew, K.(2016). Analysis of laminated CNT reinforced functionally graded plates using the element-free kp-Ritz method. *Composit Part B: Engineering, 84,* 211–221.

[8] Song, Z., Zhang, L. & Liew, K.(2016). Active vibration control of CNT reinforced functionally graded plates based on a higher-order shear deformation theory. *International Journal of Mechanical Sciences, 105,* 90-101.

[9] Shaw, L.L. (1998). Thermal residual stresses in plates and coatings composed of multi-layered and functionally graded materials. *Composit Part B: Engineering, 29(3),* 199–210.

[10] Reddy, J.N. & Chin, C.D.(1998). Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and plates. *Journal of Thermal Stresses*, 21 (6), 593–626

[11] Reddy, J.N. & Cheng, Z.Q. (2001). Three-dimensional thermomechanical deformations of functionally graded rectangular plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids, 20(5),* 841–855.

[12] Reddy, J.N. (2000). Analysis of functionally graded plates. *International Journal For Numerical Methods in Engineering, 47(1-3),* 663–684.

[13] Fantuzzi, N., Tornabene, F. & Viola, E. (2016). Four-parameter functionally graded cracked plates of arbitrary shape: a GDQFEM solution for free vibrations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *23(1),* 89–107.
[14] Apalak, M.K. & Bagci, M.D. (2011).Thermal residual stresses in adhesively bonded in-plane functionally graded clamped plates subjected to an edge heat flux. *Journal of Adhesion Science and Technology, 25 (15),* 1861–1908.
[15] Bagci, M.D. & Apalak, M.K.(2011). Thermal residual stresses in one-directional functionally graded plates subjected to in-plane heat flux. *Numerical Heat Transfer Applications Part A: Applications, 60(1),* 50–83.
[16] Apalak, M.K. & Demirbas, M.D. (2013). Thermal residual stresses in adhesively bonded in-plane functionally graded clamped circular hollow plates. *Journal of Adhesion Science and Technology, 27(14),* 1590–1623
[17] Apalak, M.K. & Demirbas, M.D.(2015). Thermal residual stresses in in-plane functionally graded clamped hollow circular plates subjected to an edge heat flux. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, 229(3),* 236–260.
[18] Sadowski, T., Boniecki, M., Librant, Z.&Nakonieczyn,K.(2007). Theoretical prediction and experimental verification of temperature distribution in FGM cylindrical plates subjected to thermal shock. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(21-22),* 4461–4467.
[19] Alibeigloo, A. (2010). Exact Solution for Thermal-Elastic Response of Functionally Graded Rectangular Plates . *Composite structures, 92(1),* 113-121.
[20] Apalak, M. & Demirbaş, M. (2018). Thermal StressAnalysis of In-Plane Two-Directional Functionally Graded Plates Subjected to In-Plane Edge Heat Fluxes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 232(8),* 693-716.
[21] Apalak, M.K. & Bağcı, M.D. (2011). Thermal Residual Stresses in Adhesively Bonded In-Plane Functionally Graded Plates Subjected to an Edge Heat Flux. *Journal of Adhesion Science and Technology, 25(15),* 1681-1908.
[22] Bağcı, M.D. & Apalak, M.K. (2011). Thermal Residual Stresses in On-Directional Functionally Graded Plates Subjected to In-Plane Heat Flux. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 60(1),* 50-83.
[23] Boggarapu, V., Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S., Chowdary, S.& Kumar Gara, D. (2021). State of the Art in Functionally Graded Materials.'' *Composite Structures, 262,* 113596.
[24] Demirbaş, M.D., Apalak, M.K.& Ekici, R. (2023). Determination of Three-Dimensional Thermo-Mechanical Behavior of Bidirectional Functionally Graded Rectangular Plates With the Theory of Elasticity. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 31(3),* 1-29.
[25] Demirbaş, M.D., Ekici, R.& Apalak, M.K. (2020). Thermoelastic Analysis of Temperature-Dependent Functionally Graded Rectangular Plates using Finite Difference Methods. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 27(9),* 707-724.
[26] Ghatage, P.S., Kar, V.R. & Sudhagar, P.E. (2020). On the Numerical Modelling and Analysis of Multi-Directional Functionally Graded. *Composite Structures:A Review, Composite Structures, 236,* 111837.
[27] Golbahar Haghighi, M., Malekzadeh, P. & Rahideh, H. (2011). Three-Dimensional Transient Optimal Boundary Heating of Functionally Graded Plates. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 59(1),* 76-95.
[28] Leetsch, R.,Wallmersperger, T. & Kröplin, B. (2009). Thermomechanical Modeling of Functionally Graded Plates. *Journal of intelligent material systems and structures, 20(15),* 1799-1813.
[29] Marchuk, A.V. (2021). Analytical Solution of the Problem on the Thermally Stressed State of Functionally Graded Plates based on the 3D Elasticity Theory. *Composites: Mechanics, Computations, Applications*: *An International Journal, 12(4),* 37- 62.
[30] Matysiak, S. & Perkowski, D. (2016). On Heat Conduction Problems in a Composite Half-Space With a Nonhomogeneous Coating. *Heat Transfer Research, 47(12),* 1141-1155.
[31] Pala, Y. & Çavuş, M. (2011). Dikdörtgensel Plakalarda Hareketli Isı Kaynağının Oluşturduğu Sıcaklık dağılımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendsilik Bilimleri Dergisi, 17(1),* 19-25.
[32] Yarımpabuç, D., Cihan, E., Çelebi, K. & Eker, M. (2020). Heat Conduction Analysis of Two-Dimensional Anisotropic Plate. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1),* 139-148.
[33] Baytak, T., Tosun, M., Ipek, C., Mollamahmutoglu, C. & Bulut, O. (2024). Thermal Stress Analysis for Functionally Graded Plates with Modulus Gradation, Part II. *Experimental Mechanics, 64,* 1229-1247.
[34] Yarımpabuç , D., Eker, M. & Yıldırım, R. (2023). Thermal Analysis of Bi-Directional Functionally Graded Plates Subjected To Heat Generation. *Heat Transfer Research, 55(6),* 83-92.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 233-241, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1513170
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Enhancing Hotel Recommendations through Feature-based Clustering

Özellik Tabanlı Kümeleme ile Otel Tavsiyelerinin Geliştirilmesi

Ömer Arifoğulları[1*], Gülfem Işıklar Alptekin[2], Günce Keziban Orman[3]

Geliş / Received: 09/07/2024 ***Revize / Revised: 31/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 18/09/2024***

ABSTRACT

This paper addresses the challenge of sparse interaction data in recommendation systems for the hotel industry. Due to the infrequent nature of hotel stays (often once or a few times annually), customer-product interaction data is typically sparse, hindering the effectiveness of traditional collaborative filtering techniques. We propose a novel hybrid recommendation framework specifically designed for this scenario. Unlike conventional systems that rely solely on user preference similarity, our framework leverages hotel clustering based on binary attributes to segment the product space. User interactions are analyzed within these clusters, leading to a more refined recommendation process. We take advantage of several clustering and feature reduction techniques and assign the final recommendation through ballot scoring. The experiments are performed on a real-world hotel sales data set including both sales information and hotel attributes. We evaluate our methodology and demonstrate significant improvements over baseline approaches which is the case of not using the found clusters for recommendation. The proposed framework achieves a two-fold increase in both the number of users receiving recommendations and the number of correct recommendations. These results highlight the potential of cluster- based recommendations for mitigating sparsity issues in tourism recommender systems.

Keywords- Recommendation System, Collaborative Filtering, Hybrid Recommendation System, Ballot Score

ÖZ

Bu makale, otel endüstrisi için öneri sistemlerinde seyrek etkileşim verilerinin yarattığı zorlukları ele almaktadır. Otel konaklamalarının genellikle yılda bir veya birkaç kez olması, müşteri-ürün etkileşim verilerini seyrek kılar. Bu da geleneksel işbirlikçi filtreleme tekniklerinin etkinliğini engeller. Bu senaryo için özel olarak tasarlanmış yeni bir hibrit öneri çerçevesi öneriyoruz. Yalnızca kullanıcı tercihi benzerliğine dayanan geleneksel sistemlerin aksine, çerçevemiz ürün uzayını bölümlere ayırmak için ikili özniteliklere dayalı otel kümelemesinden yararlanmaktadır. Kullanıcı etkileşimleri bu kümeler içinde analiz edilerek daha rafine bir tavsiye süreci ortaya çıkar. Çeşitli kümeleme ve özellik azaltma tekniklerinden yararlanıyor ve nihai tavsiyeyi oylama puanlaması yoluyla atıyoruz. Deneyler, hem satış bilgilerini hem de otel niteliklerini içeren gerçek dünya otel satış veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre metodolojimizi kümeleme kullanmayan temel yaklaşımlara göre önemli gelişmeler gösteriyor. Önerilen çerçeve, hem tavsiye alan kullanıcı sayısında hem de doğru tavsiye sayısında iki kat artış sağlıyor. Bu sonuçlar, turizm tavsiye sistemlerindeki seyreklik sorunlarını hafifletmek için küme tabanlı önerilerin potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler- Öneri Sistemi, İşbirlikçi Filtreleme, Hibrit Öneri Sistemi, Oylama Puanı

[1]*Corresponding Author Contact:mr.arifogullari@gmail.com (https://orcid.org/0009-0002-6146-264X)
Department of Computer Engineering, Galatasaray University, 34349, Istanbul
[2]Contact: gisiklar@gsu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0146-1581)
Department of Computer Engineering, Galatasaray University, 34349, Istanbul
[3]Contact: korman@gsu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0402-8417)
Department of Computer Engineering, Galatasaray University, 34349, Istanbul

I. INTRODUCTION

Following a significant recovery in 2023, the initial UNWTO World Tourism Barometer of the year indicated that international tourism nearly returned to its pre-pandemic levels, achieving 88% of its former volume with an estimated 1.3 billion international arrivals [1]. Similarly, Turkey experienced a significant upturn in tourism revenue, marking a 16.9% increase from the previous year to reach 54,315,542,000, with accommodation spending also rising by 27% according to the National Statistical Report [2]. This revitalization is vital for economies worldwide, as tourism significantly generates revenue, creates jobs, and fosters cultural exchange. The increasing shift towards online search and booking further highlights the critical role of advanced recommendation systems in maintaining competitive advantage by effectively utilizing the extensive data collected by travel agencies.

The literature on recommendation systems categorizes them into three primary types: collaborative filtering, content-based filtering, and hybrid filtering. Collaborative filtering recommends items based on user behavior and patterns [3-5]. It examines user activity to find comparable users and their preferences. Once similar users are identified, the system proposes items that previous customers with similar preferences have enjoyed or bought. Content-based filtering techniques analyze the items and a user's behavior [6]. The user's previous preferences are stored in a user profile. An item is analyzed to determine the similarities with the user's profile and previous choices so that the system can recommend items that the user has already liked. The hybrid filtering technique combines recommendation techniques to profit from the strength of different approaches to obtain better recommendations and overcome the setbacks of one algorithm [7].

Recommendation systems face two primary analytical challenges: diversity and sparsity [8, 9]. Sparsity mostly arises from infrequent user-item interactions leading to weaker recommendations [10]. On the other hand, diversity is difficult to achieve without users' demographic values such as gender, socioeconomic status, and education level. To address these issues, one viable approach is the clustering of users or items, followed by designing a recommendation system for each cluster. This strategy helps mitigate the effects of sparsity and enhances the diversity of recommendations. Nonetheless, a significant obstacle is the often-limited availability of detailed user features in user databases, while collecting item features tends to be easier.

Our paper focuses on precisely clustering datasets describing hotel features through binary variables. Relevant literature includes studies on hotel clustering and the importance of feature analysis [11,12]. A hotel recommendation system based on the link prediction method is introduced by [13]. They constructed a customer-hotel bipartite network using the data crawled from TripAdvisor.com. Another point of view has been to cluster travelers according to their past choices and their personality traits [14,15]. We encounter that Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) is commonly used for hotel recommendation systems. A user-defined weights to prioritize hotel features and suggest optimal choices is employed in [16-18] presents a fuzzy and nonlinear programming approach that captures the dynamic nature of user preferences and contextual factors, optimizing weights based on real-time user choices for personalized recommendations. Nevertheless, these methods are not tailored for high sparsity of interactions. Besides, we encountered a work that explores the influence of customer satisfaction on hotel recommendations, analyzing the relationship between satisfaction features and recommendation likelihood, emphasizing the importance of price-quality ratio, customer service, and facilities [19]. This approach differs from our proposal at the point that it focuses on user satisfaction, so that the feedback is important in these cases. However, in our proposal, we do not build an explicit framework. We propose to take advantage of clustering for overcoming the sparsity of sales data. Utilizing a real-life dataset from a leading Turkish tourism company covering over 61% of registered tourist facilities, our work aims to develop an accurate hybrid recommendation system that considers both item features and user similarities.

Contributions of our study include:

i. Developing a hybrid recommendation framework that takes into account the item features from the perspective of content-based filtering and user similarities for collaborative action.

ii. Implementing this framework on a real-world hotel sales dataset characterized by high sparsity.

iii. Experimentally showing the superior performance of our hybrid model compared to traditional collaborative approach.

iv. Employing sales data for hotel recommendations as opposed to relying on customer reviews or ratings.

v. Providing detailed methodologies and pseudo-codes for the hybrid recommendation system, which may be re-applicable for any other datasets with binary item features.

The structure of this article is outlined as follows: Section II examines the cluster-based hybrid recommendation model proposed by this study. In Section III, we present the experimental setup, alongside the results derived from these experiments. Finally, Section IV offers concluding remarks and encapsulates the findings of the paper.

II. CLUSTER-BASED HYBRID RECOMMENDATION FRAMEWORK

In the context of our study, the products are 2,562 hotels, and most users visit only one or two of them. Addressing this challenge, we grouped hotels into clusters based on their features. We then identified for each user, other users who had visited hotel clusters most similar to the ones they visited.

A. Hotel Clustering

The inherent challenge in analyzing a sparse binary matrix of hotel features necessitates sophisticated analytical methodologies. Our prior work introduced a comparative analysis of various clustering and dimension reduction techniques applied to this dataset [20]. Given that most clustering algorithms are primarily designed for datasets with numerical features, an initial step involved converting the dataset in question from binary to numerical format. In our prior work, we specifically focus on Sparse Principal Component Analysis (SPCA) [21] and Non-Negative Matrix Factorization (NMF) [22]. Dimension reduction is essential for making complex datasets more manageable and deriving meaningful insights with less computational resource expenditure. In conventional PCA, the principal components are derived as linear combinations of all original features [23]. Conversely, SPCA generates principal components from linear combinations of a select subset of the original features. The primary objective of SPCA is to determine a minimal subset of features that explain the maximum variance within the data, effectively excluding noise or irrelevant information. NMF is also a dimensionality reduction technique similar to PCA. Unlike PCA, NMF models offer straightforward interpretability. Nonetheless, NMF is not universally applicable across all datasets; the sample features must be non-negative, like in our hotel dataset.

After implementing dimension reduction techniques, we employed four well-known distinct clustering algorithms for further analysis: K-means, hierarchical agglomerative, DBSCAN, and OPTICS [20]. The effectiveness of two distinct dimension reduction methodologies, alongside the performance of four clustering algorithms, is thoroughly evaluated in [20]. Our analysis focuses on two critical criteria of the resultant cluster structure: firstly, achieving a clustering configuration characterized by high intra-similarities, and secondly, ensuring that the clusters are well-separated, with significant inter-cluster distances. This whole clustering efforts are encapsulated within the 'Hotel Clustering' process. Utilizing optimally performing clusters identified in [20], we aim to formulate more accurate hotel recommendations for customers.

B. Recommendation Engine

The methodology for this recommendation engine process is outlined in *Algorithm 1 Recommendation Engine* shown in Table 1. Our recommendation engine takes parameters the *weight*, which is used in ballot scoring which is described in the following part, and the *recommendation_number*, which express the number of items which will be recommended to each user, outputting a set of *recommendations* for each user. To evaluate the success of our system, we conducted preliminary supervised learning experiments, with the setup detailed in Section III. The process begins by taking the training data from the dataset (*line #1*). We then take the clusters of the found hotels obtained from the application of the clustering methodology described previously to group hotels in the previous section in (*line #2*). Hotels are then replaced with their cluster equivalents in the dataset (*lines #3* and *#4*), thus creating a modified dataset for recommendations. Each row in this set represents a user's previously purchased hotel cluster and other details related to that purchase. Utilizing the *getUsers(...)* function (*line #5*), we construct the *userlist* matrix, where each row corresponds to a user vector. The size of these vectors is equal to the total count of hotel clusters.

Table 1. Pseudo-code of Recommendation Engine

Algorithm 1 Recommendation Engine

Require: *weight*, *recommendation_number*
Ensure: *recommendations*, a set including *recommendation_number* recommendations for each customer
1: Set *data* as the extracted training data set from the revised sales table **2:** Set *clusters* as the found hotel clusters from the hotel binary features set **3:** Match hotel IDs from the training *data* set with hotel IDs in *clusters*
4: Replace the hotel ID of each sales record in the training *data* set with the corresponding cluster ID's after matching
5: userlist ← getUsers(data)
6: cosines ← getCosineSimilarity(userlist)
7: **for** user **from** userlist **do**
8: user rec ← getRecommendations(*user*, *cosines*, *weight*, *recommendation_number*)
9: recommendations ← aggregate(*recommendations*, user_rec)
10: **end for**

It is important to highlight that utilizing hotel clusters instead of individual hotels significantly impacts the dimensionality of the vectors in question. If individual hotels were used, the vector size would correspond to the total number of hotels within the system. Considering that the number of clusters is much smaller than that of hotels, the resulting *userlist* matrix demonstrates a significant decrease in sparsity. This reduction translates to fewer zeros in each vector of the *userlist* matrix. While this decrease in zeros is noteworthy, it's essential to recognize that there might also be a decrease in ones. This is because multiple visits by a user to hotels within the same cluster are aggregated into a single cluster representation. However, if users in the system have interacted with different hotels, depending on the level of diversity, there may be interactions with the number of clusters equal to the number of hotels. Generally, various users exist in real-world systems, resembling both the first and second scenarios. Therefore, the decrease in the number of ones may not be as dramatic as the decrease in the number of zeros. Cosine similarity, calculated in *line #6*, is used to determine the similarity between user vectors within the *userlist*. The equation for cosine similarity is provided in Eq. 1 for two binary vectors *x* and *y* at the identical size.

$$\text{cosine}(x, y) = \frac{\sum_i x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_i x_i} \cdot \sqrt{\sum_i y_i}} \tag{1}$$

Cosine similarity was selected for its widespread use and reliability in computing similarity between binary vectors. A value of 1 indicates identical user vectors and a value of 0 signifies no common elements between the vectors. Subsequent steps in Algorithm 1 involve a straightforward sub-procedure to generate recommendations for each user. We detailed this sub-procedure in *Algorithm 2 get Recommendations* shown in Table 2. Specifically, *line #1* of this sub-procedure filters users according to their cosine scores, choosing the top *recommendation_number* users that are most similar for each target user. The core concept behind our recommendations is to propose hotels that the user had not visited before but were visited by users most similar to them. Nonetheless, the process of selecting *recommendation_number* users introduces additional complexities.

Table 2. Pseudo-code of getting recommendations through ballot scoring

Algorithm 2 getRecommendations

Require: *user*, *cosines*, *weight*, *recommendation_number*
Ensure: user_rec, a set including recommendation_number recommendations for given user
1: Set similar_users, similarities ← extractSimilarUsers(*user*, *cosines*, *recommendation_number*)
2: Set neighbors, itemNumbers ← ballotScores(*similar_users*, *similarities*, *weight*, *recommendation number*)
3: Get hotel IDs as many as the number of items of each neighbor from *neighbors*, *itemNumbers*, ensuring these IDs are distinct from those already purchased by the user.

Let us consider the scenario where the *recommendation_number* is set to 3, and for a given user, the similarities of the top 3 similar users are 0.9, 0.1, and 0.1, respectively. In this case, while making recommendations, it is necessary to receive more recommendations from the first user and perhaps fewer or no

recommendations from the other two. To achieve this, we applied a technique, widely utilized in voting systems known as "ballot scoring" [24].

Ballot scoring is a method that facilitates the distribution of n preferences among $k>=n$ candidate demands based on the quality of those demands. In this scoring framework, not all k candidates may receive a share from the preferences; rather, candidates receive shares based on their quality scores. This method uses a weighting parameter to adjust the distribution strength based on quality. In our context, the n preferences correspond to the recommendations to be made, ultimately totaling the *recommendation_number*. The k options, in our case, are the similar users identified, also equal to the number of recommendations. If each user receives exactly one recommendation, the preferences are evenly distributed among all users. This system enables a dynamic distribution where more recommendations can be allocated to users with higher similarity scores. The allocation of recommendations per user is determined using a straightforward formula, as illustrated in Formula 2. This equation is obtained by rounding the product of the user's similarity score, s, and the weight, w, to the nearest integer.

$$\text{ballot}(w,s) = \begin{cases} \lfloor w \cdot s \rfloor, \text{if the fraction part of } w \cdot s \ < 0.5 \\ \lceil w \cdot s \rceil, \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

The ballot count for each similar user, as determined in *line #2* of Algorithm 2 using Eq. 2. This procedure facilitates the allocation of recommendation rights up to the specified *recommendation_number*, prioritizing users with the highest ballot counts. Although it is possible under this method that some similar users may not contribute recommendations, it primarily ensures that recommendations are predominantly sourced from users exhibiting the greatest similarity. Consequently, our approach can be characterized as a hybrid recommendation engine, since it seamlessly merges the evaluative strengths of collaborative filtering—through the assessment of user similarities based on their preferences—with a content-based approach that categorizes these preferences by their attributes.

III.EXPERIMENTS AND RESULTS

We employed two distinct datasets for our analysis: an extensive collection of hotel features, and anonymized sales data, which documented transactions executed by the sales department from 2019 to 2022. The hotel feature dataset includes properties that have been visited at least once by customers, incorporating 2,562 distinct hotels each characterized by 27 features. These features, which are all binary, indicate whether the relevant hotel has the relevant feature or not. Some examples of features are "child-baby friendly","ski-hotel","pool","sandy beach","next to sea shore". Despite the challenges that sparse and binary datasets pose for clustering [25], such features are advantageous for content-based filtering systems by providing clear indications of attributes that align with user preferences or item descriptions.

Our second dataset contains sales data (40,599 sales records with 32 features) that indicates which hotel was chosen and bought by which customer. Unlike many hotel recommendation systems that rely on customer reviews or ratings from platforms like Tripadvisor or Trivago [11,13], our approach utilizes sales data, offering direct insights into customer preferences and outcomes. This leads to a dataset characterized by sparser customer-hotel interactions but provides a basis for more reliable evaluations. The unmodified raw hotel dataset was imported ensuring the Hotel ID column contained no null values, and each binary feature column had at least one '1' value. After verifying the uniqueness of the Hotel ID column and removing duplicate rows, we finalized a hotel feature table with 2,562 rows and 27 columns. The sales dataset was subject to comprehensive cleaning, including the removal of suspicious records, such as those with incorrect regions or room types, and the rectification of inconsistencies, such as sales records without corresponding hotel feature entries, resulting in the exclusion of 9,212 rows. These adjustments culminated in a streamlined sales dataset comprising 28,439 records, ready for further analysis. The detailed results of the clustering step on this data set are previously reported in [20]. Here, we mainly focus on the recommendation step and detail the results of ballot scoring.

A. Setup and Performance Measurement

We conducted a supervised experiment to evaluate the efficiency of our proposed approach. We partitioned 10% of each user's records from the main sales dataset into a dedicated test set while retaining the remainder for training purposes. Notably, due to the infrequent nature of hotel bookings for many users, a significant portion of the dataset consisted of users with only a single transaction, rendering them ineligible for inclusion in the test set. Consequently, out of the 2588 users, only 600 were incorporated into the test set, with the remainder categorized as cold-start users.

In the training phase, we ran both the cluster-based approach proposed in Algorithm 1 and a baseline method, differing solely in the exclusion of steps pertaining to hotel ID vector similarities (omitting *lines #2, 3*, and *4* in Algorithm 1). Each method was configured to generate 10 recommendations per user. The ballot scoring

we use tells us how many recommendations we can get from each similar user for a total of 10 recommendations. However, there is a risk that hotels already recommended by different users will be recommended again, failing to produce any recommendations altogether. In some cases, similar users visit only the same hotels as the user for whom the recommendations are generated. This may also cause not to produce any single recommendation for some users. Such scenarios, common in datasets characterized by rare transactions such as hotel bookings, necessitated the inclusion of additional performance metrics beyond correct recommendations. That is why; we included the number of users for whom the recommendation could be produced as performance metrics besides the correct recommendations. To evaluate the performance of our methods, we employed the following metrics:

- Number of distinct users for whom recommendation could be generated in the training set
- Number of distinct users for whom a recommendation could be made in the test set
- Number of correct recommendations for the test set
- Ratio of correct recommendations made for the test set to the expected number of complete recommendations.

Given that our test set comprises 600 users, each associated with only one sales data point allocated to the test set, the anticipated number of complete recommendations stands at 600. We systematically varied the ballot score weight across a range of values from 1 to 10, with the results evaluated accordingly.

B. Results

We first evaluate the impact of ballot scoring on the recommendation distribution for selected users to reveal the behavior of ballot scoring. Table 3 illustrates the distribution of similar users, their cosine similarity, and corresponding ballot scores generated by executing Algorithm 1 with *recommendation_number* set to 10 and *weight* adjusted to 2 and 5, respectively. For instance, when recommending 10 items to customer ID 171, employing a *weight* of 2 results in recommendations sourced from 9 distinct similar users. Conversely, when the *weight* is increased to 5, recommendations originate from 3 different users. The results reveal a trend where a lower *weight* increases the diversity and number of recommending users.

Table 3. Cosine similarity and ballot scores of similar customers for target customer ID 171 across different weights

Recommendation Order	Similar Customer	Cosine Similarity Score	Ballot Score for w=2	Ballot Score for w=5
1	47617	0.816	**2**	**4**
2	17208	0.730	**1**	**4**
3	1299804	0.707	**1**	**2**
4	17132	0.707	**1**	1
5	17907	0.707	**1**	1
6	19228	0.707	**1**	1
7	19133	0.707	**1**	1
8	17082	0.707	**1**	1
9	75469	0.707	1	1
10	23012	0.707	1	1

The evaluation results of our proposed cluster-based approach and the baseline method, utilizing various weights in the ballot scoring scheme, are depicted in Figure 3. In our study, the training dataset comprises 2588 users. These plots provide a comprehensive visual representation of the impact of weight variation on the effectiveness of the ballot scoring mechanism in both our proposed approach and the baseline method.

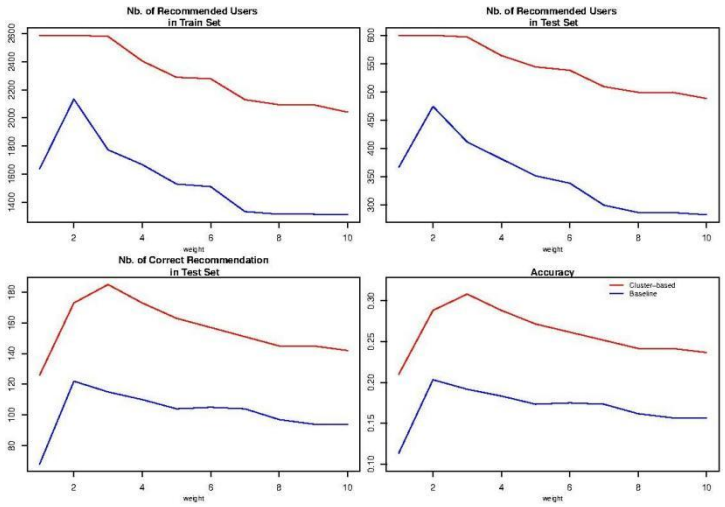


Figure 3. The change of the number of total recommended and correctly recommended users in Train and Test sets with the change of ballot weight

Our proposed approach demonstrates the capability to provide recommendations to all users across various weight settings, including *weight* of 1, 2, and 3. This inclusivity extends to users in the test set as well. However, as the *weight* parameter increases, the number of users eligible for recommendations gradually decreases. Notably, our cluster-based approach exhibits twice the efficacy of the baseline method in terms of the number of users that can be recommended across all *weight* configurations. After a certain *weight* value, the reason for the decrease in the number of users who can be recommended is the large number of recommendations received from a single user. This problem may not occur in datasets with hundreds of transactions per user when the *weight* is high, but as mentioned before, most of the users visited only one or two hotels in our data. Based on our observations, our dataset's optimal *weight* parameter emerges as 3. In the plots depicting the number of correct recommendations and their ratio relative to the anticipated total recommendations, our proposed cluster-based approach consistently outperforms the baseline, achieving double the success rate. This underscores the effectiveness of our approach in enhancing correct recommendation and completeness. Across all methods evaluated, this *weight* setting consistently yields the highest levels of success.

IV. CONCLUSION

In this research, we have developed a novel hybrid recommendation framework tailored for hotel transactions, addressing the challenge of sparse customer-product interactions. Our framework introduces a unique methodology by segmenting hotels based on their attributes and evaluating customer similarities through interactions with these hotel clusters. A comprehensive clustering phase was conducted to determine optimal segmentation, utilizing cosine similarity to quantify customer similarities. Subsequently, customers were prioritized based on these similarities, with recommendations generated via a weighted ballot scoring system that dictated the allocation of recommendations from each user. Our findings were benchmarked against a baseline approach that considers individual hotels, revealing that our method resulted in two times more success both in terms of producing the number of recommended users and the success of recommendations.

The core insight from this study indicates the efficacy of employing item segmentation to enhance correct recommendation. Furthermore, the adaptability of our framework permits its application across diverse datasets, offering flexibility in selecting clustering tools for segmentation and integrating various collaborative filtering techniques within the recommendation engine phase. This initial study was intentionally focused on establishing and algorithmically detailing our framework, foregoing a broader range of experimental conditions. Future research will explore variations in experimental approaches, expanding upon the groundwork set by this research. For now, the data set we have used consists of only hotel sales and does not reflect if the customers liked the hotels. That is why we cannot measure the success of customer satisfaction about recommended hotels. As a novel perspective, this work can be extended to measuring the performance according to the pleasant hotels for a system including customer feedback.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TÜBITAK) under the grant number 122N701 and by the Galatasaray University Research Fund (BAP) within the scope of

project number FBA-2024-1240, and titled 'Bağlantı Tahmini Yöntemleri ve Sınıf Dengesizliği Sorununa Çözüm Yaklaşımları'. The original data set used in the experiments in this study was provided by Setur Company. The clustering results of this work were previously published at a conference with reference [20].

REFERENCES

[1] Unwto world tourism barometer and statistical annex, january 2023. https://www.e-unwto.org/doi/epdf/10.18111/wtobarometereng.2023.21.1.1?role=tab. Accessed: 2024-02-01.

[2] Turizm İstatistikleri, ekim-aralık, (2023). *https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index? p=Turizm-Istatistikleri-IV.-Ceyrek:-Ekim—Aralik,-2023-53661*. Accessed: 2024-02-01.

[3] Liu, L.L., & Mpcm, J. (2023). *Multi-modal user portrait classification model based on collaborative learning. Information Technology and Control*, 52(4):867–877.

[4] Lee, M., & Kim, H.J. (2023). *A collaborative filtering model incorporating media promotions and users' variety-seeking tendencies in the digital music market. Decision Support Systems*, 174:114022.

[5] Iftikhar, A., Mustansar A. G., Mubbashir A., Zahid M., & Muazzam M. (2020). *An improved product recommendation method for collaborative filtering. IEEE ACCESS*, 8:123841– 123857.

[6] Jozani, M., Liu, C.H., & Choo, KK. R. (2023). *An empirical study of content-based recommendation systems in mobile app markets. Decision Support Systems*, 169:113954.

[7] Liu, D.R, Lai, C.H., & Lee, W.J. (2009). *A hybrid of sequential rules and collaborative filtering for product recommendation. Information Sciences*, 179(20):3505–3519.

[8] Wihartiko, F. D., Nurdiati S., Buono, A., & Santosa, E. (2023). *Multi-objective entropy optimization model for agricultural product price recommendation problem. Engineering Letters*, 31(4),

[9] Li, G.H.C.M.Z., Wu, J., & Chen, Y. (2023). *Multi-hypergraph neural network with fusion of location information for session-based recommendation. IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 53(4):1389–1398.

[10] Bobadilla, J., Ortega, F., Hernando, A. & Gutiérrez, A. (2013). *Recommender systems survey. Knowledge-Based Systems*, 46:109–132.

[11] Akyol, M. (2021). *Clustering hotels and analyzing the importance of their features by machine learning techniques. Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi*, 2(1):16–23.

[12] Rodrıguez-Victoria, O.E., Puig, F. & González-Loureiro, M. (2017). *Clustering, innovation and hotel competitiveness: evidence from the colombia destination. International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 29(11):2785–2806.

[13] Kaya, B. (2020). *A hotel recommendation system based on customer location: a link prediction approach. Multimedia Tools Appl.*, 79(3–4):1745–1758.

[14] Chen, T. (2020), *A fuzzy ubiquitous traveler clustering and hotel recommendation system by differentiating travelers' decision-making behaviors. Applied Soft Computing*, 96:106585.

[15] Lee, T. H., & Jan, F.H. (2023). *How does personality affect covid-19 pandemic travel risk perceptions and behaviors? evidence from segment analysis in taiwan. Sustainability*, 15(1).

[16] Forouzandeh, S., Berahmand, K. Nasiri, E. & Rostami, M. (2021). *A Hotel Recommender System for Tourists Using the Artificial Bee Colony Algorithm and Fuzzy TOPSIS Model: A Case Study of TripAdvisor. International Journal of Information Technology & Decision Making (IJITDM)*, 20(01):399–429.

[17] Kwok, P.K., & Lau, H.Y.K. (2019). *Hotel selection using a modified topsis-based decision support algorithm. Decision Support Systems*, 120:95–105.

[18] Chen, T., & Chuang. Y.H. (2018). *Fuzzy and nonlinear programming approach for optimizing the performance of ubiquitous hotel recommendation. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(2).

[19] Lee, S.H., Yun, J.J., Diaz, M.M. & Duque, C.M. (2021). *Open innovation through customer satisfaction: A logit model to explain customer recommendations in the hotel sector. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(3):180.

[20] Arifogullari, O., & Orman, G.K. (2023). *On experimental study of hotel clustering. In Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2023*, IMECS 2023, pages p. 82–87, Hong Kong.

[21] Johnstone, I. M., & Yu, L. A. (2009). *On consistency and sparsity for principal components analysis in high dimensions. Journal of the American Statistical Association*, 104(486):682–693.

[22] Inderjit, S. D., & Suvrit, S. (2005). *Generalized nonnegative matrix approximations with bregman divergences. In Proceedings of the 18th International Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS'05*, page 283–290, Cambridge, MA, USA, MIT Press.

[23] Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 374(2065):20150202–20150202, 2016.

[24] Taebel, D.A. (1975). *The effect of ballot position on electoral success. American Journal of Political Science*,

19(3):519–526.
[25] Ye, M., Zhang, P., & Nie, L. (2018). *Clustering sparse binary data with hierarchical bayesian bernoulli mixture model. Computational Statistics Data Analysis*, 123:p. 32–49.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 242-256, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1521183
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

İstanbul'da Bulunan Ahşap Evlerin Kullanıcı Memnuniyeti Açısından Değerlendirilmesi

Evaluation of Timber Houses in Istanbul in Terms of User Satisfaction

Elif Kaplan[1*]

Geliş / Received: 23/08/2024 ***Revize / Revised: 20/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 13/11/2024***

ÖZ

Ahşap evler, geleneksel Türk mimarisinde önemli yere sahip yapılardır. Geçmiş dönemde Anadolu'da yapılan evlerin çoğunluğunun ahşap olduğu görülmektedir. Ahşap doğal, sıcak, geri dönüştürebilir, tasarım esnekliği olan ve ülkemizde kaynağı kolay bulunabilen bir malzemedir. Bir yüzyıl öncesine kadar Anadolu'da yaygın olarak kullanılan ahşap yapıların kullanımı günümüze ulaşan süreç içerisinde oldukça azalmıştır. Türkiye'nin deprem bölgesi üzerinde yer alması ve ülkemizde son yıllarda yaşanan depremler nedeniyle ahşap evlere olan ilgi artmış, ahşap evlerde yaşamak isteyen kullanıcı sayısı çoğalmıştır. Özellikle 1999 Marmara depreminden sonra oluşan bu ilgi artışı dikkat çekicidir. Ancak günümüze ulaşan süreçte bu ilginin süreklilik göstermediği düşünülmektedir. Türk yapı sektöründe ahşap yapım sistemleri betonarme sistemler kadar yaygın kullanılmamaktadır. Deprem bölgesi olan ülkemizde betonarme sistemle oluşturulan yapılar yerine ahşap ve çelik sistemler gibi depreme karşı daha güçlü dayanım gösterebilen sistemlerin kullanımının artırılmasının gerekliliği açıktır. Ahşap yapılara, ahşap malzemenin getirdiği birtakım olumsuzluklar nedeniyle kullanıcı açısından ön yargı ile yaklaşıldığı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında İstanbul'da 1999 Marmara depremi sonrasında inşa edilen ahşap yapılarda ikamet eden kullanıcıların, olumlu ve olumsuz yargılarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın yazarı tarafından özgün olarak hazırlanan bir anket formu, ahşap ev kullanıcılarına yüz yüze olarak uygulanmıştır. Çalışmaya 62 ahşap ev kullanıcısı katılmıştır. Çalışma sonucunda ahşap ev kullanıcılarının ahşap evlerde yaşamaktan mutlu oldukları ve bu evlerde yaşamaya devam etmeyi düşündükleri görülmüştür. Depreme dayanım açısından güçlü olan ve zayıf zeminler üzerine kolaylıkla inşa edilebilen ahşap yapım sistemlerinin yaygınlaştırılması ve kullanım alanının artırılmasına yönelik dikkat çekilmesi, çalışmanın ülkemiz yapı sektörüne vereceği katkı olarak düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler- Ahşap, Ahşap evler, Ahşap yapılar, Ahşap yapım sistemleri

ABSTRACT

Timber houses have an important place in traditional Turkish architecture. Most houses built in Anatolia in the past were made of timber. Timber is a natural, warm, recyclable, and design flexible material. Although timber constructions were common in Anatolia until a century ago, their use has significantly declined since then. Türkiye's location being in an earthquake-prone zone and recent earthquakes have increased demand for and interest in timber houses. This increase in interest, especially after the 1999 Marmara earthquake, has not continued until today. Timber construction technologies within the Turkish building industry are less common than reinforced concrete systems. In our country, it is clear that the use of systems that can withstand stronger

[1]*Sorumlu yazar iletişim: elif.kaplan@fbu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-0239-2867)
İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Fenerbahçe Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, İstanbul, Türkiye

earthquakes, such as timber and steel systems, should be increased instead of structures built with reinforced concrete systems. Because employing wood has some disadvantages, it's thought that the user has preconceived conceptions about timber houses. Within the scope of this study, it was aimed to determine the positive and negative judgments of users living in timber houses built after the 1999 Marmara earthquake in Istanbul. The author originally prepared the survey and applied it face-to-face to timber house users. 62 timber house users participated in the study. The study's findings showed that people who lived in timber houses were content with their homes and intended to stay in them. Drawing attention to the widespread use and increased application of timber construction systems, is considered a contribution that this study will make to our country's construction sector.

Keywords- Timber, Timber houses, Timber structures, Timber construction systems

I. GİRİŞ

Ahşap sıcak, doğal ve insana yakın gelen bir malzemedir. Aynı zamanda ahşap, geniş renk ve doku çeşitliliği ile tasarım esnekliği olan, geri dönüştürülebilen, insana ve çevreye zarar vermeyen, sürdürülebilir bir malzemedir. Ülkemizde kaynağı kolay bulunabilen, yenilenebilir bir malzeme olan ahşabın hafif ve nefes alan bir malzemesi olması, yalıtım sağlaması gibi birçok olumlu özelliği bulunmaktadır. Diğer yapı malzemeleri ile birlikte de kullanılabilen ahşap malzeme tasarımcıya seçme ve karar vermede konfor yaratmaktadır.

Ahşap hafif bir malzeme olması, üretim ve uygulama kolaylığı nedeniyle yapı üretiminde sıklıkla kullanılan bir malzemedir. Ahşap yapıda inşaat aşamasında, kaba ve ince yapıda kullanılabilmektedir. İnşaat aşamasında kalıp ve iskele yapımında; kaba yapıda temelde, yapının taşıyıcı sistem oluşumunda ve çatıda kullanılan ahşap, ince yapı uygulamalarında kapı ve pencerede, doğramalarda, duvar, tavan, döşeme ve merdiven kaplamalarında kullanılmaktadır.

Ahşabın malzeme özelliğinden ve yapısal özelliklerinden kaynaklanan bir takım olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Yanıcı bir malzeme olması, suya ve neme karşı koruma gerekliliği, böceklenme, kurtlanma, mantarlaşma gibi etkilere karşı dayanıksız olması ve bakım gerektiren bir malzeme olması ahşabın olumsuz özelliklerinden bazılarıdır. Ahşabın yapısal özelliklerinden kaynaklanan çarpmaya ve darbeye karşı dayanıksızlığı, aşınma durumu ve çürüme riski de olumsuz özellikleri arasında sayılmaktadır. Ancak, ahşaba uygulanan birtakım kurutma ve koruma yöntemleriyle, malzemenin olumsuz özelliklerine karşı önlem alınabilmektedir.

Ahşap yapım sistemleri, çağdaş, rasyonel ve güvenli sistemlerdir. Bu sistemlerin doğru ve yerinde kullanıldığı zaman betonarme sistemler kadar yüksek performans gösterebilen sistemler olduğu bilinmektedir. Ahşap yapı sistemleri, Dünyada Amerika, İngiltere, Kanada, Japonya ve Finlandiya gibi gelişmiş ülkelerde sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Bir yüzyıl öncesine kadar Anadolu'da yaygın olarak kullanılan ahşap yapılar, geleneksel Türk mimarisinde de önemli bir yere sahiptir. Osmanlılar Dönemi'nde Anadolu'da yapılan evlerin çoğunluğunun ahşap olduğu bilinmektedir [2].

Ahşap yapım sistemleri her mevsim koşulunda uygulanabilen, ön yapımlı ve kuru yapım olarak imal edilebilen, üretim ve uygulama hatalarının en aza indirilebildiği, az sayıda ekip ile yapının uygulamasının kısa sürede yapılabildiği, yapı içinde kullanılan parçaların değiştirilebildiği, parçaların sökülüp yeniden kullanılabildiği sistemlerdir [3]. Ayrıca ahşap sistemlerin hafif olmaları nedeniyle nakliye ve montajı kolay, çabuk ve ekonomiktir [4]. Deprem bölgelerinde zayıf zeminler üzerinde kolaylıkla inşa edilebilen ahşap yapım sistemlerinin uygulanması, titreşim emme özelliği ve şok etkisine dayanımı açısından avantajlıdır. Bu sistemlerin dezavantajları ise, düzenli bakım gerektirmesi, su-nemden korunma ve yangına karşı önlem alınma gerekliliği olarak sıralanabilir [2].

Günümüze ulaşan süreçte gelişen teknoloji ile birlikte değişim gösteren ahşap yapım sistemleri, kütük sistemler ve çerçeve sistemler olarak farklı başlıklar altında incelenebilir. Kütük sistemler, masif ya da tabakalı olarak hazırlanan kütüklerin üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan yığma yapılardır. Bu yapılarda genellikle iç veya dış duvar yüzeyi kaplaması yapılmasına gerek duyulmamaktadır [5]. Bazı durumlarda ise, özellikle geleneksel kütük yapılarda, yapı dış duvar yüzeyinin kil-çamur ile sıvandığı görülmektedir [6]. Çerçeve sistemler ise konut üretiminde kullanılan ve yapının ahşap taşıyıcı bir iskelet ile oluşturulduğu, genellikle 2, en fazla 6 katlı olarak üretilen sistemleridir. Bu sistemler hafif ve ağır çerçeve sistemler olarak oluşturulabilir. Hafif çerçeve sistemler platform çerçeve ve balon çerçeve olarak kurgulanabilmektedir [3]. Platform çerçeve sistem ahşap konut üretiminde en yaygın kullanılan çerçeve yöntemlerinden biridir [7]. Balon çerçeve sistemlerin inşaat süresinin, çerçeve sistemle oluşturulan sistemlere göre daha hızlı olduğu düşünülmesine karşın bu sistem günümüzde kullanılmamaktadır [3,8]. Platform sistemde çerçeveler önyapımlı olarak fabrikada üretilebildiğinden, bu yöntemin tekil uygulamalardansa çok sayıda üretim yapılması gereken toplu konut uygulamalarında kullanılması daha doğru olmaktadır [9].

Günümüzde çok katlı ahşap yapıların yapılabilmesi ağır ahşap sistemler olarak adlandırılmaktadır ve bu sistemlerde endüstriyel tabakalı ahşap malzemelerle geniş açıklıklar geçilebilmektedir. Bu sistemlerde Glulam-GLT (Glued Laminated Timber), CLT (Cross Laminated Timber), LVL (Laminated Veneer Lumber) vb. tabakalı ahşap ürünler ile doğal ahşaba göre daha iyi taşıyıcılık sağlanmış ve daha üst mekanik ve statik özellikler kazandırılmıştır [10,11]. Dünyada yeni teknoloji ile üretilen çok katlı ahşap yapı sistemlerinin kullanımda olduğu görülmektedir [12-14]. Ayrıca günümüzde çok katlı ahşap yapılarda hibrit sistemler de kullanılabilmektedir. Ahşap-beton, ahşap-çelik ve ahşap-beton-çelik gibi hibrit sistemlerle çok katlı yapılar yapılabilmektedir [12]. Türkiye'de ise ahşap sistemlerle çok katlı yapı teknolojisine geçiş henüz başlamamıştır [15].

Dünyada deprem bölgesi olan ülkelerde ahşap yapıların kullanımı her geçen gün artış göstermektedir. ABD'nin deprem bölgelerinde yer alan konutların, Kanada'da konut ve eğitim binalarının büyük çoğunluğu ahşap taşıyıcı sistemli yapılardır [16,17]. Türkiye'de art arda yaşanan depremler sonrasında ahşap konutlara olan ilginin arttığı ve ahşap evlerde oturmayı tercih eden kişi sayısının artış gösterdiği görülmüştür [2]. Ahşap evlere olan ilgi özellikle 1999 Marmara depreminden sonra ciddi anlamda artmış, ancak günümüze ulaşan süreçte bu ilgi süreklilik göstermemiştir [18,19]. Türkiye İstatistik Kurumu'ndan (TUİK) alınan yapı izin istatistikleri verilerine göre 2000-2019 yılları arasında ahşap yapım sistemleri ile inşa edilen toplam yapı sayısı 5.637'dir. Yine aynı verilere göre betonarme sistemle inşa edilen toplam yapı sayısı ise 1.843.727'dir. TUİK verilerine göre 2000-2019 yılları arasında ahşap yapım sistemleri ile inşa edilen toplam yapı sayısının diğer tüm yapım sistemleri ile yapılan yapılara oranı %0.28'dir. Bu oran betonarme sistemle oluşturulan yapılar için %90.4'tür [19]. İstanbul'da ise ahşap yapım sistemleriyle oluşturulan yapılar %1'in altında kalmaktadır [11].

Ülkemizde kullanılan imar ve afet yönetmeliklerine bakıldığında ahşap yapıya, yapı yüksekliği 6.50 metreyi aşmayacak şekilde, bodrum kat hariç yalnızca iki kat olarak yapılması yönünde sınırlandırma getirildiği görülmektedir. Ayrıca yönetmelikte ahşap yapıların bitişik düzende yapılmaması, ayrık düzende komşu sınırlarından en az 5.00 m mesafe bırakılarak yapılması gerektiği belirtilmektedir [20].

Çalışmada İstanbul'da 1999 Marmara depremi sonrasında yapılan ahşap yapıların incelenmesi ve bu yapıların kullanıcı memnuniyeti açısından değerlendirilmesinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ahşap ev kullanıcılarının bu evlerde oturmayı neden tercih ettikleri, olumlu ve olumsuz yargılarının neler olduğu ve ilerleyen süreçte de bu evlerde oturmaya devam etmek isteyip istemedikleri sorularına yanıt aranmıştır.

II. ÇALIŞMANIN YÖNTEMİ

Çalışma İstanbul'da bulunan ahşap evlerde yaşayan kullanıcılar ile yapılmıştır. Ahşap evler dışında, diğer taşıyıcı sistem türü yapılarda yaşayan kullanıcılar değerlendirmeye alınmamıştır. Araştırmada verilerin toplanması öz bildirim yapılması yoluyla yapılmıştır. Ahşap ev kullanıcılarına çalışmanın yazarı tarafından özgün olarak hazırlanan anket formu sunulmuş ve bu formun kullanıcılar tarafından doldurulması beklenmiştir. Çalışmada anket formu dışında herhangi bir veri toplama aracı kullanılmamıştır. Çalışmada kullanılan anket için etik kurul onayı alınmıştır.

A. Anket Soruları

Ahşap ev kullanıcılarına sunulan anket formunda toplamda 19 soru bulunmaktadır. Soruların bazıları evet/hayır olarak iki seçenekli, bazıları ise açık uçlu olarak yanıtlanmak üzere hazırlanmıştır. Anket formunda öncelikle kullanıcıların ikamet ettikleri site adı, adres bilgisi, ahşap evin inşa edildiği yıl ve ahşap evde kaç yıldır ikamet ettikleri sorularına yer verilmiştir. Kullanıcılara, ahşap evde oturmayı neden tercih ettiği, daha önceden ahşap evde oturup oturmadığı ve ahşap evde oturmaya devam etmeyi düşünüp düşünmediği sorulmuştur. Formda kullanıcıların ahşap eve bakım yaptırıp yaptırmadığı ve ahşap evde yangın açısından özel bir önlem alıp almadığı sorularına yer verilmiştir. Ayrıca formda ahşap evde ısıtma sorunu, yapı içinden veya dışından kaynaklanan ses sorunu, su ve nem sorunu olup olmadığı, güneş enerjisinden faydalanıp faydalanılmadığı, günışığından faydalanılmanın yeterli olup olmadığı gibi fizik ortam koşullarının değerlendirildiği sorular da bulunmaktadır. Kullanıcılara ahşap evde kendilerini güvende hissedip hissetmediği sorulmuştur. Ahşap evde sağlıklı bir yaşam sürdürüp sürdürmediği, bu evlerin çevreye zararlı olup olmadığı, kullanıcıların ahşap evleri estetik bulup bulmadığı sorularına yer verilmiştir. Ayrıca anket formunda ahşap evin kullanıcı açısından olumlu/avantajlı ve olumsuz/dezavantajlı özellikleri sorulmuş ve bu sorunun açık uçlu olarak yanıtlanması beklenmiştir.

B. Katılımcı Özellikleri

Çalışmaya 62 ahşap ev kullanıcısı katılmıştır. Katılımcılara sunulan anket formunda, katılımcının ahşap evde ne kadar süreyle ikamet ettiği sorusuna yer verilmiştir. Buna göre katılımcıların ahşap evlerde ikamet süreleri 10 yıldan az ve 10 yıldan çok olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Çalışmaya katılan 31 kullanıcı, ahşap evlerde 10 yıldan az süreyle ikamet ettiğini, 31 kullanıcı ise ahşap evlerde 10 yıl ve üzeri süre ile ikamet ettiği bilgisini vermiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Ahşap ev kullanıcıları ikamet süreleri

Ahşap Evde İkamet Süresi	Ahşap Ev Kullanıcı sayısı
10 yıldan az	31
10 yıldan çok	31
Toplam	62

III. ÇALIŞMA ALANI

1999 Marmara depremi sonrasında Türkiye'de ve İstanbul'da ahşap yapı uygulamaları artış göstermiştir. Çalışma alanı İstanbul ili ile sınırlandırılmış ve bu kapsamda 1999 Marmara depremi sonrasında inşa edilen ahşap evler incelenmiştir. İstanbul'da ahşap yapı üretimi yapan ve uygulayan birçok farklı firma bulunmaktadır. Bu firmalar genellikle toplu yerleşim yerleri içinde yer alan iki katlı ahşap ev uygulamaları yapmaktadır. İstanbul'da iki katlı ahşap evlerden oluşan birçok farklı toplu yerleşim yeri bulunmaktadır. Çalışmada bu yerlerden; Silivri'de yer alan Altınorak Sunflower Evleri, Saral Onater Evleri ve Ömerli'de yer alan Meşeli Evler Sitesi incelenmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan ahşap ev sayısı ve ahşap evlerin yer aldığı yerleşim yeri adları Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Çalışma kapsamında incelenen yerleşim yeri adı ve ahşap ev sayısı.

Yerleşim Yeri Adı	İncelenen Ahşap Ev Sayısı
Altınorak Sunflower Evleri	23
Saral Onater Evleri	24
Meşeli Evler Sitesi	15
Toplam	62

A. Altınorak Sunflower Evleri

Altınorak Sunflower Evleri, Silivri mevkii E-5 karayolu üzerinde yer alan toplamda 350 konuttan oluşan 5 farklı plan şemasına sahip yapılardır. Bu evlerin yapımına 2000 yılında başlanmıştır. Sunflower Evleri yerleşim planı Şekil 1'de yer almaktadır.

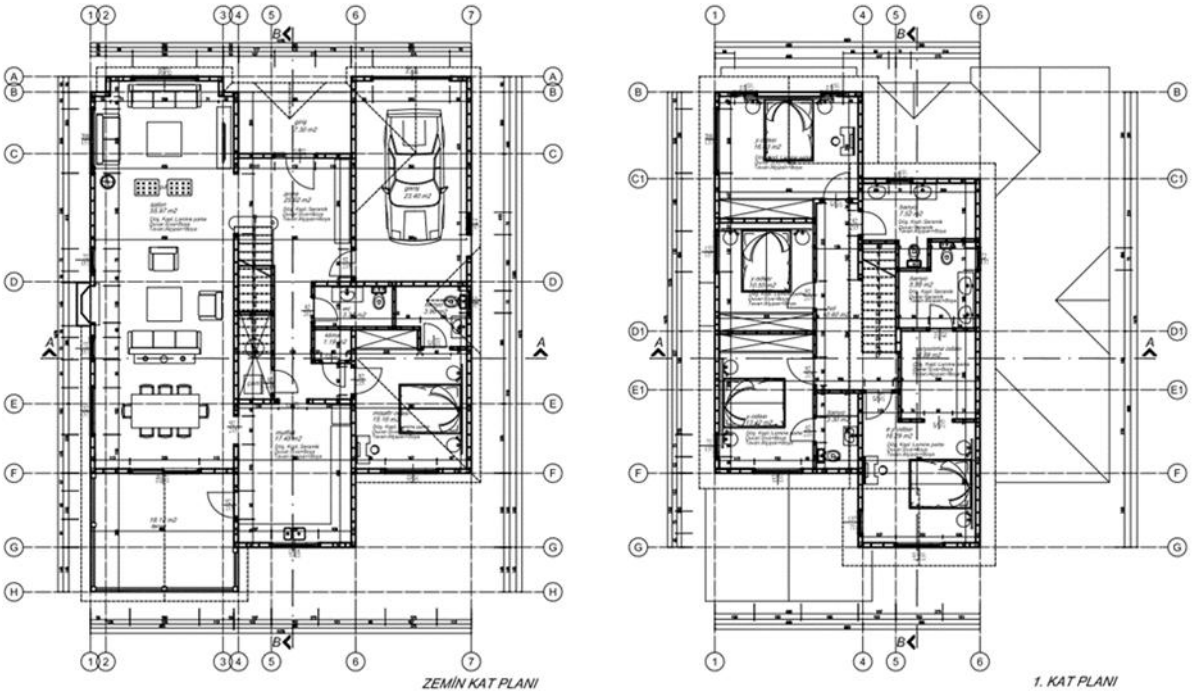


Şekil 1. Altınorak Sunflower Evleri yerleşim planı [21]

Zemin kat ve üst kat şeklinde iki katlı konut olarak tasarlanan yapıların zemin kat taban alanı 120-270 m^2 aralığında, birinci kat taban alanı ise 80-140 m^2 aralığındadır. Bodrum kat bulunmayan yapılarda kat yüksekliği 2.70 metredir. Yapı ağırlığı yaklaşık olarak 60 tondur [2]. Konutun üst katında yatak odaları ve banyolar, alt katında salon, mutfak, WC ve garaj bulunmaktadır. Yapıda tek kollu ahşap taşıyıcılı merdiven bulunmaktadır. Sunflower Evleri genel görünümü Şekil 2'de, zemin ve birinci kat plan tipi ise Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 2. Altınorak Sunflower Evleri genel görünümü [21]



Şekil 3. Altınorak Sunflower Evleri zemin ve birinci kat plan tipi [21]

B. Saral Onater Evleri

Onater Evleri, Silivri Kale mevkiinde yer alan, toplamda 34 konuttan oluşan 2 farklı plan şemasına sahip yapılardır. Bu evlerin yapımına ise 2012 yılında başlanmıştır. Onater Evleri yerleşim planı Şekil 4'te görülmektedir.

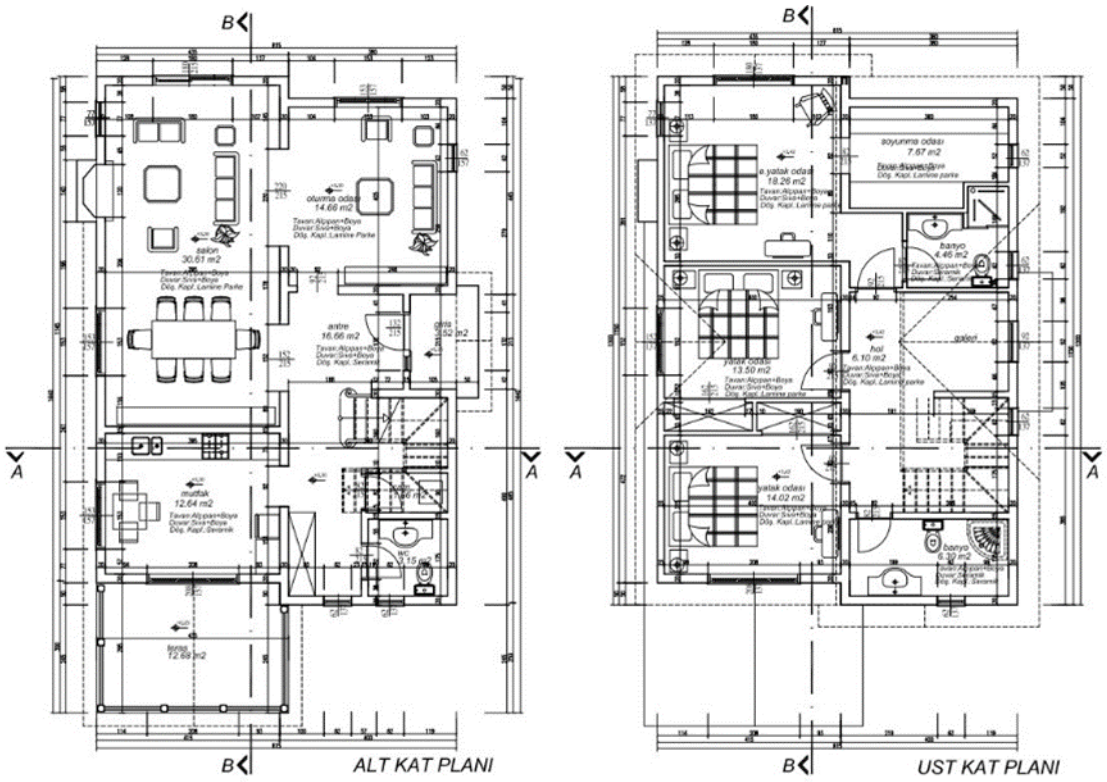


Şekil 4. Saral Onater Evleri yerleşim planı [22]

Bodrum kat bulunmayan, zemin kat ve üst kat olarak tasarlanan Saral Onater Evleri'nde zemin kat taban alanı 103-107 m^2, birinci kat taban alanı ise 87-98 m^2 aralığındadır. Yapılarda kat yüksekliği 2.72 metredir. Yapı ağırlığı yaklaşık olarak 30 tondur [2]. Konutun zemin katında salon, oturma odası, mutfak, WC ve teras, üst katında yatak odaları ve banyolar bulunmaktadır. Saral Onater Evleri genel görünümü Şekil 5'te, zemin ve birinci kat plan tipi ise Şekil 6'da yer almaktadır.

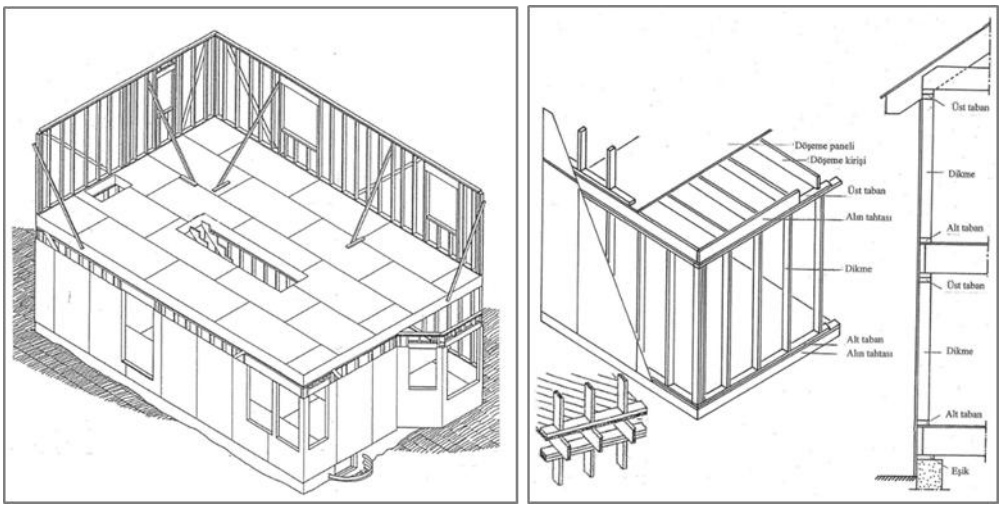


Şekil 5. Saral Onater Evleri genel görünümü [22]



Şekil 6. Saral Onater Evleri zemin ve birinci kat plan tipi [22]

Sunflower ve Onater Evleri platform çerçeve yapım sistemi ile inşa edilmiştir. Platform çerçeve, Kanada, Amerika ve İngiltere'de konut üretiminde çok sık kullanılan, iskeletleri prefabrike olarak her kat için ayrı bir platform olarak inşa edilen ahşap yapım sistemidir [7]. Platform çerçeve sistemde döşeme kurgusu, döşeme kirişlerinin oluşturulması ve bu kirişler üzerine döşeme alt kaplamasının uygulanması şeklinde olmaktadır. Sistemde zemin kat döşemesi üzerine zemin kat çerçeve duvarları uygulanmaktadır. Bu sistemde duvar; alt taban, üst taban ve dikmelerden oluşmaktadır. 5x15 cm boyutlarında kurgulanan dikme boyu duvar yüksekliği ile sınırlandırılmakta ve 40-60 cm aralıklarla yerleştirilmektedir. Platform çerçeve sistemde üst kat uygulaması, zemin katın yinelenmesi şeklinde yapılmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Platform çerçeve sistem [23, 2]

Sunflower ve Onater Evleri'nde betonarme sürekli temel uygulaması yapılmıştır. Temel duvarı üzerinde tek veya çift eşik parçası yerleştirilmektedir. Eşik parçaları üzerine ise zemin kat döşeme sistemi oturtulmaktadır. Zemin kat döşeme sistemi, sık aralıklarla (40-60 cm) konumlandırılmış ve taşıyıcı I kirişler olarak kurgulanmış döşeme kirişlerinden oluşmaktadır. Döşeme kirişleri arasında, rijitliği sağlamak amacıyla ahşap veya metal çapraz destek elemanları kullanılmıştır. Bu kirişler üzerinde döşeme alt kaplaması olarak OSB levhalar bulunmaktadır.

Zemin kat döşemesi üzerine zemin kat çerçeve duvarları konumlandırılmıştır. Çerçeve duvarlarda aynı boyut ve aralıkta kullanılan dikmeler kat yüksekliğince konumlandırılmıştır. Duvar dikmelerinin dış yüzeylerine rijitliği sağlamak amacıyla diagonal destekleme elemanları kullanılmıştır. İç duvarlarda stabiliteyi sağlamak için duvar çerçevelerinin içinde yer alan dikmeler arasında yatay kuşaklar bulunmaktadır. Duvar çerçevelerinin iç bölümlerinde extrude polistren kullanılmıştır. Duvarların üst yüzeylerine kaplama elemanları yerleştirilmiştir [9,23]. Kaplama elemanları iç yüzeylerde alçı levha, dış yüzeylerde OSB'dir. Duvar çerçevelerinin kalınlıkları; dış duvarlarda 15 cm, iç duvarlarda ise 10 cm'dir. Yapılarda kullanılan elemanlar %12-15 arasında nem oranına sahip fırınlanmış ve emprenye edilmiş çam ve köknar türü ahşaptır. Kullanılan ahşap biçimi tek parça veya tabakalı olabilmektedir [2]. Sunflower ve Onater Evleri'nde platform çerçeve sistem kurulumu Şekil 8'de görülmektedir.

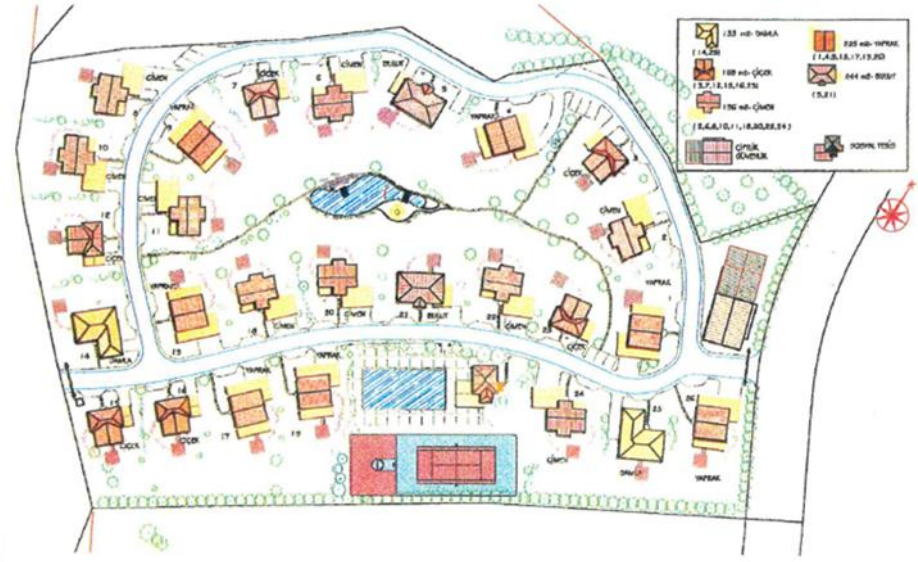


Şekil 8. Platform çerçeve sistemde duvar çerçeveleri ve taşıyıcı I kirişler [21,2]

Yapılarda su tesisatı için folyolu borular, elektrik tesisatı içinse buatsız silikonlu kablo kullanılmıştır. Elektrik kabloları ve klima tesisatı döşemede bulunan taşıyıcı I kirişlerin aralarından veya içinden geçirilerek uygulanmıştır. Yapıda ısıtma klima ile yapılmaktadır. Bir ahşap evin fabrikada üretim süresi yaklaşık olarak 15 gün, uygulama süresi ise 3 aydır [2].

C. Meşeli Evler Sitesi

Meşeli Evler Sitesi, Çekmeköy Ömerli'de yer almaktadır. Şile yolu bağlantısına 950 m mesafe uzaklıkta bulunan Meşeli Evler Sitesi'nde 5 farklı plan şemasına sahip toplamda 26 konut bulunmaktadır. Meşeli Evler Sitesi yerleşim planı Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Meşeli Evler Sitesi yerleşim planı [2]

İki katlı ve üzerinde çatı arası katı olarak tasarlanan konutlarda kat yüksekliği 2.62 metredir. Yapının üst katında yatak odaları ve banyo, zemin katta oturma odası, mutfak ve çocuk odası bulunmaktadır. Yapıda bulunan merdiven iki kollu, çelik veya ahşap taşıyıcılı merdivendir. Meşeli Evler Sitesi genel görünümü Şekil 10'da yer almaktadır.



Şekil 10. Meşeli Evler Sitesi genel görünümü [24]

Bu yapılar da Sunflower ve Onater Evleri'ne benzer şekilde platform çerçeve yapım yöntemiyle üretilmiştir. Yapılarda betonarme temel uygulanmıştır. Betonarme temel boyu yaklaşık olarak 70 cm olarak kurgulanmıştır. Temel duvarı üzerinde döşeme çerçevesi yer almaktadır. Döşeme çerçevesi, ahşap bir çerçeve içinde sıralanan masif döşeme kirişlerinden ve bu kirişler üzerine kaplanan OSB levhalardan oluşmaktadır. Kirişler arasında ısı ve ses yalıtımı sağlaması amacıyla camyünü kullanılmıştır. Yapıda kullanılan duvar, döşeme çerçeveleri ve çatı makaslarında yer alan ahşap elemanlar %15-18 nem oranına sahip fırınlanmış ve emprenye edilmiş çamdır. Yapılarda kullanılan ahşap taşıyıcılı duvar çerçeveleri atölyede hazırlanmış ve atölyeden nakliye edilerek yerinde montaj edilmiştir. Duvar çerçevelerinin kalınlıkları; dış duvarlarda 11,5 cm, iç duvarlarda ise 12 cm'dir. Dış duvar çerçevelerinin dış kısmı su kontraplağı, iç kısmı ise alçı levha ile kaplanmıştır. İç duvar çerçevelerinin her iki kısmı alçı levha ile kaplanmıştır [2]. Dış duvar çerçevelerinde yalıtım için extrude polistren kullanılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Platform çerçeve sistemde duvar çerçevesi oluşturulması [2]

Su ve elektrik tesisatının döşenmesi için gerekli altyapı panellerin içinde üretim aşamasında göz önünde bulundurularak uygulanmıştır. Yapılarda elektrik tesisatı için silikonlu ve yanmaz kablo, su ve kalorifer tesisatında ise polietilen kablo kullanılmıştır. Yapılarda ısıtma zemin katta yerden ısıtma şeklinde, üst katlarda ise radyatörlerle yapılmaktadır. Yapının sistem kuruluşu 3 gün, uygulama süresi ise 3 aydır [2].

IV. ANKET ÇALIŞMASINA İLİŞKİN BULGULAR

Anket çalışmasına ilişkin bulgular farklı başlıklar altında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler; ahşap ev tercih nedeni, anket sorularının genel değerlendirmeleri, anket sonuçlarının ahşap evde ikamet edilen süreye göre değerlendirilmesi ve anket soruları arasında Ki-Kare Bağımsızlık Testi değerlendirmeleri olarak dört ana başlık altında yapılmıştır.

A. Ahşap Ev Tercih Nedeni

Ahşap ev kullanıcısına sunulan anket formunda, öncelikle kullanıcının ahşap evde oturmayı neden tercih ettiği sorusuna yer verilmiştir. Kullanıcının bu soruyu açık uçlu olarak yanıtlaması beklenmiştir. Anket formunda 62 ahşap ev kullanıcısının 60'ı bu soruyu yanıtlamış, 2 kullanıcı ise yanıtlamamıştır. Bu soruya verilen yanıtlara göre kullanıcıların çoğunluğunun ahşap evi depreme dayanıklı olduğu için tercih ettiği görülmektedir. Bunun yanı sıra ahşap evi sağlıklı olduğu tercih eden kullanıcılar, ahşap evi doğal olduğu için, estetik olduğu için ve yeni yapı olduğu için tercih eden kullanıcıların sayıları ve yüzdesel dağılımları Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. Ahşap ev tercih nedeni

Ahşap Ev Tercih Nedeni	n	%
Depreme dayanıklı olması	36	60
Sağlıklı olması	15	25
Doğal olması	5	8.3
Estetik olması	3	5
Yeni yapı olması	1	1.7
Toplam	60	100

B. Anket Sorularının Değerlendirilmesi

Bu bölümde çalışmada yapılan anket sonuçlarının genel değerlendirmelerine yer verilmiştir. Kullanıcılara sunulan anket formunda sorular evet/hayır olarak iki seçenekli olarak yanıtlanmıştır. İstatistiksel değerlendirmelerde evet '1', hayır ise '2' olarak numaralandırılmıştır. Anket sorularına verilen yanıtların kullanıcı sayı dağılımları ve yüzdesel oranları Tablo 4'te yer almaktadır. Ayrıca tabloda sorulara verilen yanıtların aritmetik ortalaması (Mean) ve sorulara en çok verilen yanıt değeri olan tepe değerleri (Mode) görülmektedir. Tabloda tüm katılımcıların aynı görüş bildirdiği sorulara ait satırlar gri ile belirtilerek gösterilmiştir.

Tablo 4. Anket sorularına verilen yanıtların kullanıcı sayı dağılımları ve yüzdesel değerlendirmeleri

Sorular	Evet		Hayır		Mean [μ]	Mode [M_0]
	n	%	n	%		
Daha önce ahşap evde oturdunuz mu?	11	18	50	82	1.82	2.00
Ahşap evde oturmaya devam etmeyi düşünüyor musunuz?	62	100	0	0.0	1.00	1.00
Ahşap evde yapı içinden kaynaklanan ses sorunu var mı?	21	34.4	40	65.6	1.66	2.00
Ahşap evde yapı dışından kaynaklanan ses sorunu var mı?	3	5.6	51	94.4	1.94	2.00
Ahşap evde ısıtma sorunu var mı?	5	8.3	55	91.7	1.92	2.00
Ahşap evde güneş enerjisinden faydalanıyor mu?	19	31.7	41	68.3	1.68	2.00
Ahşap evde su ve nem sorunu var mı?	1	1.6	60	98.4	1.98	2.00
Ahşap evde günışığından yeteri derecede faydalanıyor mu?	59	96.7	2	3.3	1.03	1.00
Bugüne kadar ahşap eve bakım yaptırdınız mı?	37	59.7	25	40.3	1.39	1.00
Ahşap evde kendinizi güvende hissediyor musunuz?	58	98.3	1	1.7	1.02	1.00
Ahşap evde yangın için özel bir önlem aldınız mı?	33	53.2	29	46.8	1.47	1.00
Ahşap evde sağlıklı bir yaşam sürdürdüğünüze inanıyor musunuz?	61	100	0	0.0	1.00	1.00
Ahşap evin çevreye zararlı olduğunu düşünüyor musunuz?	0	0.0	60	100	2.00	2.00
Ahşap evleri estetik buluyor musunuz?	60	100	0	0.0	1.00	1.00

Anket sonuçlarına verilen yanıtlar değerlendirildiğinde, katılımcıların %82'si daha önce ahşap evde oturmadığını, %18'si ise oturduğunu belirtmiştir. Bununla beraber çalışmaya katılan tüm katılımcılar ahşap evde oturmaya devam etmeyi düşündüklerini bildirmişlerdir.

Ahşap evde ses sorunu olup olmadığı ile ilgili soruda, katılımcıların %94.4'ü ahşap evde yapı dışından, %65.6'sı ise yapı içinden gelen bir ses sorunu olmadığı yönünde görüş bildirmişlerdir. Katılımcıların bir bölümü, yapıyı ilk kullanmaya başladıklarında yapı içinden yapının yeni olması ve oturmasına bağlı ses geldiğini ama daha sonra bu sesin azaldığını belirtmişlerdir. Bazı kullanıcılar ise ahşap evde yapı içinden gelen ses sorunu olduğu, ahşap evde odalar arası ses geçişinin fazla olduğu, yapıda darbe seslerinin iletildiği ve merdiven çıkarken ses oluştuğu yönünde görüş bildirmişlerdir (%34.4).

Katılımcıların %91.7'si ahşap evde ısıtma sorunu olmadığını belirtmişlerdir. Bu katılımcılar ahşap evin ısınmasının ve soğutulmasının rahat ve çabuk olduğunu, yapının kışın sıcak yazın ise serin tutma özelliğinin bulunduğunu bildirmişlerdir. Katılımcılar bunun ahşabın ısı yalıtımı sağlama özelliğinden kaynaklandığını düşündüklerini ifade etmişlerdir. Aynı zamanda katılımcılar ahşap evin doğal havalandırma sağlayan, nefes alan bir yapı olduğu yönünde görüş bildirmişlerdir. Ayrıca ahşap evin enerji tasarrufu sağlayan bir yapı olduğunu

düşündüklerini belirtmişlerdir. Bazı katılımcılar ise ahşap evde ısınma sorunu olduğunu (%8.3), iyi bir yalıtım yapılmadığı durumda yapıda soğuk mevsimlerde sorun oluşabileceğini ifade etmiştir.

Katılımcılar ahşap evde su ve nem sorunu olmadığı yönünde görüş bildirmişlerdir (%98.4). Ahşap evde güneş enerjisinden faydalandıklarını belirten katılımcılar %31.7, faydalanmadıklarını belirten katılımcılar ise %68.3 oranındadır. Katılımcıların %96.7'si ahşap evde günışığından yeteri kadar faydalanabilindiğini ifade etmişlerdir.

Ahşap evde yangın için özel bir önlem almadığını belirten katılımcılar %46.8 oranında, önlem aldığını belirten katılımcılar ise %53.2 oranındadır. Katılımcılar yapıda yangına karşı diğer yapım türleriyle yapılan yapılara göre daha hassas yaklaşılması gerektiğini belirtmişler, ahşap evlerde halihazırda yangına karşı önlem amaçlı, silikon elektrik tesisatı, kaçak akım rölesi, duman detektörü ve yangın tüplerinin bulunduğunu ifade etmişlerdir. Meşeli Evler Sitesi'nde yangına karşı önlem amaçlı silikonlu yanmaz kablo kullanıldığını ve ayrıca site içinde yangın muslukları bulunduğu bilgisini vermişlerdir. Benzer şekilde Sunflower ve Onater Evleri'nde yangına karşı önlem amaçlı elektrik tesisatında buatsız silikonlu kablo kullanılmıştır.

Katılımcıların %98.3'ü ahşap evde kendilerini güvende hissettiğini ifade etmiştir. Tüm katılımcılar ahşap evde sağlıklı bir yaşam sürdürdüğüne inandığını, ahşap evlerin çevreye zararlı olduğunu düşünmediklerini ve ahşap evleri estetik bulduğunu belirtmişlerdir.

Katılımcılara anket sorularına verilen yanıtların yanı sıra ahşap evlerin kullanıcılar açısından olumlu ve olumsuz yönlerinin neler olduğu sorusu sorulmuş ve bu soruyu açık uçlu olarak yanıtlamaları istenmiştir. Buna göre katılımcılar ahşap evde yaşam konforunun yüksek olduğu, bu evlerde yaşamanın kendilerini iyi hissettirdiği, yapıların doğal, doğaya uyumlu, hafif, nefes alan, havadar yapılar olduğu yönünde görüş bildirmişlerdir. Yapıları insan ölçeğine yakın ve estetik olarak niteleyen katılımcılar bu yapıları rutubet ve nemden uzak sağlıklı yapılar olarak tanımlamışlardır. Ahşap evlerin ısı ve ses yalıtımı sağlayan yapılar olması nedeniyle enerji tasarruflu yapılar olduğunu düşündüklerini belirtmişlerdir. Yapılarda eskiyen bozulan parçalara müdahale, değişim ve tamirat kolaylığı olduğunu bildirmişlerdir.

Katılımcılar olumsuz yargılar olarak en başta yapının düzenli bakım gerektirmesinden bahsetmişlerdir. Anket sorularına verilen yanıtlarda ahşap ev kullanıcılarının %59.7'si bugüne kadar ahşap eve bakım yaptırdığı, %40.3'ü ise bakım yaptırmadığı bilgisini vermiştir. Katılımcılar yapının 3-4 yılda bir bakım gerektirebildiğini ve bu bakımın da maliyetli olduğunu belirtmişlerdir. Yapıda dış cephede boya bakımının belli aralıklarda yapılmasının gerekliliğinin altını çizmişlerdir. Bunun yanı sıra ıslak hacimlerde suya ve neme karşı dikkat edilmesi gerektiğini bildirmişlerdir. Ayrıca yapının bahçe içinde yer alması ve ahşabın doğal bir malzeme olmasından kaynaklanan haşere sorununa karşı da dikkatli olunmasının gerektiğine, yapıda belli aralıklarla ilaçlama yapmanın önemine dikkat çekmişlerdir. Bazı katılımcılar ahşap evin yapı ömrünün uzun olmayabileceğini düşündüklerini, yapının darbeye ve zorla girilmeye karşı dayanıksız olabileceği konusunda tereddüt ettiklerini bildirmişlerdir.

C. Anket Sorularının Ahşap Evde İkamet Edilen Süreye Göre Değerlendirilmesi

Çalışmada anket sorularının katılımcıların ahşap evde ikamet ettiği süreye göre değerlendirilmesi Ki-Kare Bağımsızlık Testi (*Chi-Square Test for Independence*) uyarınca SPSS istatistiksel analiz programı ile yapılmıştır (Tablo 5). Değerlendirme yapılırken kullanıcılar ahşap evlerde 10 yıldan az ve 10 yıldan fazla süreyle ikamet edenler olarak iki ana başlık atında incelenmiştir. Değerlendirme sonucuna göre anlamlı farklılık görülen soru tablo üzerinde gri ile belirtilerek gösterilmiştir.

Tablo 5. Anket sorularına verilen yanıtların ahşap evde ikamet edilen süreye göre değerlendirilmesi

Sorular		İkamet Süresi				Sig. (p)
		10 Yıldan Az		10 Yıldan Çok		
		Evet	Hayır	Evet	Hayır	
Daha önce ahşap evde oturdunuz mu?	n	8	23	3	27	.108
	%	25.8	74.2	10	90	
Ahşap evde oturmaya devam etmeyi düşünüyor musunuz?	n	31	0	31	0	-
	%	100	0.0	100	0.0	
Ahşap evde yapı içinden kaynaklanan ses sorunu var mı?	n	8	23	13	17	.150
	%	25.8	74.2	43.3	56.7	
Ahşap evde yapı dışından kaynaklanan ses sorunu var mı?	n	0	27	3	24	.236
	%	0.0	100	11.1	88.9	
Ahşap evde ısıtma sorunu var mı?	n	2	28	3	27	.640
	%	6.7	93.3	10	90	
Ahşap evde güneş enerjisinden faydalanıyor mu?	n	12	19	7	22	.225
	%	38.7	61.3	24.1	75.9	
Ahşap evde su ve nem sorunu var mı?	n	0	31	1	29	.305
	%	0.0	100	3.3	96.7	
Ahşap evde günışığından yeteri derecede faydalanıyor mu?	n	31	0	28	2	.144
	%	100	0.0	93.3	6.7	
Bugüne kadar ahşap eve bakım yaptırdınız mı?	n	17	14	20	11	.437
	%	54.8	45.2	64.5	35.5	
Ahşap evde kendinizi güvende hissediyor musunuz?	n	30	0	28	1	.305
	%	100	0.0	96.6	3.4	
Ahşap evde yangın için özel bir önlem aldınız mı?	n	11	20	22	9	.005
	%	35.5	64.5	71	29	
Ahşap evde sağlıklı bir yaşam sürdürdüğünüze inanıyor musunuz?	n	31	0	30	0	-
	%	100	0.0	100	0.0	
Ahşap evin çevreye zararlı olduğunu düşünüyor musunuz?	n	0	31	0	29	-
	%	0.0	100	0.0	100	
Ahşap evleri estetik buluyor musunuz?	n	31	0	29	0	-
	%	100	0.0	100	0.0	

Anket sorularına verilen yanıtların katılımcıların ahşap evde ikamet ettiği süreye göre değerlendirilmesinde, ahşap evde yangın için özel bir önlem alınıp alınmadığı sorusunda %95 güven düzeyinde anlamlı farklılaşma görülmektedir ($p<0.05$). Bu soruda ahşap evde 10 yıl ve üzeri süreyle oturanlar, 10 yıldan daha az süreyle oturanlara oranla daha fazla ahşap evde yangın için önlem aldıklarını ifade etmişlerdir. 10 yıl ve üzeri süreyle oturanlar %71 oranında yangın için önlem aldıklarını belirtirken, 10 yıldan az süreyle oturanlar ise %35.5 oranında yangın için önlem aldıklarını belirtmişlerdir. Anket formunda diğer sorulara verilen yanıtlarda ise anlamlı farklılaşma görülmemektedir ($p>0.1$).

D. Anket Soruları Arasında Ki-Kare Bağımsızlık Testi Değerlendirmeleri

Anket formunda yer alan tüm sorular arasında SPSS istatistiksel analiz programı ile Ki-Kare Bağımsızlık Testi (*Chi-Square Test for Independence*) kullanılarak ikili değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda aralarında en az %95 güven düzeyinde anlamlı ilişki görülen soru grupları aşağıda yer almaktadır:

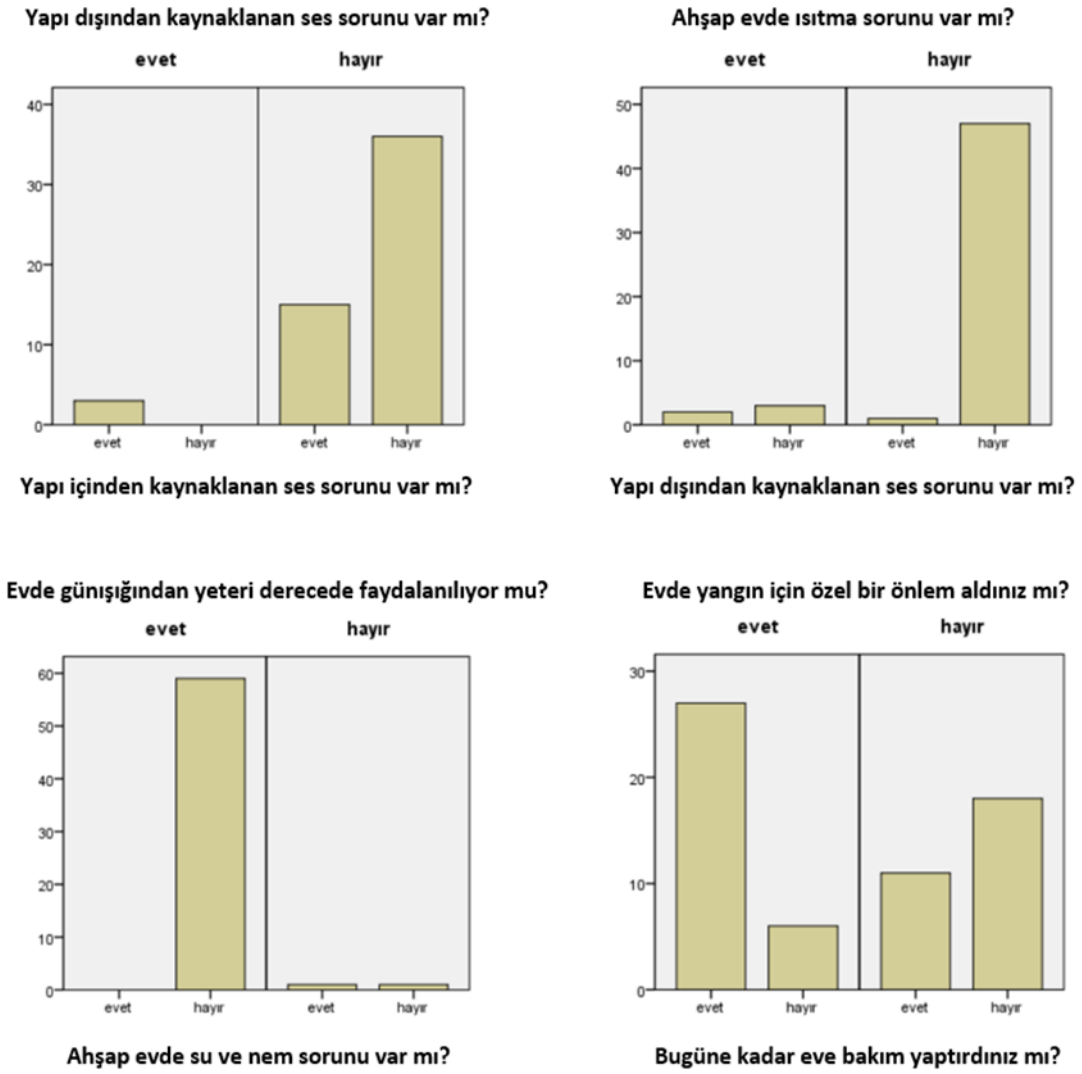
• Ahşap evde yapı içinden kaynaklanan ses sorunu var mı sorusu ile ahşap evde yapı dışından kaynaklanan ses sorunu var mı sorusu arasında %95 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki bulunmaktadır ($p<0.05$, $p=.033$).

• Ahşap evde yapı dışından kaynaklanan ses sorunu var mı sorusu ile ahşap evde ısıtma sorunu var mı sorusu arasında %95 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki saptanmaktadır ($p<0.05$, $p=.021$).

• Ahşap evde su ve nem sorunu var mı sorusu ile ahşap evde günışığından yeteri derecede faydalanılıyor mu sorusu arasında %99 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki bulunmaktadır ($p<0.05$, $p=.033$).

• Bugüne kadar ahşap eve bakım yaptırdınız mı sorusu ile ahşap evde yangın için özel bir önlem aldınız mı sorusu arasında %99 güven düzeyinde anlamlı bir ilişki saptanmaktadır ($p<0.01$, $p=.000$).

Soru grupları arasında yapılan ikili değerlendirmelere göre ahşap ev içinde ses sorunu olmadığı yönünde görüş belirten kullanıcılar, evde yapı dışından da gelen ses sorunu olmadığı yönünde görüş belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra ahşap evde yapı dışından kaynaklı ses sorunu olmadığını belirten kullanıcılar, ahşap evde ısıtma sorunu olmadığı yönünde görüş bildirmişlerdir. Ahşap evde su ve nem sorunu olmadığını düşünen kullanıcılar, ahşap evde günışığından yeteri kadar faydalanıldığını düşünen kullanıcılar olmuştur. Değerlendirme sonuçlarına göre ahşap eve bakım yaptıran kullanıcılarda, yangın için özel önlem alan kullanıcılar, almayan kullanıcılara göre daha yüksek orandadır (Şekil 12).



Şekil 12. Ki-Kare Bağımsızlık Testi değerlendirmelerine göre aralarında anlamlı ilişki saptanan soru grupları

V. SONUÇLAR

Ahşap ev kullanıcılarının çoğunlukla ahşap evleri depreme dayanıklı oldukları için tercih ettiği görülmüştür. 1999 Marmara depremi sonrası ahşap evlere olan yönelimin artması ve İstanbul'da farklı firmalar tarafından ahşap ev uygulamalarının başlaması ile kullanıcıların da bu evlere olan ilgisi artış göstermiştir. Günümüze ulaşan süreçte ise bu ilginin süreklilik göstermediği görülmektedir.

Çalışmada kullanılan anket soruları farklı şekillerde değerlendirilmiştir. Örneğin; ahşap ev kullanıcılarının evlerde ikamet sürelerine göre değerlendirme yapılmış, bu değerlendirme 10 yıldan az süreyle ve 10 yıldan fazla süreyle ahşap evde ikamet eden kullanıcılar olarak iki ana başlıkta incelenmiştir. Bu değerlendirmede 10 yıldan daha fazla süreyle ahşap evde ikamet eden kullanıcıların ahşap evde yangına karşı özel önlem alma gereksinimi duyduğu görülmüştür. Çalışmada yapılan anket sorularının genel değerlendirmelerine göre kullanıcıların çoğunluğu ahşap evde ısı, su ve nem sorunlarının olmadığını belirtmişlerdir. Ahşap evde günışığından yeteri kadar faydalanıldığı yönünde görüş bildiren katılımcılar, bu evleri rutubetsiz, sağlıklı evler olarak tanımlamışlardır. Ayrıca kullanıcılar ahşap evleri enerji tasarruflu yapılar olarak değerlendirmişlerdir. Bir takım kullanıcılar ahşap evlerde yaşamanın olumlu taraflarının yanı sıra ahşabın aşınma, çürüme gibi etkilere karşı

bakım gerekliliği ve yapıda yangına karşı önlem alınması zorunluluğu gibi bazı zor tarafların da olduğunun altını çizmişlerdir. Soru grupları arasında yapılan ikili değerlendirmelere göre ahşap eve bakım yaptıran kullanıcıların ahşap evde yangın için özel önlem alan kullanıcılar olduğu görülmüştür. Yine aynı değerlendirmeye göre, ahşap evde ses sorunu olmadığı yönünde görüş belirten kullanıcıların ahşap evde ısıtma sorunu olmadığını da düşündükleri görülmüştür.

Çalışmaya katılan tüm katılımcılar ahşap evde sağlıklı bir yaşam sürdürdüklerine inandıklarını, bu evlerde yaşamaktan memnun olduklarını ve bu evlerde oturmaya devam etmek istediklerini belirtmişlerdir. Katılımcılar ahşap evlerde kendilerini güvende hissettikleri yönünde görüş bildirmişlerdir. Ayrıca tüm katılımcılar ahşap evleri estetik bulduğunu, bu evlerin doğal ve çevreye zarar vermeyen evler olduğunu düşündüklerini bildirmişlerdir.

Dünyada gelişen bir teknoloji olan ahşap yapılarla ilgili yeni yapı uygulamalarının olduğu fakat bu uygulamaların Türkiye'de henüz yapılmaya başlanmadığı bilinmektedir. Deprem bölgesi olan ülkemizde ahşap ve çelik sistemler gibi yapı sistemlerinin uygulanabilirliğinin artırılmasının gerekliliği açıktır. Ahşap yapım sistemlerine yönetmeliklerde getirilen sınırlılıklar bu sistemlerin ülkemizde uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır. Yönetmelikte ahşap yapının sadece ayrık düzende, iki katlı ve bahçeli olarak sınırlandırılması, ağır ahşap sistemler olarak yapılabilen çok katlı ahşap yapıların yapılabilirliğini mümkün kılmamaktadır. Özellikle arsaların kıymetli olduğu ve çok katlı yapı uygulamalarının çoğunlukta olduğu İstanbul'da yapılan ahşap evler iki katlı lüks konut olarak üretilmekte ve bu yapıların kullanıcı hedef kitlesi yüksek gelir düzeyi olan kişiler olmaktadır.

1999 Marmara depreminden sonra ahşap evlere üretici ve kullanıcı tarafından artan bir talep olması fakat daha sonraki süreçte bu ilginin süreklilik göstermemesi dikkat çekicidir. Kullanıcı açısından incelendiğinde ahşap ev kullanıcılarının bu evlerde yaşamaktan mutlu oldukları görülmektedir. Deprem bölgesi olan ülkemizde kullanılan yapı yönetmeliğinde gerekli düzenlemelerin yapılarak özellikle İstanbul gibi büyük şehirlerde çok katlı ahşap yapı uygulamalarının yapılabilirliğinin artırılması önem taşımaktadır. Ahşap yapı uygulamalarının yaygınlaştırılabilmesi için ahşap yapı üretimi ve uygulamasının yüksek maliyetli olması ve yönetmeliklerde ahşap yapı uygulamaları ile ilgili belli sınırlamamaların olması gibi sorunların çözüme ulaştırılması gerekmektedir. Bu anlamda ahşap yapıların üretim, uygulama ve kullanım alanında geliştirilebilmesine yönelik yapılacak yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın yazarı, verdiği değerli destek için Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Anabilim Dalı hocası Prof.Dr. Erkan Avlar'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR

[1] Brahamsen, R. (2017). Mjøstårnet-construction of an 81 m tall timber building. *Internationales Holzbau-Forum IHF*. https://events.forum-holzbau.com/pdf/31_IHF2017_Abrahamsen.pdf, (Erişim tarihi: 20.06.2024).
[2] Erkoç, E. (2004). *İstanbul'da günümüz teknolojisiyle üretilen ahşap konutların tasarım-uygulama-kullanım üçgeninde değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.
[3] Avlar, E. (2023). *Katlı Ahşap Yapılar-I*. https://www.youtube.com/watch?v=RgZrrz6OL1A&t=34s, (Erişim tarihi: 10.03.2024).
[4] Çalışkan, Ö., Meriç, E. & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. *Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science, 6*(1), 109-118.
[5] Moehler, K., Natterer, J., Goetz, K. H. & Hoor, D. (1978). Timber design &construction sourcebook. McGraw-Hill Publishing Company, USA.
[6] Tümer, Ş. (2020). *Bafra kırsal konut mimarisi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sanat Tarihi Anabilim Dalı, Ankara.
[7] Çakır, S. (2000). *Geleneksel Karadeniz ahşap konut üretimi yönteminin çağdaş teknoloji açısından değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
[8] Pizi, M. (2003). The Invention of the Balloon Frame, How It Affected Architecture in the New World, The Case Of Chile. *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, January, Madrid.
[9] Avlar, E. (2003). Ahşap çerçeve yapıların strüktürel tasarımı. *Deprem Bölgelerinde Yapı Üretimi Sempozyumu*. TMMOB Mimarlar Odası, İstanbul Büyükkent Şubesi, 1. Baskı, 15-16 Şubat 2002, YTÜ Oditoryumu, İstanbul.
[10] Tavşan, C., Tufan, A. Ş. & Tavşan, F. (2022). Ekolojik malzeme olan ahşapla yapılan çok katlı yapılar. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi, 7*(1), 291-309.
[11] Avlar, E. (2023). *Türkiye'de Gelenekselden Çağdaş Ahşap Yapılara Geçiş*. https://www.youtube.com/watch?v=2LVJy_7mxyo, (Erişim tarihi: 15.04.2024).
[12] Avlar, E. (2023). *Katlı Ahşap Yapılar-II*. https://www.youtube.com/watch?v=ID2N6YmHuII&t=16s, (Erişim tarihi: 11.05.2024).

[13] Smith, I. & Snow, M. A. (2008). Timber: an ancient construction material with a bright future. *The Forestry Chronicle*, *84*(4), 504-510.
[14] Avlar, E. (2008). Türkiye'de ahşap yapı üretimine yönelik durum tespiti. *Mimarlıkta Malzeme*, *3*(8), 71-76.
[15] Avlar, E. & Ercoşkun, P. K. (2012). Türkiye yapı sektöründe tutkallı tabakalı ahşap teknolojisinin benimsenmeme nedenlerinin ercoşkun modeli ile değerlendirilmesi. *Megaron*, *7*(1), 67-76.
[16] Akça, C., Akarca, H., Erdoğmuş, E., & Demirel, A. (2013-2014). *Yapı Ahşabı ve Ahşap Yapı Sektörü*. Ulusal Ahşap Birliği.
[17] *Türk Yapı Sektörü Raporu 2014*, Yapı Endüstri Merkezi, İstanbul.
[18] Gün, B. (2021). *Mimari uygulamalarda betonarme yapı yerine ahşap yapı önerisi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul.
[19] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2020). *Yapı İzin İstatistikleri.* http://www.tuik.gov.tr.
[20] TSE. (2006). *TS EN 1995-1-1/AC. Eurocode 5: Ahşap Yapıların Projelendirilmesi Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Bina Kuralları*.
[21] Saral İnşaat Altınorak Sunflower Evleri Kataloğu. (2024). www.sunflower.com, (Erişim tarihi: 01.07.2024).
[22] Saral İnşaat Onater Evleri Kataloğu. (2024). www.saralinsaat.com, (Erişim tarihi:15.06.2024).
[23] Allen, E. & Iano, J. (1999). Fundamentals of Building Construction Materials and Methods. Third Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
[24] Proje Kataloğu. (2024). https://www.cemainsaat.com.tr/tr/proje/meseli-evler-12, (Erişim tarihi: 20.06.2024).

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 257-265, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1521559
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Sezgisel Bulanık Tek-Yönlü ANOVA Modeli ve Bir Uygulama

Intuitionistic Fuzzy One-Way ANOVA Model and an Application

Zeynep Gökkuş[1*], Sevil Şentürk[2]

Geliş / Received: 24/07/2024 ***Revize / Revised: 06/09/2024*** ***Kabul / Accepted: 12/09/2024***

ÖZ

Varyans analizi (ANOVA) modelleri ikiden fazla bağımsız grubun ortalamalarının karşılaştırılmasında istatistiksel çalışmalarda kullanılan önemli yöntemlerdir. Uzun yıllardır hemen her alanda, bilimsel araştırmalarda ANOVA modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek-yönlü ANOVA modelinde tek faktör (bağımsız değişken) ve bu faktörün çeşitli düzeyleri ya da denemeleri söz konusu olmaktadır. Burada amaç denemelerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini incelemektir. Belirsizlik altında elde edilen ve bulanık sayılarla temsil edilen gözlemlerin modellenmesi için de farklı bulanık ANOVA modelleri geliştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar istatistiksel olarak incelendiğinde, sezgisel bulanık ANOVA modellerine ilişkin çalışmaların az sayıda olduğu görülmüştür. Bu çalışmada sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA modelinin teorik yapısı anlatılmış ve bir örnek uygulama ile açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırma analizi ile desteklenmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Sezgisel Bulanık Sayılar, Tek-Yönlü Varyans Analizi (ANOVA), Bulanık Kümeler

ABSTRACT

Analysis of variance (ANOVA) models are essential techniques used in statistical studies when comparing the means of more than two independence groups. ANOVA models have been widely used in scientific research in almost every field for many years. In the one-way ANOVA model, there is one factor (independent variable) and various levels or experiments of this factor. The aim here is to analyze the effects of the experiments on the dependent variable. Different fuzzy ANOVA models were developed to model observations obtained under uncertainty and represented by fuzzy numbers. When the studies in the literature were examined statistically, it was seen that there were few studies on the intuitionistic fuzzy ANOVA models. In this study, the theoretical structure of the intuitionistic fuzzy one-way ANOVA model was explained and illustrated with an application. The results obtained were supported and interpreted by comparative analysis.

Keywords- Intuitionistic Fuzzy Numbers, One-Way Analysis of Variance (ANOVA), Fuzzy Sets

[1]*Sorumlu yazar iletişim: z.gokkus@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-2767-8420)
Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye
[2]İletişim: sdeligoz@eskisehir.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-9503-7388)
İstatistik Bölümü, Fen Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

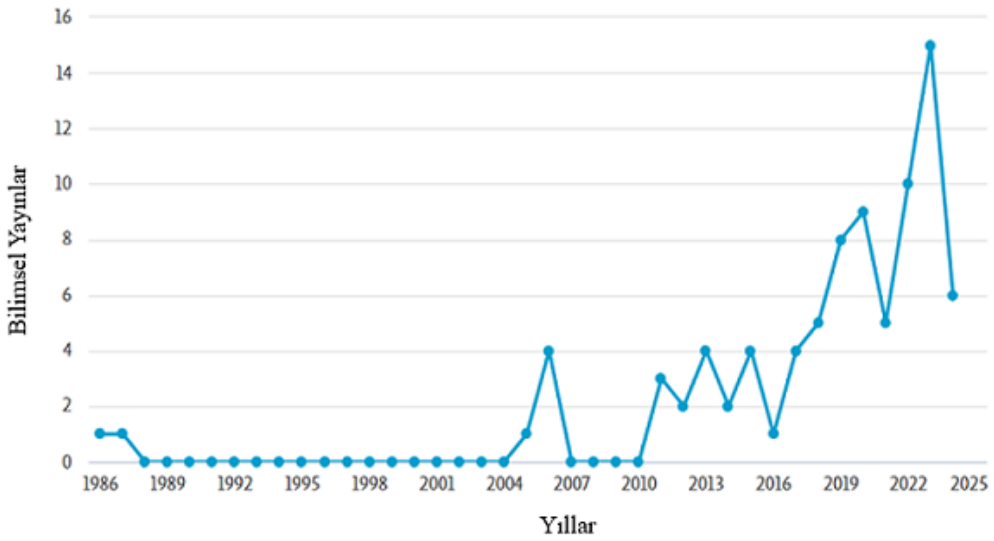
I. GİRİŞ

Varyans analizi (ANOVA), üç ya da daha fazla grup ortalaması arasında istatistiksel olarak fark olup olmadığını test etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Grup ortalamalarının karşılaştırılması, deneyin sonunda bağımlı değişkende meydana gelen değişkenliğin ne kadarının faktör(ler)den, ne kadarının hatadan kaynaklandığının belirlenmesi, dolayısıyla toplam varyansın bileşenlerine ayrılması yardımıyla yapılır. Tek-yönlü ANOVA, ANOVA modellerinin en basit olan özel bir halidir. Sadece tek faktörün (bağımsız değişken) etkisi araştırıldığında kullanılmaktadır. Deney birimleri homojen olduğunda kullanılması önerilen en uygun modeldir [1]. Deney birimleri homojen olduğunda, rastgeleleştirme üzerinde hiçbir kısıt olmaz ve bu nedenle tek yönlü ANOVA modeline tamamen rastgele model de denmektedir.

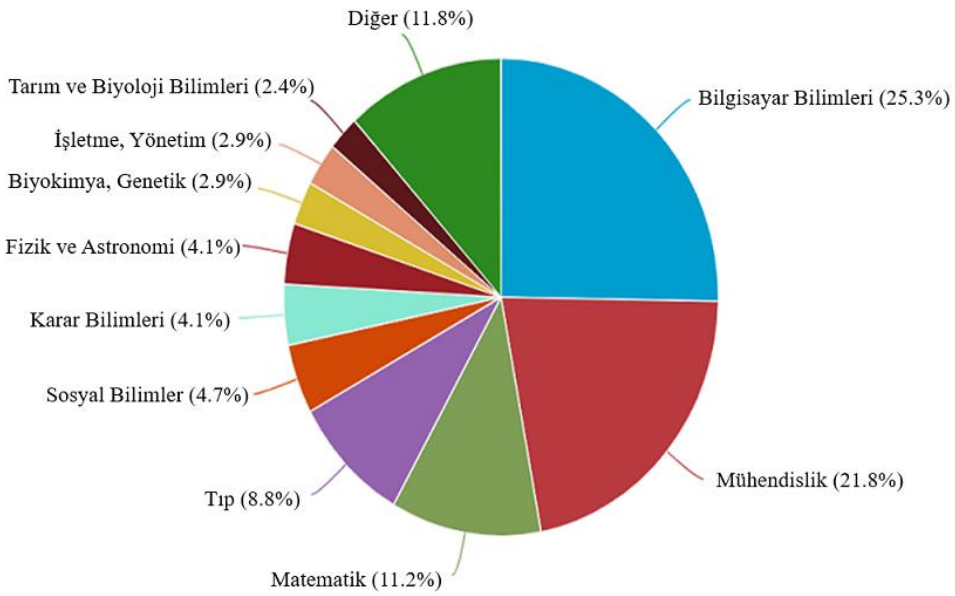
ANOVA, farklı popülasyonların ortalamalarındaki varyansların önemini ele alan bir istatistiksel analiz testidir. Uygulamalı bilimlerde veriler kesinlik veya belirsizlik içeriyorsa klasik ANOVA çözüm olamaz. Bu durumlarda, bulanık gözlemlere dayalı bulanık ANOVA'nın kullanılması gerekir ve özellikle bu tür problemler için ANOVA'nın aksine daha uygundur. Bulanık ANOVA, bulanık sayıları kullanır ve klasik ANOVA'nın bir genellemesidir [2].

Literatürde farklı alanlarda birçok araştırmacı farklı bulanık sayı türleri için farklı ANOVA modelleri önermiştir. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir; tek yönlü bulanık varyans analizinin araştırılması ve sonuçlarının regresyon modeliyle karşılaştırılması [3], tek yönlü ANOVA'nın normal bulanık gözlemler altında test edilmesi [4], bulanık gözlemlerle asimptotik tek örnek testleri [5], belirli bir Hilbert uzayı üzerinde, fonksiyonel veriler için tek yönlü bir ANOVA yaklaşımının geliştirilmesi [6], ANOVA modelinde belirsiz veriler için moment düzeltmesini kullanma [7], asimptotik çoklu - bulanık gözlemler için araçların önyükleme örnek testi [8,9], optimizasyon yaklaşımında tek yönlü bulanık ANOVA [10], uzatma ilkesi yaklaşımının temeli olan bulanık gözlemler için tek yönlü ANOVA'nın geliştirilmesi [11], Latin Kare Modelinde Yamuk Bulanık Sayılar kullanılması ve LSD testi [12], sıralama yöntemine dayalı sezgisel bulanık ANOVA [13], nötrosofik varyans analizi (NANOVA) [14], özel ve devlet okulu öğrencileri arasındaki performans farkının nedenlerini analiz etmek için yeni bir Nötrosofik-Temel Bileşen Analizi ve İki Yönlü Nötrosofik ANOVA [14-16], simetrik olmayan üçgen bulanık sayılar için tek yönlü ANOVA [17-19], simetrik olmayan üçgen bulanık sayılar için iki yönlü ANOVA [20].

Özetinde "bulanık" ve "tek-yönlü ANOVA" terimlerini içeren 85 bilimsel yayın SCOPUS'ta taranmaktadır ve bunların yıllara göre dağılımı Şekil 1 ve disiplinlere göre dağılımı Şekil 2 ile gösterilmiştir [21].



Şekil 1. Bulanık tek-yönlü ANOVA ile ilgili bilimsel yayınların yıllara göre dağılımı



Şekil 2. Bulanık tek-yönlü ANOVA ile ilgili bilimsel yayınların disiplinlere göre dağılımı

Söz konusu yayınlardan sekizi aynı yazarın aynı prosedürü önerdiği sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA üzerinedir. Bu yayınlarda yöntemden bahsedilmemekte, yöntem uygulaması için algoritma geliştirildiği belirtilmekte ve kısa bir kod ekranı görüntüsü verilmektedir. Ancak, prosedürün klasik tek-yönlü ANOVA modeline benzerliğinin dışında yöntem bilgisi verilmemektedir.

Bu çalışmanın amacı, sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA yöntemini açıklamak, uygulayarak göstermek ve karşılaştırmalı analizlerle tartışmaktır.

Yöntem bölümünde klasik tek-yönlü ANOVA modeli, sezgisel bulanık kümeler-sayılar ve sezgisel tek-yönlü ANOVA kısaca açıklanmıştır. Bulgular bölümünde bir seramik üretim fabrikasından alınan veriye yöntem uygulanmıştır. Son bölümde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

II. YÖNTEM

Sezgisel tek-yönlü ANOVA modeli, gözlemlerin kesin olmadığı deneyler için uygun bir varyans analizidir. Kararsızlık veya belirsizlik içeren gözlemler sezgisel bulanık sayılarla ifade edildiğinde, bu verilerin analizinin de sezgisel bulanık bir yöntem olması gerekir.

Literatürde uygulaması yer alan ancak yöntemine yer verilmeyen sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA modelinin bu çalışmada teorik yapısı açıklanmış ve bir örnek üzerinde uygulanmıştır. Modelin amacı tek faktör etkisi altında ikiden fazla bağımsız grubun ortalamalarını karşılaştırmaktadır. Bu yöntem klasik tek-yönlü ANOVA'ya benzemektedir ve uygulaması oldukça kolaydır. Bu nedenle takipte sırayla önce klasik tek-yönlü ANOVA modeli kısaca anlatılmış, ardından sezgisel bulanık kümeler tanımlanarak sezgisel bulanık sayılar arasındaki aritmetik işlemlere kısaca değinilmiş ve son olarak sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA açıklanmıştır.

A. Tek-Yönlü Varyans Analizi (ANOVA)

Tek-yönlü ANOVA için matematiksel model $y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}, i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, n$ dir. Burada y_{ij}: i-inci gruptaki j-inci gözlemi, μ: genel ortalamayı, τ_i: i-inci grubun etkisini ve ε_{ij}: rastgele hata terimini temsil etmektedir. Söz konusu model sabit etkili bir modeldir, başka bir ifadeyle $\sum_{i=1}^{a} \tau_i = 0$ olduğu varsayılır. Tek-yönlü ANOVA modeli için veri yapısı Tablo 1 ile temsil edilmiştir.

Tablo 1. Tek-yönlü ANOVA modelinin veri yapısı

	Gözlemler					
Gruplar	**1**	**2**	**…**	**n**	**Toplam**	**Ortalama**
1	y_{11}	y_{12}	$\cdots$	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	$\cdots$	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮	⋮
a	y_{a1}	y_{a2}	$\cdots$	y_{an}	$y_{a.}$	$\bar{y}_{a.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

Burada, $y_{i.} = \sum_{j=1}^{n} y_{ij}$ ve $\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n}, i = 1, \dots, a$ sırayla i-inci gruptaki gözlemlerin toplamını ve ortalamasını ifade eder. Bununla birlikte, $N = an$ toplam gözlem sayısı olmak üzere, $y_{..} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}$ ve $\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N}$ sırayla tüm gözlemlerin toplamı ve ortalamasıdır.

ANOVA modellerinin uygulanabilmesi için bazı temel varsayımların karşılanması gerekmektedir.

Varsayım 1. ε_{ij} hata terimleri 0 ortalama ve σ^2 varyanslı normal dağılıma sahiptir.

Varsayım 2. Hata terimlerinin varyansları homojendir.

Varsayım 3. Hata terimleri birbirinden bağımsızdır.

Bu üç varsayım kısaca $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ biçiminde gösterilir. ANOVA modellerinde parametre tahmini yukarıda belirtilen varsayımlar gereğince en küçük kareler (EKK) veya en çok olabilirlik yöntemi kullanılarak yapılır. Normallik varsayımı gereği her iki yöntem de en etkin tahmin edicileri verir. Bu çalışmada F istatistiği EKK ile hesaplanmıştır.

Normal olmayan dağılımlar veya temel varsayımların karşılanmaması gibi durumlara bu çalışmada yer verilmemiştir.

Tek-yönlü ANOVA modelinde amaç gruplar arasında anlamlı bir fark olup olmadığını sınamaktır. Bunun için hipotezler aşağıdaki gibi ifade edilir.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$

$H_1: En\ az\ bir\ \mu_i\ diğerlerinden\ farklıdır, i = 1, \dots, a.$

Hipotez testinde genel kareler toplamının parçalanışı ise

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_{..}\right)^2 = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_{i.}\right)^2.$$

Burada, KT: Kareler toplamı olmak üzere,

$$KT_{Toplam} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_{..}\right)^2$$

$$KT_{Grup} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 = n\sum_{i=1}^{a}(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$$

$$KT_{Hata} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \bar{y}_{i.}\right)^2$$

KT değerleri ilgili serbestlik derecelerine oranlandığında, kareler ortalaması (KO) ve F istatistiği elde edilir.

$$F_{Grup} = \frac{KT_{Grup}/(a-1)}{KT_{Hata}/(N-a)} = \frac{KO_{Grup}}{KO_{Hata}}$$

F_{Grup} test istatistiğinin değeri, α anlam düzeyinde $a-1$ ve $N-a$ derbestlik dereceli F tablo değerinden büyükse, yani $F_{Grup} > F_{\alpha;a-1;N-a}$ ise H_0 reddedilir.

Tek-yönlü ANOVA sonuçları Tablo 2'deki sunulur.

Tablo 2. Tek yönlü ANOVA tablosu

	Kareler toplamı (kt)	**Serbestlik derecesi (sd)**	**Kareler ortalaması (ko)**	**F testi**
Gruplar arası	KT_{Grup}	$a-1$	KO_{Grup}	F_{Grup}
Grup içi (hata)	KT_{Hata}	$N-a$	KO_{Hata}	
Toplam	KT_{Toplam}	$N-1$		

B. Sezgisel Bulanık Kümeler ve Üçgensel Sezgisel Bulanık Sayılar

Bu bölümde sezgisel bulanık kümeler için sezgisel bulanık sayı tanımı, sezgisel bulanık sayıya ilişkin bazı aritmetik işlemler, sezgisel bulanık sayıya ait üyelik ve üye olmama fonksiyonları, üçgensel sezgisel bulanık sayı tanımları [22-25] ve bu sayılar için sıralama yöntemlerine [13] kısaca yer verilmiştir.

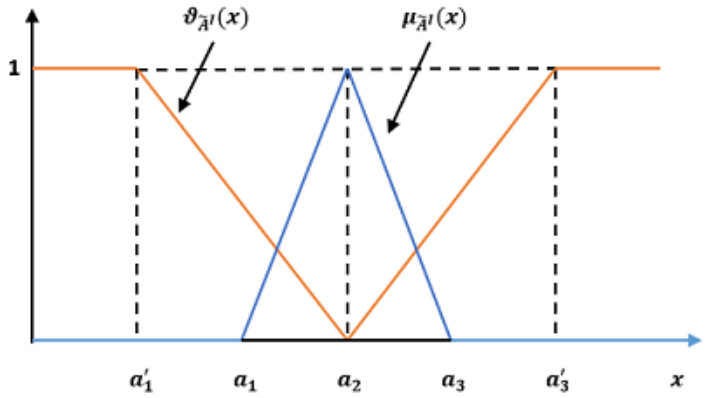
Tanım 1: X boş olmayan bir küme olsun. X kümesi üzerinde sezgisel bulanık A kümesi $\tilde{A} = \{< x, \mu_A(x), v_A(x) >; x \in X\}$ biçiminde tanımlanmaktadır. Burada, $\mu_A(x)$ ve $v_A(x): X \to [0,1]$, sırasıyla x in üyelik ve üye olmama derecelerini temsil eden fonksiyonlardır ve $0 \le \mu_A(x) + v_A(x) \le 1$ dir. Eğer üyelik fonksiyonu $\mu_A(x) = 1$ ve üye olmama fonksiyonu $v_A(x) = 0$ (veya tersi) ise x bulanık değil kesin sayıdır.

Tanım 2: Bir üçgensel sezgisel bulanık sayı (ÜSBS), $a_1' \le a_1 \le a_2 \le a_3 \le a_3'$ olmak üzere $\tilde{A}^I = (a_1, a_2, a_3; a_1', a_2, a_3')$ olarak tanımlanır. Aşağıda bir ÜSBS'nin üyelik ve üye olmama fonksiyonlarının elde edilmesi için gerekli işlemler yer almaktadır.

$$\mu_{\tilde{A}^I}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a_1}{a_2-a_1}, & eğer\ a_1 \le x \le a_2\ ise \\ \dfrac{a_2-x}{a_3-a_2}, & eğer\ a_2 \le x \le a_3\ ise \\ 0, & diğer\ hâllerde. \end{cases}$$

$$v_{\tilde{A}^I}(x) = \begin{cases} \dfrac{a_2-x}{a_2-a_1'}, & eğer\ a_1' \le x \le a_2\ ise \\ \dfrac{x-a_2}{a_3'-a_2}, & eğer\ a_2 \le x \le a_3'\ ise \\ 1, & diğer\ hâllerde. \end{cases}$$

Bir ÜSBS Şekil 3 deki gibi gösterilir [26].



Şekil 3. Üçgensel sezgisel bulanık sayı (ÜSBS)

Tanım 3: $\tilde{A}^I = (a_1, a_2, a_3; a_1', a_2, a_3')$ ve $\tilde{B}^I = (b_1, b_2, b_3; b_1', b_2, b_3')$ iki ÜSBS olmak üzere, bu sayılar arasında aşağıdaki aritmetik işlemler tanımlıdır.

$\tilde{A}^I + \tilde{B}^I = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3; a_1' + b_1', a_2 + b_2, a_3' + b_3')$
$\tilde{A}^I - \tilde{B}^I = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3; a_1' - b_1', a_2 - b_2, a_3' - b_3')$
$\tilde{A}^I \otimes \tilde{B}^I = (a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3; a_1'b_1', a_2b_2, a_3'b_3')$
$k \ge 0\ için, \quad k(a_1, a_2, a_3; a_1', a_2, a_3') = (ka_1, ka_2, ka_3; ka_1', ka_2, ka_3')$
$k < 0\ için, \quad k(a_1, a_2, a_3; a_1', a_2, a_3') = (ka_3, ka_2, ka_1; ka_3', ka_2, ka_1')$

Tanım 4: ÜSB sayıları durulaştırmak için bir $R(\tilde{A}^I)$ indeksi kullanılır. $\tilde{A}^I = (a_1, a_2, a_3; a_1', a_2, a_3')$ ÜSB sayısı için $R(\tilde{A}^I)$ indeksi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R(\tilde{A}^I) = \frac{1}{3}\left[\frac{(a_3'-a_1')(a_2-2a_3'-2a_1')+(a_3-a_1)(a_1+a_2+a_3)+3(a_3'^2-a_1'^2)}{a_3'-a_1'+a_3-a_1}\right].$$

Tanım 5: $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ iki ÜSBS, Tanım 4'te verilen $R(.)$ indeksine göre aşağıdaki koşullarda sıralanabilir:

$R(\tilde{A}^I) > R(\tilde{B}^I) \Leftrightarrow \tilde{A}^I > \tilde{B}^I$
$R(\tilde{A}^I) < R(\tilde{B}^I) \Leftrightarrow \tilde{A}^I < \tilde{B}^I$
$R(\tilde{A}^I) = R(\tilde{B}^I) \Leftrightarrow \tilde{A}^I \approx \tilde{B}^I$
$R(\tilde{A}^I + \tilde{B}^I) = R(\tilde{A}^I) + R(\tilde{B}^I)$
$R(\tilde{A}^I - \tilde{B}^I) = R(\tilde{A}^I) - R(\tilde{B}^I)$

C. Sezgisel Bulanık Tek-Yönlü ANOVA Modeli

Üçgensel sezgisel bulanık sayılardan oluşan bir veride, tek faktörün etkisi altında ikiden fazla grubun ortalamaları arasında fark olup olmadığını bulmak için tek-yönlü sezgisel bulanık ANOVA modeline ihtiyaç vardır. Bu modelin uygulanması için takipteki adımlar izlenir.

Adım 1. ÜSBS, Tanım 4 ile verilen sıralama indeksi hesaplanarak durulaştırılır.

Adım 2. Durulama işleminden elde edilen kesin verilerin normal dağılıma sahip olup olmadığı incelenir. Normal dağılıma sahipse ANOVA varsayımlarının karşılandığı kabul edilir.

Adım 3. Durulama sonuçlarına klasik tek-yönlü ANOVA modeli uygulanır.

III. BULGULAR

Bölüm II-C'de açıklanan, ÜSBS lar için tek-yönlü ANOVA modelinin uygulaması için karo üreten bir firmanın verileri kullanılmıştır. Firma, üç operatöre, üretilen karoları hızla inceleme ve "*karolar üzerindeki siyah nokta sayıları*"na ilişkin ilk bakıştaki tespitlerini raporlama görevi vermiştir. Operatörler ilk bakışta tespit ettikleri *siyah nokta sayılarını* not etmişlerdir. İlk not ettikleri kesin sayılar ÜSBS biçiminde yer alan a_2 lerdir. Firma hata raporlarını incelenmiş ve her bir operatörün kaydettiği "*siyah nokta sayıları*" arasından rastgele onar veriyi seçmiştir. Kesin sayılardan oluşan veri, ilk bakışta tespit edildiğinden ve dikkatlice sayılarak elde edilmediğinden ÜSBSlere dönüştürülmüştür. Uygulama verisi toplamda otuz ÜSBS olarak Tablo 3'te sunulmuştur. Burada amaç, ilk bakışta tespit edilen *siyah nokta sayılarının* operatörlere göre farklılaşıp farklılaşmadığını araştırmaktır.

A. Üçgensel Sezgisel Bulanık Sayılar İçin Tek-Yönlü ANOVA Modeli

Tablo 3'te üç operatörün hazırladığı, karolarda tespit edilen siyah nokta sayılarına ilişkin hata raporlarından rastgele seçilen otuz ÜSBS yer almaktadır.

Tablo 3. Karolarda tespit edilen ÜSB siyah nokta sayıları (n=30)

1. operatör		**2. operatör**		**3. operatör**	
$(\tilde{A}^l)$	$(\mu_{\tilde{A}^l}, v_{\tilde{A}^l})$	$(\tilde{A}^l)$	$(\mu_{\tilde{A}^l}, v_{\tilde{A}^l})$	$(\tilde{A}^l)$	$(\mu_{\tilde{A}^l}, v_{\tilde{A}^l})$
(2,3,4;**1,3,5**)	(0.9, 0.05)	(3,4,5;**2,4,6**)	(0.5, 0.25)	(6,7,8;**5,7,9**)	(0.7, 0.15)
(1,3,5;**1,3,6**)	(0.95, 0.03)	(4,5,7;**2,5,8**)	(0.5, 0.17)	(5,6,8;**4,6,9**)	(0.35, 0.43)
(3,5,6;**2,5,7**)	(0.05, 0.63)	(4,5,6;**3,5,7**)	(0.5, 0.25)	(8,9,10;**7,9,11**)	(0, 0.85)
(1,2,4;**1,2,5**)	(0.45, 0.37)	(3,4,6;**3,5,7**)	(0.75, 0.17)	(7,8,10;**6,8,11**)	(0.3, 0.35)
(1,2,4;**1,2,5**)	(0.45, 0.37)	(1,3,4;**1,3,5**)	(0, 0.75)	(5,6,8;**4,6,9**)	(0.35, 0.43)
(2,3,5;**2,3,6**)	(0.95, 0.03)	(2,5,6;**1,5,7**)	(0.83, 0.13)	(7,9,11;**6,9,12**)	(0.15, 0.57)
(1,2,4;**1,2,5**)	(0.45, 0.37)	(1,2,3;**1,2,4**)	(0, 1)	(6,7,8;**5,7,9**)	(0.7, 0.15)
(2,3,5;**1,3,7**)	(0.95, 0.03)	(4,6,8;**2,6,10**)	(0.25, 0.38)	(5,6,8;**4,6,10**)	(0.35, 0.33)
(2,4,6;**1,4,7**)	(0.55, 0.3)	(4,5,7;**3,5,8**)	(0.5, 0.25)	(5,7,9;**4,7,10**)	(0.85, 0.1)
(3,4,6;**2,4,7**)	(0.1, 0.45)	(4,6,7;**3,6,8**)	(0.25, 0.5)	(6,8,9;**5,8,10**)	(0.65, 0.23)

ÜSBSlerin üyelik ve üye olmama dereceleri Tanım 2'ye göre hesaplanmıştır ancak yöntemin uygulanmasına katkısı yoktur. $(\tilde{A}^l)$ ölçümleri için sıralama indeksleri Tablo 4 ile verilmiştir.

Tablo 4. Karolarda tespit edilen durulaştırılmış siyah noktala sayıları ($R(\tilde{A}^l)$ sıralama indeksi)

1. operatör	**2. operatör**	**3. operatör**
3.00	4.00	7.00
3.19	5.11	6.33
4.67	5.00	9.00
2.52	4.52	8.33
2.52	2.86	6.33
3.52	4.33	9.00
2.52	2.20	7.00
3.56	6.00	6.56
4.00	5.33	7.00
4.33	5.67	7.67

Durulaştırılan verilere önce IBM SPSS 26 paket programında Shapiro-Wilk testi uygulanmış ve herbir operatöre ait sıralama indekslerine ait dağılımların normal dağılım ile uyumlu oldukları görülmüştür ($p > \alpha$).

Burada, i grup (operatör) sayısını göstermek üzere $\mu_{.i}$ grup ortalamalarının birbirinden farklı olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için aşağıdaki hipotezler kurulmuştur.

$H_0: \mu_{.1} = \mu_{.2} = \mu_{.3}$
$H_1: En\ az\ bir\ \mu_{.i}\ diğerlerinden\ farklıdır, i = 1,2,3.$

Hipotezlerin testi için Tablo 4'te yer alan verilere Bölüm II-C'de anlatılan yöntem MS Excel 2021 yazılımı ile uygulanmıştır. Varyans analizi sonuçlarına Tablo 5'te yer verilmiştir.

Tablo 5. Tek yönlü sezgisel bulanık ANOVA sonuçları

	$\widetilde{kt}$	sd	$\widetilde{ko}$	$\tilde{F}$	p
Gruplar arası	86.957	2	43.478	41.771	0.000558598
Grup içi (hata)	28.104	27	1.041		
Toplam	105.061	29			

Tablo 5'ten elde edilen $\tilde{F}_{(hesap)} > F_{(0.95;2;29)}$ ve $p < \alpha$ olduğundan H_0 hipotezi reddedilmiş ve operatör gözlemlerinden en az birinin diğerlerinden farklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

B. Karşılaştırma Analizleri

Öncelikle, Tablo 4'teki verilere IBM SPSS Statistics 26 yazılımında klasik tek-yönlü ANOVA uygulanmış ve Tablo 5 ile aynı sonuçlar elde edilmiştir. Yalnız p değeri $5.4627\text{x}10^{-9}$ bulunmuştur.

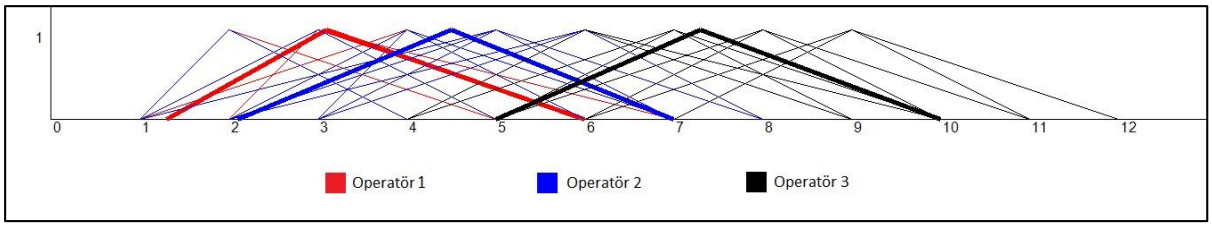
İkinci olarak, Tablo 5'teki üçgensel sezgisel bulanık sayıların koyu yazılan bileşenleri, daha geniş bir üçgen belirttiğinden, simetrik olmayan Tip-I üçgensel bulanık sayılar olarak ele alınmıştır. Bu sayı tipinde üçgensel bulanık sayı (merkez, sol açıklık, sağ açıklık) biçiminde tanımlıdır [17-19, 2]. Örneğin, Tablo 3'te 1. operatörün ilk gözlemi olan (2,3,4;**1,3,5**) sezgisel bulanık sayısını simetrik olmayan üçgensel bulanık sayıya dönüştürelim. Koyu yazılan ve diğerinden daha geniş bir üçgen belirten (**1,3,5**)'i Tip-I üçgensel bulanık sayı olarak ele aldığımızda, buna karşılık gelen simetrik olmayan üçgensel bulanık sayı (3,2,2) olur. Yani a_2 merkez, $a_2 - a_1'$ sol açıklık ve $a_3' - a_2$ sağ açıklık değerlerini vermektedir ((3,3-1,5-3)). Okuyucular daha ayrıntılı bilgi için ilgili yayınları inceleyebilir [17-19, 2]. Tablo 3'teki tüm sayılara benzer işlem yapılmış ve bu sayı tipi için önerilen bulanık tek-yönlü ANOVA modeli uygulanmıştır [17-19]. Sonuçlar Tablo 6 ile verilmiştir.

Tablo 6. Simetrik olmayan üçgensel bulanık sayılar için tek yönlü ANOVA sonuçları

	$\widetilde{kt}$	sd	$\widetilde{ko}$	$\tilde{F}$	p
Gruplar arası	91.467	2	45.733	32.363	0.000923632
Grup içi (hata)	38.358	27	1.315		
Toplam	130.314	29			

Tablo 6'da elde edilen $\tilde{F}_{(hesap)} > F_{(0.95;2;29)}$ ve $p < \alpha$ olduğundan H_0 hipotezi reddedilmiş ve operatör gözlemlerinden en az birinin diğerlerinden farklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bulgular Tablo 5 ile uyumludur. Hem klasik, hem ÜSBS için hem de simetrik olmayan Tip-I üçgensel bulanık sayılar için ANOVA modelleri aynı sonuçları vermiştir. Tablo 4'te koyu renkli belirtilen üçgensel bulanık sayılar Visual Studio yazılımıyla çizilmiş ve Şekil 4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3. Tablo 3 te verilen üçgensel sezgisel bulanık sayılar

Şekilde 3'te kırmızı, mavi ve siyah üçgenler sırasıyla Operatör 1, 2 ve 3'ün karolarda ilk bakışta tespit ettiği yaklaşık siyah nokta sayılarını temsil etmektedir. Kalın çizilen üçgenler her bir grubun ortalamasını göstermektedir ve üç grup ortalamasının birbirinden farklı olduğu açıktır.

IV. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, verilerin üçgensel sezgisel bulanık gözlemlerden oluştuğu bağımsız grupların benzerlikleri yönünden karşılaştırılmasında tek-yönlü varyans analizi modeline benzer olarak tanımlanan tek yönlü sezgisel bulanık varyans analizi tanıtılmış ve yöntemin uygulanabilirliği gerçek bir veri üzerinde gösterilmiştir.

Bir seramik fabrikasında, görevli üç operatör, üretilen karoların üzerindeki siyah noktaları ilk görüşte yaklaşık olarak sayarak raporlamışlardır. Raporlar incelendiğinde, siyah nokta sayıları arasında operatörlerden kaynaklanan bir farklılık olup olmadığı araştırılmak istenmiştir. Her bir operatörün hata raporundan rastgele 10ar gözlem seçilmiş, ÜSBSlere dönüştürülmüş ve sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA modeli ile analiz edilmiştir. Sonuçta H_0 hipotezi reddedilmiştir ve operatörlerin raporları arasında anlamlı fark olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Elde edilen sonuçları değerlendirmek amacıyla karşılaştırma analizi olarak simetrik olmayan üçgensel bulanık sayılar için literatürde yer alan tek-yönlü ANOVA modeli uygulanmıştır. Bu model için ÜSBSlerin ikinci (daha büyük olan) üçgen kısmı önce simetrik olmayan üçgen bulanık sayılara dönüştürülmüş ve ardından model uygulanmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlar, belirsizlik veya kararsızlık altında elde edilen verilerin değerlendirilmesine uygun bulunmuştur.

Bu çalışma ile sezgisel bulanık tek-yönlü ANOVA modeli açıklanmıştır. İleride bu yöntemle elde edilen bağımsız grupların ikili karşılaştırmaları için sezgisel bulanık POST-HOC testleri ve/veya sezgisel bulanık faktöriyel ANOVA modellerinin çalışılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı destekleyen Eskişehir Teknik Üniversitesi Araştırma Projeleri Komisyonu'na 23ADP094 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında verdikleri destek için teşekkür ederiz

KAYNAKLAR

[1] Şenoğlu, B., & Acıtaş, Ş. (2011). *İstatistiksel deney tasarımı: sabit etkili modeller*. Nobel.
[2] Kumar, R., Khepar, J., Yadav, K., Kareri, E., Alotaibi, S. D., Viriyasitavat, W., ... & Dhiman, G. (2022). A systematic review on generalized fuzzy numbers and its applications: past, present and future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *29*(7), 5213-5236.
[3] De Garibay, V. G. (1987). Behaviour of fuzzy ANOVA. *Kybernetes*, *16*(2), 107-112.
[4] López-Díaz, M., Gil, M. Á., Grzegorzewski, P., Hryniewicz, O., Lawry, J., Montenegro, M., & Casals, M. R. (2004). Introduction to ANOVA with fuzzy random variables. In *Soft methodology and random information systems* (pp. 487-494). Springer Berlin Heidelberg.
[5] Montenegro, M., Colubi, A., Casals, M.R., & Gil, M.A. (2004). Asymptotic and bootstrap techniques for testing the expected value of a fuzzy random variable, *Metrika 59*, 31–49.
[6] Cuevas, A., Febrero, M., & Fraiman, R. (2004). An anova test for functional data. *Computational statistics & data analysis*, *47*(1), 111-122.
[7] Konishi, M., Okuda, T., & Asai, K. (2006). Analysis of variance based on fuzzy interval data using moment correction method. *International Journal of Innovative Computing, Inf. Control 2 (1)*, 83–99.
[8] Gil, M. Á., Montenegro, M., González-Rodríguez, G., Colubi, A., & Casals, M. R. (2006). Bootstrap approach to the multi-sample test of means with imprecise data. *Comput. Stat. Data Anal. 51 (1)*, 148–162.
[9] González-Rodríguez, G., Colubi, A., & Gil, M. Á. (2012). Fuzzy data treated as functional data: A one-way ANOVA test approach. *Computational Statistics & Data Analysis*, *56*(4), 943-955.
[10] Wu, H. C. (2007). Analysis of variance for fuzzy data. *International Journal of Systems Science*, *38*(3), 235-246.

[11] Nourbakhsh, M., Mashinchi, M., & Parchami, A. (2013). Analysis of variance based on fuzzy observations. *International Journal of Systems Science*, *44*(4), 714-726.
[12] Parthiban, S., & Gajivaradhan, P. A. (2016). Comparative Study of LSD Under Fuzzy Environments Using Trapezoidal Fuzzy Numbers. *IOSR Journal of Mathematics (IOSR-JM), 12(1),* 57-75.
[13] Anuradha, D., & Kalpanapriya, D. (2018). Intuitionistic fuzzy ANOVA and its application in medical diagnosis. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, *11*(2), 653-656.
[14] Aslam, M. (2019). Neutrosophic analysis of variance: application to university students. *Complex & intelligent systems*, *5*(4), 403-407.
[15] Nortey, E. N., Eric, W. N., & Eunice, O. A. (2022). Neutrosophic-principal component analysis of causes of performance gap among private and public school students in the basic education certificate examination. *Asian Journal of Probability and Statistics*, *20*(3), 132-149.
[16] Miari, M., Anan, M. T., & Zeina, M. B. (2022). Neutrosophic two way ANOVA. *International Journal of Neutrosophic Science*, *18*(3), 73-83.
[17] Parchami, A., Mashinchi, M., & Kahraman, C. (2021). A case study on vehicle battery manufacturing using fuzzy analysis of variance. In *Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions: Proceedings of the INFUS 2020 Conference, Istanbul, Turkey, July 21-23, 2020* (pp. 916-923). Springer International Publishing.
[18] Parchami, A., Mashinchi, M., & Kahraman, C. (2021). An Implication of Fuzzy ANOVA in Vehicle Battery Manufacturing. *Journal of Mahani Mathematical Research*, *10*(2), 33-47.
[19] Gökkuş, Z., Şentürk, S., Yildiz, T., & Cevher, E. Y. (2023, August). An Application of Fuzzy ANOVA on Field of Agricultural Machinery. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 560-571). Cham: Springer Nature Switzerland.
[20] Gökkuş, Z., Şentürk, S., Yildiz, T., & Yeşiloğlu Cevher, E. (2023, August). Two-Way ANOVA for Fuzzy Observations and an Implication. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 548-559). Cham: Springer Nature Switzerland.
[21] URL. (05.09.2024) https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=f733d3dcf9b798351df901e1d2d5c00a&sot=a&sdt=a&sl=55&s=%28TITLE-ABS-KEY%28fuzzy%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28one+way+ANOVA%29%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results
[22] Atanassov, K.T. (1983). Intuitionistic fuzzy sets. *VII, ITKR's Session*, Sofia.
[23] Atanassov, K.T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy sets and Systems*.
[24] Atanassov, K.T. (1994). New operations defined over intuitionistic Fuzzy sets. *Fuzzy sets and Systems, 6,* 137-142.
[25] Atanassov, K.T. (1999). *Intuitionistic fuzzy sets: theory and application*, Springer.
[26] Malik, M., & Gupta, S. K. (2023). On optimistic, pessimistic and mixed fuzzy-programming based approaches to solve multi-objective fully intuitionistic fuzzy linear fractional programming problems. *Annals of Operations Research*, 1-45.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 266-273, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1552081
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Maya Bazlı Çinko Oksitlerin Gıda Boyası Gideriminde Kullanımı

Use of Yeast-Based Zinc Oxides in Food Dye Removal

Şennur Merve Yakut[1*], Hüseyin Avcı[2], Şahlan Öztürk[3]

Geliş / Received: 20/09/2024 ***Revize / Revised: 23/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 01/11/2024***

ÖZ

Mevcut çalışmada, *Yarrowia lipolytica*'nın (maya) sulu özütü kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri sentezlenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) desenleri ve termogravimetrik analizler pH 12'de 2:1 hacim oranında çinko sülfat çözeltisi (0,1 M) ve maya özütü kullanılarak, iyi kristalleşmiş ZnO nanopartiküllerinin oluşumunu doğrulamıştır. Sentezlenen ZnO nanopartikülleri (1saatlik reaksiyon süresi ve pH 7), sulu bir çözeltiden amarant gıda boyasını uzaklaştırmak için kullanılmış ve adsorpsiyon süreçleri incelenmiştir. Adsorbanın kütlesi başına adsorbe edilen boya kütlesi, başlangıç boya konsantrasyonunun artırılmasıyla büyümüş ve daha çok boya giderim verimi elde edilmiştir. Maksimum bozunma verimliliği, litre başına 1g ZnO kullanılarak elde edilmiştir. Sentezlenen ZnO nanopartiküller, özgün özellikleri ve %75'lik iyi adsorpsiyon kapasitesi ve kimyasal çözücüler kullanılmadan gerçekleştirilen sentezi sayesinde çevre dostu ve verimli bir yöntem olmuştur.

Anahtar Kelimeler- Yarrowia lipolytica, Gıda boyası giderimi, Yeşil sentez

ABSTRACT

In the present study, zinc oxide (ZnO) nanoparticles were synthesized by green synthesis method using aqueous extract of *Yarrowia lipolytica* (yeast). X-ray diffraction (XRD) patterns and thermo gravimetric analysis confirmed the formation of well-crystallized ZnO nanoparticles using zinc sulfate solution (0.1 M) and yeast extract at 2:1 volume ratio at pH 12. The synthesized ZnO nanoparticles (1 h reaction time and pH 7) were used to remove amaranth food dye from an aqueous solution and the adsorption processes were investigated. The quantity of dye adsorbed per unit mass of adsorbent increased with rising initial dye concentration, resulting in enhanced dye removal efficiency. The maximum degradation efficiency was obtained using 1 g of ZnO per liter. The synthesized ZnO nanoparticles were an environmentally friendly and efficient method due to their unique properties, good adsorption capacity of 75% and synthesis without using chemical solvents.

Keywords- Yarrowia lipolytica, Food dye treatment, Green synthesis

[1]*Sorumlu yazar iletişim: sennurmerve@nevsehir.edu.tr(https://orcid.org/0000-0001-9190-4061)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Nevşehir, Türkiye
[2]İletişim: huseyin2018avci@gmail.com (https://orcid.org/0000-0001-9399-6457)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Nevşehir, Türkiye
[3]İletişim: sahlan.ozturk@nevsehir.edu.tr (https://orcid.org/ 0000-0002-6064-3628)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Nevşehir, Türkiye

I. GİRİŞ

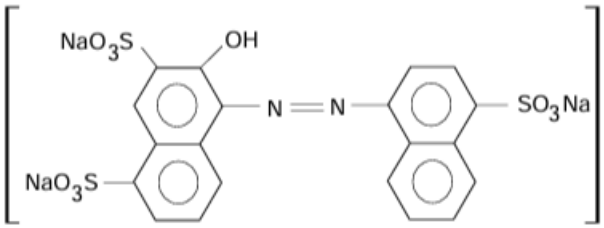
Nanoteknoloji üzerine yapılan araştırmaların giderek artması ve bu araştırmaların başarılı sonuçlar elde etmesiyle birçok bilim insanının ilgisi bu konuda yoğunlaşmıştır. Daha sonra nanoteknoloji ile ilgili çalışmalara biyolojik organizmaların eklenmesi bir başka deyişle biyoteknoloji ile birleştirilmesiyle nanobiyoteknoloji kavramı ortaya çıkmıştır. Nanobiyoteknoloji genel anlamda biyolojik yapıların nano düzeyde araştırılarak bilimsel açıdan faydalı bir ürüne dönüştürülmesi ile ilgilidir. Bu konudaki çalışmalar teknolojinin de gelişmesiyle yüksek bir ivme kazanmıştır. Yapılan son çalışmalara bakıldığında da bu konuda etkili çalışmalar karşımıza çıkmaktadır [1-3].Fiziksel ve kimyasal analiz gibi geleneksel yöntemlerle nanomalzeme sentezi yapılmakta ancak bu yöntemlerin yapılışının zor olması ve çoğu zaman zararlı kimyasallar kullanılması endişe oluşturmaktadır. Bunun yerine çevre dostu yöntemler keşfedilmeye başlanmıştır. Yeşil sentez metodu adı verilen bu yöntemde biyolojik kaynak olarak, bazı bakteriler, mayalar, algler ve bitki özütleri kullanılmaktadır. Bu nanomalzemeler, antimikrobiyal, antioksidan, antibakteriyal, biyo-görüntüleyici, boya giderici malzeme olarak kullanılmaktadır. Mayalar ile gerçekleştirilen çalışmalarda, sentez aşamasında indirgeyici ve kaplayıcı ajanlara ihtiyaç duyulmakta ve bu görevi mayalar üstlenebilmektedir[2]. Böylece çevre dostu bir teknoloji ile ucuz, basit ve toksik olmayan nanomalzemeler elde edilmektedir.

Literatürde maya ile gerçekleştirilmiş yeşil sentez çalışmaları kısıtlı olmasına rağmen mayalar, yeşil sentezde sabit üretime sahip olma, temel kültür ortamlarında hızlı büyüme, metalleri güçlü absorbe edebilme gibi başarılı sonuçlar göstermeleri nedeniyle tercih edilen biyolojik materyallerdir [4]. Nanomalzeme sentezi, sadece maya hücreleri, su ve reaktifler kullanılarak fazladan bir sabitleyiciye gerek kalmadan gerçekleşmektedir. Mayalardan metal temelli nanomalzeme üretim mekanizmasında maya hücresinin iç pH'ı artar daha sonra oksidoredüktazlar aktif hale gelirler. Böylece metal iyonları indirgenerek maya bazlı metal oksit sentezi gerçekleşip aynı zamanda nanomalzemenin toksisitesi ortadan kalkmaktadır [4].

Çalışmamızın nanomalzeme sentezi aşamasında biyolojik materyal olarak kullanılan *Yarrowia lipolytica (Y. lipolytica)* genel olarak güvenli tanınan ve yoğurt, zeytinyağı gibi temel besinlerden elde edilen bir maya türüdür. Lipit oranı yüksek olan ortamları tercih edip, hidrofobik karbon kaynağını kullanabilmektedir [5].Ayrıca alkan, yağ asidi gibi organik bileşikleri kullanma kabiliyeti sayesinde yağ atıklarının parçalanmasında iyileştirici olarak da güvenle kullanılabilmektedir [6]. Lipaz enzimi üretme yeteneğine sahip olmasından dolayı, gıdalarda kullanıma sahiptir. Ayrıca ilaç ve kimya sektöründe de kullanımı yaygındır. DNA modifikasyonlarıyla elde edilmiş proteinler ve metabolizma sonucu ortaya çıkan ara ürünleri üretebilme yeteneği sayesinde, yağ üretimi, sitrik asit gibi temel asitlerin üretimi gibi alanlarda kendine yer bulmaktadır [7]. Çok hücreliler gibi protein salgılayabilmeleri, yüksek yoğunluklu fermantasyon yapabilmelerinden dolayı üretim için uygun olması bu maya türünün çalışmalarda tercih edilmesine sebep olmaktadır [7]. Bu nedenlerle çalışmamızda *Y.lipo* ile çinko oksit nanopartikül sentezi gerçekleştirilmiştir.

Çinko oksit nanopartiküller (ZnONP) katalitik verimi yüksek, adsorbsiyon kabiliyeti olan ve çevre alanında çeşitli kullanıma sahip olan malzemelerdir. Özellikle ultraviyole (UV) ışını altında valans bandında elektron transferi sağlaması yönüyle hidroksil radikali üretme ve bu radikallerin da kirleticileri parçalama özelliği sebebiyle titanyum dioksit (TiO_2) ile benzer özelliğe sahiptir. Ekmek mayası **(***Saccharomyces cerevisiae*) kullanılarak ZnO sentezi gerçekleştirilen bir çalışmada [8], Eriochrome Black T boyasının fotokatalitik bozunması sonuçları değerlendirilmiştir. Buna ek olarak ZnONP'lerin, aktimikrobiyal aktivite mekanizmaları incelenmiştir. Fotodegredasyon deneyleri sonucunda % 80'in üzerinde verim elde edilip, gram pozitif bakterilerden *Staphylococcus Aureus'a (S. aureu)* karşı etkili olmuştur. *Pichia kudriavzevii* mayası kullanılarak sentezlenen ZnO'ler ile ilgili başka bir çalışmada ise [9], ZnO-NP'lerin serbest radikal temizleme aktivitesi, sitotoksisite ve antibakteriyel yapısı incelenmiştir. Sentezlenen nanopartiküller hem gram pozitif hem de gram negatif bakterilere karşı antibakteriyel aktivite sergilemiştir. *Pichia fermentans* JA2 kullanılarak gümüş (Ag) ve ZnONP'lerin sentezinin gerçekleştirildiği başka bir çalışmada [10], ZnONP'ler *Pseudomonas aeruginosa'yı* inhibe edebilmişlerdir. Literatürde olumlu sonuçlar elde edilen ZnONP'lerin gıda boyası gideriminde etkili olup olmadığı bu çalışma kapsamında araştırılmıştır.

Gıda alanında renk verici madde olarak sıklıkla kullanılan Amarant suda çözünebilien azo boyar grubunda yer alan bir katkı maddesidir. Gıdalarda yemek ve tat vermek için kullanılan bu sentetik boyar maddelerin, çocuklarla yapılan çalışmalarda hiperaktivite artışına neden olduğu rapor edilmiştir [11]. Gıda endüstrisinde kullanılan bu boyaların proses sonucunda alıcı ortama ulaşmasıyla, arıtılmadığı sürece özellikle sucul ortamda meydana gelebilmektedir. Bu boyaların giderimi üzerine ileri oksidasyon prosesleri, adsorbsiyon, biyolojik arıtım gibi yöntemler gerçekleştirilmektedir [12-14]. Amarant boyasının organik yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir [15].



Şekil 1. Amarant boyasının organik yapısı

Bu çalışmada kullanılan *Y. lipolytica* mayası biyoteknolojik çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir mayadır. Çevre dostu bir yöntemle sentezlenmesi ve kendi izole ettiğimiz bir maya ile sentezin gerçekleşmesi çalışmanın sürdürülebilirliğini ve özgünlüğünü arttırmaktadır. Çalışma (i) *Y. lipolytica*nın çoğaltılması, (ii) Yeşil sentez metoduna göre çinko nanopartiküllerin elde edilmesi, (iii) ZnONP'lerin gıda boyası gideriminde kullanımı olmak üzere 3 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

A.Y. lipolyticanın çoğaltılması

Çalışmamızda kullandığımız maya *Y. lipolytica* NCAIM Y00591 suşu olup, bir arıtma tesisinden izole edilmiştir [16]. Mayayı çoğaltmak için [17]: Nutrient broth (Merck KGaA) besiyerinin 8 g'ı 1000 ml distile suda çözülerek hazırlanan karışım 630 mL ve 70 mL'lik erlenmeyerlere dağıtılarak 121°C'de 15 dakika otoklavlanarak steril hale getirilmiştir. Nutrient broth besiyerine *Y. lipolytica* suşu 30°C'de inkübatörde 120 rpm çalkalama hızında 48 saat inkübasyona bırakılmıştır. Kültür 2 defa aktifleştirildikten sonra 45 µm çapındaki membranlarda süzme işlemleri gerçekleştirilerek biyokütle elde edilmiş, elde edilen biyokütle 65°C'de etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2.*Yarrowia lipolytica* üretme süreci (sol) ilk aşama, (sağ) son aşama

B. Yeşil sentez metoduna göre ZnONP'lerin elde edilmesi

İstenilen miktarda üretilen maya kullanılarak ZnONP sentezi gerçekleştirmek için, 2 g kuru haldeki *Y. lipolytica*'nın 100 mL saf su içerisinde maya ile aynı miktarda D- glikoz ile çözünmesi sağlanmıştır. Etüvde 30 °C'de yaklaşık 30 dakika bekletilen maya karışımı, 0,1 M hazırlanan $ZnSO_4$ çözeltisinin içerisine damla damla eklenilmiştir. Çözelti 2 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılıp pH kontrolleri gerçekleştirilen çözelti yaklaşık 24 saat karanlık bir ortamda oda sıcaklığında bekletilmiştir [10]. Maya çözeltisi Whatman No.1 filtre kağıdından geçirilip santrifüj tüplerine konularak 4000 rpm'de 10 dakika boyunca santrifüjlenmiştir. Daha sonra 350 °C'de 1 saat kalsine edilmiştir. Böylece nanomalzemenin kristalize hale gelmesi sağlanmıştır. Elde edilen nanomalzemelerin karakterizasyonu amacıyla X Işını Kristalografisi (XRD) ve Termogravimetrik analiz (TGA/DTA) yapılmıştır. Malzemenin karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra mor renkli gıda boyası olan Amarantın gideriminde kullanımı incelenmiştir.

C. ZnONP'lerin Gıda Boyası Gideriminde Kullanımı

Boyar maddenin dalga boyu taraması yapılmış ve maksimum absorbans değeri tespit edildikten sonra farklı konsantrasyonlarda absorbans verileri elde edilerek kalibrasyon eğrisi çizilmiştir. Farklı miktarlarda eklenen nanomalzemenin boyar madde giderimindeki verimi bu kalibrasyon eğrisi kullanılarak tespit edilmiştir. Gıda boyasının giderim verimini arttırmak amacıyla H_2O_2 ilavesi yapılarak giderim verimine etkisi incelenmiştir. Boyar madde giderimi ölçümünde spektrofotometre (Hach Lange,Amerika Birleşik Devletleri) kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Mor gıda boyasının (Amarant) giderim yapılmadan önceki hali

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Maya bazlı ZnO elde edildikten sonra malzemenin içeriğini doğrulamak için karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

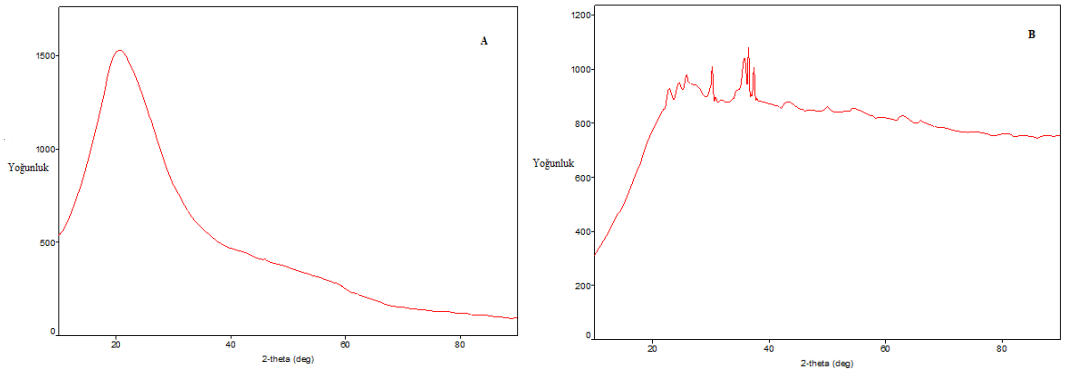
A. Yeşil Sentez Metoduna Göre Sentezlenen Çinko Oksit Nanopartiküllerin Karakterizasyonu

X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Toz halindeki örnek, ZnO'nun varlığını doğrulamak ve yapıyı analiz etmek için bir Cu Kα - X Ray Difraktometresi tarafından analiz edilmiştir. ZnONP'ler 350 °C'de kül fırınında yakıldıktan sonra XRD analizi yapılmış ancak ZnO pikleri gözlemlenememiştir. Daha sonra 600 °C'de yakılan ZnONP'lere yapılan analiz sonucunda pik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4). Pikler 2θ değerinde ortaya çıkmış, en büyük pikler 35,49°, 36,441°, 37,315° değerlerinde elde edilmiş, bu pikler kütüphane ile karşılaştırıldığında ZnO'ya karşılık geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca piklerin konumu literatür değerleriyle karşılaştırılmış ZnO parçacıklarının varlığı doğrulanmıştır. Daha sonra parçacıkların ortalama boyutu Debye-Scherrer [18] formülü kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 1). Kristal nanopartikülün ortalama boyutu 3,46 nm olduğu tespit edilmiştir.

$$\mathcal{D} = \frac{0.9/\lambda}{\beta \cos\theta} \tag{1}$$

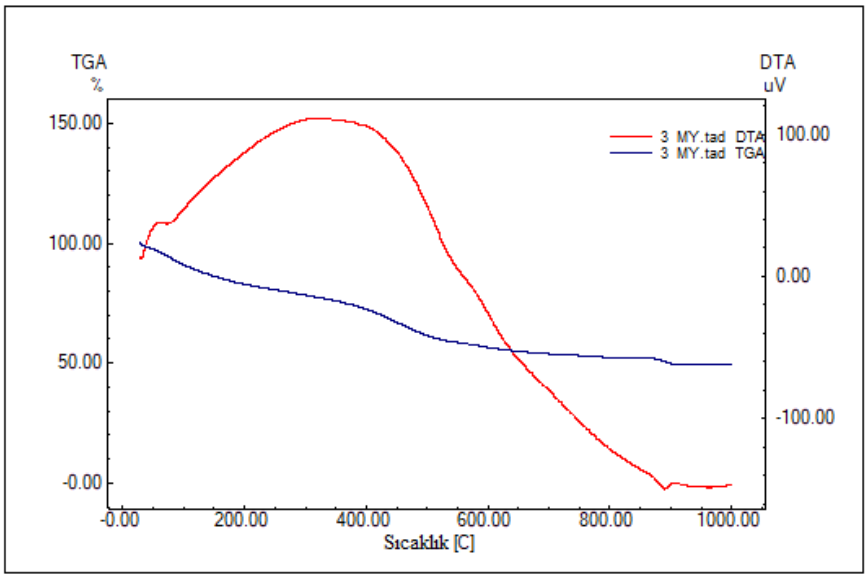
Burada "λ" X-ışını dalga boyunu (0.154 nm), "β" radyan cinsinden maksimumun yarısında genişleyen çizgiyi ve "θ" Bragg açısını ifade etmektedir [18]. Yazılım arama eşleştirmesi aracıyla, ICDD ZnO Referans Deseni ile 01-073-8765 ile eşleştiği bulunmuştur. Ayrıca (002), (002),(002),(002),(002) olmak üzere 5 adet düzlemde ana tepe noktaları tespit edilmiştir.



Şekil 4.XRD analiz sonuçları (A) 350 °C'de kalsinasyon, (B) 600°C'de kalsinasyon

Termal Analiz

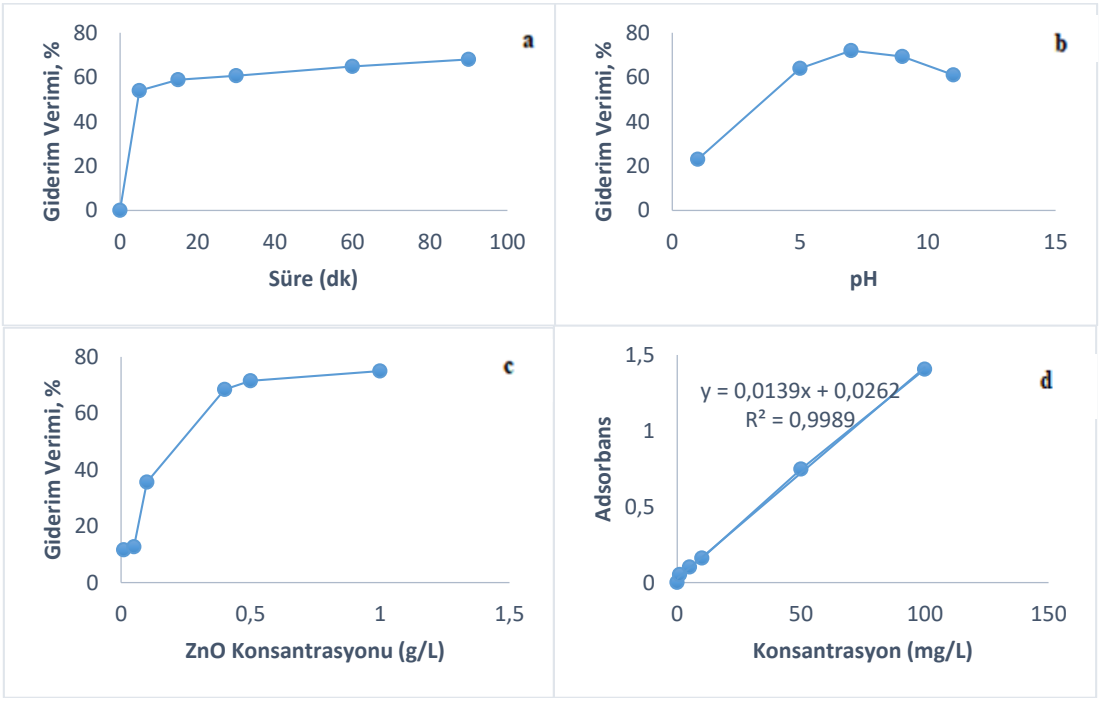
ZnONP'lerin kararlılığını ve ZnO bozulmasının kararlılık üzerindeki etkisini belirlemek ve malzemenin termal davranışını öngörmek için TGA/DTA ölçümleri yapılmıştır. ZnONP'lere ait analiz sonucu Şekil 5'te gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında işlemin ekzotermik olduğu anlaşılmakla birlikte bunun yüksek sıcaklıkta kristalizasyon gerçekleşmesiyle ilişkili olduğu düşünülebilir. 1000 °C'ye kadar ısıtılan nanopartiküller, yaklaşık %50 oranında kütle kaybına uğramıştır. Kütle kaybı yaklaşık 700 °C'de gerçekleştiğinden ZnONP'lerin kristalleşmesi 700 °C üzerinde gerçekleşmiştir. Geniş ve yoğun ekzotermik tepe saf ZnO fazının oluşumunu göstermiştir. Bu sonuçlar literatürdeki çinko nanopartikül araştırmaları ile uyumludur [19].



Şekil 5. TGA/DTA analiz sonuçları

B. Gıda Boyası Giderimi

Mor gıda boyasının (Amarant) giderim çalışmaları için spektrofotometrede dalga boyu taraması gerçekleştirilmiş ve en yüksek pike 505 nm'de ulaşılmıştır. Ardından farklı konsantrasyonlarda hazırlanan numuneler (1-100 mg/L) bu dalga boyunda okutulmuş ve Şekil 6 (d)'da verilen kalibrasyon grafiği elde edilmiştir. Deneysel aşamada elde edilen adsorbans değerleri elde edilen denkleme göre konsantrasyona çevrilmiştir. Adsorpsiyon süreci sırasında kirletici ve nanomalzeme arasında nanomalzeme-boya, boya-boya, kimyasal bağlar, hidrojen bağları, Van der Waals kuvvetleri, iyon değişimi ve hidrofobik çekimler gibi çok sayıda faktör süreci etkilemektedir [20]. Gıda boyası içerikli çözeltinin pH'ı 9,46 olarak ölçülmüştür. Giderim çalışmaları kapsamında, süre, pH ve nanomalzeme konsantrasyonu parametreleri ile denemeler yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Gıda Boyası Giderim Çalışmaları ve Kalibrasyon Grafiği (a) Sürenin boya giderimi üzerine etkisi, (b) pH'ın boya giderimi üzerine etkisi, (c) Nanomalzemenin boya giderimi üzerine etkisi, (d) Kalibrasyon grafiği

Boya başlangıç konsantrasyonu 10 mg/L olarak hazırlanarak kendi pH değerinde, 0,5 g/L ZnO ile belirli sürelerde giderim çalışmaları yapılmıştır. Burada 5. dakikada boyanın yarıdan fazlası giderilmiş olup, 30. dakikadan sonra sabit bir düzeyde giderim devam etmiştir. Maksimum giderim verimi 90. dakikada % 68 olarak tespit edilmiştir. XRD analiz sonuçlarında hesaplanan malzeme boyutu da dikkate alındığında, ZnONP'ler ilk

dakikalarda boya moleküllerini muhtemelen geniş yüzey alanı sayesinde tutmuştur. Daha sonra en uygun pH belirleme çalışmalarına başlanılmıştır. Deneysel aşamayı başlatırken giderim verimini arttırmak için 0,5 mL H_2O_2 eklenmiştir. H_2O_2 eklenmesiyle yüksek bir verim elde edilememiştir. Bu durum fazla H_2O_2'in radikal süpürücü etkisinden dolayı oksidasyon verimliliğini azaltmasına dayandırılabilir [21]. Değişen pH değerlerinde (1-11) gerçekleştirilen deneyler 90 dakika ile 60 dakika temas süresi arasında önemli bir fark olmamasından dolayı enerji kaybını azaltmak için 60 dakika boyunca devam etmiştir. Çok düşük ve çok yüksek pH değerlerinde giderim düşük kalırken nötr pH değerinde %72'ye varan giderim elde edilmiştir. Alkali koşullarda alım kapasitesindeki azalma hidroksil iyonları arasındaki rekabete atfedilebilir [22]. Çünkü alkali koşullarda hidroksil iyonları bol miktarda bulunacaktır ve bu durum bir süre sonra giderim veriminin durmasına yol açabilecektir. Daha sonra 7 pH değerine ayarlanan çözeltinin, farklı ZnO konsantrasyonlarında adsorbans ve derişimleri ölçülmüştür. Buna göre ZnO miktarı arttıkça boyar madde giderimi de artmıştır. Gıda boyasının giderimi 1 g/L konsantrasyon değerinde % 75'e ulaşmıştır. Bu durum malzemenin konsantrasyonunun artmasıyla yüzey alanının artması ve daha çok boyanın malzemeye tutunarak çözeltiden giderimi ile ilgili bir durumdur. Çözeltinin, bu sonuçlar elde edilmeden önceki ve sonraki görselleri Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Amarant giderimi öncesi (solda), sonrası (sağda)

Görüldüğü üzere Amarant boyasının giderimi büyük miktarda 60 dakikalık sürede gerçekleşmiştir. Literatürdeki Amarant giderim çalışmalarına bakıldığında, manyetik kitosan biyokömürü kullanılarak 1500 dakikada başarılı bir giderim gerçekleştiğini görmekteyiz [23]. Başka bir çalışmada ise 5. günün sonunda %99'luk bir amaranth giderimi elde edilmiştir [24].

IV. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında ZnONP'ler sentezlenip karakterize edilmiştir. XRD analiz sonuçları kütüphanede bulunan ZnO ile kıyaslanıp doğrulanmıştır. Kalsinasyon yöntemiyle 350 °C'de kristalize olma işlemi gerçekleşememiş ancak 600 °C'de istenilen kristalize yapı elde edilmiştir. Amarant boyasının ZnONP'lerle gerçekleştirdiği yüzey yüklenmesinde pH oldukça etkili olmuştur. Sunulan sonuçlar ve tartışmalarla, yüksek oranda çözünen boya Amarant'ın, yeşil sentez metoduyla sentezlenen ZnONP'lerin biyosorbent olarak kullanarak sulu çözeltilerinden başarıyla uzaklaştırılabileceği açıktır. Ön çalışmalar, 7 pH'ta, 60 dakikada ve 0,1 g/L ZnONP'lerle sulu çözeltilerden Amarant'ın neredeyse %75'ini adsorbe edebileceğini göstermektedir. Ek olarak, 0,5 g/L'de giderim verimi % 71,6 olduğundan %5'in altında bir fark mevcuttur. Bu durumda daha ekonomik bir giderim olması açısından maksimum malzeme konsantrasyonu 0,5 g/L seçilebilir. Sulu çözeltilerdeki boyar maddeleri gidermek için yaygın olarak kullanılan adsorpsiyon malzemeleriyle karşılaştırıldığında, hazırlanan ZnO nanomalzemesi ucuz, basit hazırlama, çözeltiden kolay ayırma ve başarılı adsorpsiyon kapasitesi avantajları sergilemiştir. Ayrıca tartışma kısmında bahsedildiği üzere bazı Amarant giderim çalışmalarına göre daha kısa sürede verim elde edilmiştir. Sonuç olarak maya bazlı çinko oksitlerin gıda boyaları tarafından gerçekleşen su kirliliğini kontrol etmek için yararlı bir absorban olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Salem, S. S. (2022). Baker's yeast-mediated silver nanoparticles: Characterisation and antimicrobial biogenic tool for suppressing pathogenic microbes. *BioNanoScience, 12*(4), 1220-1229.

[2] Shu, M., He, F., Li, Z., Zhu, X., Ma, Y., Zhou, Z., ... & Zeng, M. (2020). Biosynthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles using yeast extract as reducing and capping agents. *Nanoscale research letters*, *15*, 1-9.

[3] AswaMurillo-Rábago, E. I., Vilchis-Nestor, A. R., Juarez-Moreno, K., Garcia-Marin, L. E., Quester, K., & Castro-Longoria, E. (2022). Optimized synthesis of small and stable silver nanoparticles using intracellular and extracellular components of fungi: An alternative for bacterial inhibition. *Antibiotics*, *11*(6), 800.

[4] Roychoudhury, A. (2020). Yeast-mediated green synthesis of nanoparticles for biological applications. *Indian J Pharm Biol Res*, *8*(03), 26-31.

[5] Kiymaci, M. E., Şimşek, D., & Altanlar, N. (2022). Molecular Identification And Lipolytic Activity Of Yarrowia Lipolytica Isolated From Yoghurt Cream. *Journal of Faculty of Pharmacy of Ankara University*, *46*(2), 450-457.

[6] Gonçalves, F. A. G., Colen, G., & Takahashi, J. A. (2014). Yarrowia lipolytica and its multiple applications in the biotechnological industry. The Scientific World Journal, 2014.

[7] Ünver, Y. (2022). Biyofarmasötik Proteinlerin Üretiminde Kullanilan Mayalar. *Fen Bilimleri ve Matematikte Güncel Araştırmalar*, 1940.Mart, 2022.

[8] El-Khawaga, A. M., Elsayed, M. A., Gobara, M., Suliman, A. A., Hashem, A. H., Zaher, A. A., ... & Salem, S. S. (2023). Green synthesized ZnO nanoparticles by Saccharomyces cerevisiae and their antibacterial activity and photocatalytic degradation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-12.

[9] Boroumand Moghaddam, A., Moniri, M., Azizi, S., Abdul Rahim, R., Bin Ariff, A., Zuhainis Saad, W., ... & Mohamad, R. (2017). Biosynthesis of ZnO nanoparticles by a new Pichia kudriavzevii yeast strain and evaluation of their antimicrobial and antioxidant activities. *Molecules*, *22*(6), 872.

[10] Chauhan, R., Reddy, A., & Abraham, J. (2015). Biosynthesis of silver and zinc oxide nanoparticles using Pichia fermentans JA2 and their antimicrobial property. *Applied nanoscience*, *5*, 63-71.

[11] Llewellyn, G. C., Penberthy, J. K., & Parker, J. M. (2020). Food Color Additives in the US Food Supply: Review of Neurobehav-ioral Safety. *J Pediatr Neurol Neurosci*, *4*(1), 55-72.

[12] Palas, B., Ersöz, G., & Atalay, S. (2023). Tabakalı Çift Hidroksit Katalizörler Kullanılarak Peroksimonosülfat ve Hidrojen Peroksit Aktivasyonu ile Gıda Boyalarının Giderimi: Box-Behnken Tasarımı ile Reaksiyon Koşullarının Optimizasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *13*(4), 2790-2808.

[13] Biswal, A. K., Sahoo, M., Suna, P. K., Panda, L., Lenka, C., & Misra, P. K. (2022). Exploring the adsorption efficiency of a novel cellulosic material for removal of food dye from water. *Journal of molecular liquids*, *350*, 118577.

[14] Esquerdo, V. M., Cadaval Jr, T. R. S., Dotto, G. L., & Pinto, L. A. A. (2014). Chitosan scaffold as an alternative adsorbent for the removal of hazardous food dyes from aqueous solutions. *Journal of colloid and interface science*, *424*, 7-15.

[15] Mittal, A. (2006). Removal of the dye, Amaranth from waste water using hen feathers as potential adsorbent. *Electron. J. Environ. Agric. Food Chem*, *5*(2), 1296-1305.

[16] Kilic, I. H., Karakucuk-Iyidogan, A., Al-Aaazi, N., Bayil-Oguzkan, S., & Ozaslan, M. (2018). Bioremediatign of wastewater contaminated with petroleum hydrocarbons from Baiji Thermal Power Station in Iraq. *Fresenius Environmental Bulletin*, *27*(8), 5223-5229.

[17] Avci, H., Öztürk, Ş., & Aslim, B. (2021). Farklı Adli Biyolojik Örnekler Üzerinde Gelişen Mantar Türleri ile İlgili Bazı Doğal Ekstraktların Antifungal Etkileri: Deneysel Çalışmalar. *Turkiye Klinikleri Journal of Forensic Medicine & Forensic Sciences*, *18*(3).

[18] Bokuniaeva, A. O., & Vorokh, A. S. (2019, December). Estimation of particle size using the Debye equation and the Scherrer formula for polyphasic TiO2 powder. In *journal of physics: Conference series* (Vol. 1410, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.

[19] Kayani, Z. N., Saleemi, F., & Batool, I. (2015). Effect of calcination temperature on the properties of ZnO nanoparticles. *Applied Physics A*, *119*, 713-720.

[20] Dobe, N., Abia, D., Tcheka, C., Tejeogue, J. P. N., & Harouna, M. (2022). Removal of amaranth dye by modified Ngassa clay: Linear and non-linear equilibrium, kinetics and statistical study. *Chemical Physics Letters*, *801*, 139707.

[21] Sahinkaya, S., & Yakut, S. M. (2020). A comparative study on applicability of nano-sized iron (II, III) oxide in ultrasonicated Fenton process. *Environmental Engineering Research*, *25*(1), 36-42.

[22] Romdhane, D. F., Satlaoui, Y., Nasraoui, R., Charef, A., & Azouzi, R. (2020). Adsorption, Modeling, Thermodynamic, and Kinetic Studies of Methyl Red Removal from Textile-Polluted Water Using Natural and Purified Organic Matter Rich Clays as Low-Cost Adsorbent. *Journal of Chemistry*, *2020*(1), 4376173.

[23] Wang, F., Li, L., Iqbal, J., Yang, Z., & Du, Y. (2022). Preparation of magnetic chitosan corn straw biochar and its application in adsorption of amaranth dye in aqueous solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, *199*, 234-242.

[24] Rajashekarappa, K. K., Mahadevan, G. D., Neelagund, S. E., Sathynarayana, M., Vijaya, D., & Mulla, S. I. (2022). Decolorization of amaranth RI and fast red E azo dyes by thermophilic Geobacillus thermoleovorans KNG 112. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, *97*(2), 482-489.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 274-289, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1555404
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Makine Öğrenimi Yaklaşımları Kullanarak El Hareketi Tabanlı Biyometrik Kimlik Doğrulama

Hand Gesture Based Biometric Authentication Using Machine Learning Approaches

Zekeriya Katılmış[1*]

Geliş / Received: 24/09/2024 ***Revize / Revised: 17/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 18/10/2024***

ÖZ

Kimlik doğrulama, modern teknoloji alanında önemli bir görev haline gelmektedir. Bu, bir cihazın bir sistem varlığıyla etkileşimde bulunan bir kullanıcıyı tanıdığını onaylamasına olanak tanıyan bir süreçtir. Bu çalışmada, Leap Motion (LM) cihazı kullanılarak tek elle gerçekleştirilen hareket bazlı kullanıcı kimlik doğrulama üzerine çalışılmıştır. Çalışma el hareketi takip, görüntü karelerinin elde edilmesi, önişlem, öznitelik çıkarımı ve seçimi, boyut indirgeme, sınıflandırma ve doğrulama adımlarından oluşmaktadır. El biyometrisinin benzerlik ve farklılıkları dikkate alınarak hazırlanan 85 özellik belirlenerek 40 kullanıcı tarafından veri kümesi oluşturulmuştur. Bu veri kümesine Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC) özellik seçim algoritması ile Doğrusal Ayırım Analizi (LDA) ve Temel Bileşenler Analizi (PCA) boyut indirgeme yöntemleri uygulanarak karşılaştırma analizleri yapılmıştır. Doğrulama başarımı farklı makine öğrenimi algoritma yöntemleri ile test edilmiştir. Önerilen bu sistemin geçerliliği ve elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek için 5 katlamalı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Biyometrik kimlik doğrulama, en iyi sonuç %96,50 oranı ile çekirdek tabanlı aşırı öğrenme makinesi (K-ELM) yaklaşımı ile elde edilmiştir. Tüm aşamalarda uygulamalara bakıldığında, K-ELM sınıflandırıcının başarım oranlarını koruduğunu ve en yüksek başarım oranını verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda K-ELM sınıflandırıcının kararlı bir yapıda olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Biyometrik, Kimlik Doğrulama, El Hareketi, Makine Öğrenimi, Özellik Çıkarımı

ABSTRACT

Authentication is becoming an important task in the field of modern technology. It is a process that allows a device to confirm that it recognizes a user interacting with a system entity. In this study, a single-handed gesture-based user authentication using the Leap Motion (LM) device has been investigated. The study consists of hand gesture tracking, acquisition of image frames, preprocessing, feature extraction and selection, dimension reduction, classification, and validation steps. A dataset was collected by 40 users by determining 85 features prepared by considering the similarities and differences of hand biometrics. Comparison analyses were performed by applying the Pearson Correlation Coefficient (PCC) feature selection algorithm and Linear Discriminant Analysis (LDA) and Principal Component Analysis (PCA) dimensionality reduction methods to this dataset. The verification performance was tested with different machine learning algorithm methods. A 5-fold cross-validation method was used to test the validity of this proposed system and the accuracy of the obtained results. In biometric authentication, the best result was obtained with the kernel-based extreme learning machine (K-ELM) approach

[1]*Sorumlu yazar iletişim: zekeriya.katilmis@ksbu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2095-5483)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

with a rate of 96.50%. When the applications were examined in all stages, it was observed that the K-ELM classifier maintained its performance rates and gave the highest performance rate. At the same time, it was seen that the K-ELM classifier has a stable structure.

Keywords- Biometrics, Authentication, Hand Gesture, Machine Learning, Feature Extraction

I. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, bilgisayar da dahil olmak üzere dijital cihazların kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Bu artış nedeniyle, önemli bilgi ve belgelerin büyük bir kısmı bilgisayarda saklanmaktadır. Sonuç olarak, bilgisayar güvenliği ve kimlik doğrulama artık çok önemlidir. Güvenlik veya kişiselleştirme amacıyla kullanıcı kimlik doğrulamasını geliştirmeye artan bir ihtiyaç vardır. Çeşitli güvenlik türleri bulunmaktadır; bunlar arasında bilgiye dayalı, biyometrik temelli güvenlik sistemleri yer almaktadır.

Son zamanlarda giderek artan bir şekilde karşılaştığımız biyometrik sistemler, sunduğu avantajlar ve kullanım alanlarıyla ön plana çıkmaktadır. Biyometrik sistemler, bireylerin fiziksel ve davranışsal özelliklerini tanımlayarak kimliklendirme yapan sistemlerdir. En yaygın kullanılanları ise parmak izi [1], el geometrisi [2], ses [3], retina [4], yüz [5], imza [6] vb. biyometrik sistemledir. Bu sistemler günümüzde hava alanları, bankalar ve sağlık sektörü gibi kritik alanlarda, giriş çıkış işlemleri ve kimlik doğrulama gibi süreçlerde kullanılmaktadır. Her bir sistemin kendi içerisinde avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Günümüzde bu teknolojiler sayesinde güçlü parolalara ve uzun şifrelere ihtiyaç gittikçe azalmaktadır. Biyometrik güvenlik sistemlerinde kişilerin kimlik ispatı için taşımak zorunda oldukları kart, anahtar ya da şifre gibi araçların yerine, bireyin unutması, kaybetmesi, kopyalanması daha zor olan fiziksel ya da davranışsal özelliklerine dayalı bir analiz sistemi sunulmaktadır.

Dokunmatik olmayan insan-bilgisayar etkileşimine ve gelişmiş kullanıcı kimlik doğrulamasına artan bir ilgi vardır. El duruşu ve hareketi temelli temassız etkileşimlerin daha yaygın olarak kullanılacağını ve bu tür etkileşimlerde yeniden kimlik doğrulamanın giderek daha fazla talep edileceği düşünülmektedir. LM cihazı, ellerin, parmakların ve eklemlerin 3D hareketlerini temassız olarak tanıyabilen bir cihazdır. LM cihazının benzer sensör ve kameralara kıyasla daha uygun fiyatlı, hafif ve taşınabilir olması ile günümüzdeki çeşitli teknolojik cihazlara kolayca entegre edilebilmesi, bu çalışmada tercih edilmesinin nedenidir. Literatürde LM tabanlı kullanıcı kimlik doğrulama çalışması az sayıda bulunmaktadır. Bu çalışmada, dijital bir sensör sistemine dayanan LM sensörü kullanılarak sağ elle gerçekleştirilen biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama üzerine çalışılmıştır.

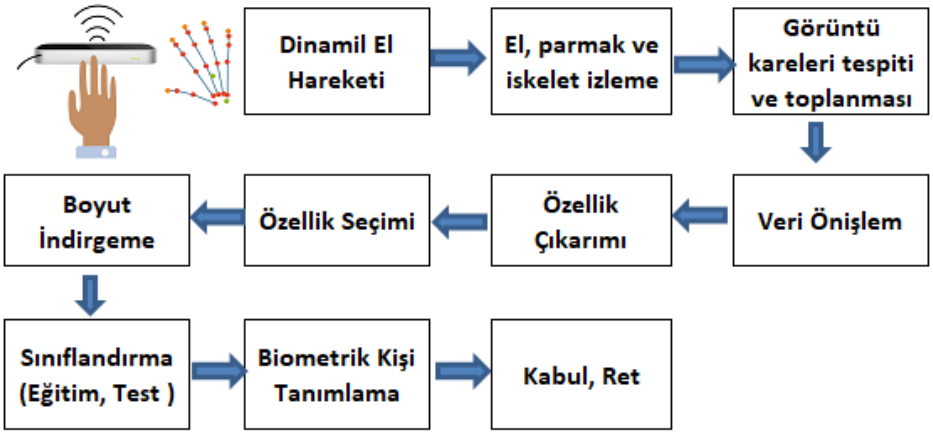
Çalışmanın amacı, kullanıcıları ellerinin iskelet duruşlarındaki bireysel özelliklere dayanarak tanımlamak ve doğrulamaktır. El ve parmakları doğru bir şekilde tanımak ve birden fazla ölçümde kullanıcılar arası değişkenliği azaltmak için, kullanıcıların sağ ellerini LM cihazının üzerinde, avuç içi aşağı bakacak ve parmaklar birbirine bitişik şekilde düz uzatılmış olarak tutmaları istenmiştir. Kullanıcı kimlik doğrulama yöntemi, her kullanıcının el pozisyonunu aldığı sırada parmaklarının ve eklemlerinin göreceli konumsal ilişkisine dayanmaktadır.

Bu çalışma için oluşturulan veri kümesi ilk olarak PCC özellik seçimi yöntemi uygulanarak özellik sayısı oransal ve kademeli olarak düşürülmüştür. İkinci aşamada ise boyut indirgeme yöntemleri kullanılarak boyut küçültülmüştür. Makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak orijinal veri kümesi ile özellik seçimi ve boyutu indirgenmiş veri kümelerinin sınıflandırma başarım oranları karşılaştırılmıştır. Önerilen bu sistemin geçerliliği ve elde edilen sonuçların doğruluğunu test etmek için 5 katlamalı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca yeni bir sağ el tabanlı biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama veri kümesi ile topluluğa katkıda bulunulmuştur. Bu çalışma ile elde edilen özgün veri kümesi https://sites.google.com/view/trdataset/ linkinden elde edilebilir.

Makine öğrenimi yöntemlerinden ELM sınıflandırıcılar hızlı eğitim, yüksek performans, genelleme yeteneği gibi avantajlı yönleri ile öne çıkmaktadır. ELM algoritması, diğer sınıflandırma algoritmalarına kıyasla daha hızlı öğrenme süresi sunar ve yüksek bir doğruluk düzeyi sağlamaktadır. ELM, katmanlı sinir ağları gibi yapılara benzer ancak, ağırlık ve eşik parametrelerinde rastgele seçilen değerler kullanılır ve değiştirilmez. Bu durum başarım doğruluğunda dalgalanmalara yol açmaktadır. Bunun yerine K-ELM algoritmasında çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır. Kernel-ELM'de, önce giriş verileri, bir çekirdek fonksiyonu ile dönüştürülür, yüksek boyutlu bir uzaya aktarılır. Bu dönüşüm, doğrusal olmayan ilişkileri yakalamaya yardımcı olur. Kernel-ELM, yüksek boyutlu verilerde etkili sonuçlar verir. Bu süreç, verinin karmaşıklığını daha iyi yakalayarak, kararlı bir yapı sunar ve modelin performansını artırır. Bu sebeple çalışmada K-ELM algoritması tercih edilmiştir. Temel ELM ve diğer farklı türlerden seçilen algoritmalar kullanılarak çalışma süresi ve performans karşılaştırmaları sunulmuştur.

PCC özellik seçimi yöntemi büyük veri kümeleri üzerinde hızlı bir şekilde çalışması ve özellik seçimi sürecinde güçlü bir teknik olmasından dolayı tercih edilmiştir. PCA ve LDA, veri analizi ve makine öğrenimi alanında en önemli boyut indirgeme yöntemlerindendir. Her ikisi de yüksek boyutlu verileri daha yönetilebilir bir

forma indirgeyebilmekle birlikte, veri analiz ve modelleme süreçlerini kolaylaştırır. PCA, fazla boyutlu verilerdeki genel özellikleri bularak boyut sayısının azaltılmasını, verinin sıkıştırılmasını sağlamaktadır. Bu yöntem, yüksek korelasyonlu değişkenleri bir araya getirerek verilerdeki en çok varyasyonu oluşturarak daha az sayıda yapay değişken kümesi oluşturur. PCA verideki gerekli bilgileri ortaya çıkarmada etkili bir yöntemdir. LDA ise sınıflar arasındaki ayrımı en iyi şekilde maksimize etmeye çalışır. Bu, daha iyi sınıflandırma sonuçları elde edilmesine daha etkin rol oynamaktadır. Aynı zamanda yüksek boyutlu verilerde, LDA boyut indirgeme gereksiz özelliklerin etkisini azaltarak modelin performansını arttırmaktadır. PCA, genel bir boyut indirgeme yöntemi iken, LDA, sınıflandırma ve ayırt etme üzerinde yoğunlaşan bir tekniktir. LDA, sınıflandırma problemlerinde daha yaygın olarak kullanılır. Özellikle etiketli verilerle çalışır. Çalışmada LDA boyut indirgeme yöntemi tercih edilmiş ve PCA ile karşılaştırma imkanı sunulmuştur.



Şekil 1. Kullanıcı kimlik doğrulama için kullanılan öbek yapı

Önerilen doğrulama modelin genel öbek yapısı, Şekil 1'de gösterildiği gibi 3 aşama ve 10 adımdan oluşmaktadır. LM aşaması hareket, izleme ve görüntü karelerinin toplanması adımlarından oluşmaktadır. Veri kümesi aşaması önişlem, öznitelik çıkarımı ve seçimi ve boyut indirgeme adımlarından oluşmaktadır. Uygulama aşaması ise sınıflandırma, biyometrik kimlik doğrulama ve kabul, ret aşamalarından oluşmaktadır. İlk adım, el hareketinin yapılması ve LM hizmetinin başlatan adımdır. İkinci adım, izleme adımdır, bu adımda izleme katmanı, el ve parmak hareket izleme bilgilerini çıkararak verileri eşleştirir. Üçüncü adım, LM uygulama programlama arabirimi özelliklerini kullanarak eşleştirilen verilerden görüntü karelerinin toplanır. Dördüncü adım LM sensöründen toplanan verilerinden alınan özellikler çıkarılarak veri kümesi oluşturulur. Beşinci adımda, bu özelliklerden özellik seçim algoritması uygulanarak özellik seçimi yapılır. Altıncı adımda ise seçim yapılan özelliklerin indirgeme yöntemiyle boyutları orantısal kademeli azaltılır. Yedinci adım ise kimlik doğrulama için sınıflandırma eğitimin yapıldığı aşamadır. Son adımda eğitilmiş sınıflandırıcı bireylerin kimliğinin doğrulanması gerçekleştirilir. Bu çalışmanın literatüre katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

a. Biyometrik kimlik doğrulamada K-ELM ağ yapısı ve öğreniminin kullanıldığı ilk uygulama olması
b. Biyometrik kimlik doğrulama için LM tabanlı bir veri kümesinin kullanıma sunulması
c. Biyometrik kimlik doğrulama da PCC özellik seçimi, PCA ve LDA boyut indirgeme yöntemlerinin kullanılması
d. İki aşamalı özellik seçme ve küçültme yaklaşımlarının bütünleştirilmesiyle oluşturulan farklı veri kümeleri ile doğrulama başarım analizi sunulması
e. El hareketlerinin kullanıcılar tarafından farklı sürede yapılmasının doğrulama başarım analizine etkisinin sunulması
f. Özellik seçme ve boyut azaltma yöntemleri aşamasında orantılı ve kademeli olarak özellikler azaltılarak en iyi ve uygun özellik sayısı ile doğrulama başarım analizi sunulması.

II.LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Literatürde biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama üzerine birçok çalışma mevcuttur. LM tabanlı biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama üzerine çok az çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalardan bu çalışmanın konusu ve kapsamı bağlamında LM tabanlı çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetlenmiştir.

Wong ve arkadaşları [7] da LM tabanlı bir sensör kullanarak biyometrik bir kimlik doğrulama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Kollar, bilekler, ellerle birlikte kollar ve parmaklar gibi sabit el hareketlerini kullanmışlardır. Önerdikleri kimlik doğrulama sisteminin ortalama %0,10'luk bir eşit hata oranı ve %90'lık bir doğruluk elde ettiğini göstermişlerdir. Imura ve arkadaşları [8] LM aracılığıyla bir el hareketi tabanlı biyometrik kimlik doğrulama yöntemi sunmuştur. Biyometrik veriler kullanılarak, üç kategoriye ayrılmış yedi 3D hareket önermiştir.

Her katılımcı 75 özellik içeren 7 el hareketinin her birini 10 kez gerçekleştirmiş ve 630 örnek elde edilmiştir. Deney dokuz katılımcı ile gerçekleştirilmiş ve %90'ın üzerinde bir doğru kabul oranı (TAR) elde etmişlerdir. Eşit hata oranı (EER) yaklaşık %4 olarak ölçülmüştür. DP doğru pozitif sayısı, DN doğru negatif sayısı, YP yanlış pozitif sayısı ve YN yanlış negatif sayısıdır. EER metrik hesaplaması, yanlış kabul oranı (FAR) ve yanlış ret oranı (FRR) metriklerinin ortalaması ile bulunur. TAR, FAR, FRR ve EER metrik eşitlikleri sırasıyla (1)(2)(3)(4)'de sunulmuştur.

TAR (True Accept Rate) = DP / (DP + YN) (1)

FAR (False Acceptance Rate) = YP / (YP + DN) (2)

FRR (False Rejection Rate) = YN / (YN + DP) (3)

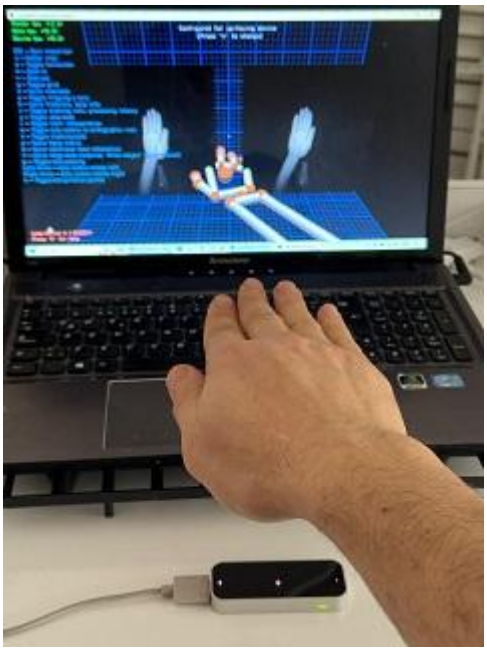
EER (Equal Error Rate)=(FAR+FRR) / 2 (4)

Ayrıca, Maruyama ve arkadaşları [9] LM sensörüyle parmak eklemlerinin konumlarını kullanarak kullanıcı kimlik doğrulama tanıtmışlardır. Kullanıcı kimlik doğrulama yöntemimiz temel olarak, her kullanıcı el duruşunu aldığında parmaklarının eklemlerinin göreceli konumsal ilişkisine dayanmaktadır. Bu çalışmada, aynı ve farklı parmaklar arası eklemleri arasındaki ilişki özellik setleri karşılaştırılarak kullanıcı analiz edilmiş ve doğrulanmıştır. Deneye yaklaşık yirmi katılımcı katılmış ve her kullanıcı için el 30 kez ölçülmüştür. Sonuçlar, parmak içi eklemler arasındaki ayrımlara dayalı %84,65'lik bir tanımlama oranı göstermiştir.

Elin geometrik özelliklerini kaydetmeye yönelik LM tabanlı bir kullanıcı kimlik doğrulama sistemi [10] çalışmasında sunulmuştur. Veri kümesi 21 kişiden toplanmıştır. Her kullanıcı için parmakların uzunluğu ve genişliği, parmaklar arasındaki mesafe, elin ve bileğin merkezi kaydedilmiştir. LM kullanarak el anlık görüntülerinden oluşan bir veri kümesi toplanmıştır. Her kullanıcı için çift elli 40 anlık görüntüsü için 52 el özelliği toplanmıştır. k-NN, SVM, çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve lojistik regresyon gibi sınıflandırıcılar kullanılmıştır. Sınıflandırma %90 üzeri bir başarı sağlamıştır. Bu çalışmalar yanı sıra, Manabe ve arkadaşları [11] sayısal tuş takımı ve elin biyometrik kimlik doğrulamasını birleştiren iki faktörlü bir kullanıcı kimlik doğrulama sistemi önermiştir. El geometrisi ve el hareketi verileri LM cihazı tarafından ölçülmüştür. Ardından, kullanıcı kimlik doğrulaması için kullanılan ham özelliklerden 40 özellik çıkarmışlardır. Daha sonra, kullanıcıların gerçek olup olmadıklarını için rastgele orman (RF) tabanlı bir sınıflandırıcı uygulanmıştır. Aynı zamanda, önerdikleri kimlik doğrulama sistemi 21 katılımcı kullanıcısı tarafından değerlendirilmiş ve %94,98'lik bir kimlik doğrulama doğruluğu elde edilmiştir. Bunların dışında, hava el yazısı [12-14], daire çizme [15], imza çizme [16,17], alfabe dizeleri [18] gibi farklı el hareketleri kullanılarak kullanıcı veya kişi tanımlama üzerine farklı çalışmalarda yapılmıştır. Örneğin, Saritha ve diğerleri [15] daire çizme, kaydırma, ekrana dokunma ve tuşa dokunma tabanlı hareketlere dayanan LM tabanlı bir kimlik doğrulama sistemi önermiştir. Bu çalışmalara benzer farklı cihazlar, sensörler kullanılarak yapılan çalışmalarda mevcuttur. Shin ve arkadaşları [19] ivme, jiroskop ve EMG sensörlerine dayalı bir kullanıcı kimlik doğrulama yaklaşımı geliştirmiştir. 20 denekten 400 örnek toplamışlardır. Her bir denek 20 kez hareket gerçekleştirmiş ve ardından çok sınıflı bir SVM'yi eğiterek %98,70'lik bir kimlik doğrulama oranı elde etmişlerdir. Wu ve arkadaşları [20], Lai ve arkadaşlarının [21] yaklaşımını, beden silueti yerine Kinect iskelet modelini benimseyerek genişletmiş ve yöntemi yalnızca kimlik tespiti yerine kullanıcı kimlik doğrulaması yapmak üzere geliştirmiştir. Dinamik zaman eğriltme (DTW) algoritması, hareketlerin karşılaştırmak için kullanılmıştır.

III. LEAP MOTION SENSÖRÜ

LM, el hareketleriyle yazılımlarla etkileşim sağlamaya olanak tanıyan, Şekil 2'de gösterilen bir cihazdır. Bu sensör, derinlik bilgisine sahip el görüntüsünü elde etmek için bir çift kamera ve kızılötesi LED'ler kullanmaktadır. LM, üç boyutlu uzayda gerçekleşen el ve parmak hareketlerini çok hassasiyetle, 290 fps gibi yüksek bir hızla algılayıp kaydedebilmektedir. LM saniyede 200 kareye kadar hareketleri yaklaşık 25 ile 600 mm arasında 150 derecelik etkin görüş alanı içerisinde izleyebilir [22]. Tespit edilen değerler milimetre cinsinden değerlerdir. LM uygulama programlama arayüzü (API), hareket izleme verilerine ait görüntü karesi (frame) adı verilen bir dizi anlık fotoğraf sunar. Bu cihaz görüş alanındaki el, parmak ve benzer nesneleri tarayarak sürekli olarak bir veri dizisi ve görüntü kareleri sağlar. Bu sensör, görüş alanına giren el, parmak hareketlerini tarayarak anlık bir veri dizisi ve görüntü kareleri üretir. Her bir görüntü karesi el, parmak ve nesne gibi temel tarama bilgilerini ve o anda tanınan hareket ve durum bilgilerini içerir. Tespit edilen bir el ve parmak hareketleri için cihaz benzersiz bir ID değeri üretir. Üretilen ID değeri tespit edilen hareketin sensörün görüş alanında kaldığı sürece korunur. LM işaret dili tanıma (SLR) [23,24], bilgisayar etkileşimi [25,26], robot kontrolü [27,28], tıbbı teşhis[29] ve rehabilitasyon [30,31] gibi araştırma alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2. LM cihazı ve uygulama programlama arayüzü [22]

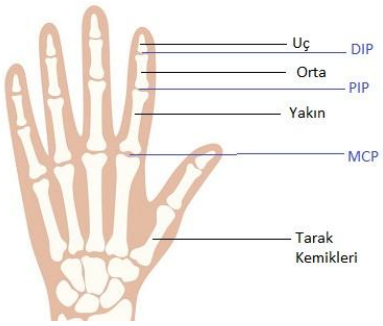
IV. VERİ KÜMESİ

Bu çalışmada, sağ el ile yapılan hareketlerin kaydedilmesi amacıyla farklı yaş gruplarından 20 yetişkin erkek ve 20 yetişkin kadından oluşan toplam 40 denekle veri toplanmış ve özellik çıkarımları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda el, parmak, eklem ve eklem noktalarının her biri için uzunluk, mesafe, genişlik ve açı olmak üzere 4 farklı türden oluşan ayırt edici 85 özellik belirlenmiştir. Bu özellikler arasında, sadece el ve parmak boyutlarıyla sınırlı kalmayıp el hareketinin tanınmasında belirleyici olacağı düşünülen açı bilgisi de bulunmaktadır. Her bir el hareketi için tek çerçevede (frame) 10 tekrar örnek barındıran 40 denekten toplam 400 kayıt içeren bir veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesi, her bir el hareketi için farklı sürelerde alınan görüntü karelerinin birleşiminden oluşmuştur. Görüntü kareleri her 30 salisede bir alınmıştır. LM cihazı tarafından elin açık pozisyon duruşu sağlandıktan sonra kayıt başlatılmıştır. Kayıtlar bir ile dört saniye arası değişen süreler içinde alınmıştır. Denekler sağ eli kullanarak LM üstünde Şekil 3'te gösterildiği üzere el cihaza paralel duracak şekilde ve parmaklar bitişik bir konumda göstererek kayıtlar oluşturulmuştur. LM cihazının bağlantısı bilgisayar üzerinde yer alan USB 3.0 portu ile gerçekleştirilmiştir. Her bir deneğin her bir el hareketi için oluşturduğu kayıt ayrı bir dosya olarak kaydedilmiştir. Bir kullanıcıya ait el hareketi yakalama görüntüsü Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. LM ile el geometrisini yakalama görseli.

Veri kümesinin oluşturulması amacıyla LM cihazı kullanılarak C# dilinde bir veri toplama sistemi tasarlanmıştır. Hareketlerin denekler tarafından yapılması sürecinde aydınlatma koşulları değiştirilmeden gün ışığı aydınlatması ve doğal ortamlar kullanılmıştır. Geliştirilen sistemle oluşturulan raw uzantılı veri kümesinin dönüştürme, normalizasyon, özellik seçimi, boyut indirgeme ve sınıflandırma süreçleri Matlab ile gerçekleştirilmiştir.



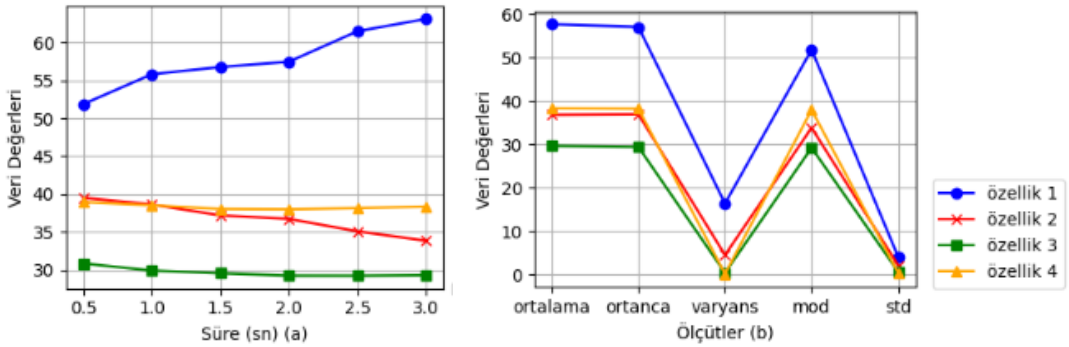
Şekil 4. El bileği ve kemikleri [32,33]

El anatomisi tarak (metakarp) kemikleri, parmak (falanks) kemikleri ve eklemlerden (joint) oluşur. Her parmak için 1 tane olmak üzere 5 adet tarak kemiği bulunur. Avuç içi bitişinden itibaren parmak eklemleri başlar. Bunlar falanks kemikleri olarak bilinir. Falankslar konumlarına göre isimlendirilir. Yerleşimlerine göre proksimal falanks (parmak kökünde, yakın), orta falanks ve distal falanks (parmak uç kemikleri) olarak 3 tanedir. Parmak eklemleri ise içeriden dışarıya doğru metakarpal falanks eklem (MCP), proksimal iç falanks eklem (PIP) ve distal iç falanks eklem (DIP) olarak 3 tanedir. Parmak kemikleri 14 tane falanks kemiği ve 14 tane eklemden oluşmaktadır [32,33]. El bileği ve kemiklerin anatomisi Şekil 4'de sunulmuştur.

El tabanlı biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama için uygun özellik çıkarımları el anatomisine bağlı yapılmıştır. Özellikler sağ elin biyometrik yapılış durumu ve gereksinim görülen noktalar dikkate alınarak belirlenmiştir. Özellik setinde 2 farklı grup mesafe bilgisi kullanılmıştır. Birinci grupta parmak içi ve parmaklar arası mesafe bilgisi alınmıştır. Öncelikle parmak ucu (TipPosition) pozisyon noktaları arası mesafe bilgisine başvurulur. Benzer özellik grubu olarak 3 parmak eklem (DIP, PIP, MCP) (JointPosition) pozisyon noktaları arası mesafe bilgisi ve bunlar ile parmak ucu (TipPosition) ve avuç içi (PalmPosition) pozisyon noktaları arası mesafe bilgisine başvurulur. Söz konusu bu noktalar arasında toplam 39 özellik belirlenmiştir. İkinci grupta ise tarak ve bilek kemikleri arası mesafe bilgisi alınmıştır. Elin avuç içi noktası ve bilek (Arm) noktası arası mesafe bilgisine başvurulur. Bunlara ek olarak elin metakarpal falanks eklem (MCP) noktaları ile dirsek pozisyon (ElbowPosition), bilek pozisyon (WristPosition) ve bilek (Arm) merkez noktası arası mesafe bilgilerine başvurulur. Belirlenen bu noktalar arasında toplam 30 özellik belirlenmiştir. Diğer özellik seti olarak parmak kemik uzunluk ve genişlik bilgisine de başvurulmuştur. Bunlarla birlikte bilek (Arm) ve avuç içi genişlik bilgisine de özellik olarak ilaveten alınmıştır. Bu noktalar için toplam 12 özellik belirlenmiştir. Son olarak parmaklar arası yön (Direction) açı bilgisine de kullanılmıştır. Her bir açı bilgisi için toplam 4 özellik eklenmiştir. Bu çalışma çerçevesinde, el tabanlı biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama için tanımlanan özellikler daha önce belirtildiği gibi 4 kategoriye ayrılmış ve toplamda 85 özellik sınıflandırma aşamasında kullanılmak üzere belirlenmiştir.

V. ÖZELLİK ÇIKARIMI

Biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama hareket tabanlı olduğu için, farklı ve benzer el hareketlerini ayırt edilebilmesini sağlayan bir süreç işletilir. Oluşturulan farklı uzunluklara sahip veri kümesinde sinyal işleme özellik çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bu özellik çıkarımı için çeşitli ölçütler mevcuttur. Bunlar içerisinden standart sapma (STD), ortalama (AVG), ortanca (medyan), varyans ve en sık tekrar eden değer (mod) olmak üzere 5 adet ölçüt kullanılmıştır [34-36]. İlk aşamada, her bir hareket örneğine ait özellikler için bu ölçütler tek tek uygulanmış ve her biri için birer değer elde edilmiştir. Elde edilen toplam 5 değer, her bir örnek özelliği için ayrı ayrı hesaplandıktan sonra birleştirilerek yeni bir veri kümesi oluşturulmuştur. Her biri farklı uzunlukta olan kimlik doğrulama örneklerinin her bir özelliği için anılan ölçütler hesaplanarak örnek bu ölçütler ile temsil edilir hale getirilmiştir. Bu işlem sonucunda, farklı uzunluk ve sürelere sahip veri kümesinin boyutunun eşitlenmesi gerçekleştirilmiştir. Her bir orijinal özellik için beş farklı istatistiksel ölçüt (ortalama, standart sapma, ortanca, varyans, mod) hesaplanarak, 85 orijinal özellik 425 özelliğe genişletilmiştir ($85 \times 5 = 425$). Ayrıca, 40 denekten her biri için 10 tekrar alınarak toplam 400 örnek elde edilmiştir ($40 \times 10 = 400$). Böylece, veri kümesi (400×425) boyutuna dönüştürülmüştür. Bir kullanıcının bir örneklem içinden 4 özellik bilgisi içeren orijinal veriler ve özellik çıkarımı sonrası oluşan verilere ait grafik Şekil 5'te sunulmuştur. Kullanılan bu 4 özellik parmak ucu (TipPosition) pozisyon noktaları arası mesafe bilgisidir.



Şekil 5. Bir kullanıcının bir örneklem içinden seçilen beş özelliğe (a) ve özellik çıkarımı sonrası veriler (b)

VI. ÖZELLİK SEÇİMİ

Özellik seçimi orijinal veri kümesinden en iyi, etkin ve nitelikli özelliklerin seçimi olarak tanımlanmaktadır. Büyük boyutlu ve özellik sayısı fazla olan veri kümelerinde kullanılması kaynak optimizasyonu, sonuç doğruluğu, çalışma süresi, etkin kullanım gibi avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, PCC yöntemi kullanılmıştır. PCC, iki değişken ya da özellik arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için önemli yöntemlerden birisidir. Veri analizi süreçlerinde, özellikler arasındaki doğrusal bağlantıyı değerlendirerek karar verme süreçlerinde, ilişkilerin güçlülüğünü ve yönünü belirlemede ve sonuçların genellenebilirliğini sağlamada önemli bir rol oynamaktadır.

PCC tekniği, özellikler arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü istatistiksel olarak ölçme amacı ile kullanılan bir yöntemdir. Kovaryans yöntemine dayanmaktadır. İki özellik kovaryansının standart sapmasına bölünmesiyle belirlenir. Bu teknik ile veri kümesindeki her bir özellik için korelasyon katsayısı bulunarak, özellikler arasında bulunan doğrusal bağımlılık ilişkisi ortaya çıkarılır [37,38]. Korelasyon katsayısı [-1,1] arasında bir değer almaktadır. Özelliklere ait elde edilen değerler mutlak değeri alındıktan sonra sıralanarak en yüksek değere sahip olanlar seçilir. P, özellikler arasındaki Pearson korelasyonun katsayısını gösterir ve eşitlik (5)'deki gibi tanımlanır. Eşitlikte **x** ve **y** veri kümesi içindeki iki özellik değeri ve $\boldsymbol{\sigma_x}$ ile $\boldsymbol{\sigma_y}$ sırasıyla **x** ve **y** özelliklerinin standart sapmalarını temsil etmektedir.

$$P = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \, \sigma_y} \tag{5}$$

VII. BOYUT İNDİRGEME YÖNTEMLERİ

Boyut indirgeme yöntemleri, yüksek boyutlu veri kümesinden gereksiz ve bağımlı özellikleri çıkararak daha düşük boyutlu bir veri kümesi elde etmek için kullanılır. Bu çalışmada, makine öğrenimi uygulamaları için önişleme aşamasında boyut azaltmak amacıyla PCA ve LDA yöntemleri tercih edilmiştir.

A. Temel Bileşenler Analizi (PCA, Principal Component Analysis)

PCA, makine öğrenimi, veri madenciliği ve istatistik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir doğrusal boyut azaltma tekniğidir. PCA, veri kümesindeki olası bağımlı değişkenleri, temel bileşenler adı verilen doğrusal bağımsız değişkenlere dönüştürmek için ortogonal dönüşüm yöntemini kullanır. Eşitlikte **n** veri kümesi toplam boyutu, $\bar{\boldsymbol{x}}$ veri kümesi ortalaması, $\boldsymbol{T}$ transpozu ve $\boldsymbol{x_i}$ **i.** özellik değerini temsil etmektedir. PCA yönteminde, ***d*** boyutlu ***n*** örnekli bir veri kümesi X= $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ için, kovaryans matrisi eşitlik(6) ile ifade edilir:

$$cov_{ij} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \tag{6}$$

Bu hesaplama sürecinde, ilk olarak verinin ortalama değeri her bir elemandan çıkarılarak merkezleme işlemi gerçekleştirilir. Ardından, kovaryans matrisi, iki veya daha fazla rastgele değişken kümesi arasındaki korelasyon gücünü ölçmek için hesaplanır. Sonraki adımda, öz değer-öz vektör ayrıştırma yöntemi kullanılarak kovaryans matrisinin öz değerleri ve öz vektörleri elde edilir. Devamında, bileşenler seçilerek bir özellik vektörü oluşturulur; burada en yüksek özdeğere sahip özvektör, veri kümesinin temel bileşeni olarak belirlenir. Son aşamada ise boyutu değiştirilmiş yeni bir veri kümesi elde edilmiş olur [39,40].

B. Doğrusal Ayırım Analizi(LDA, Linear Discriminant Analysis)

LDA, veri nesnelerinin sınıf bilgisini dikkate alarak sınıfların en iyi şekilde ayrıldığı uzaydaki vektörleri bulmayı hedefleyen bir doğrusal boyut indirgeme tekniğidir [41]. PCA yöntemiyle birlikte en yaygın kullanılan teknikler arasındadır [40]. Bu teknik, veri kümesindeki farklı sınıflara ait grupların doğrusal ayrılabilirliğini en üst düzeye çıkararak boyut azaltma işlemi gerçekleştirir. $\boldsymbol{S_B}$ eşitliğinde ***c*** sınıfların sayısını, $\boldsymbol{x_i}$ **i.** sınıfın ortalamasını,

$\bar{\boldsymbol{x}}$ tüm sınıfların ortalaması ve $\boldsymbol{T}$ transpozu temsil eder. $\boldsymbol{S_W}$ eşitliğinde ise $\boldsymbol{N_i}$ **i.** sınıftaki örnek sayısını ve $\boldsymbol{x_{i,j}}$ **i.** sınıftaki **j.** örneği temsil etmektedir. LDA yöntemi için, boyut indirgeme işleminde sınıflar arası saçılım matrisi $\mathbf{S_B}$ ve sınıf içi saçılım matrisi $\mathbf{S_W}$ aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$S_B = \sum_{i=1}^{c} (\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} - \bar{x})(\bar{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} - \bar{x})^T \tag{7}$$

$$S_w = \sum_{i=1}^{c} \sum_{j=1}^{N_i} (x_{i,j} - \bar{x})(x_{i,j} - \bar{x})^T \tag{8}$$

İlk olarak, sınıflar arası saçılım matrisi olan $\boldsymbol{S_B}$, farklı sınıfların ortalamaları arasındaki mesafeyi hesaplamak için kullanılır. Ardından, sınıf içi saçılım matrisi olarak bilinen $\boldsymbol{S_W}$ ise her sınıfın ortalaması ile örnekleri arasındaki mesafeyi belirler. Devamında, saçılım matrisleri için özvektörler ve bunlara karşılık gelen özdeğerler hesaplanır. Daha sonra, özdeğerler sıralanır ve en yüksek özdeğerlere sahip özvektörler seçilerek yeni bir matris oluşturulur. Son olarak, veri kümesi ile bu matrisin iç çarpımı alınarak yeni bir veri kümesi elde edilir.

VIII. MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMLERİ

Makine öğrenimi, istatistiksel, olasılıksal ve optimizasyon modeller kullanarak bilgisayarların veriden öğrenmesini ve bu öğrenilen bilgiyi çeşitli görevlerde uygulamasını sağlar. Makine öğrenimi, hızla gelişen bir alan olup, veri bilimi, yapay zeka ve analitik teknolojilerle birleşerek daha akıllı ve etkili sistemler geliştirilmesini sağlar [42]. Makine öğrenmesinde sınıflandırıcılar, otomatik karar verme sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Gelen verinin hangi sınıfa ait olduğunu belirlememize yardımcı olurlar. Sınıflandırma işlemi için birçok algoritma mevcuttur ve bunlar farklı veri kümelerinde farklı sonuçlar elde edebilir. Bu nedenle, elimizdeki verilere en uygun sınıflandırıcıyı seçmek, doğru kararlar almak açısından büyük önem taşır. Çalışmada farklı makine öğrenmesi algoritmaları tercih edilmiştir. Destek vektör makinesi, ileri beslemeli yapay sinir ağı, derin sinir ağları, aşırı öğrenme makinesi ve çekirdek tabanlı aşırı öğrenme makinesi modeli kullanılmıştır. Sırasıyla geleneksel makine öğrenimi algoritması, tek katmanlı sinir ağı, çok katmanlı sinir ağı, temel ve çekirdek tabanlı aşırı öğrenme sinir ağı algoritmaları kullanılmıştır. Bu makine öğrenimi yöntemlerinin özellik seçimi ve boyut indirgemeye bağlı olarak başarım ve çalışma süreleri karşılaştırma imkanı sağlanmıştır.

A. Aşırı Öğrenme Makinesi (ELM, Extreme Learning Machines)

Son dönemde, ELM makine öğrenimi alanında dikkat çeken bir öğrenme yöntemi haline gelmiştir. Huang ve arkadaşları [43], bu yöntemi ELM olarak adlandırılan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. ELM, rastgele belirlenen giriş ağırlıkları ile analitik olarak hesaplanan çıkış ağırlıklarına sahip tek gizli katmanlı ileri beslemeli (SLFN) bir yapay sinir ağı modelinin özelleştirilmiş halidir. Bu nedenle, aşırı öğrenme makinelerinin çalışma prensipleri, YSA'nın prensipleriyle belirli bir ölçüde benzerlik göstermektedir. Ancak, aşırı öğrenme makinelerinde gizli katmandaki ağırlıklar rastgele atanmakta ve eğitim sürecinin ilerleyen aşamalarında güncellenmemektedir. Gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlıklar ise tek bir seferde, doğrusal bir model aracılığıyla analitik ve hızlı bir şekilde belirlenmektedir. Bu modelde, giriş katmanındaki nöronların ağırlıkları ve gizli katmandaki nöronların eşik değerleri rastgele üretilirken, gizli katmandaki çıkış ağırlıkları analitik olarak hesaplanmaktadır [44]. Modelin en önemli avantajı, öğrenme sürecinin çok hızlı gerçekleşmesidir. ELM'de gizli katmanda sigmoid, sinüs ve gaussian gibi aktivasyon fonksiyonları kullanılırken, çıkış katmanında doğrusal bir fonksiyon tercih edilmektedir [45]. Deneysel sonuçlar bu algoritmanın iyi bir genelleme başarımı sunduğunu göstermiştir. İleri beslemeli sinir ağları için bilinen algoritmalardan çok hızlı öğrenebildikleri ifade edilmiştir. **N** örnek ve **m** sınıftan oluşan bir $\{(x_j, t_j)\}_{j=1}^{N}$ eğitim örneği kümesi için, **L** gizli düğümlü ve **g(x)** aktivasyon fonksiyonlu SLFN aşağıdaki eşitlik(9) ile ifade edilir.

$$\sum_{i=1}^{L} \beta_i \; g(w_i \,.\, x_j + \mathrm{b_i}) = O_j \;, j=1,\ldots,N \tag{9}$$

Burada $x_j = [x_{j1}, x_{j2}, \ldots, x_{jN}]^T$, $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \ldots, w_{iN}]^T$, $t_j = [t_{j1}, t_{j2}, \ldots, t_{jm}]^T$ ve $\boldsymbol{b_i}$ sırasıyla girdi parametreleridir. $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \ldots, w_{iN}]^T$ ***i.*** gizli düğüm ile giriş düğümlerini birbirine bağlayan, $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \ldots, \beta_{im}]^T$ ise ***i.*** gizli düğüm ile çıkış düğümlerini birbirine bağlayan ağırlık vektörüdür. $\boldsymbol{b_i}$ ***i.*** gizli düğüm eşiği ve $\boldsymbol{O_j}$ ise $\boldsymbol{x_j}$ girişine göre gerçek ağ çıkışıdır.

Gizli katman çıkış matrisi **H** ve eşitlik sırasıyla (10)(11) ile ifade edilir:

$$\mathbf{H}(\mathrm{w_1}, \ldots \mathrm{w_L}, \mathrm{x_1}, \ldots \mathrm{x_N}, b_1, \ldots \ldots b_L) = \begin{bmatrix} \mathrm{g}(\mathrm{w_1}.\mathrm{x_1} + \mathrm{b_1}) & \ldots & \mathrm{g}(\mathrm{w_L}.\mathrm{x_1} + \mathrm{b_L}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathrm{g}(\mathrm{w_1}.\mathrm{x_N} + \mathrm{b_1}) & \ldots & \mathrm{g}(\mathrm{w_L}.\mathrm{x_N} + \mathrm{b_L}) \end{bmatrix}_{\boldsymbol{LXN}} \tag{10}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{LXm}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_N^T \end{bmatrix}_{NXm} \tag{11}$$

Çıkış ağırlık matrisi $\boldsymbol{\beta}$ ise eşitlik (12) ile ifade edilir. **T** ise istenen hedef çıktı matrisidir.

$$\beta = \mathbf{H}^{\dagger}\,\mathbf{T} \tag{12}$$

B. Çekirdek Tabanlı Aşırı Öğrenme Makinesi (K-ELM, Kernel Extreme Learning Machines)

Huang ve arkadaşları [46-51], kernel çekirdek yöntemini aşırı öğrenme makinesi ile birleştirerek K-ELM geliştirmiştir. Girdi ağırlıkları ve bias değeri, eğitim kümesinden bağımsız olarak rastgele belirlenir. Gradyan tabanlı yöntemlerde ise en uygun parametreler iteratif bir süreçle bulunur ve bu süreç genellikle uzun sürer. Bu nedenle, aşırı öğrenme makinesinin öğrenme süreci, klasik geri yayılım algoritmalarına göre daha hızlı ve kolaydır. Ancak, gizli düğüm sayısı sabit tutulsa bile, girdi ağırlıkları ve bias değerlerinin her sınıflandırmada rastgele seçilmesi, sınıflandırma doğruluğunda dalgalanmalara yol açmaktadır. Bu durumu çözmek amacıyla, aşırı öğrenme makinesinin gizli katmanı yerine bir çekirdek fonksiyonu kullanılmasını önermişlerdir. Böylece, girdi ve gizli katmanlar arasındaki ağırlıkların rastgele belirlenmesine gerek kalmamaktadır. [52-54].

Kernel-ELM'de, $\emptyset_i(\mathrm{x})$ matrisinde her bir giriş verisi için çekirdek fonksiyonu uygulanır. Çalışmada gaussian (RBF) çekirdek fonksiyonu kullanıldığından eşitlik (13) ile ifade edilir:

$$\emptyset_i(\mathrm{x}) = \emptyset(\mu_i, \sigma_i, x) = \exp\left(\frac{-||X-\mu_i||^2}{\sigma_i}\right) \tag{13}$$

$\mu_i = [\mu_{i1}, \mu_{i1}, \ldots, \mu_{iN}]^T$ ***i.*** çekirdek fonksiyonunun merkezi, ***x*** ise giriş verisi, $\boldsymbol{\sigma_i}$ ise ***i.*** çekirdek genişliğini ve verilerin yayılımını kontrol eder. $\boldsymbol{\mu_i}$ modelin öğrenme sürecinde, veriler arasındaki ilişkileri temsil eder. **N** örnek ve **m** sınıftan oluşan bir $\{(x_j, t_j)\}_{j=1}^{N}$ eğitim örneği kümesi için ve **L** gizli düğümlü RBF aşağıdaki eşitlik (14) ile tanımlanır.

$$\sum_{i=1}^{L} \beta_i\, \emptyset_i\; x_j = \boldsymbol{o_j}\,, j=1,\ldots.,N, \tag{14}$$

H tahmin matrisini, $\boldsymbol{\emptyset_i(\mathbf{x})}$ çekirdek fonksiyonu ile dönüştürülmüş giriş verilerini ve $\boldsymbol{\beta}$ ise çıktılara karşılık gelen ağırlıkları temsil eder. $\boldsymbol{\beta}$ ise en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır. Gizli katman çıkış matrisi **H** eşitlik sırasıyla (15)(16)(17) ile ifade edilir:

$$\mathbf{H}(\mu_1, \ldots, \mu_{\mathrm{N}}, \sigma_1, \ldots, \sigma_{\mathrm{N}}, x_1, \ldots, x_N) = \begin{bmatrix} \emptyset(\mu_{\mathbf{1}}.\sigma_{\mathbf{1}} + \mathrm{x}_1) & \ldots & \emptyset(\mu_{\mathbf{L}}.\sigma_{\mathbf{L}} + \mathrm{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \emptyset(\mu_{\mathbf{1}}.\sigma_{\mathbf{1}} + \mathrm{x}_{\mathrm{N}}) & \ldots & \emptyset(\mu_{\mathbf{L}}.\sigma_{\mathbf{L}} + \mathrm{x}_{\mathrm{N}}) \end{bmatrix}_{\boldsymbol{LXN}} \tag{15}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{LXm}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_N^T \end{bmatrix}_{NXm} \tag{16}$$

$$\mathbf{H} = \emptyset_i(\mathrm{x}) \cdot \beta \tag{17}$$

Temel ELM sınıflandırıcıda hücre sayısı 100 ve sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çekirdek tabanlı K-ELM sınıflandırıcıda *RBF_kernel* fonksiyonu tercih edilmiştir. K-ELM'de hücre sayısının kullanılmasına gerek yoktur. K-ELM algoritması için düzenleme katsayısı C (18)'deki eşitlik ile belirlenmiştir. Düzenleme katsayısı genellikle veri kümesine bağlı olarak değişmektedir. Burada X veri kümesini temsil etmektedir.

$$\mathrm{C} = \max(\mathrm{eig}(\mathrm{X}'\mathrm{X})) \tag{18}$$

C. Destek Vektör Makinesi (SVM, Support Vector Machine)

SVM, regresyon ve sınıflandırma analizlerinde yaygın olarak kullanılan esnek ve yüksek performanslı bir makine öğrenme algoritmasıdır. SVM, veri noktalarını yüksek boyutlu bir özellik uzayında en iyi şekilde ayırmak amacıyla hiper düzlemler kullanır. Amacı, sınıflandırma probleminde farklı sınıfları en iyi şekilde ayıran bir sınır bulmaktır. SVM'nin temel prensibi, iki sınıf arasındaki en geniş ayırma sınırını bulmaktır [55]. Bu ayrım sınırı, destek vektörleri olarak bilinen ve sınıflandırma kararını etkileyen en yakın veri noktaları tarafından belirlenir. SVM'nin temel hedefi, bu ayırma sınırını en geniş yapacak hiper düzlemi bulmaktır. Bu genişlik, iki sınıf arasındaki en yakın veri noktalarının arasındaki mesafeyi ifade eder. Bu mesafenin maksimize edilmesi, modelin genelleme yeteneğini artırarak daha iyi sınıflandırma performansı sağlar. SVM, yalnızca doğrusal olarak ayrılabilen veri kümeleriyle değil, aynı zamanda doğrusal olarak ayrılabilir olmayan veri kümeleriyle de etkili bir şekilde çalışabilir. Çalışmada yaygın olarak kullanılan doğrusal çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır.

D. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı (FFNN, A feed-forward Artificial Neural Network)

FFNN, yaygın olarak girdi verilerini önceden tanımlanmış sınıflara ayırmak üzere kullanılmaktadır. Her katmanın bir sonraki katmana tamamen bağlı olduğu düzenlenmiş sinir hücrelerinden oluşur. Bu model, özellikleri alan bir giriş katmanından, verileri işleyip dönüştüren bir veya daha fazla gizli katmandan ve sınıf olasılıklarını

üreten bir çıkış katmanından oluşmaktadır [56]. Her katman bir sonraki katmana tamamen bağlıdır, bu da ağın veriler içindeki karmaşık desenleri ve ilişkileri öğrenmesine olanak tanır. İleri ve geri geçişlerden oluşan bir süreç sayesinde geriye yayılım, ağın bağlantılarının ağırlıklarını yinelemeli olarak ayarlamasını sağlayarak tahmin edilen çıktılar ile gerçek hedefler arasındaki tutarsızlığı en aza indirir. Model daha çok yeni veriler geldikçe ağın parametrelerini güncelleyerek kademeli öğrenmeyi sağlamaya odaklanmıştır. Ağ, giriş özelliklerinden çıkış sınıflarına olan eşleştirmeyi optimize etmek ve doğrusal dışı özellik katmak için ReLU gibi aktivasyon fonksiyonları kullanmaktadır. Çalışmada ReLU aktivasyon fonksiyonlu 100 nöron içeren tek gizli katmanlı, çıkış katmanında da Softmax aktivasyon kullanılan bir sinir ağı modeli oluşturulmuş ve kullanılmıştır.

E. Derin Sinir Ağları (DNN, Deep Neural Networks)

DNN, yapay zeka ve makine öğreniminde önemli bir rol oynayan, çok katmanlı yapay sinir ağı modelleridir. Genel olarak, bir girdi katmanı, bir veya daha fazla gizli katman ve bir çıktı katmanı bulunur. DNN, katmanlar halinde düzenlenmiş ve birbirine bağlı nöronlardan oluşur. DNN'nin derin sinir ağı olarak adlandırılmasının sebebi, mimarisinde birden fazla gizli katmanın yer almasıdır. Gizli katmanlardaki nöron sayısı, sınıflandırma doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir. DNN mimarisini klasik yapay sinir ağlarından ayıran en belirgin özellik, çok katmanlı yapısı ve her katmanda barındırdığı yüksek sayıda nörondur. [57-59]. Bu derinlik, ağın karmaşık verileri daha iyi modelleyebilmesine ve yüksek düzeyde soyutlama gerçekleştirebilmesine olanak tanır. Bu farklılık, modelin karmaşıklığını ve öğrenme yeteneğini artırma potansiyelini gösterir. Ancak, katman sayısının artması, daha fazla parametre ve hesaplama kaynağı gereksinimini de beraberinde getirir. Her katman, ağın öğrenme sürecine önemli bir katkı sağlar. Gizli katman sayısının artması, ağın daha karmaşık ve özel özellikler öğrenmesine imkan tanırken, eğitim sürecini de zorlaştırabilir. Derin öğrenme modellerindeki katmanlar, bilgiyi bir önceki katmandan alıp bir sonraki katmana aktararak modelin temel yapı taşlarını oluşturur.

Bu çalışmada geliştirilen modelde bir giriş katmanı, üç gizli katman ve bir çıkış katmanı bulunmaktadır. İlk gizli katmanda 100, ikinci katmanda 50 ve üçüncü katmanda 25 nöron yer almıştır. Gizli katmanlarda ReLU aktivasyon fonksiyonu, son katmanda ise softmax kullanılmıştır. Modelin optimizasyonu için Adam algoritması tercih edilmiştir. Diğer parametreler, eğitim döngüsü sayısı 50, mini-yığın (batch) boyutu 128, öğrenme oranı 0.01, gradyan eşik değeri 1 olarak alınmıştır.

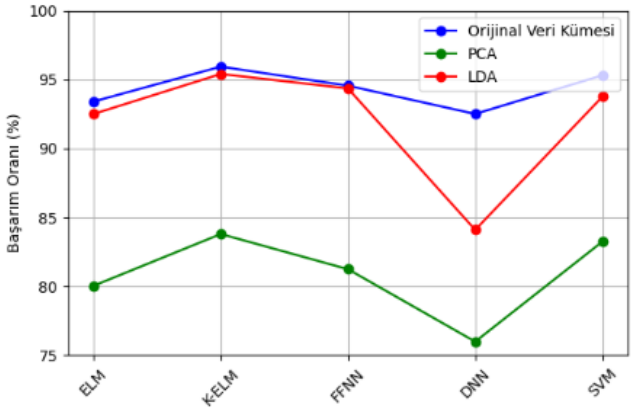
IX. DENEYSEL SONUÇLAR

Başarım oranlarının incelenmesinde, 40 denekten elde edilen 400 örnek içeren orijinal veri kümesi üzerinde iki aşamalı özellik seçimi ve boyut indirgeme işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk aşama PCC özellik seçim algoritması kullanılarak kritik özelliklerin seçimi için alt veri kümeleri oluşturulmuştur. Kritik özelliklerin seçiminde oransal ve kademeli olarak özellik sayıları azaltılmıştır. Özellik seçimleri oransal ve kademeli olarak sırasıyla yüzde 75, 50, 25 ve 13'e düşürülmüştür. Bu aşamada 4 oransal yüzdeliğe göre kademeli düşürülerek en iyi özellik seti belirlenmek istenmiştir. İkinci aşamada orijinal ve özellik seçimi ile elde edilen veri kümeleri PCA ve LDA yöntemleri ile boyut indirgenerek yeni veri kümeleri oluşturulmuştur. Boyutu indirgenmiş veri kümeleri ile birlikte tüm veri kümeleri sınıflandırma sürecinde kullanılmıştır. Özellik seçimi ve boyut indirgeme yöntemleri ile elde edilen veri kümelerinin başarım oranlarının karşılaştırılması ve en yüksek başarım oranına sahip özellik alt kümelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Tablo ve şekillerdeki sonuçlar test sürecindeki başarım oranlarıdır. Çalışma süreleri ise eğitim ve test aşamasında geçen süre alınmıştır. ELM ve K-ELM sınıflandırıcılar için eğitim sürecindeki başarım oranları yazılmamıştır. PCA ve LDA süreçlerinde %98 oranında veriyi temsil eden özellik sayısı alınmıştır.

Makine öğrenimi sınıflandırıcıları kullanılarak ilk aşamada özellik çıkarımları ile dönüştürülen 425 özellik seti içeren orijinal veri kümesi ve 2 boyut indirgeme tekniği ile oluşturulan veri kümelerinin başarım oranlarına bakılmıştır. Bu aşamada boyut indirgeme yöntemleri sonucu 114 PCA ve 35 LDA özellik setine düşürülmüştür. Makine öğrenimi algoritmalarının birinci aşama için başarım oranları ve çalışma süreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo 1'deki başarım oranı grafikleri ise Şekil 6'da verilmiştir. Bu 3 veri kümesine bakıldığında kullanıcı kimlik doğrulama için en yüksek sınıflandırma başarım oranı K-ELM ile elde edilmiştir. Sınıflayıcılar arasında çalışma süresi en kısa olan K-ELM'dir. Deneysel sonuçlara göre, LDA boyut indirgemenin PCA'ya göre daha iyi başarım ile sonuçlandığı gözlenmiştir.

Tablo 1. Birinci aşama veri kümelerinin sınıflandırma başarım oranları ve çalışma süreleri

1. AŞAMA						
	Orijinal veri Kümesi (425)		PCA (114 özellik)		LDA (35 özellik)	
Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)
ELM	93,40	0,0335	80,05	0,0062	92,50	0,0067
K-ELM	**95,93**	**0,0191**	**83,80**	**0,0056**	**95,40**	**0,0051**
FFNN	94,55	1,0631	81,25	0,2304	94,35	0,2011
DNN	92,50	6,1189	76,00	2,8553	84,10	2,6278
SVM	95,30	9,0028	83,25	8,5663	93,75	8,2863

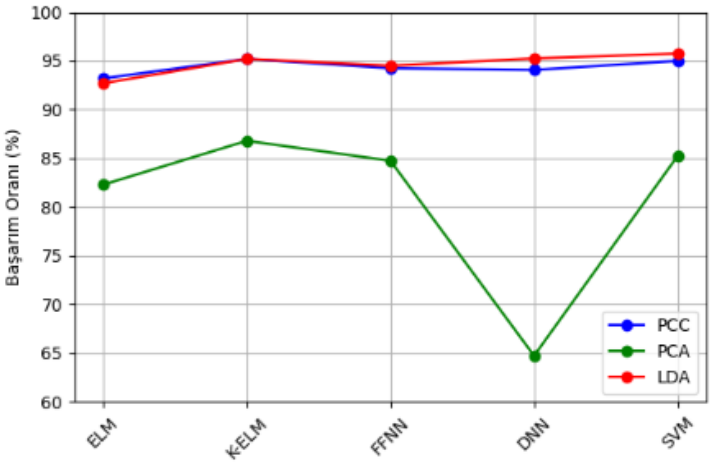


Şekil 6. Birinci aşama veri kümelerinin sınıflandırma başarım oranları

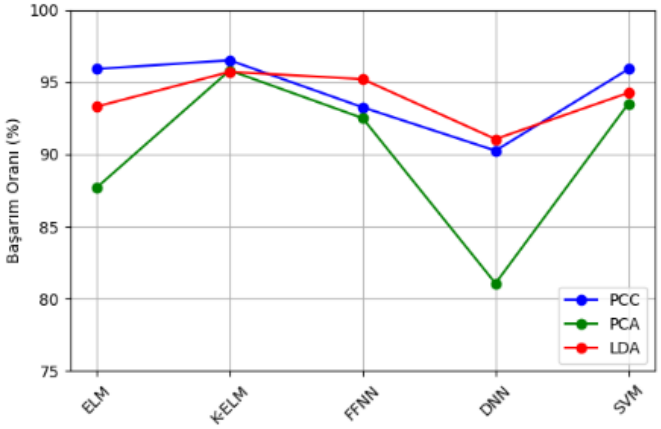
İkinci aşamada 425 özellik seti içeren orijinal veri kümesinin yüzde 75 (320 özellik) oranında en iyi özellik seti PCC özellik seçimi yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Bu aşamada ikinci işlem olarak yeni özellik setine boyut indirgeme yöntemleri uygulanarak 91 PCA ve 32 LDA özellik setine düşürülmüştür. Üçüncü aşamada da orijinal veri kümesinin yüzde 50 (213 özellik) oranında en iyi özellik seti PCC özellik seçimi yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Burada ikinci işlem olarak boyut indirgeme yöntemleri uygulanarak 60 PCA ve 28 LDA özellik setine düşürülmüştür. Her iki aşama için bakıldığında biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama için en yüksek sınıflandırma başarım oranı K-ELM ile elde edilmiştir. Çalışma süreleri açısından en hızlı sınıflayıcıda K-ELM'dir. İki aşama içinde en iyi boyut indirgeme yöntemi LDA olarak görünmektedir. Makine öğrenimi sınıflandırıcıların bu aşamalar için başarım oranları ve çalışma süreleri Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2'deki başarım oranı grafikleri ise sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 2. İkinci ve üçüncü aşama veri kümelerinin sınıflandırma başarım oranları ve çalışma süreleri

	2.AŞAMA						3.AŞAMA					
	PCC (320 özellik)		PCA (91 özellik)		LDA (32 özellik)		PCC (213 özellik)		PCA (60 özellik)		LDA (28 özellik)	
Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)
ELM	93,20	0,0142	82,30	0,006	92,70	0,0069	95,90	0,0141	87,70	0,0071	93,30	0,0069
K-ELM	**95,20**	**0,0112**	**86,80**	**0,0044**	**95,20**	**0,0053**	**96,50**	**0,0112**	**95,80**	**0,0052**	**95,70**	**0,0052**
FFNN	94,25	0,6948	84,75	0,2064	94,50	0,1973	93,25	0,6573	92,50	0,2061	95,20	0,1801
DNN	94,07	5,1418	64,75	2,7792	95,25	2,6207	90,25	5,2896	81,07	2,7398	91,05	2,7095
SVM	95,00	9,6787	85,25	8,5404	95,75	8,3221	95,89	9,3019	93,50	8,4569	94,25	8,4028



Şekil 7. İkinci aşama veri kümülerinin sınıflandırma başarım oranları

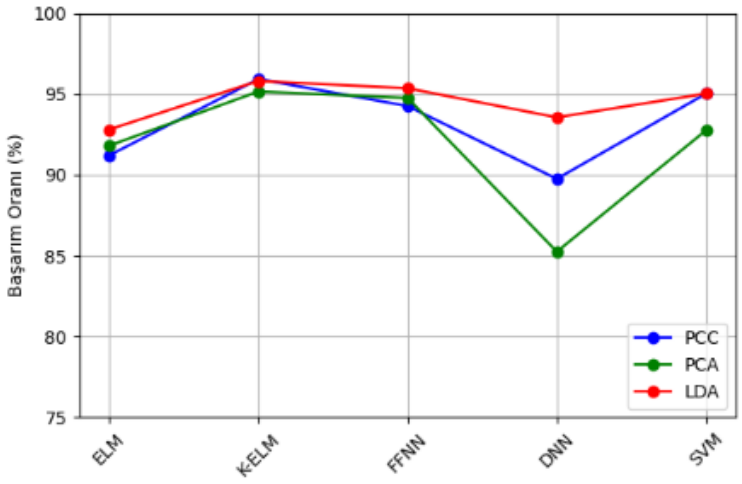


Şekil 8. Üçüncü aşama veri kümülerinin sınıflandırma başarım oranları

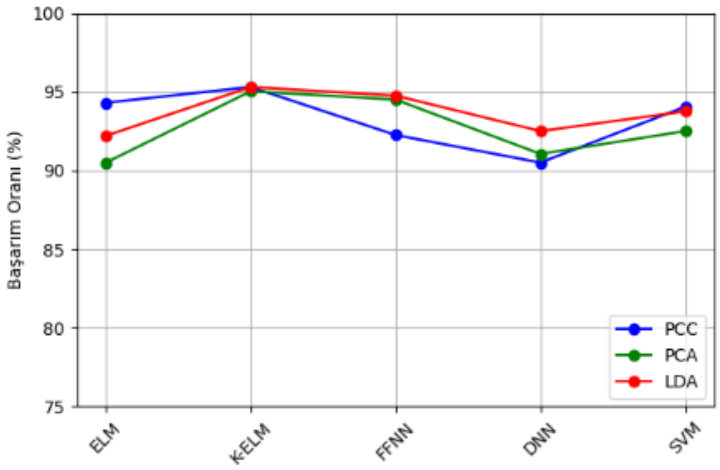
Dördüncü aşamada orijinal veri kümesinin yüzde 25 (107 özellik) oranında en iyi özellik seti PCC özellik seçimi yöntemi uygulanarak çıkarılmıştır. İkinci adım olarak boyut indirgeme yöntemleri uygulanarak 30 PCA ve 19 LDA özellik setine düşürülmüştür. Beşinci aşamada da orijinal veri kümesinin yüzde 13 (55 özellik) oranında en iyi özellik seti PCC özellik seçimi yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Burada ikinci adım olarak boyut indirgeme yöntemleri uygulanarak 15 PCA ve 11 LDA özellik setine düşürülmüştür. Her iki aşama için bakıldığında en yüksek sınıflandırma başarım oranı K-ELM ile elde edilmiştir. Çalışma süreleri açısından en hızlı sınıflayıcıda K-ELM'dir. İki aşama içinde en iyi boyut indirgeme yöntemi LDA olarak görünmektedir. Bu aşamalar için başarım oranları ve çalışma süreleri Tablo 3'de sunulmuştur. Tablo 3'deki başarım oranı grafikleri ise sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'de verilmiştir.

Tablo 3. Dördüncü ve beşinci aşama veri kümülerinin sınıflandırma başarım oranları ve çalışma süreleri

	4.AŞAMA						**5.AŞAMA**					
	PCC (107 özellik)		PCA (30 özellik)		LDA (19 özellik)		PCC (55 özellik)		PCA (15 özellik)		LDA (11 özellik)	
Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)	Doğruluk (%)	Ç. Süresi (sn)
ELM	91,20	0,0333	91,80	0,0069	92,80	0,0068	94,30	0,0105	90,50	0,0058	92,20	0,0056
K-ELM	**95,92**	**0,0154**	**95,15**	**0,0054**	**95,80**	**0,0049**	**95,30**	**0,0085**	**95,03**	**0,0040**	**95,30**	**0,0041**
FFNN	94,25	0,7721	94,75	0,2058	95,35	0,1837	92,25	0,4520	94,50	0,1559	94,75	0,1525
DNN	89,75	6,0631	85,25	2,9347	93,55	2,7344	90,50	4,8363	91,05	2,5683	92,50	2,4184
SVM	95,02	9,5993	92,75	8,6100	95,02	8,5449	94,05	7,6328	92,50	6,4539	93,75	6,5291



Şekil 9. Dördüncü aşama veri kümülerinin sınıflandırma başarım oranları



Şekil 10. Beşinci aşama veri kümülerinin sınıflandırma başarım oranları

Özellik seçimi ve boyut indirgeme yöntemlerinin çalışma sürelerine bakıldığında LDA sınıf içi ve sınıf dışı hesaplama yaptığından çok küçük de olsa yavaştır. Veri kümelerinin boyutları küçüldükçe bu yöntemlerin çalışma süreleri birbirine yaklaşmaktadır. Makine öğrenimi algoritmaları ile kıyasladığımızda ise ELM ve K-ELM algoritmaları ile yakın değerler verirken diğerlerine göre çok hızlıdırlar. Bu ön işlem aşama süreçlerinde çalışma süreleri Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Özellik seçimi ve boyut indirgeme yöntemlerinin çalışma süreleri

	PCC	PCA	LDA
	Çalışma Süresi (sn)	Çalışma Süresi (sn)	Çalışma Süresi (sn)
Orijinal veri kümesi		0,036	0,126
PCC 320 özellik içeren veri kümesi	0,0198	0,026	0,079
PCC 213 özellik içeren veri kümesi	0,0191	0,021	0,044
PCC 107 özellik içeren veri kümesi	0,0188	0,020	0,022
PCC 55 özellik içeren veri kümesi	0,0187	0,017	0,018

Tüm aşamalarda yapılan uygulamalar incelendiğinde, K-ELM sınıflandırıcısının genel olarak diğer sınıflandırıcılara göre başarım oranlarını koruduğu ve en yüksek başarıyı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, K-ELM'nin kararlı bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. Algoritmaların farklı yapıları nedeniyle çalışma sürelerinde de farklılıklar ortaya çıkmıştır; en hızlı sınıflayıcı K-ELM'dir. PCA ve LDA uygulanan veri kümeleri, başarı, süre ve öznitelik sayısı bakımından karşılaştırıldığında, LDA'nın boyut indirgeme yöntemi olarak sınıflandırma algoritmalarında etkili olduğu gözlemlenmektedir. K-ELM'nin boyut indirgenmiş veri kümeleri üzerindeki başarım oranlarını koruduğu da gözlemlenmiştir. Oransal ve kademeli olarak özellik seçiminde kullanılan PCC

algoritmasının tüm aşamalarda iyi bir seçim yaptığı ve performans gösterdiği görülmüştür. Tüm uygulama aşamalarında algoritmalar içerisinde çalışma süresi en yavaş SVM ve başarım oranı en düşük DNN olmuştur. İki aşamalı süreçle özellik sayısının azaltılması ve boyut küçültülmesi, oluşturulan veri kümelerinin hesaplama, süre, depolama ve başarım açısından avantaj sağlamaktadır.

X. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışmada, tek elle gerçekleştirilen LM tabanlı biyometrik kullanıcı kimlik doğrulama modeli ile yeni bir yaklaşım tarzı sunulmuştur. LM, birçok açıdan sunduğu avantajlar nedeniyle benzer cihazlar arasında tercih edilmiştir. Ayrıca, LM cihazı biyometrik kimlik doğrulama sürecinde çoğu ortamda kullanım imkanına sahiptir. Önerilen model, el hareket girdilerini kullanarak sunulan stratejiyi etkin bir şekilde değerlendirdiği için sağlamdır. Doğrulama modeli için farklı sınıflandırma yöntemleri kullanılmış ve başarımları analiz edilmiştir. Özgün oluşturulan veri kümesi kullanarak, veri setinin özellik sayısı azaltma ve boyut düşürme aşamalarında kimlik doğrulama başarımları birçok yönü ile ele alınmıştır. Kimlik doğrulama, farklı makine öğrenimi sınıflandırma türleriyle gerçekleştirilmiştir ve en iyi doğruluk %96 oranı ile K-ELM yaklaşımı kullanılarak kaydedilmiştir. Oransal ve kademeli özellik seçimi ve boyut indirgeme süreçlerinde PCC ve LDA ile elde edilmiş veri kümeleri ile her bir makine öğrenimi algoritmasının başarım oranlarının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada uygulanan strateji sayesinde, öznitelik seçimi ve boyut azaltma teknikleri kullanılarak yüksek sınıflandırma başarımı sağlanmıştır. Çalışmanın ilerleyen safhalarında, LM cihazı ile çok faktörlü yüksek güvenlik gerektiren kimlik doğrulama çalışması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Selbes, B., & Elihoş, A. (2023). Deep Learning Based Latent Palmprint Recognition. *In 2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference* (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
[2] Iula, A. (2021). Biometric recognition through 3D ultrasound hand geometry. *Ultrasonics*, 111, 106326.
[3] Aydemir, E., Tuncer, T., Dogan, S., & Unsal, M. (2021). A novel biometric recognition method based on multi kernelled bijection octal pattern using gait sound. *Applied Acoustics*, 173, 107701.
[4] Devi, R. M., Keerthika, P., Suresh, P., Sarangi, P. P., Sangeetha, M., Sagana, C., & Devendran, K. (2022). Retina biometrics for personal authentication. *In Machine Learning for Biometrics* (pp. 87-104).
[5] Ammour, B., Boubchir, L., Bouden, T., & Ramdani, M. (2020). Face–iris multimodal biometric identification system. *Electronics*, 9(1), 85.
[6] Bibi, K., Naz, S., & Rehman, A. (2020). Biometric signature authentication using machine learning techniques: Current trends, challenges and opportunities. *Multimedia Tools and Applications*, 79(1), 289-340.
[7] Wong, A. M. H., & Kang, D. K. (2016). Stationary hand gesture authentication using edit distance on finger pointing direction interval. *Scientific Programming*, 2016(1). DOI: 10.1155/2016/7427980.
[8] Imura, S., & Hosobe, H. (2018). A hand gesture-based method for biometric authentication. *In Human-Computer Interaction. Theories, Methods, and Human Issues: 20th International Conference*, HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15–20, 2018, Proceedings, Part I 20 (pp. 554-566). Springer International Publishing.
[9] Maruyama, K., Shin, J., Kim, C. M., & Chen, C. L. (2017). User authentication using leap motion. *In Proceedings of the international conference on research in adaptive and convergent systems* (pp. 213-216).
[10] Bernardos, A. M., Sánchez, J. M., Portillo, J. I., Wang, X., Besada, J. A., & Casar, J. R. (2016). Design and deployment of a contactless hand-shape identification system for smart spaces. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 7, 357-370.
[11] Manabe, T., & Yamana, H. (2019). Two-factor authentication using leap motion and numeric keypad. *In HCI for Cybersecurity, Privacy and Trust: First International Conference*, HCI-CPT 2019, Held as Part of the 21st HCI International Conference, HCII 2019, Orlando, FL, USA, July 26–31, 2019, Proceedings 21 (pp. 38-51). Springer International Publishing.
[12] Xu, W., Tian, J., Cao, Y., & Wang, S. (2017). Challenge-response authentication using in-air handwriting style verification. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 17(1), 51-64. doi:10.1109/TDSC.2017.2752164.
[13] Lu, D., Xu, K., & Huang, D. (2017). A data driven in-air-handwriting biometric authentication system. *In 2017 IEEE International Joint Conference on Biometrics (IJCB)* (pp. 531-537). IEEE.
[14] Lu, D., Huang, D., & Rai, A. (2019). FMHash: Deep hashing of In-Air-Handwriting for user identification. *In ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-7). IEEE.
[15] Saritha, L. R., Thomas, D., Mohandas, N., & Ramnath, P. (2017). *Behavioral biometric authentication using Leap Motion sensor*. Int. J. Latest Trends Eng. Technol, 8(1), 643-649.
[16] Xiao, G., Milanova, M., & Xie, M. (2016). Secure behavioral biometric authentication with leap motion. *In 2016 4th international symposium on digital forensic and security (isdfs)* (pp. 112-118). IEEE.
[17] Taher, M. M., & George, L. E. (2022). A digital signature system based on hand geometry. *Journal of Algebraic Statistics*, 13(3), 4538-4556.

[18] Chahar, A., Yadav, S., Nigam, I., Singh, R., & Vatsa, M. (2015). A leap password based verification system. *In 2015 IEEE 7th International Conference on Biometrics Theory, Applications and Systems (BTAS)* (pp. 1-6). IEEE.
[19] Shin, J., Islam, M. R., Rahim, M. A., & Mun, H. J. (2020). Arm movement activity based user authentication in P2P systems. *Peer-to-peer networking and applications*, 13(2), 635-646. DOI: 10.1007/s12083-019-00775-7.
[20] Wu, J., Konrad, J., & Ishwar, P. (2013). Dynamic time warping for gesture-based user identification and authentication with Kinect. *In 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 2371-2375). IEEE.
[21] Lai, K., Konrad, J., & Ishwar, P. (2012). Towards gesture-based user authentication. *In 2012 IEEE Ninth International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance* (pp. 282-287). IEEE.
[22] LM Cihazı. (2023). Leap Motion C# SDK Documentation. Retrieved from https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/csharp/index.html. Accessed September 11, 2024.
[23] Katılmış, Z., & Karakuzu, C. (2023). Double handed dynamic Turkish Sign Language recognition using Leap Motion with meta learning approach. *Expert Systems with Applications*, *228*, 120453.
[24] Katılmış, Z., & Karakuzu, C. (2021). ELM based two-handed dynamic Turkish sign language (TSL) word recognition. *Expert Systems with Applications*, *182*, 115213.
[25] Ameur, S., Khalifa, A. B., & Bouhlel, M. S. (2020). Hand-gesture-based touchless exploration of medical images with leap motion controller. *In 2020 17th International multi-conference on systems, signals & devices (SSD)* (pp. 6-11). IEEE.
[26] Ferreira, S. C., Chaves, R. O., Seruffo, M. C. D. R., Pereira, A., Azar, A. P. D. S., Dias, Â. V., ... & Brito, M. V. H. (2020). Empirical evaluation of a 3D virtual simulator of hysteroscopy using Leap Motion for gestural interfacing. *Journal of Medical Systems*, 44, 1-10.
[27] Korayem, M. H., Madihi, M. A., & Vahidifar, V. (2021). Controlling surgical robot arm using leap motion controller with Kalman filter. *Measurement*, 178, 109372.
[28] Korayem, M. H., Vosoughi, R., & Vahidifar, V. (2022). Design, manufacture, and control of a laparoscopic robot via Leap Motion sensors. *Measurement*, 205, 112186.
[29] Najafinejad, A., & Korayem, M. H. (2023). Detection and minimizing the error caused by hand tremors using a leap motion sensor in operating a surgeon robot. *Measurement*, 221, 113544.
[30] Tarakci, E., Arman, N., Tarakci, D., & Kasapcopur, O. (2020). Leap Motion Controller–based training for upper extremity rehabilitation in children and adolescents with physical disabilities: A randomized controlled trial. *Journal of Hand Therapy*, 33(2), 220-228.
[31] Aguilar-Lazcano, C. A., & Rechy-Ramirez, E. J. (2020). Performance analysis of Leap motion controller for finger rehabilitation using serious games in two lighting environments. *Measurement*, 157, 107677.
[32] Dunai, L., Novak, M., & García Espert, C. (2020). Human hand anatomy-based prosthetic hand. *Sensors*, *21*(1), 137.
[33] Geng, J., Zhang, W., Ge, Y., Wang, L., Huang, P., Liu, Y., ... & Cheng, X. (2024). Inter-rater variability and repeatability in the assessment of the Tanner–Whitehouse classification of hand radiographs for the estimation of bone age. *Skeletal Radiology*, 1-8.
[34] Vishnoi, V. K., Kumar, K., & Kumar, B. (2022). A comprehensive study of feature extraction techniques for plant leaf disease detection. *Multimedia Tools and Applications*, *81*(1), 367-419.
[35] Uçar, M. K., Örenç, S., Bozkurt, M. R., & Bilgin, C. (2017). Evaluation of the relationship between chronic obstructive pulmonary disease and photoplethysmography signal. In *2017 Medical Technologies National Congress (TIPTEKNO)* (pp. 1-4). IEEE.
[36] Şeker, D., & Özerdem, M. S. (2020). Classification and Statistical Analysis of Schizophrenic and Normal EEG Time Series. In *2020 Medical Technologies Congress (TIPTEKNO)* (pp. 1-4). IEEE.
[37] Sun, S., Hu, M., Wang, S., & Zhang, C. (2023). How to capture tourists' search behavior in tourism forecasts? A two-stage feature selection approach. *Expert Systems with Applications*, *213*, Article 118895. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118895
[38] Daru, A. F., Hanif, M. B., & Widodo, E. (2021). Improving neural network performance with feature selection using Pearson correlation method for diabetes disease detection. *JUITA: JurnalInformatika, 9*(1), 123–130. https://doi.org/10.30595/juita. v9i1.9941
[39] Hasan, B. M. S., & Abdulazeez, A. M. (2021). A review of principal component analysis algorithm for dimensionality reduction. *Journal of Soft Computing and Data Mining*, *2*(1), 20-30
[40] Choubey, D. K., Kumar, M., Shukla, V., Tripathi, S., & Dhandhania, V. K. (2020). Comparative analysis of classification methods with PCA and LDA for diabetes. *Current diabetes reviews*, *16*(8), 833-850.
[41] Martinez, M., & Kak, A. C. (2001). PCA versus LDA. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *23*, 228–233. https://doi.org/10.1109/34.908974
[42] Cruz, J. A., & Wishart, D. S. (2006). Applications of machine learning in cancer prediction and prognosis. *Cancer informatics*, *2*, 117693510600200030.

[43] Guang-BinHuang, Zhu, Q.-Y., & Siew, C.-K. (2006). Extreme learning machine: Theory and applications. *Neurocomputing , 70*, s. 489–501.
[44] Tang, J., Deng, C., Huang, G.-B., & Zhao, B. (2015). Compressed-Domain Ship Detection on Spaceborne Optical Image Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , 53* (3), s. 1174-1185.
[45] Huang, G. B. (2014). An Insight into Extreme Learning Machines: Random Neurons, Random Features and Kernels. *Cognitive Computation , 6* (3), s. 376-390.
[46] Cao, J., Lin, Z., Huang, G. B., & Liub, N. (2012). Voting based extreme learning machine. *Information Sciences , 185* (1), s. 66–77.
[47] Cambria, E., Huang, G.-B., Kasun, L. L., Zhou, H., Vong, C. M., Lin, J., et al. (2013). Extreme learning machines. *IEEE Intelligent Systems , 28* (6), s. 30–59.
[48] Cambria, E., Huang, G. B., Kasun, L. L. C., Zhou, H., Vong, C. M., Lin, J., ... & Liu, J. (2013). Extreme learning machines [trends & controversies]. *IEEE intelligent systems*, *28*(6), 30-59.
[49] Cao, F., Yang, Z., Ren, J., Chen, W., Han, G., & Shen, Y. (2019). Local block multilayer sparse extreme learning machine for effective feature extraction and classification of hyperspectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(8), 5580-5594.
[50] Cambria, E., Huang, G. B., Kasun, L. L. C., Zhou, H., Vong, C. M., Lin, J., ... & Liu, J. (2013). Extreme learning machines [trends & controversies]. *IEEE intelligent systems*, *28*(6), 30-59.
[51] Pal, M., Maxwell, A. E., & Warner, T. A. (2013). Kernel-based extreme learning machine for remote-sensing image classification. *Remote Sensing Letters*, 4(9), 853-862.
[52] Chen, C., Li, W., Su, H., & Liu, K. (2014). Spectral-spatial classification of hyperspectral image based on kernel extreme learning machine. *Remote Sensing*, 6(6), 5795-5814.
[53] Huang, G. B., Zhou, H., Ding, X., & Zhang, R. (2012). Extreme learning machine for regression and multiclass classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(2), 513-529.
[54] Zhou, L., & Ma, L. (2019). Extreme learning machine-based heterogeneous domain adaptation for classification of hyperspectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(11), 1781-1785.
[55] Huang, C.-L., Chen, M.-C., & Wang, C.-J. (2007). Credit scoring with a data mining approach based on support vector machines. *Expert Systems with Applications, 33*, s. 847–856.
[56] Tiboni, M., & Remino, C. (2024). Condition Monitoring of Pneumatic Drive Systems Based on the AI Method Feed-Forward Backpropagation Neural Network. *Sensors*, 24(6), 1783. https://doi.org/10.3390/s24061783
[57] Büyük, O., & Arslan, L. M. (2018). Age identification from voice using feed-forward deep neural networks. In *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
[58] Baştürk, A., Yüksel, M. E., Çalışkan, A., & Badem, H. (2017). Deep neural network classifier for hand movement prediction. In *2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
[59] Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 313(5786), 504-507. https://doi.org/10.1126/science.112764.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 290-300, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1557880
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Tane Boyutunun Polikristal NiAl Nano Telinin Mekanik Özelliklerine Etkisi: Moleküler Dinamik Çalışması

The Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Polycrystalline NiAl Nanowire: Study of Molecular Dynamics

Sefa Kazanç[1*]

Geliş / Received: 30/09/2024 ***Revize / Revised: 26/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 27/10/2024***

ÖZ

Bu çalışmada tek eksenli çekme gerilmesi altındaki polikristal NiAl nano telinin mekanik özelliklerine tane boyutunun etkisi Moleküler Dinamik (MD) benzetim yöntemi ile incelendi. Çekme deformasyonu sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrilerinden Young modülü, akma dayanımı, kopma gerilmesi değerleri belirlendi. Meydana gelen yapısal değişimleri tespit etmek için ortak komşu analiz yöntemi (Common Neighbor Analysis-CNA) kullanılarak belirlenen atomik konumlardan yararlanıldı. Elde edilen sonuçlardan Gömülmüş Atom Metodu (GAM) potansiyel fonksiyonu ile modellenen polikristal nano tel alaşım sistemde tane boyutunun tanelerin hareket mekanizmalarını, tane sınırlarını ve tane boyutu ile akma dayanımı arasındaki ilişkiyi etkilediği tespit edildi. Bu ilişkiden Hall-Petch etkisi ve belirli bir kritik tane büyüklüğünden sonra ters Hall-Petch etkisi gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler- Tane Boyutu, Nano Tel, Polikristal, Moleküler Dinamik, Hall-Petch Etkisi.

ABSTRACT

In this study, the effect of grain size on the mechanical properties of polycrystalline NiAl nanowire under uniaxial tensile stress was investigated by Molecular Dynamics (MD) simulation method. The Young's modulus, yield strength, and fracture stress values were determined from the stress-strain curves obtained as a result of tensile deformation. Atomic positions determined using the Common Neighbor Analysis (CNA) method were used to detect the structural changes that occurred. From the results obtained, it was determined that the grain size affects the movement mechanisms of the grains, grain boundaries and the relationship between grain size and yield strength in the polycrystalline nanowire alloy system modeled with the Embedded Atom Method (EAM) potential function. From this relationship, Hall-Petch effect and after a certain critical grain size inverse Hall-Petch effect were observed.

Keywords- Grain Size, Nanowire, Polycrystalline, Molecular Dynamics, Hall-Petch Effect.

[1*]Sorumlu yazar iletişim: skazanc@firat.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8896-8571)
Fırat Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü

I. GİRİŞ

Düşük boyutlu nano malzemeler benzersiz anizotropik özelliklerinin yanı sıra optik, sensörler ve yarı iletken nano yapı alanlarındaki potansiyel uygulamaları nedeniyle oldukça ilgi çekmektedir [1-3]. Metalik nano teller, ultra yüksek akma dayanımı ve büyük çekme uzaması gibi birçok çekici özelliğe sahiptir [4]. Nano teller nano boyuttaki ölçeklerinden kaynaklanan üstün termal, mekanik, elektronik ve optik özelliklerinden dolayı nano-elekromekanik cihazlarda yapı taşı olarak kullanılmaları için son yıllarda kapsamlı bir şekilde incelenmektedir [5-7]. Bununla birlikte ultra yüksek frekanslı rezanatörler [8], biyolojik ve kimyasal uygulamalar için dedektörler ve sensörler [9], optoelektronik ve nano elektronik cihazlar [10] için mükemmel adaylardır. Ayrıca benzersiz özelliklerinden dolayı nano teller yeni nesil yapısal malzemeler, biyo-sensörler, taramalı tünelleme ve atomik kuvvet mikroskobu için uçlar ve geleceğin nano ölçekli bilgisayarlarında ve cihazlarında devre ve ara bağlantı elemanları olarak da kullanılacaktır [11]. Hacimsel (bulk) yapılarla karşılaştırıldıklarında nano tellerde artan yüzey/hacim oranı nedeniyle yüzeydeki atomlar arası etkileşmeler daha güçlü hale gelmekte ve buna bağlı olarak artan yüzey gerilimi ve enerjisi bu malzemelerin mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir [12,13]. Yapılan deneyler, metalik nano tellerin genellikle mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen tane sınırları içerdiğini göstermektedir [14-16]. Genel olarak numune boyutunun nano ölçeğe düşülmesinin bir yararı, malzemedeki kusur ve kusur oluşum olasılığının azalmasıdır. Taneler, tane boyutuna, şekline, tane sayısına, tanelerdeki kristal yönelimlerine ve sınır yapılarına bağlı olarak malzemelerin termodinamik, mekanik ve elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Bu parametrelerin makroskobik boyuttaki tane özellikleriyle nasıl ilişkili olduğunu açıklayan birçok teori olmasına rağmen nano ölçekte bu sayı oldukça azdır [12].

Katıların en önemli mekanik özellikleri elastiklik ve dayanıklılıkla ilgilidir. Malzemelerin elastik özellikleri olan Young modülü, akma dayanımı, üst akma dayanımı parametreleri ve bununla birlikte kırılma noktası genellikle çekme testleri ile belirlenmektedir [17,18]. Bu deneyleri makroskopik ölçekte gerçekleştirmek nispeten kolaydır. Ancak malzeme boyutları küçüldüğünde bu deneyleri yapmak oldukça zorlaşmaktadır [12]. Geleneksel çekme deneylerinin yanı sıra nano hatta piko boyutlu girinti deneyleri de yapılabilmektedir [19,20].

Çoğu durumda nano ölçekte deneysel çalışmaların zorluğundan ve zaman alan süreçlerinden dolayı araştırmacılar deneysel çalışmalar yerine teori ve deney arasında bir köprü kurmak için bilgisayar benzetimleri kullanmaktadırlar. Atomik ölçekteki benzetim çalışmaları nano ölçekteki malzemelerin yapı ve özelliklerini belirlemek için oldukça faydalıdır [21,22]. MD benzetimleri farklı yükleme koşulları altında nano malzemelerin mekanik davranışını ve deformasyon mekanizmalarını analiz etmekte sıklıkla kullanılmaktadır ve bu yöntemin çeşitli nano tel yapılarının davranışlarının incelenmesinde etkili bir araç olduğu kanıtlamıştır [23-25]. B2 süper örgü yapısına sahip NiAl alaşımı yüksek erime noktası, düşük yoğunluk, iyi termal iletkenlik ve yüksek sertlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğundan yüksek sıcaklık yapısal malzemeleri için potansiyel bir aday olarak kabul edilir [26]. Bununla birlikte ortam sıcaklıklarında doğası gereği kırılgan, düşük süneklik ve sınırlı üretilebilirliği nedeniyle mühendislik uygulamaları kısıtlanmaktadır. Tek fazlı NiAl'nin sünekliliğini iyileştirme ve gerilme davranışı, tek kristal ve polikristal yapı kullanılarak geniş sıcaklık aralıklarında ve zorlanma oranlarında incelenmiştir [12]. Çağın ve ark. [27], CuNi nanotelleri için Q-SC tipi bir EAM modeli kullanarak 2 nm kalınlığındaki model sistemlerinin plastik deformasyonu araştırılmıştır. Sonuçlardan, nano tel modellerinin kalınlıklarının küçük olması nedeniyle sistemde yeterli plastik deformasyon oluşamadığını, bunun yerine nano telleri sertleştiren ardışık çoklu ikizlenme tipi deformasyonların oluştuğunu bildirmişlerdir. Polikristal TiN nin deformasyon mekanizması ve mekanik özelliklerine tane büyüklüğünün etkisi Jia ve ark., [28] tarafından araştırılmıştır. Tane büyüklüğünün, polikristalin deformasyon mekanizmalarını belirlediği ve ayrıca mukavemetini etkilediği tespit edilmiştir. Tane boyutu 3,2 nm'den büyük olduğunda, Hall-Petch ilişkisi gösterdiği, tane boyutu 3,2 nm'den küçük olduğunda ise ters Hall-Petch ilişkisi gösterdiği görülmüştür. Ayrıca tane dönüşü ve tane sınırı kayması ana deformasyon mekanizmaları olarak belirlenmiştir. [28]. Sutrakar ve ark., çekme ve sıkıştırma deformasyon işlemine maruz bırakılan NiAl nano telinin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. NiAl nano telinin yüklemeye bağlı asimetrik zor-zorlanma davranışını sergilediği ve nano tellerin sırasıyla çekme ve basınç yüklemeleri altında yumuşaması ve sertleşmesi nedeniyle akma dayanımında bir asimetri de gözlemlemişlerdir [29]. Birçok benzetim çalışması mono atomik nano kristal malzemelerin plastik deformasyonuna odaklanmıştır [30, 31]. Bununla birlikte ikili alaşım polikristal nano tellerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmaların sayısı azdır.

Bu çalışmada, polikristal NiAl nano telinin tek eksenli çekme deformasyon sürecini modellemek için MD benzetim yazılım paketi LAMMPS [32] kullanıldı. GAM potansiyel fonksiyonu ile atomlar arası etkileşmeler hesaplandı. Tane sayısının, polikristalin zor-zorlanma eğrilerinden elde edilen mekanik özelliklerine etkileri ve OVITO programından elde edilen atomik konumlarından deformasyon mekanizmaları üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışıldı. Ayrıca elde edilen sonuçlardan ikili alaşım polikristal nano tellerde tane boyutunun mekanik özellikler üzerinde açıkça etkili olduğu ve bu konuda yapılan çalışmaların az olması sebebiyle literature katkı sağlayacağı ifade edilebilir.

II. MATERYAL VE METOD

Atomlar arası potansiyelin doğru seçimi MD benzetiminden elde edilen sonuçların deneysel değerlerle ne derece uyum içerisinde olduğunu belirler. 1980'lerde Daw ve Baskes [33] tarafından önerilen GAM, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede oldukça gerçekçi sonuçlar üretmektedir.

GAM fonksiyonunun matematiksel ifadesi

$$E_{top} = \sum_i^N F_i(\rho_i) + \frac{1}{2}\sum_{i\neq j}\Phi(r_{ij}) \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. Bu fonksiyonda $F_i(\rho_i)$ ve $\Phi(r_{ij})$ ifadeleri sırasıyla gömme enerjisi ve iki atom arasındaki ikili etkileşme enerjisine karşılık gelmektedir [34]. GAM' ın detayları ve potansiyel fonksiyonunun NiAl alaşımı için değerleri literatürden bulunabilir [35].

MD benzetim yönteminde model sisteme uygulanan çekme veya sıkıştırma zorlanmasında zor ifadesi, mikroskobik zor tensörü tarafından Denklem (2) deki gibi hesaplanmaktadır [33, 37].

$$\sigma = V^{-1}\left[\sum_{i=1}^N m_i\vartheta_i\vartheta_i - \sum_{i=1}^N\sum_{j>i}^N \frac{F_{ij}}{r_{ij}}\mathrm{r}_i.\mathrm{r}_j\right] \quad (2)$$

Dokuz bileşene sahip zor tensörü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix}\sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13}\\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23}\\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33}\end{pmatrix} \quad (3)$$

Zor tensörünün normal bileşenlerinin pozitif değerleri çekme zoruna, negatif değerleri ise sıkıştırma zoruna karşılık gelmektedir [38].

Ortak Komşu Analizi (Common Neigbohr Analysis-CNA) model sistemdeki atomik dağılımların ayrıntılarını analiz etmek için kullanılan algoritmalardan biridir [39]. Çalışmada OVITA programı ile CNA analizi yapılmıştır ve bu analizin detayları literatürden bulunabilir [40].

%50 atomik kompozisyona sahip NiAl nano tel alaşım sisteminin tane sayısına bağlı mekanik özelliklerini incelemek için farklı sayıda tane içeren 7 farklı model yapı oluşturuldu. Bu çalışmada Atomsk programı [41] tarafından Voronoi mozaikleme (Voronoi tessellation) algoritması ile 50Åx50Åx200Å boyutlarında 41890 parçacıklı NiAl nano tel alaşım sistemi içerisinde her bir tanenin rasgele yönelime sahip olduğu 2, 3, 8, 12, 20, 25 ve 35 taneli polikristal yapılar oluşturuldu. Model sistemdeki ortalama tane boyutu *d*'yi belirlemek için tane sayısı *n* olmak üzere $n = [6V / (\pi d^3)]$ ifadesi kullanıldı [42]. Bu ifade de *V* benzetim hücresinin hacmini ifade etmektedir. Buna göre model nano tel içerisinde oluşturulan 2, 3, 8, 12, 20, 25 ve 35 tane içeren yapıların ortalama boyutu sırasıyla 7,81 nm, 6,82 nm, 4,92 nm, 4,3 nm, 3,62 nm, 3,36 nm ve 3,01 nm olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada modellenen polikristal NiAl nano tel sistemi, Ni ve Al atomları bcc tabanlı B2 süper örgü noktalarına yerleştirilerek oluşturuldu. Örgü parametresi 2,88 Å değerindedir. Nano telin sadece x doğrultusu boyunca periyodik sınır şartları uygulanırken y ve z doğrultuları serbest bırakılmıştır. Atomlara ilk hızların atanması Maxwell-Boltzman hız dağılımı dikkate alınarak rastgele olacak şekilde yapıldı. Verlet algoritması 1 fs zaman aralıklarında hareket denklemlerinin sayısal çözümü için kullanıldı. Germe işlemi uygulanmadan önce polikristal sistemin hedef sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşmasını sağlamak için NVT istatistik topluluğu altında $5x10^4$ MD adımı dengeye getirildi. Farklı tane sayılarına sahip nano tel numunelerine tüm çalışma boyunca 100 K sıcaklık ve 0 GPa basınç değerleri altında $1x10^9 s^{-1}$ zorlanma oranında germe işlemi uygulandı.

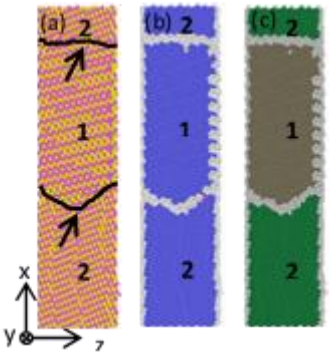
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada MD yöntemi ile 7 farklı tane sayısına sahip polikristal NiAl nano telline 100 K sabit sıcaklık ve 0 GPa basınç değeri altında x ekseni boyunca uygulanan $1x10^9 s^{-1}$ germe zorlanma oranı sonucu meydana gelen mekanik özelliklerdeki değişimler ve plastik deformasyon mekanizması incelenmeye çalışıldı.

A. Polikristal NiAl nano telinin mekanik özelliklerine tane boyutunun etkisi

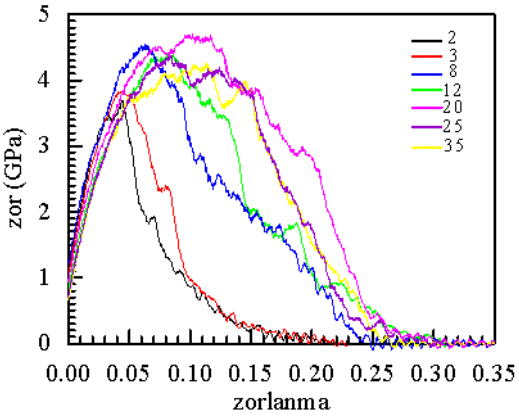
Şekil 1'de 1 ve 2 rakamları ile numaralandırılmış 2 taneli NiAl nano telinin OVITO programından (100) düzlem kesitinden elde edilen farklı atomik görselleri verilmiştir. Şekil 1(a)'da pembe renkle gösterilen Ni atomlarının ve sarı renkle gösterilen Al atomlarının nano yapı içerisindeki dağılımları verilmiştir. Ok işareti tane sınırlarını göstermektedir. Şekil 1(b)'de CNA analizinden elde edilen birim hücreli yapılar verilmiştir. Mavi renkli atomlar bcc birim hücreli yapıları gösterirken beyaz renkli atomlar periyodik sınır şartlarının uygulanmadığı yüzeydeki atomları ve CNA analizinde herhangi bir birim hücre yapısı tarafından tanımlanmayan tane sınırında bulunan düzensiz yapıdaki atomları göstermektedir. Şekil 1(c)'de ise OVITO programı tarafından farklı

yönelimlere sahip atomik grupların başka bir ifadeyle tane yapılarının farklı renklerle görselleştirildiği nano tel model sisteminin başlangıç yapısı verilmiştir.



Şekil 1. 2 tane içeren NiAl model sistemin (100) düzleminden belirlenen atomik görüntüleri.

Şekil 2'de 2, 3, 8, 12, 20, 25 ve 35 tane içeren model polikristal nano tellere x ekseni doğrultusu boyunca $1x10^9$ s^{-1} zorlanma oranı ile uygulanan çekme gerilmesi sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrileri görülmektedir. Bu tane sayıları nano telin kaba taneli ve ince taneli yapılı durumlarını incelemek için rasgele seçilmiştir. Malzemelerin çekme işlemi sonucu elde edilen zor-zorlanma eğrilerinden nano telin elastiklik modülü (E), akma dayanımı, akma ve kopma zorlanması gibi temel mekanik özellikleri belirlenebilir.



Şekil 2. Farklı tane sayıları için elde edilen zor-zorlanma eğrileri.

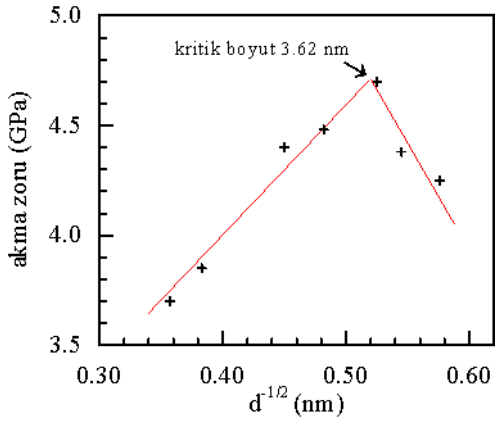
Tablo 1'de bu çalışmada çekme gerilmesi uygulanan nano teller için elde edilen mekanik özellikler verilmiştir. Farklı tane sayılarına sahip nano tellerin hepsinde uygulanan zorlanmanın belirli değerine kadar zor-zorlanma eğrisinin hemen hemen doğrusal olarak değiştiği ve malzemelerin elastiklik özellik gösterdiği bölge açıkça görülmektedir. Doğrusal değişimin meydana geldiği bu bölgenin regresyon analizi malzemenin önemli mekanik özelliklerin biri olan elastiklik modülünü vermektedir. Tablo 1'den elastiklik modülünün açıkça tane boyutundan etkilendiği görülmektedir. Tane boyutu küçüldükçe, başka bir ifade ile tane sayısı arttıkça elastiklik modülü azalmaktadır. Azalan tane boyutu malzemede bir yumuşamaya sebep olmaktadır. Bu yumuşamanın, daha küçük tane boyutlarına sahip numunelerde, tane sınırlarının toplam hacmin daha büyük bir kısmını kaplaması ve tane sınırı kaymasının daha kolay hale gelmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir [43]. Küçük tane boyutunda, tane sınırlarının ve üçlü bağlantıların elastik zayıflığı, polikristal nanotellerin elastik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [44]. Bununla birlikte tane sayısının 20 nin üzerinde olduğu durumda elastiklik modülünün bir artış sergilediği görülmektedir.

Tablo 1. Farklı tane sayılarına bağlı olarak NiAl nano telinin mekanik özellikleri.

Tane sayısı	E (GPa)	Akma zoru (GPa)	Akma zorlanması	Kopma zorlanması
2	135,3	3,70	0,044	0,19
3	134,1	3,85	0,047	0,20
8	90,57	4,40	0,064	0.24
12	79,57	4,48	0,085	0,29
20	78,69	4,70	0,100	0,30
25	80,48	3,42	0,083	0,28
35	83,83	3,25	0,115	0,26

Zorlanmanın artması sonucu zor-zorlanma eğrisi en yüksek değerine ulaştığında akma zoru olarak adlandırılan değerde malzemede plastik şekil değişimi başlamaktadır. Uygulanan zorlanmanın, akma zoruna karşılık gelen akma zorlanması değerini geçmesi durumunda plastik şekil değişimi için gerekli mekanizmalar etkili olmaya başlar. Tablo 1'den tane sayının artmasıyla akma zoru ve akma zorlanması değerlerinde de bir artışın meydana geldiği görülmektedir. Polikristaller tek kristallerden daha güçlüdür ve tane büyüklüğünün azalmasıyla akma zorunun artması "daha küçük daha güçlüdür" etkisiyle malzemenin mukavemetinde bir artışa sebep olmuştur [45]. Tane sınırları atomların kayma düzlemlerindeki hareketine karşı bir engel görevi görür. Ayrıca bu engelin dayanımı tanelerdeki atomların yönelim açılarının artmasıyla artmaktadır. Tablo 1'den nano telde kopmanın meydana geldiği zorlanma değerlerinin tane boyutunun küçülmesiyle arttığı görülmektedir. Li ve ark. [44] Mo nano teli için yaptıkları çalışmada tane büyüklüğünün azalmasıyla kopma gerilim değerinde bir artışın olduğunu belirlemişlerdir. Küçük taneli yapılar yüksek bir mukavemete sahip olması yanında, uzama miktarının da yüksek olması sebebiyle daha geç kopmaktadırlar [46].

1950'lerde Hall [47] ve Petch [48] çok sayıda deneysel çalışma sonucuna dayanarak Hall-Petch ilişkisi olarak ifade edilen ve akma zoru ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi belirleyen bir ifade buldular. Bu ilişki küçük bir tane boyutunun yüksek bir malzeme mukavemetine karşılık geldiğini belirtir. Böylece tane büyüklüğünü küçültmek, malzemelerin mukavemetini değiştirmek için etkili bir yöntem haline gelmiştir [49,50]. Bu davranışın fiziksel temeli, tane sınırları boyunca dislokasyon hareketinin zorluğu ve dislokasyon yığılmasından kaynaklanan zor konsantrasyonu ile ilişkilidir. Bununla birlikte tane boyutu nano ölçek seviyesine indikçe tane sınırlarının hacim oranı önemli ölçüde artar ve sonuç olarak tane sınırı kayması ve tane sınırı dönüşümü gibi tane sınırı aracılı süreçler daha önemli hale gelir [51,52]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, malzemenin mukavemeti üzerinde tane boyutunu küçültmenin etkisinin sınırlı olduğu belirlenmiştir [53]. Özellikle tane boyutu belirli bir kritik boyutun altına düşürüldüğünde malzemenin mukavemeti azalır ve ters Hall-Petch etkisi ortaya çıkar. İlk olarak Yip [54], polikristal malzemelerde en yüksek plastik direncin yaklaşık 20nm'lik tane boyutlarında meydana geldiğini öne sürdü. Schiotz ve ark. küçük tane boyutlarında bir yumuşama sürecini belirledikleri nano kristal Cu için yaptıkları benzetim çalışmalarıyla elde ettikleri sonuçlarla Yip'i desteklemişlerdir [55]. Bu tane yumuşama olayı Ni ve Pt gibi çeşitli nano tellerde yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir [56-58]. Yaptığımız çalışmada akma zoru ve tane boyutu arasındaki ilişki Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Polikristal NiAl nano telinin tane boyutu ile akma zoru arasındaki ilişkisi.

Ortalama tane boyutu d=3,62 nm den büyük yani $d^{-1/2}$ =0,525'den küçük olduğunda model polikristal nano tellerin akma zorunun d'deki azalma ile arttığı görülmektedir. Bu sonuç Hall-Petch ilişkisi ile uyumludur.

$$\sigma_S = \sigma_0 + k.d^{-1/2} \quad (4)$$

Bu denklemde σ_S akma zorunu, σ_0 biresyel dislokasyonları hareket ettirmek için gereken örgü sürtünme zorunu, k, tane sınırlarının göreli güçlendirme katsayısını gösteren Hall-Petch eğimi olarak bilinen ve malzemeye göre değişen bir sabiti ve d ortalama tane boyutunu ifade etmektedir [53]. $d^{-1/2}$ değeri 0,525 nm den küçük olan noktalar kullanılarak yapılan fit işleminden Hall-Petch denklemi,

$$\sigma_S = 3,4 + 5,92.d^{-1/2} \quad (5)$$

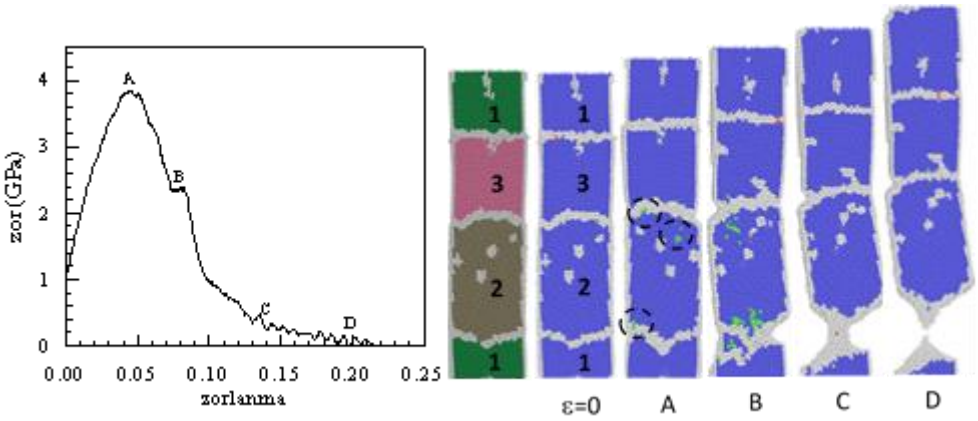
olarak elde edilir. Tanelerin içerisindeki atom sayılarının az olması ve tanelerdeki dislokasyon hareketi kolayca gerçekleşmediği için germe işlemi sırasında OVITO programında dislokasyon analizi sonucu herhangi bir dislokasyon aktivitesi gözlenmedi. Tane boyutu 3,62 nm'den küçük olduğunda yani $d^{-1/2}$ değeri 0,525 nm'den büyük olduğunda model nano tel sisteminin akma zorunun, d'nin azalmasıyla azaldığı belirlendi. Bu sonuç ilk olarak Chokshi ve ark. [59] tarafından belirlenen ters Hall-Petch etkisi ile uyumludur. NiAl nano tel sistemi için ters Hall-Petch denklemi $d^{-1/2}$ değeri 0,525'den büyük olan noktaların fit edilmesiyle aşağıdaki şekilde elde edildi.

$$\sigma_S = 6{,}51 - 8{,}42.d^{-1/2} \quad (6)$$

B. Polikristal NiAl nano telinin deformasyon mekanizmasına tane boyutunun etkisi

Polikristal NiAl nano telinin deformasyon sürecini incelemek için 3, 8, 12 ve 20 tane içeren model sistemlerin zor-zorlanma eğrilerinin farklı noktaları için OVITO programında CNA analizinden elde edilen atomik görüntüleri incelenmiştir. Tane sayısının artması tanelerin oldukça küçülmesine sebep olduğundan ve görsel olarak atomik konumları incelemenin zorlaşmasından dolayı sadece yukarıda belirlenen 4 farklı tane sayısı içeren nano teller seçilmiştir.

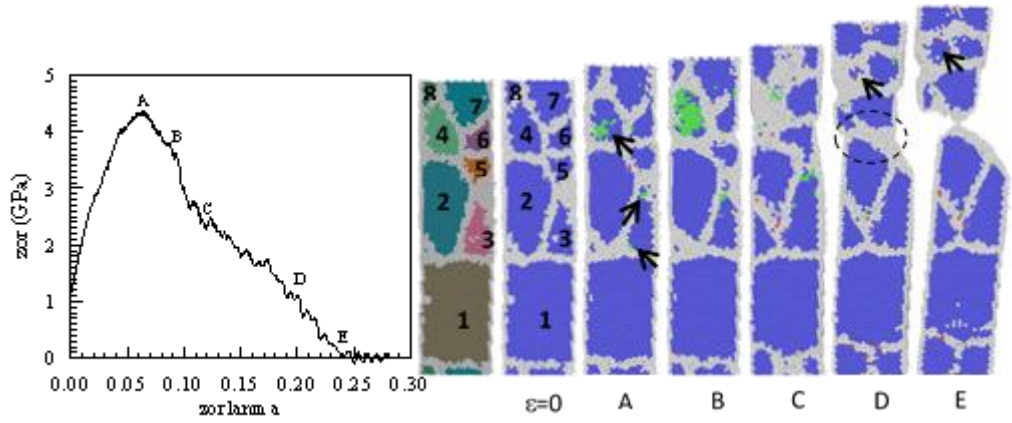
Şekil 4'de 3 taneden meydana gelen NiAl nano telinin (100) düzlem kesiti boyunca farklı renklerle gösterilen tanelerin zorlanma uygulanmadan önceki başlangıç yapısı ve farklı zorlanma değerleri için CNA analizinden alınan atomik konfigürasyonları verilmiştir. CNA analizin yönteminde bcc, fcc ve hcp yapılar sırasıyla mavi, yeşil ve kırmızı renkli atomlar gösterilirken, beyaz renkli atomlar herhangi bir birim hücre yapısına sahip olmayan, periyodik sınır şartlarının uygulanmadığı yüzey ve tane sınırı atomlarına karşılık gelmektedir. Akma zoru olan (ε=0,046) A noktasına karşılık gelen atom konumlarında 2 numaralı tanenin noktalı daireler ile gösterilen bölgesinde az sayıda fcc birim hücreli kümelerin oluşumu görülmektedir. Akma noktası geçilip B noktasına ulaşıldığında fcc kümelerde zorun artışıyla birlikte az da olsa bir artış belirlenmiştir. Bununla birlikte 1 ve 2 numaralı tanelerin arasındaki tane sınırda numunenin boyun vermeye başladığı ve C noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde boyun bölgesinin daha belirgin hale gelerek yapının bu noktadan inceldiği görülmektedir. Zorlanmanın artmasıyla yapı içerisinde fcc birim hücreli kümeler yerini atomların yeniden düzenlenmesiyle bcc birim hücrelerine bırakmıştır. Zorlanmanın 0,2 değerine karşılık gelen D noktasında ise numunede kopma meydana gelmiştir. Taneler aynı kristalografik yönelime sahip bir grup atom olarak tanımlanır ve her bir tanedeki yönelim diğer tanelerden farklıdır. Tane sınırları iki tane arasındaki düzensiz bölgelerdir ve tanelere göre daha az yoğundur. Bununla birlikte düzensiz yapıdaki tane sınırlarındaki atomlar tane içerisindeki kristal atomlarına göre daha yüksek enerjiye sahiptir ve bu nedenle enerji bakımından elverişli konumlarda değillerdir [12]. Tane sayısının az olduğu iri taneli yapılarda tane sınırları, herhangi bir tanenin enine kesitinin ortasından geçecek bir düzlem ile aynı büyüklükte olacaktır. Tane içerisinde belirli bir yönelime sahip kristal yapıdaki atomlar arasındaki bağlar, düzensiz yapıdaki tane sınırlarına göre daha güçlüdür. Bunun sonucu olarak tane sayısının az olduğu iri taneli model sistemde kopma tane sınırında meydana gelmiştir. Bununla birlikte çok sayıda taneden oluşan bir başka deyişle ince taneli malzemelerde tanelerin ortasından kopma meydana gelir. Eğer kopma tane sınırları boyunca meydana gelse kopma yüzeyi daha geniş olduğu için daha büyük bir kuvvet gerekecekti [46].



Şekil 4. 3 tane içeren model NiAl nano tel sisteminin farklı zorlanma değerlerinde CNA analizinden elde edilen atomik görüntüleri.

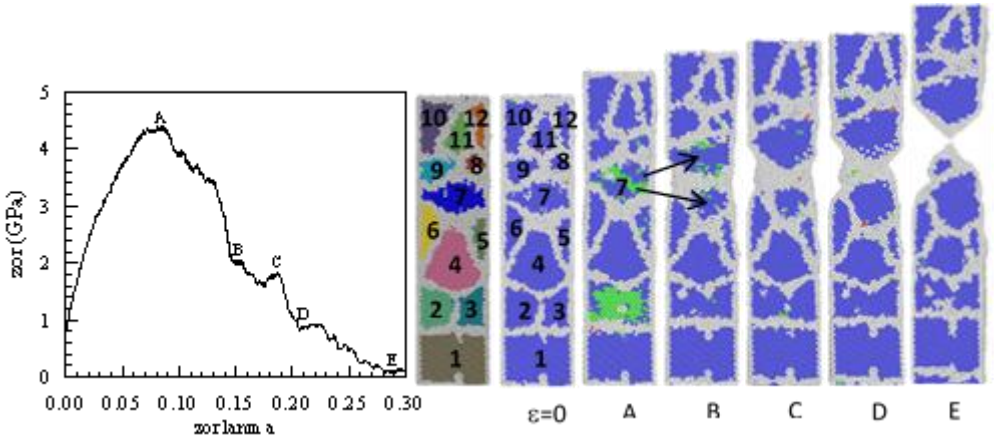
Şekil 5'te 8 taneden oluşan polikristal NiAl nano telinin, farklı yönelime sahip tanelerinin farklı renklerle gösterildiği zorlanma uygulanmadan önceki başlangıç yapısı ve farklı zorlanma değerleri için CNA analizinden alınan atomik konfigürasyonları (100) düzlem kesiti boyunca verilmiştir. Akma zoru olan A noktasında 4 numaralı ve kısmen de 3 numaralı tanelerde ok ile gösterilen fcc birim hücreli yapıların oluşumu görülmektedir. Zorlanmanın artmasıyla 4 numaralı tanenin büyük çoğunluğunun fcc yapıya dönüştüğü, B noktasına karşılık gelen zorlanma değeri için elde edilen atomik konfigürasyondan açıkça görülmektedir. Zor-zorlanma eğrisinde C noktasına karşılık gelen zorlanmada, zorun artışı fcc birim hücreli bu tanenin "diğer" olarak adlandırılan atomik konfigürasyona dönüştüğü ve ilerleyen zorlanma değerlerinde atomların yeniden düzenlenmesi sonucu D ve E de okla gösterilen gölgede sırasıyla tekrar bcc yapıya sahip tane oluşumu ve büyümesi tespit edilmiştir. Bu tane çekirdeklenmesi ve büyümesi olayı Latapie ve Farkas [60] tarafından rapor edilmiştir. Bununla birlikte D noktasında model sistemde noktalı daire ile gösterilen bölgede boyun oluşumu meydana gelmekte ve E noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde de kopmanın bu noktadan gerçekleştiği görülmektedir. Kopma, tane sınırında

boyun verme ile meydana gelmiştir. Germe işlemi boyunca tanelerin çoğunda başlangıçtaki kristal yapı ve düzeni korunmuştur.



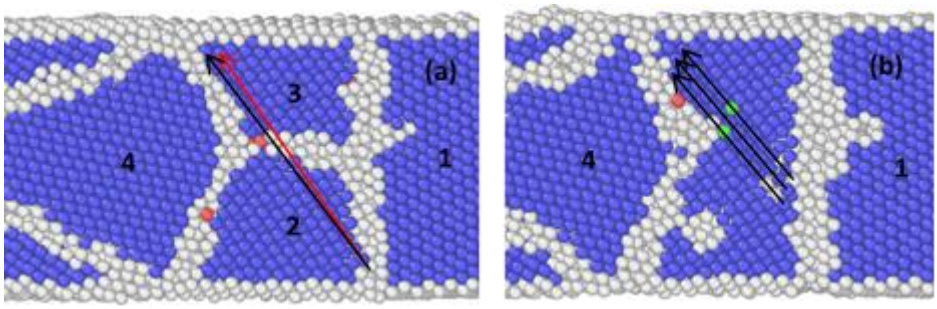
Şekil 5. 8 tane içeren model nano tel sisteminin farklı zorlanma değerlerinde CNA analizinden elde edilen atomik görüntüleri.

Şekil 6'da 12 tane içeren polikristal NiAl nano telinin, (100) düzlem kesiti boyunca zorlanma uygulanmadan önceki başlangıç yapısı ve farklı zorlanma değerleri için CNA analizinden belirlenen atomik konfigürasyonları verilmiştir. Zorlanma değerinin model nano tel sisteminin plastik şekil değişiminin başladığı akma noktası A da 2 ve 3 numaralı tanelerin neredeyse tamamının, 7 numaralı tanenin ise kısmen fcc birim hücreli yapıya dönüşümü açıkça görülmektedir. B noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde fcc yapıların atomların yeniden düzenlenmesi sonucu bcc birim hücrelerden oluşan yapılara dönüştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte bu zorlanma değerinde 2 ve 3 numaralı tanelerin arasındaki tane sınırının kalktığı ve tanelerin birleşerek tek bir tane meydana geldiği tespit edilmiştir.



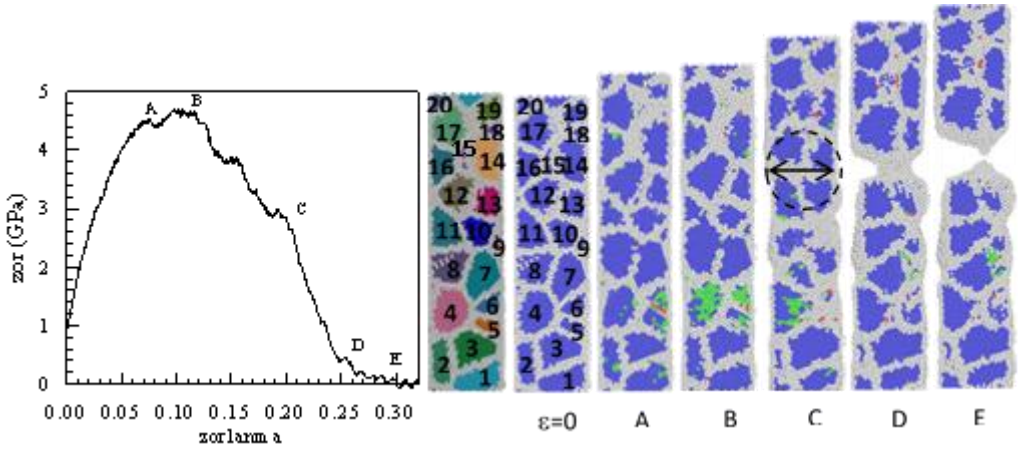
Şekil 6. 12 tane içeren model nano tel sisteminin farklı zorlanma değerlerinde CNA analizinden elde edilen atomik görüntüleri.

Bu durumu daha detaylı görebilmek için 2 ve 3 numaralı tanelerin başlangıçtaki ve zor-zorlanma eğrisinde B noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde elde edilen atomik görüntüleri Şekil 7 (a-b)'de verilmiştir. Şekil 7 (a)'da zor uygulanmadan önce 2 numaralı tanenin atom yönelimleri kırmızı ok ile, 3 numaralı tanedeki atom yönelimleri ise siyah ok ile gösterilmiştir. Oklar, 2 ve 3 numaralı tanelerdeki atomik yönelim farklarını açıkça belirtmektedir. Gerilme uygulandıktan sonra iki tane bölgesini içerecek şekilde yeniden çizilen okların birbirine paralel olduğu bir başka deyişle her iki tanedeki atomik yönelimlerin aynı olduğunu göstermektedir. Bu da gerilme uygulandıktan sonra tanelerin döndüğünü düşündürmektedir. Aynı atomik yönelime sahip tanelerin birleşerek arasındaki sınırın ortadan kalkması ve daha büyük bir tane oluşumu bunun bir göstergesidir. Bu da zor kaynaklı tane büyümesinin dönme-birleşme ve tane sınırı göç mekanizmalarının yakından ilişkili olduğunu gösteren çalışmaların sonuçlarını doğrulamaktadır [61-63]. Bazı deneysel çalışmalar komşu tanelerin koordineli olarak dönmesinin küçük tane boyutlarında en yaygın deformasyon mekanizması haline geldiğini göstermektedir [64-66]. B noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde oklarla gösterildiği gibi 7 numaralı tanenin ortasından numune boyun vermeye başlamıştır. C ve D zorlanmalarında oluşan boyun bölgesi, zorlanmanın etkisiyle giderek daha belirgin bir hale gelerek nano teli inceltmiş ve E'ye karşılık gelen zorlanma değerinde kopma meydana gelmiştir. Kopmanın var olan tane sınırlarında değil de tanenin içinde oluşan tane sınırında meydana geldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 7: Polikristal NiAl nano tel sistemine zor (a) uygulanmadan ve (b) uygulandıktan sonra küçük tanelerin birleşerek büyük tanenin oluşumu.

Şekil 8'de 20 taneden oluşan NiAl nano telinin, (100) düzlem kesiti boyunca zorlanma uygulanmadan önceki ve farklı zorlanma değerleri için CNA analizinden elde edilen atomik yapıları verilmiştir. A noktasına karşılık gelen zorlanma değerinde 4, 5 ve 6 numaralı tanelerde fcc birim hücreli yapıların çekirdeklenmeye başladığı görülmektedir. Zorlanma B noktasına ulaştığında fcc yapılar tane içerinde yayılarak neredeyse tanelerin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. 10-11 ve 12-13 taneleri arasındaki tane sınırın, zorlanmanın artmasıyla nano telin enine kesiti boyunca yönelim aldığı ve bu noktadan boyun vererek kopmanın gerçekleştiği C, D ve E atomik konfigürasyonlarından açıkça görülmektedir. Kopmanın tanelerden değil de tane sınırında gerçekleşmesinin, nano telin enine kesiti boyunca tek bir tanenin olmaması, bunun yerine zorlanmanın etkisiyle atomlar arasındaki bağın daha zayıf olduğu bir tane sınırının telin enine kesitinin ortasından geçecek bir düzlem boyunca (noktalı daire ile gösterilen bölgedeki ok işareti) oluşmasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Zorlanmanın artmasıyla oluşan fcc birim hücreli yapıların çoğunluğunun bcc birim hücreli yapılara dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 8. 20 tane içeren NiAl model nano tel sisteminin farklı zorlanma değerlerinde CNA analizinden elde edilen atomik görüntüleri.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada GAM potansiyel fonksiyonu ile modellenen, farklı tane büyüklüklerine sahip polikristal NiAl nano tellerine uygulanan tek eksenli çekme deformasyonunun, nano tellerin mekanik ve yapısal özelliklerine etkisi MD benzetimi ile incelendi.

1-Elastiklik modülünün tane boyutundan etkilendiği, tane sayısı arttıkça elastiklik modülünün azaldığı belirlendi.

2-Tane sayının artışının akma zoru ve akma zorlanması değerlerinde de bir artışa sebep olduğu tespit edildi.

3-Tane boyutu, polikristal NiAl'nin deformasyon mekanizması üzerinde etkilidir ve ayrıca mukavemetini belirler. Tane boyutu 3,62 nm'den büyük olduğunda, tane boyutu ve akma zoru doğrudan bir Hall-Petch ilişkisi gösterir. Bununla birlikte tane boyutu 3,62 nm'den küçük olduğunda, ters bir Hall-Petch ilişkisi gözlemlenir. 3,62 nm'lik kritik tane boyutuna ulaşıldığında, arayüzey atomlarının tane dönüşüne direnme yeteneği en güçlüdür. Akma dayanımı ile tane boyutu arasındaki ilişkiyi veren Hall-Petch etkisi doğrulanmıştır. Bu nedenle, kritik tane boyutunu korumak, NiAl nano tel model sisteminin mukavemetini etkili bir şekilde artırabilir.

4-İncelenen nano tellerde kopmaların tane sınırlarında ve tanelerde meydana geldiği görülmüştür.

5- Gerilme uygulandıktan sonra tanelerin döndüğü, aynı atomik yönelime sahip tanelerin birleşerek arasındaki sınırın ortadan kalktığı ve daha büyük bir tane oluşumu meydana geldiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Fan, H. J., Werner, P., & Zacharias, M. (2006). Semiconductor nanowires: from self-organization to patterned growth. *Small*, *2*(6), 700–717.
[2] Teo, B. K., Huang, S. P., Zhang, R. Q., & Li, W. K. (2009). Theoretical calculations of structures and properties of one-dimensional silicon-based nanomaterials: Particularities and peculiarities of silicon and silicon-containing nanowires and nanotubes. *Coord. Chem. Rev.*, *253*(23), 2935–2958.
[3] Zakharov, N., Werner, P., Gerth, G., Schubert, L., Sokolov, L., & Gösele, U. (2006). Growth phenomena of Si and Si/Ge nanowires on Si (111) by molecular beam epitaxy. *J. Cryst. Growth*, *290*(1), 6–10.
[4] Cao, A., Wei, Y., & Ma, E. (2008). Grain boundary effects on plastic deformation and fracture mechanisms in Cu nanowires: Molecular dynamics simulations. *Physical Review B*, *77*, 195429.
[5] Hochbaum, A. I., & Yang, P. (2010). Semiconductor nanowires for energy conversion. *Chem. Rev.*, *110*(1), 527–546.
[6] Rodrigues, V., Fuhrer, T., & Ugarte, D. (2000). Signature of atomic structure in the quantum conductance of gold nanowires. *Phys. Rev. Lett.*, *85*, 4124.
[7] Lu, W., & Lieber, C. M. (2006). Semiconductor nanowires. *J. Phys. Appl. Phys.*, *39*(21), R387.
[8] Feng, X., He, R., Yang, P., & Roukes, M. (2007). Very high frequency silicon nanowire electromechanical resonators. *Nano Lett.*, *7*(7), 1953–1959.
[9] Eom, K., Park, H. S., Yoon, D. S., & Kwon, T. (2011). Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics principles. *Phys. Rep.*, *503*(4–5), 115–163.
[10] Zhang, C., De Sarkar, A., & Zhang, R. Q. (2011). Inducing novel electronic properties in< 112> Ge nanowires by means of variations in their size, shape and strain: a first-principles computational study. *J. Phys. Condens. Matter*, *24*(1), 015301.
[11] Park, H., & Ji, C. (2006). On the thermomechanical deformation of silver shape memory nanowires. *Acta Materialia*, *54*, 2645–2654.
[12] Abdullah, N. M. (2017). *Tensile Strength of Polycrystalline NiAl Nanowires: A Molecular Dynamics Study*. Master's Thesis, Firat Universitiy, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Elazig.
[13] Diao, J., Gall, K., & Dunn, M. L. (2004). Yield strength asymmetry in metal nanowires. *Nano Lett.*, 4, 1863.
[14] Wu, B., Heidelberg, A., & Boland, J. J. (2005). Mechanical properties of ultrahigh-strength gold nanowires. *Nat. Mater.*, *4*, 525.
[15] Wu, W., Brongersma, S. H., Hove, M. V., & Maex, K. (2004). Influence of sruface and grain-boundary scattering on the resisitvity. *Appl. Phys. Lett.*, *84*, 2838-2840.
[16] Klinger, L., & Rabkin, E. (2006). Thermal stability and creep of polycrystalline nanowires. *Acta Mater.*, *54*, 305-311.
[17] Smith, W. F. (1996). *Principles of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill Inc., New York, USA.
[18] Savaşkan, T. (2004). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Akademi Ltd. Şti. Yayınları*, 15, Trabzon
[19] Deng, X., Joseph, V.R., Mai W., Wang Z.L., & Jeff Wu C. F. (2009). Statistical approach toquantifying the elastic deformation of nanomaterials. *Pnas*, *29*, 11845–11850.
[20] Zhu, Y., Xu, F., Qin,Q., Fung, W. Y., & Lu, W. (2009). Mechanical Properties of Vapor-Liquid-Solid Synthesized Silicon Nanowires. *Nanoletters*, 11, 3934-3939.
[21] Yamakov, V., Wolf, D., Phillpot, S. R., Mukherjee, A. K., & Gleiter, H. (2002). Dislocation processes in the deformation of nanocrystalline aluminium by molecular-dynamics simulation. *Nat. Mater.*, *1*, 45.
[22] Swygenhoven, H. V. (2002). Grain boundaries and dislocations, *Science*, 296, 66.
[23] Fu, B., Chen, N., Xie, Y., & Ye, X. (2014). Size and orientation dependent melting properties and behavior of wurtzite CdSe nanowires. *Comput. Mater. Sci.*, 84, 293–300.
[24] Mandal, T. (2012). Strain induced phase transition in CdSe nanowires: Effect of size and temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 101(2), 021906.
[25] Ye, X., Sun, D. Y., & Gong, X. G. (2008). Pressure-induced structural transformation of CdSe nanocrystals studied with molecular Dynamics. *Phys. Rev. B*, *77*(9), 094108.
[26] Conrad, H., & Narayan, J. (2000). On the grain size softening in nanocrystalline materials. *Scr Mater.*, 42, 1025.
[27] Cagin, T., Che, J., Qi, Y., Zhou, Y., Demiralp, E., Gao, G., & Goddard III, W. A. **(**1999). Computational Materials Chemistry at the Nanoscale. *Journal of Nanoparticle Research*, 1, 51‑69.
[28] Jia, H., Liu, X., Li, Z., Sun, S., & Li, M. (2018). The effect of grain size on the deformation mechanisms and mechanical properties of polycrystalline TiN: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 143, 189-194.
[29] Sutrakar, V.K., & Mahapatra, D.R. (2010). Superplasticity in intermetallic NiAl nanowires via atomistic simulations. Materials Letters,64(7), 879-881.
[30] Ruestes, C. J., Bertolino, G., Ruda, M., Farkas, D., & Bringa, E. M. (2014). Grain size effects in the deformation of [0001] textured nanocrystalline Zr. *Scr. Mater.*, 71, 9–12.

[31] Cao, R. G., & Deng, C. (2015). The ultra-small strongest grain size in nanocrystalline Ni nanowires. *Scr. Mater.*, 94, 9–12.
[32] LAMMPS Molecular Dynamics Simulator, http://lammps.sandia.gov/. (Erişim Tarihi:02.04.2021).
[33] Daw, M. S., & Baskes, M. I. (1983). Semiempirical, quantum mechanical calculation of hydrogen embrittlement in metals. *Phys. Rev. Lett.*, 50, 1285–1295.
[34] Guellil, A. M., & Adams, J. B. (1992). The application of the analytic embedded atom method to bcc metals and alloys. *J. Mater. Res.*, 7, 639–652.
[35] Zhou, X. W., Johnson, R. A., & Wadley, H. N. G. (2004). Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers. *Phys. Rev. B*, 69, 144113.
[36] Kazanc, S. (2013). The effects on the lattice dynamical properties of the temperature and pressure in random NiPd alloy. *Canadian Journal of Physics*, 91, 833-838.
[37] Kazanc, S., Ozgen, S., & Adiguzel, O. (2003). Pressure effects on martensitic transformation under quenching process in a molecular dynamics model of NiAl alloy. *Physica B*, 334, 375-381.
[38] Jacobus, K., Sehitoglu, H., & Balzer, M. (1996). Effect of stress state on the stress-induced martensitic transformation in polycrystalline Ni-Ti alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(A), 3066-3073.
[39] Bonny G., Castin N., & Terentyev D. (2013). Interatomic potential for studying ageing under irradiation in stainless steels: the FeNiCr model alloy. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 21, 085004.
[40] Stukowski A. (2012). Structure identification methods for atomistic simulations of crystalline materials. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 20, 045021.
[41] Hirel, P. (2015). Atomsk: a tool for manipulating and converting atomic data files. *Comput. Phys. Commun.*, 197, 212.
[42] Zhang, Y., Li, J., Hu, Y., Ding, S., Du, F., & Xia, R. (2021). Mechanical properties and scaling laws of polycrystalline CuZr shape memory alloy. *J. Appl. Phys.*, 130, 155106.
[43] Schiøtz, J., Di Tolla, F. D., & Jacobsen, K. W. (1998). Softening of Nanocrystalline Metals at Very Small Grains. *Nature*, 391, 561.
[44] Li, X., Hu, W., Xiao, S., & Huang, W.Q. (2008). Molecular dynamics simulation of polycrystalline molybdenum nanowires under uniaxial tensile strain: Size effects. *Physica E*, 40, 3030–3036.
[45] Zhu, Y., Lia, Z., & Huanga, M. (2013). Coupled effect of sample size and grain size in polycrystalline Al nanowires. *Scripta Materialia*, 68, 663–666.
[46] Weissavach, W. (1996), Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Birsen Kitabevi, 4.Baskı, İstanbul, 27-29.
[47] Hall, E. O. (1951). The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion and Results. *Proceed. Phys. Soc. Lond. Sect. B*, 64, 747–752.
[48] Petch, N. J. (1953). The Cleavage Strength of Polycrystals. *J. Iron Steel Inst.*, 174, 25–28.
[49] Jang, J. S. C., & Koch, C. C. (1990). The hall-petch relationship in nanocrystalline iron produced by ball milling. *Scr. Metall. Mater.*, 24, 1599–1604.
[50] Knapp, J. A., & Follstaedt, D. M. (2004). Hall-Petch relationship in pulsed-laser deposited nickel films. *J. Mater. Res.*, 19, 218–227.
[51] Zhang, L., Lu, C., & Tieu, K. (2016). A review on atomistic simulation of grain boundary behaviors in face-centered cubic metals. *Comput. Mater. Sci.*, 118, 180.
[52] Zhang, L., Shibuta, Y., Huang, X., Lu, C., & Liu, M. (2019). Grain boundary induced deformation mechanisms in nanocrystalline Al by molecular dynamics simulation: From interatomic potential perspective. *Comput. Mater. Sci.*, 156, 421.
[53] Jia, H., Liu, X., Li, Z., Sun, S., & Li, M. (2018). The effect of grain size on the deformation mechanisms and mechanical properties of polycrystalline TiN: A molecular dynamics study. *Computational Materials Science*, 143, 189–194.
[54] Schiøtz, J., &, Jacobsen, K. W. (2003), A maximum in the strength of nanocrystalline copper. *Science*, 301, 1357-1359.
[55] Yip, S. (1998). The strongest size, *Nature*, 391, 532–533.
[56] Shan, Z. W., Stach, E. A., Wiezorek, J. M. K., Knapp, J. A., Follstaedt, D. M., & Mao, S. X. (2004). Grain boundary-mediated plasticity in nanocrystalline nickel. *Science*, 305, 654–657.
[57] Wang, L. H., Han, X. D., Liu, P., Yue, Y. H., Zhang, Z., & Ma, E. (2010). In Situ Observation of Dislocation Behavior in Nanometer Grains. *Phys. Rev. Lett.*, 105, 135501.
[58] Wang, L. H., Teng, J., Liu, P., Hirata, A., Ma, E., Zhang, Z., Chen, M. W., & Han, X. D. (2014). Grain rotation mediated by grain boundary dislocations in nanocrystalline platinum. *Nat. Commun.*, 5, 4402.
[59] Chokshi, A., Rosen, A., Karch, J., & Gleiter, H. (1989). On the validity of the hall–Petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metall.*, 23, 1679-1683.
[60] Latapie, A., & Farkas, D. (2003). Molecular dynamics simulations of stress-induced phase transformations and grain nucleation at crack tips in Fe. *Modelling Simulation in Materials Science and Engineering*, 11(5), 745-753.

[61] Farkas, D., Frøseth, A., & Swygenhoven, H. V. (2006). Grain boundary migration during room temperature deformation of nanocrystalline Ni. *Scripta Mater.*, 55, 695–698.
[62] Monk, J., & Farkas, D. (2007). Strain-induced grain growth and rotation in nickel nanowires. *Phys. Rev. B*, 75, 045414.
[63] Farkas, D., Mohanty, S., & Monk, J. (2008). Strain-driven grain boundary motion in nanocrystalline materials. *Mater. Sci. Eng. A*, 493, 33–40.
[64] Gianola, D. S., Petegem, S. V., Legros, M., Brandstetter, S., Swygenhoven, H. V., & Hemker, K. J. (2006). Stress-assisted discontinuous grain growth and its effect on the deformation behavior of nanocrystalline aluminum thin films. *Acta Mater.*, 54(8), 2253–2263.
[65] Wang, Y.B., Li, B. Q., Sui, M. L., & Mao, S. X. (2008). Deformation-induced grain rotation and growth in nanocrystalline Ni. *Appl. Phys. Lett.*, 92, 011903.
[66] Gorkaya, T., Molodov, K. D., Molodov, D. A., & Gottstein, G. (2011). Concurrent grain boundary motion and grain rotation under an applied stress. *Acta Mater.*, 59(14), 5674–5680.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 301-310, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1559218
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Surface Disinfection of Bread Wheat Seeds for *in vitro* Germination

Ekmeklik Buğday Tohumlarının *in vitro* Çimlenmesinde Yüzey Dezenfeksiyonu

Begüm Terzi Aksoy[1*]

Geliş / Received: 10/10/2024 ***Revize / Revised: 03/01/2025*** ***Kabul / Accepted: 04/01/2025***

ABSTRACT

In the process of optimizing seed germination, *in vitro* seed sterilization is complex due to the influence of many factors (e.g., genotype, disinfectants, temperature, light, and application time). This study compared the efficacy of both sodium hypochlorite and hydrogen peroxide disinfectants at three concentrations (5%, 10%, 20%) and three treatment times (5, 10, 15 minutes). These are the most used disinfectants for *in vitro* seed sterilization on wheat. Additionally, the germination and contamination rates of surface disinfection in sterile petri dishes were examined as the initial step for molecular and breeding studies in wheat. Upon examining the results of a total of 19 different disinfection treatment combinations, the findings of this study highlight the significance of a 20% sodium hypochlorite concentration with a 15-minute treatment time as the optimal disinfection method minimizing contamination in the *in vitro* Murashige and Skoog medium. Method number 8 (20% NaClO – 10 min), which showed the highest germination percentage at 95%, was determined based on the germination results obtained on sterile filter papers in petri dishes. These results provide valuable tools to aid with molecular and breeding studies related to wheat cultivation and improvement of surface seed disinfection.

Keywords- Contamination, Disinfection, Germination, Wheat Seed

ÖZ

Tohum çimlenmesini optimize etme sürecinde, *in vitro* tohum sterilizasyonu birçok faktörün (örneğin genotip, dezenfektanlar, sıcaklık, ışık ve uygulama süresi) etkisi nedeniyle karmaşıktır. Bu çalışmada, sodyum hipoklorit ve hidrojen peroksit dezenfektanlarının üç konsantrasyonda (%5, %10, %20) ve üç işlem süresinde (5, 10, 15 dakika) etkinliği karşılaştırılmıştır. Bunlar, buğdayda *in vitro* tohum sterilizasyon için en çok kullanılan dezenfektanlardır. Ayrıca, buğdayda moleküler ve ıslah çalışmaları için ilk adım olarak steril petri kaplarında yüzey dezenfeksiyonunun çimlenme ve kontaminasyon oranları incelenmiştir. Toplam 19 farklı dezenfeksiyon işlem kombinasyonunun sonuçları incelendiğinde, bu çalışmanın bulguları, *in vitro* Murashige ve Skoog besiyerinde kontaminasyonu en aza indiren optimum dezenfeksiyon yöntemi olarak 15 dakikalık işlem süresine sahip %20'lik bir sodyum hipoklorit konsantrasyonunun önemini vurgulamaktadır. En yüksek çimlenme yüzdesini %95 olarak gösteren yöntem numarası 8 (%20 NaClO – 10 dk), petri kaplarındaki steril filtre kağıtlarında elde edilen çimlenme sonuçlarına dayanarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, buğday yetiştiriciliği ve yüzey tohum dezenfeksiyonunun iyileştirilmesiyle ilgili moleküler ve ıslah çalışmalarına yardımcı olmak üzere karşılaştırmalı bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Kontaminasyon, Dezenfeksiyon, Çimlenme, Buğday Tohumu

[1*]Corresponding author contact: begumterzi@kmu.edu.tr.com (https:// orcid.org/0000-0002-3264-2257)
Department of Bioengineering, Karamanoğlu Mehmetbey University, Karaman, Turkey

I. INTRODUCTION

Wheat (*Triticum aestivum* L.) began to be cultivated approximately ten thousand years ago, and today it is the most cultivated and consumed grain in the world [1,2]. In addition, wheat, which is a significant source of protein, is exposed to biotic (fungi, bacteria, etc.) and abiotic (salt, cold, etc.) stresses that can lead to serious yield losses in its production [3,4]. From past to present, many breeding studies have been carried out on wheat, aiming to increase the quality and productivity. In this regard, in addition to breeding studies, *in vitro* micropropagation techniques are used to accelerate the germination and growth of wheat, shorten the development period, and obtain more productive seeds.

Traditional germination methods face various limitations, including seasonal production, labor demands, time consumption, pest infestation, and disease susceptibility, making large-scale plant production challenging. Therefore, to overcome these limitations and sustain wheat production, the application of new approaches such as tissue culture is considered a desirable alternative. *In vitro* culture techniques are employed in numerous fields: rapid plant production [5–7], developmental biology [8,9], secondary metabolite production [10–12], and bioenergy production [13]. Moreover, *in vitro* culture systems offer significant advantages, such as investigating seed germination physiology, controlling environmental conditions, and preserving genetic resources through cryopreservation [14,15]. In this regard, *in vitro* techniques like tissue culture are significant tools for optimizing germination processes and supporting plant breeding efforts. These methods provide a more efficient and controlled environment, surpassing the limitations of traditional germination methods, and thereby facilitating large-scale plant production and genetic diversity preservation.

Seeds from field or greenhouse environments are exposed to many contaminants such as bacteria, fungi, yeast, and viruses [8,16,17]. Effective surface sterilization of seeds or explants intended for culture initiation constitutes the initial step in both *in vitro* propagation and other molecular or classical breeding studies [18]. It is worth noting that while disinfection may be deemed irrelevant in classical breeding studies, *in vitro* technologies necessitate meticulous attention to eliminate surface contamination from seeds. Furthermore, numerous studies have highlighted the significance of *in vitro* seed sterilization and germination techniques as pivotal tools for addressing the constraints encountered in traditional breeding methods [19,20]. These techniques encompass aseptic germination of seeds in a controlled environment following surface sterilization procedures [7]. Although complete elimination of contamination may not always be feasible, the severity of its repercussions can be mitigated by reducing its frequency through chemical disinfection methods [21].

There are different types of disinfectants used in surface sterilization of plant material. The most commonly used among these are sodium hypochlorite (NaOCl), hydrogen peroxide (H_2O_2), ethanol (C_2H_6O), mercuric chloride ($HgCl_2$), silver nitrate ($AgNO_3$), calcium hypochlorite ($Ca(ClO_2)$), bromine water and Tween 20 [22]. In addition, they may have toxic effects depending on factors such as the applied sterilization method used, concentration of the sterilant, application times or processing sequences [23]. While the sterilization method aims to inactivate all microorganisms, it can also damage plant tissue. For this reason, appropriate combination of treatment the application time and sterilant selection will depend on the sensitivity of the explant to be sterilized. After sterilization, the biological activities of the explant must be preserved [4]. To generalize, the chemicals used in the sterilization of tissue culture materials should be effective, inexpensive, available, and have low toxicity. Therefore, it is important to determine the appropriate sterilant concentration and treatment time to obtain more efficient results, minimize explant damage, and standardize the disinfection method depending on the plant material [17]. In this study, the primary objective was not to completely eliminate all microorganisms from the seed surface (sterilization) but to reduce contamination particularly fungal contamination to obtain healthy and uncontaminated seeds. Accordingly, we aimed to optimize the surface disinfection of bread wheat seeds by determining the most effective treatment conditions in an *in vitro* Murashige and Skoog (MS) medium and petri dish culture. The study evaluated the effects of commonly used disinfectants, including sodium hypochlorite, hydrogen peroxide, and ethanol, by varying their concentrations and treatment durations. This process represents the initial stage of plant cultivation in molecular breeding studies (Figure 1).

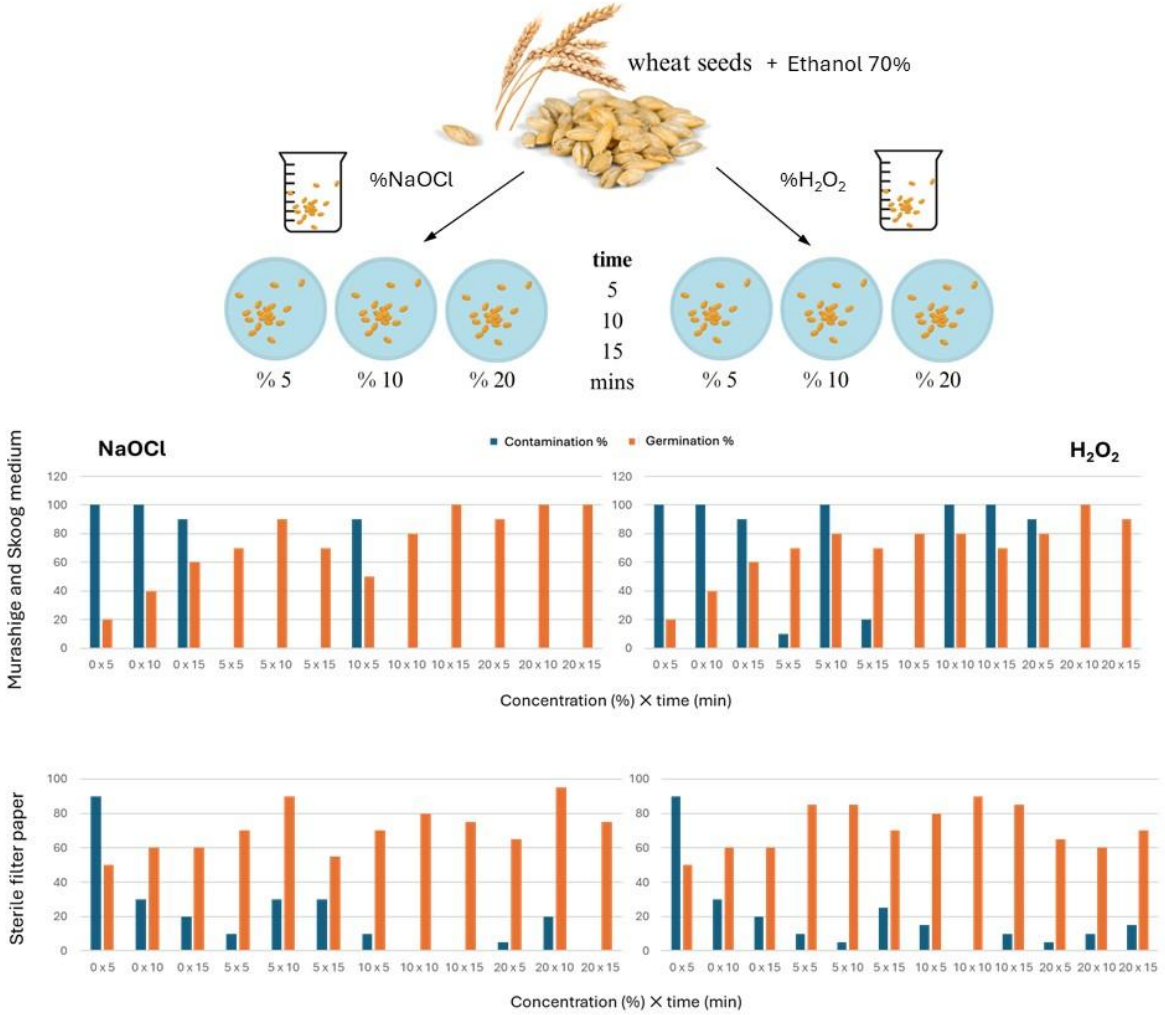


Figure 1. Schematic illustration of optimizing *in vitro* seed disinfection for wheat seeds.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Plant Material

In this study, seeds of the bread wheat variety Sultan 95 were used as plant material. If plant seeds are collected from open fields and stored under inappropriate conditions, *in vitro* seed germination is typically inhibited [24] In this study, wheat seeds grown and stored in the field were used, which necessitated the development of a more effective surface disinfection protocol. The seeds were selected for this study due to their natural state and absence of protective fungicidal coating. All experiments were carried out at Karamanoğlu Mehmetbey University, Department of Bioengineering, Molecular Biology and Genetics Laboratory.

B. Surface Disinfection of Wheat Seeds

Commercial domectic bleach (5% NaClO), ethanol (Merck), and hydrogen peroxide (H_2O_2) (Sigma) were used in the study. The disinfectants used were applied at different concentrations and treatment times. In total, 19 different disinfection methods were applied (Table 1). Accordingly, the seeds were washed several times in distilled water and then sterilized in 70% ethanol solution for 1 minute. Then, the seeds were soaked in NaClO and H_2O_2 solutions at different concentrations (0%, 5%, 10%, and 20%) and different treatment (or soaking) times (5, 10, 15 min). Finally, the seeds were washed three times in sterile pure water for 5 minutes each, and each petri dish, 10 seeds were used.

Table 1. Nineteen different surface disinfection methods used for bread wheat seeds.

Methods	Ethanol	NaClO	H_2O_2	Sterilized water
1	70% ethanol – 1 min	5% – 5 min	-	100 ml – 5 min x3
2	70% ethanol – 1 min	5% – 10 min	-	100 ml – 5 min x3
3	70% ethanol – 1 min	5%– 15 min	-	100 ml – 5 min x3
4	70% ethanol – 1 min	10% – 5 min	-	100 ml – 5 min x3
5	70% ethanol – 1 min	10% – 10 min	-	100 ml – 5 min x3
6	70% ethanol – 1 min	10% – 15 min	-	100 ml – 5 min x3
7	70% ethanol – 1 min	20% – 5 min		100 ml – 5 min x3
8	70% ethanol – 1 min	20% – 10 min		100 ml – 5 min x3
9	70% ethanol – 1 min	20% – 15 min		100 ml – 5 min x3
10	70% ethanol – 1 min	-	5% – 5 min	100 ml – 5 min x3
11	70% ethanol – 1 min	-	5% – 10 min	100 ml – 5 min x3
12	70% ethanol – 1 min	-	5%– 15 min	100 ml – 5 min x3
13	70% ethanol – 1 min	-	10% – 5 min	100 ml – 5 min x3
14	70% ethanol – 1 min	-	10% – 10 min	100 ml – 5 min x3
15	70% ethanol – 1 min	-	10% – 15 min	100 ml – 5 min x3
16	70% ethanol – 1 min	-	20% – 5 min	100 ml – 5 min x3
17	70% ethanol – 1 min	-	20% – 10 min	100 ml – 5 min x3
18	70% ethanol – 1 min	-	20% – 15 min	100 ml – 5 min x3
19-control	70% ethanol – 1 min	-	-	100 ml – 5 min x3

C. Germination and culture conditions

After the disinfection process, the seeds were grown in sterile Petri dishes containing 4.4 g/l Murashige and Skoog (MS) [25] supplemented with 30 g/l sucrose (Merck) and 8 g/l Plant Agar (Sigma). For MS, the pH of the medium was adjusted to 5.8 before autoclaving at 121°C for 15 minutes.

Ten wheat seeds were plated in each Petri dish containing autoclaved double-layer sterile filter paper (Whatman filter paper) and the Petri dish containing MS medium. All disinfection procedures were carried out in a laminar airflow sterile cabinet (Nüve LN 090), and all each method included three replicates per treatment.

All Petri dishes containing sterile seeds were left in the dark for two days and then incubated at a temperature of 23±2°C and relative humidity of 60-70% for 16 hours of light and 8 hours of darkness, for 21 days. Wheat seeds started germinating two days after sowing, and germination percentages and contamination rates were recorded after 7 and 21 days.

D. Statistical Analysis

At the end of 21 days, germination and contamination percentages for each petri dish were measured and statistically analyzed. Analysis of variance (ANOVA) test was performed, and Duncan's multiple range test was used for analysis ($p<0.05$) [4,26].

III. RESULTS

In this study, two type surface disinfectant materials (sodium hypochlorite and hydrogen peroxide) were prepared at different concentrations (5, 10, 20%) and treatment times (5, 10, and 15 mins) to maximize the germination of bread wheat seeds. Eighteen different surface disinfection method combinations for wheat seeds in each germination medium were evaluated and described in Table 2.

Table 2. Germination and contamination percentages of bread wheat seeds in different germination media (MS medium, sterile filter paper).

Methods	MS Medium		Sterile filter paper	
	Germination (%) ± (SD)	Contamination (%) ± (SD)	Germination (%) ± (SD)	Contamination (%) ± (SD)
1	70.00±2 ab	0±0 a	68.33±7.63 abc	5.00±5 a
2	90.00±0 cde	0±0 a	86.67±5.77 def	11.67±16.07 a
3	70.00±5 ab	0±0 a	68.33±18.92 abc	13.33±15.27 a
4	56.67±7.64 a	33.33±49.32 abc	68.33±7.63 abc	3.33±5.77 a
5	80.00±5 bcde	0±0 a	90.00±10 f	0±0 a
6	93.33±5.77 de	0±0 a	73.33±7.63 bcde	1.67±5.77 a
7	90.00±5 cde	0±0 a	71.67±7.63 abcd	1.67±2.88 a
8	90.00±10 cde	0±0 a	95.00±5 f	8.33±10.40 a
9	95.00±5 e	0±0 a	73.33±7.63 bcde	1.67±2.88 a
10	68.33±2.88 ab	5.00±5 ab	83.33±7.63 cde	3.33±5.77 a
11	80.00±5 bcde	46.67±50.33 abc	85.00±5 cdef	1.67±2.88 a

12	70.0±5 b	10.00±10 ab	71.67±7.63 abcd	25.00±25 ab
13	75.00±5 bc	3.33±5.77 a	85.00±5 cdef	6.67±7.63 a
14	78.33±7.63 bcd	50.00±50.33 bc	88.33±2.88 ef	0±0 a
15	71.6±7.63 b	56.67±45.09 cd	85.00±±15 cdef	3.33±5.77 a
16	80.00±10 bcde	33.33±49.32 abc	70.00±5 abc	3.33±2.88 a
17	90.0±10 cde	1.67±2.88 a	65.00±5 a	6.67±5.77 a
18	90.00±10 cde	0±0 a	71.67±7.63 abcd	3.33±2.88 a
19-control	36.67±15.27 f	96.67±5.77 d	50.00±10 g	46.67±37.85 b
p-Value	<0.001	<0.001	<0.001	.005

± (SD): Standard Deviation
Different letters within columns indicate significant differences ($p<0.05$)

According to the statistical analysis, it was observed that different concentrations and durations of sodium hypochlorite and hydrogen peroxide cause significant effects on germination and contamination for both MS medium and sterile filter paper (Table 2). The best surface disinfection method for MS medium was determined as to be method 9 (95%), and the contamination percentage for this method is very low (0%). This high germination percentage is followed by method number 6, with 93.33%. When NaOCl and H_2O_2 used as disinfectants in surface disinfection in the MS medium are compared, it can be seen that disinfection methods of 20% NaOCl concentrations (methods 7-9) generally give the best germination and lowest contamination rates (0%). The lowest germination rate observed, 56.67%, belongs to disinfection method 4 containing NaOCl. The lowest contamination rate, 0%, belongs to methods 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9 and 18. Accordingly, when the contamination results for the *in vitro* MS medium were examined, it was determined that NaOCl had the lowest contamination rates for all other disinfection methods except method number 4. Although H_2O_2 showed higher germination rates than controls, it was significantly lower when compared to NaOCl in preventing contamination.

When the germination and contamination results observed on sterile filter papers in petri dishes are examined, the highest germination percentage belongs to method number 8 with 95%. Next comes method number 5, with a 90% germination rate. The lowest contamination rate, 0%, belongs to method number 5. Additionally, 0% contamination was observed for method 14. Like the MS medium, the highest overall germination rate belongs to the disinfection method using NaOCl at a concentration of 20% (method 8). The lowest germination rate belongs to method number 17, at 65%. The highest contamination value belongs to method number 12, at 25%. It is seen that the lowest germination and highest contamination values for the sterile petri paper germination environment belong to the H_2O_2 disinfectant. In this case, for both germination media (MS and sterile petri paper), the highest germination rates and the lowest contamination rates were achieved using two concentrations of NaOCl (20% and 10%) and varying treatment durations. Figure 2 shows the effects of bacterial and fungal contamination on different germination media over 21 days of monitoring in Petri dishes.

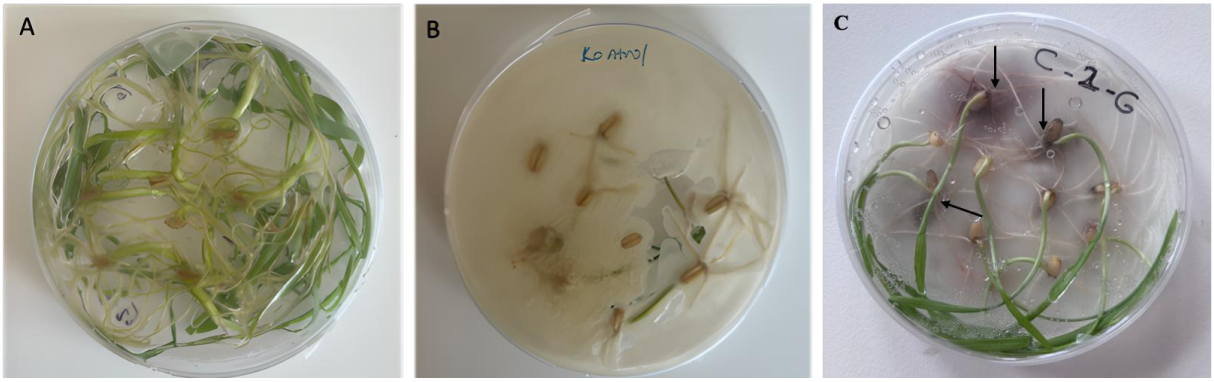


Figure 2. Effects of contamination on germination over 21 days, showing various levels of germination and contamination A) germinating healthy wheat seeds in MS medium B) wheat seeds showing contamination (bacterial) in *in vitro* MS medium (control group) without any disinfection C) wheat seeds contaminated by fungal contamination on sterile petri paper, with contamination indicated by arrows.

When germination percentages are examined in relation to disinfectant treatment durations, it is observed that the highest germination rates were obtained with methods 6, 8, 9, and 17, which involved 10- and 15-minute disinfection times.The lowest germination percentage belongs to method number 4 with a treatment time of 5 minutes. For NaOCl, the germination percentage increased even as the treatment time increased, and for H_2O_2, although the increase treatment time was higher for 10 min than for 5 min, it was lower for 15 min than for 10 min. When the contamination percentages are examined in terms of treatment duration with disinfectants, it is seen

that 5 minutes of treatment causes more contamination in petri dishes than 10 and 15 minutes. It was observed that 10 and 15-minute treatment times did not suppress contamination being observed in the petri dishes at all concentrations applied for NaOCl.

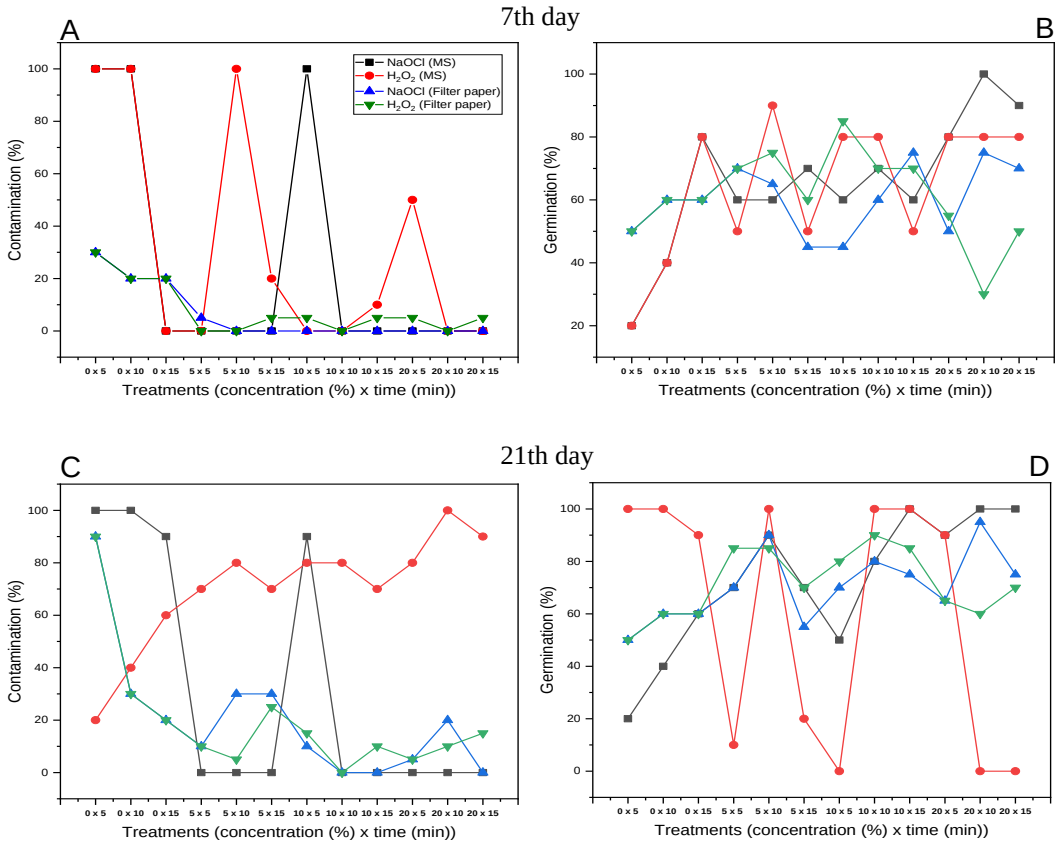


Figure 3. Effects of NaOCl and H_2O_2 on contamination and germination rates at the 7th and 21st days in different germination media (MS and Sterile Filter Paper). (A) Contamination rates at the 7th day, (B) Germination rates at the 7th day, (C) Contamination rates at the 21st day, and (D) Germination rates at the 21st day.

The effects of germination and contamination in MS medium and sterile filter paper environments were comparatively examined on the 7th and 21st days of germination (Figure 3). By the 7th day, it was observed that NaOCl usage minimized contamination in all treatments except for one specific concentration trial (%10 x 5 min) (Figure 3A). On the 21st day, as expected, control samples treated only with ethanol (common to all seeds) and rinsed with sterile water for varying durations exhibited high contamination rates in the absence of disinfectant application (Figure 3C). In terms of germination rates, NaOCl treatment demonstrated average effects at both observation points (Figures 3B and 3D). At higher concentrations (20%), NaOCl was highly effective in reducing contamination and promoting germination. These findings indicate that NaOCl, at higher concentrations, protects wheat seeds from contamination without creating any adverse effects on germination. On the other hand, at the end of the 21st day, H_2O_2 negatively affected germination as the application duration and concentration increased. This suggests that higher concentrations of H_2O_2 may exert toxic effects on seeds during prolonged germination periods. It should be noted that prolonged exposure and increased concentrations of disinfectants may harm the seeds, highlighting the necessity of a rinsing and purification step with sterile water following disinfectant treatments, as was conducted in this study (Table 1).

In the MS medium, the contamination rates for H_2O_2 were more inconsistent and higher compared to NaOCl, both on the 7th day and at the end of the 21st day. By the 21st day, H_2O_2 application, particularly at higher concentrations, was found to be highly ineffective in surface sterilization of seeds (Figure 3C). Similarly, in terms of germination rates, H_2O_2 application in the MS medium resulted in irregular and significantly lower germination rates, particularly on the 21st day, mirroring the trends observed in contamination (Figure 3D).

In applications on sterile filter papers, contamination rates for both disinfectants were quite low by the 7th day (Figure 3A), while a slight increase in these rates was observed by the 21st day (Figure 3C), which is an

expected outcome. Measurements of contamination increases at the end of the 21st day indicate the decreasing effectiveness of the disinfectants used over time. When germination rates were compared, the disinfectants exhibited a germination profile similar to that observed in the MS medium, with average germination rates (Figures 3B and 3D). In a study observing seed germination in potting soil and on sterile filter paper, the results highlighted certain advantages of the sterile filter paper in terms of the sterilization environment. Specifically, the sterile filter paper provided a controllable environment for monitoring contamination, as it allowed for easy tracking of differences such as fungal contamination and color changes [27]. In a study involving *Hibiscus coddii* subsp. *barnardii* seeds, the effects of the culture medium on seed germination were tested across various germination environments, including MS medium and filter paper [28]. According to the study results, the low-strength MS medium and sterile filter paper environment exhibited high germination rates. In another study, it was reported that sterile filter paper demonstrated the highest germination rates (92.05%) compared to a pot environment containing sand and compos [29]. These results highlight the potential of sterile filter paper as a cost-effective and practical alternative to the MS medium, particularly for surface sterilization and germination efficiency. Compared to the MS medium, the lower nutrient content and reduced moisture in the sterile filter paper environment create unfavorable conditions for microbial growth.

IV. DISCUSSION

In this study's initial disinfection (pre-treatment) phase, all wheat seeds, including the control groups, were subjected to a one-minute treatment with 70% ethanol. Despite ethanol's efficacy as a sterilizing agent, it is crucial to acknowledge its potential phytotoxic effects. Furthermore, previous studies have indicated that a two-stage sterilization process involving ethanol can be more effective [22]. In the context of this study, wheat seeds in petri dishes (19), serving as controls with only ethanol application, exhibited both lower germination rates and higher contamination percentages compared to methods where both disinfectants were utilized.

Sodium hypochlorite is frequently used for sterilization of explant sources *in vitro* culture studies, as it is simple, inexpensive, and readily available, and is effective against all kinds of contaminants such as bacteria, fungi, and viruses [30–32]. NaOCl is also used in molecular breeding studies during the surface disinfection phase of wheat seeds germinated on sterile filter papers [16,33,34]. It is also employed in studies combining wheat with various tissue culture experiments within classical breeding programs [35].

Örgeç et al. [4] reported that among the different disinfection methods they applied for einkorn and einkorn-like grains, the best germination rates belonged to methods 2 and 12 and 1-min method with 70% ethanol followed by 10 and 15 min methods of 20% NaOCl. The results we obtained in this study support the results obtained by Örgeç et al. [4]. Hesami et al. [17] conducted a study to assess the seed germination and contamination of Ficus religiosa, in which six different concentrations of sodium hypochlorite (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%) and three different treatment (soaking) durations (5, 10, and 15 minutes) were examined. The lowest contamination rate (0%) for seeds germinating in MS medium was 10- and 15-min treatment times in sodium hypochlorite at 20% concentrations. The highest seed germination rate was observed for 5- and 10-minute treatment with 10% concentration. A 20% NaOCl concentration also indicates the lowest contamination rate in this study, and in this respect, a result that overlaps with the literature has emerged. However, the study by Hesami et al. [17] reported that high concentrations of NaOCl caused a blackish color on the seeds and a low germination rate. In contrast, our study revealed that high NaOCl doses (20%) showed high germination percentages for wheat seeds, and did not cause any damage to the seeds. Hasemi et al. [19] stated that 20% NaOCl concentration is the best germination rate for einkorn-like grains. In this regard, it should be taken into consideration that increasing NaOCl concentrations may have a negative effect on the plant depending on the sensitivity of the plant used as an explant.

In a study aimed at developing an effective surface disinfection protocol to overcome conditions inhibiting the *in vitro* germination of cotton seeds, various disinfecting agents such as bleach, chlorine gas, and hydrogen peroxide, as well as additional treatments like soap-water washing and ethanol rinsing, were tested. The findings revealed that hydrogen peroxide treatment significantly improved germination rates and reduced contamination compared to other methods [24]. According to a study by Dolatabadian & Modarressanavy [36] hydrogen peroxide was reported to be more effective than other sterilization factors for plant tissue. However, different studies also show that hydrogen peroxide is ineffective in surface disinfection of explants and seeds [37]. Al Ghasheem et al. [38] tested four disinfection agents (NaOCl, H_2O_2, Captan fungicide, and boric acid) in 8 different variants for *in vitro* cultures of peach explants. According to the study's results, it was determined that sodium hypochlorite showed the best germination performance, but the hydrogen peroxide results were not found satisfactory enough. In our research, NaOCl was found to have better germination and lowest contamination performance than H_2O_2 for wheat seeds.

It has been reported that seeds collected from open fields or stored under improper conditions are generally severely infected by various fungi compared to seeds stored in a controlled environment [24]. In Figures

2B and 2C, bacterial and fungal contaminations were observed as expected contamination types in the seeds examined (Figure 2). The occurrence of such contamination is largely attributed to the use of wheat seeds that were field-grown, stored, and in their natural state without protective fungicide coatings. Therefore, it is clear that when seed supply is limited, particularly with seeds heavily contaminated, *in vitro* germination presents a significant challenge.

This study aims to determine the most effective disinfection conditions for wheat germination by examining different disinfectant types, concentrations, and application times. Therefore, in this study, the effects of two commonly used disinfectant types, sodium hypochlorite and hydrogen peroxide, on *in vitro* seed disinfection in the MS medium for wheat germination were evaluated in terms of various concentrations (5%, 10%, 20%) and treatment times (5, 10, 15 minutes). Additionally, as a first step for molecular and breeding studies in wheat, the effects of surface disinfection on germination and contamination rates in petri dishes containing sterile filter papers were also examined. As a result of the evaluations made among a total of 19 different disinfection methods, the most effective disinfection conditions for the *in vitro* MS environment were obtained at 20% concentration of NaOCl and treatment for 15 minutes. The germination rate obtained under these conditions was determined as 95%, and the contamination percentage was also determined as 0%. Based on the germination and contamination results observed in petri dishes containing sterile filter paper, the highest germination rate (95%) was comparison to H_2O_2, NaOCl demonstrates effective surface disinfection in wheat germination across various germination media. The results of the study contribute to determining the optimal disinfectant conditions recommended for surface disinfection in wheat germination, providing insights for both *in vitro* seed germination studies and molecular breeding research.

ACKNOWLEDGEMENT

Grateful acknowledgment is extended to Prof. Dr. Özlem Ateş Sönmezoğlu for valuable suggestions and for kindly providing the wheat seeds used in this study.

REFERENCES

[1] Gökmen, S. Ateş, Ö. (2005) AB Sürecinde Türkiye'de Tahıl Üretimi ve Politikaları. *Demokrasi Platformu, AB'ye Uyum Sürecinde Türk Tarımı*. 3 175–197.

[2] Ateş Sönmezoğlu, Ö. and Terzi, B. (2018) Characterization of some bread wheat genotypes using molecular markers for drought tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 24 (1), 159–166.

[3] Ateş-Sönmezoğlu, Ö., Çevik, E., and Terzi-Aksoy, B. (2022) Assessment of some bread wheat (Triticum aestivum L.) genotypes for drought tolerance using SSR and ISSR markers. *Biotech Studies*. 31 (2), 45–52.

[4] Örgeç, M., Pehlivan Karakaş, F., Şahin, G., Ağıl, F., and Zencirci, N. (2018) Einkorn (Triticum monococcum ssp. monococcum) in vitro propagation sterilization protocol. *International Journal of Secondary Metabolite*. 5 (2), 67–74.

[5] Phillips, G.C. and Garda, M. (2019) Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*. 55 (3), 242–257.

[6] Aasim, M., Korkmaz, E., Culu, A., Kahveci, B., and Sonmezoglu, O.A. (2023) TiO2 nanoparticle synthesis, characterization and application to shoot regeneration of water hyssop (Bacopa monnieri L. Pennel) in vitro. *Biotechnic and Histochemistry*. 98 (1), 29–37.

[7] Jafari, M. and Hosein Daneshvar, M. (2019) Effects of Sodium Nitroprusside on Indirect Shoot Organogenesis and in Vitro Root Formation of Tagetes Erecta:an Important Medicinal Plant. *Pol. J. Appl. Sci*. 5 14–19.

[8] Pepe, M., Marie, T.R.J.G., Leonardos, E.D., Hesami, M., Rana, N., Jones, A.M.P., et al. (2022) Tissue culture coupled with a gas exchange system offers new perspectives on phenotyping the developmental biology of Solanum lycopersicum L. cv. 'MicroTom.' *Frontiers in Plant Science*. 13, 1025477.

[9] Jafari, M., Shahsavar, A.R., Talebi, M., and Hesami, M. (2022) Exogenous Melatonin Protects Lime Plants from Drought Stress-Induced Damage by Maintaining Cell Membrane Structure, Detoxifying ROS and Regulating Antioxidant Systems. *Horticulturae*. 8 (3), 257.

[10] Arya, S.S., Rookes, J.E., Cahill, D.M., and Lenka, S.K. (2020) Next-generation metabolic engineering approaches towards development of plant cell suspension cultures as specialized metabolite producing biofactories. *Biotechnology Advances*. 45, 107635.

[11] Chandran, H., Meena, M., Barupal, T., and Sharma, K. (2020) Plant tissue culture as a perpetual source for

production of industrially important bioactive compounds. *Biotechnology Reports*. 26.

[12] Jafari, M. and Shahsavar, A. (2021) The Effect of Foliar Application of Melatonin on Changes in Secondary Metabolite Contents in Two Citrus Species Under Drought Stress Conditions. *Frontiers in Plant Science*. 12, 692735.

[13] Norouzi, O., Hesami, M., Pepe, M., Dutta, A., and Jones, A.M.P. (2022) In vitro plant tissue culture as the fifth generation of bioenergy. *Scientific Reports*. 12, (1), 5038.

[14] Jafari, M. and Hosein Daneshvar, M. (2017) Indirect organogenesis of Tagetes erecta L. via hypocotyl explant. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*. 1, 34–43.

[15] Jafari, M., Daneshvar, M.H., and Otfi-Jalalabadi, A. (2018) Direct organogenesis of passion flower (Passiflora caerulea L.) via leaf and petiole explants. *Iranian Journal of Horticultural Science*. 49 (2),.

[16] Ahmad, F., Daglish, G.J., Ridley, A.W., and Walter, G.H. (2012) Responses of tribolium castaneum to olfactory cues from cotton seeds, the fungi associated with cotton seeds, and cereals. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 145 (3), 272–281.

[17] Hesami, M., Daneshvar, M.H., and Lotfi-Jalalabadi, A. (2017) Effect of sodium hypochlorite on control of in vitro contamination and seed germination of ficus religiosa. *Iranian Journal of Plant Physiology*. 7 (4), 2157–2162.

[18] Rezaei, H., Mirzaie-Asl, A., Abdollahi, M.R., and Tohidfar, M. (2023) Comparative analysis of different artificial neural networks for predicting and optimizing in vitro seed germination and sterilization of petunia. *PLoS ONE*. 18 (5).

[19] Hesami, M., Daneshvar, M.H., and Yoosefzadeh-Najafabadi, M. (2018) Establishment of a protocol for in vitro seed germination and callus formation of ficus religiosa L., an Important Medicinal Plant. *Jundishapur Journal of Natural Pharmaceutical Products*. 13 (4).

[20] Jafari, M., Daneshvar, M.H., Agriculture, R., Lotfi, A., and Agriculture, R. (2016) Control of in Vitro Contamination of Passiflora Caerulea By Control of in Vitro Contamination of Passiflora Caerulea By Using of Sodium Hypocholorite. *Indo-Am. J. Agric. & Vet. Sci.* 4 (2), 8–15.

[21] Sink, K.C. (1980) In vitro culture of higher plants. *Scientia Horticulturae*. 13 (3), 300.

[22] Ishfaq, S., Ahmed, S.D., Shah, A.H., Khan, R.T., Fiaz, S.M., Hameed, I., et al. (2016) European Journal of in-Vitro Optimization Protocol of Wheat Cultivars in Newly Established Lab of Plant Tissue Culture , Muzaffarabad. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*. 3 (3), 477–479.

[23] Kumer Sen, M., Abu Hena Mostofa Jamal, M., and Nasrin, S. (2013) Sterilization factors affect seed germination and proliferation of Achyranthes aspera cultured in vitro. *Environmental and Experimental Biology*. 11, 119–123.

[24] Barampuram, S., Allen, G., and Krasnyanski, S. (2014) Effect of various sterilization procedures on the in vitro germination of cotton seeds. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 118 (1), 179–185.

[25] Murashige, T. and Skoog, F. (1962) A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 15 (3), 473–497.

[26] Hussain, A., Ahmed, I., Nazir, H., and Ullah, I. (2012) Plant Tissue Culture: Current Status and Opportunities. *Recent Advances in Plant in Vitro Culture*.

[27] Wuerslin, N. A., Lichtner, F. J., Podpora, N. A., & Whitecloud, S.S. (2023) Arctic seed sterilization and germination.

[28] Plessis, H.J. du, Nikolova, R.V., Egan, B.A., and Kleynhans, R. (2020) In vitro seed germination and seedling performance of Hibiscus coddii subsp. barnardii. *Ornamental Horticulture*. 26 (4), 598–606.

[29] Mrdja, J., Dusanic, N., Radic, V., and Miklic, V. (2010) Effect of different substratum on treated sunflower seed germination. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*. 55 (1), 1–8.

[30] Iqbal, M., Raja, N. I., Asif, S., Ilyas, N., Hussain, M., Yasmeen, F. & Javed, H. (2016) In vitro study of callogenesis and regeneration potential of elite wheat (Triticum aestivum L.) cultivars. *American Journal of Plant Sciences*. 7, 2515.

[31] Eren, B., Türkoğlu, A., Haliloğlu, K., Demirel, F., Nowosad, K., Özkan, G., et al. (2023) Investigation of the Influence of Polyamines on Mature Embryo Culture and DNA Methylation of Wheat (Triticum aestivum L.) Using the Machine Learning Algorithm Method. *Plants*. 12 (18), 3261.

[32] Türkoğlu, A., Tosun, M., and Haliloğlu, K. (2023) Evaluation of ethyl methanesulfonate-induced in vitro mutagenesis, polymorphism and genomic instability in wheat (Triticum aestivum L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 26 (2), 199–213.

[33] Chen, C.X., Cai, S. Bin, and Bai, G.H. (2008) A major QTL controlling seed dormancy and pre-harvest sprouting resistance on chromosome 4A in a Chinese wheat landrace. *Molecular Breeding*. 21 (3), 351–358.

[34] Soto-Cerda, B.J., Inostroza-Blancheteau, C., Mathías, M., Peñaloza, E., Zuñiga, J., Muñoz, G., et al. (2015) Marker-assisted breeding for TaALMT1, a major gene conferring aluminium tolerance to wheat. *Biologia Plantarum*. 59 (1), 83–91.

[35] Yorgancılar, Ö., Yorgancılar, A., Dikmen, S., Çarıkçı, M., Evcen, F., Van, F., et al. (2016) Obtaining the pure line in F2 Ggneration wheat using anther culture technique. *Jornal of Central Research Institute for Field Crops*. 25 (Special Issue 1), 237–242.

[36] Dolatabadian, A. and Modarressanavy, S.A.M. (2008) Effect of the Ascorbic Acid, Pyridoxine and Hydrogen Peroxide Treatments on Germination, Catalase Activity, Protein and Malondialdehyde Content of Three Oil Seeds. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 36 (2), 61–66.

[37] Miche, L. and Balandreau, J. (2001) Effects of Rice Seed Surface Sterilization with Hypochlorite on Inoculated Burkholderia vietnamiensis. *Applied and Environmental Microbiology*. 67 (7), 3046–3052.

[38] Al Ghasheem, N., Stanica, F., Peticila, A.G., and Venat, O. (2018) In Vitro Effect of Varıous Sterilization Techniques on Peach (Prunus persica (L.) Batsch) Explants. *Scientific Papers-Series B-Horticulture*. 62, 227–234.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

12(1), 311-320, 2025

DOİ: 10.35193/bseufbd.1561511
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

MAG Gazaltı Kaynağı ile Birleştirilen Farklı Otomotiv Çeliklerinin (SPH270-C/SPH440-OD) Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Different Automotive Steels (SPH270-C/SPH440-OD) Joined by MAG Gas Metal Arc Welding

Çağrı Ertürk[1*], Muhammed Elitaş[2]

Geliş / Received: 04/10/2025 ***Revize / Revised: 29/12/2024*** ***Kabul / Accepted: 29/12/2024***

ÖZ

Bu çalışmada, SPH270-C ile SPH440-OD otomotiv çelikleri Metal Aktif Gaz (MAG) kaynağı yöntemiyle birleştirilip numunelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. 9 farklı kaynak kombinasyonunda farklı tel hızı, kaynak gerilimi değerlerinde kaynak işlemi uygulanmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla çekme deneyi ve Vickers sertlik ölçümleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, farklı kaynak parametrelerinin çekme mukavemetini, yüzde uzamayı ve kaynak dikişini etkilediği gözlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı C3 kodlu numunede (6 m/dak tel hızı, 19 V kaynak voltajı parametreleri) gözlenirken, en düşük çekme dayanımı A3 kodlu numunede gözlenmiştir. En yüksek yüzde uzama değeri B2 kodlu numunede, en düşük ise A3 kodlu numunede meydana gelmiştir. Genellikle kaynak gerilimi kademeli olarak artırılıp, tel hızının sabit tutulduğu durumlarda kaynak dikişi genişlemiştir. Kaynaklı birleşimlerde kopmalar SPH270-C esas metalinde gerçekleşmiştir. Mikroyapı incelemelerinde esas metalden kaynak metaline doğru ilerledikçe tane irileşmesi ve sıklığın artığı görülmüştür. Ayrıca sertlik değerleri esas metalden kaynak metaline doğru artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler- SPH270-C, SPH440-OD, MAG Kaynağı, Mikroyapı, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

This study investigated the microstructure and mechanical properties of SPH270-C and SPH440-OD automotive steels joined by the Metal Activated Gas (MAG) welding method. Nine different welding combinations were tested with varying wire speeds and welding voltages. Microstructure investigations were carried out using an optical microscope. Tensile tests and Vickers hardness measurements were performed to evaluate the mechanical properties. The results showed that different welding parameters affected the tensile strength, percent elongation, and weld seam. Specimen C3 exhibited the highest tensile strength (6 m/min wire speed and 19 V welding voltage), while specimen A3 exhibited the lowest tensile strength. The highest percent elongation value was observed in specimen B2, and the lowest value was observed in specimen A3. In general, the weld seam widened as the welding voltage increased while the wire speed remained constant. Ruptures in the welded joints occurred in the SPH270-

[1]*Sorumlu yazar iletişim: cagrierturk19@gmail.com (https://orcid.org/0009-0000-7859-541X)
Makine Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye
[2]İletişim: muhammed.elitas@bilecik.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-5358-1783)
Makine Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye

C base metal. Microstructure examinations revealed that grain coarsening and density increased from the base metal to the weld metal. Hardness values also increased from the base metal to the weld metal.

Keywords- SPH270-C, SPH440-OD, MAG Welding, Microstructure, Mechanical Properties

I. GİRİŞ

Çelikler demir karbon alaşımı olup mühendislik malzemeleri arasında önemli yere sahiptir [1,2]. Bu çalışmada, ‘‘Steel Plate Hot’’ kelimelerinin baş harflerinden oluşan SPH kısaltmasına sahip sıcak haddelenmiş çelik levhalar incelenmiştir [3]. Bu doğrultuda Japon Endüstri Standartlarına (JIS) göre G3131 standartlarına ait bir çelik türü ayrıca Toyota üretim kodu TSG3100G ile adlandırılan SPH270-C çeliği ile JIS’ a göre G3113 standartlarına ait bir çelik olan Toyota kodu TSG3100G ile adlandırılan SPH440-OD çelikleri incelenmiştir [4]. Özellikle SPH440-OD çeliği çarpışma sonucu aşırı yük altında bozulmama özelliğine sahip çeliktir aynı zamanda SAPH olarak da tanımlanır [5]. SPH270-C ve SPH440-OD, genellikle otomotiv endüstrisinde tercih edilen ve çelik levha üretiminde kullanılan çeliklerdir. Bu çeliklerin, yüksek mukavemetin gerekli olduğu aynı zamanda şekil alabilme özelliği gösteren araç şasisi, tekerliği gibi uygulama alanları bulunmaktadır [3,6].

Gazaltı kaynağı, MIG (Metal Inert Gas) /MAG (Metal Active Gas) olarak ayrılır. Gazaltı kaynağı yaparken koruyucu gaza ihtiyaç duyulur. Koruyucu gazın kullanım amacı havanın olumsuz etkilerinden kaynak bölgesini korumaktır [7]. Koruyucu gaz ortamı, Argon (Ar), Helyum (He) veya Ar+He karışımı gibi soygazlardan oluşursa MIG, karbondioksit, azot gibi aktif gazlar içerirse MAG olarak isimlendirilir [8]. Malzemelerin kaynaklanabilmesi için ergimenin gerçeklemesini sağlayacak ısının oluşması gerekmektedir. Isı, devamlı beslenen elektrod ile malzeme arasında oluşan arkın ve oluşan kaynak akımının tel elektrottan geçmesi ile oluşan etkileşme sonucu ısınmanın gerçekleşmesi ile telin ergimesinin sağlanması mantığına dayanmaktadır. Koruyucu gaz ile olumsuz sebepler ortadan kaldırılarak gazaltı ark kaynağı uygulamaları gerçekleştirilmektedir [9].

Farklı malzemelerin üstün özelliklerini bir araya getirebilmek amacıyla kaynaklı birleşimleri yapılmaktadır. Kasih vd. (2018) çalışmalarında otomotiv endüstrisinde genellikle kullanılan farklı kalınlıklara sahip SPC 440 ve SPH 440 çeliklerinin Nokta Direnç Kaynak (NDK) yöntemiyle birleşimlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu bağlamda, daha iyi mekanik sonuçlar elde etmek amacıyla proses parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmışlardır. Farklı kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvveti parametrelerinin Taguchi yöntemi ile sonuçlara etkisini değerlendirmişlerdir. İncelemeler sonucu kaynak prosesinde kontrol edilmesi gereken en önemli parametrenin kaynak süresi olduğunu bulmuşlardır [10]. Okuyan ve Uzun (2017), çalışmalarında 1 mm ve 4 mm kalınlığındaki SPH440 çelik lama ile 1,2 mm kalınlığında ve Ø31,8 mm çapındaki STKM800 boru profili, en iyi kaynak nüfuziyetini sağlamak amacıyla kaynak akımı, kaynak hızı ve kaynak gerilimi parametrelerini farklı kombinasyonlarda uygulayarak robot ark kaynağı ile birleştirmişlerdir. Sonuç olarak en iyi nüfuziyetin sağlandığı kaynak akımı, kaynak hızı ve kaynak gerilim değerlerini bulmuşlardır [11].

Literatürde SPH270-C ve SPH440-OD çeliklerinin robot ark kaynağı, punta kaynağı ile birleştirilmesine dair çalışmalara rastlanılmasına rağmen MAG kaynağı ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada literatür çalışmalarından farklı olarak SPH270-C ile SPH440-OD otomotiv çelikleri, MAG gaz altı kaynağı ile birleştirilmiştir. 3 farklı tel ilerleme hızı ve her tel ilerleme hızı için 3 farklı gerilim değerinde olmak üzere 9 farklı parametrede birleşimler gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin mikroyapısı optik mikroskopta analiz edilmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesi için çekme testleri ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri esas metal (EM), ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metali (KM) bölgeleri boyunca eksenlere paralel doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak parametrelerinin kaynak dikişine etkisi değerlendirilmiştir. Farklı kalınlıklardaki iki farklı sıcak haddelenmiş SPH270-C/SPH440-OD çeliklerin MAG kaynak uygulamaları ile literatüre ve otomotiv endüstrisine vereceği katkı çalışmanın önemini göstermektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

SPH270-C ve SPH440-OD, otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemet ve şekil alabilme yeteneği gösterebilmeleri sebebiyle yapı çeliği olarak kullanılmaktadırlar [12]. Deney sırasında kaynak işlemi için Gedik GeKA marka 1 mm çapındaki SG2 AWS A5 18(ER70 S-6) kodlu kaynak teli kullanılmıştır. Bu çeliklere ve kaynak teline ait kimyasal bileşim değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca çelikler ve kaynak teli ile ilgili mekanik özelliklerin bulunduğu değerler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. Esas metallerin (SPH270-C/SPH440-OD) ve SG2 elektrodunun kimyasal bileşimleri (%)

Alaşım Elementi (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Al	Fe
SPH270-C	0,04	0,01	0,24	0,011	0,01	0,009	0,010	0,02-0,05	Kalan
SPH440-OD	0,15	0,01	0,7	0,013	0,007	0,026	0,022	0,02-0,05	Kalan
SG2 Kaynak Teli	0,08	0,85	1,45	<0,02	<0,025	<0,3	-	-	Kalan

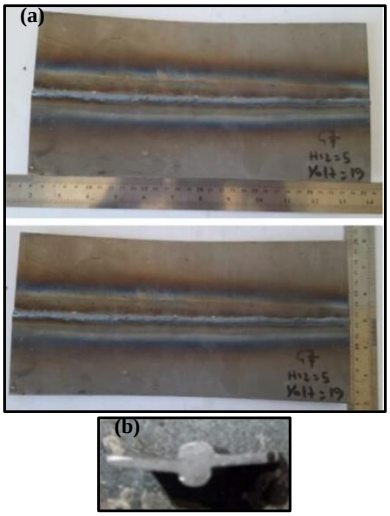
Tablo 2. Esas metallerin (SPH270-C/SPH440-OD) ve SG2 elektrodunun mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Yüzde Uzama (%)
SPH270-C	165-325	≥270	39
SPH440-OD	255-410	≥440	35
SG2 Kaynak Teli	420	500-640	22

2 mm kalınlığındaki SPH270-C ile 3 mm kalınlığındaki SPH440-OD çelikleri EN ISO 14273 standartlarına göre NTE 2500/4B devirmeli giyotin makas ile 300x75 mm boyutlarında hazırlanmıştır [13]. Sac malzemeler MAG gazaltı kaynağı ile manuel çift taraflı tek pasolu olarak birleştirilmiştir (Şekil 1). Kaynak parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. GekaMac marka GKM 500 su soğutmalı kaynak makinesinde 1 mm çapında SG2 AWS A5 18 kaynak teli kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak HB212 karışımı tercih edilmiştir. Koruyucu gazın gaz bileşimi %2 oksijen, %12 karbondioksit ve %86 balans argon gazıdır.

Tablo 3. Kaynak parametreleri

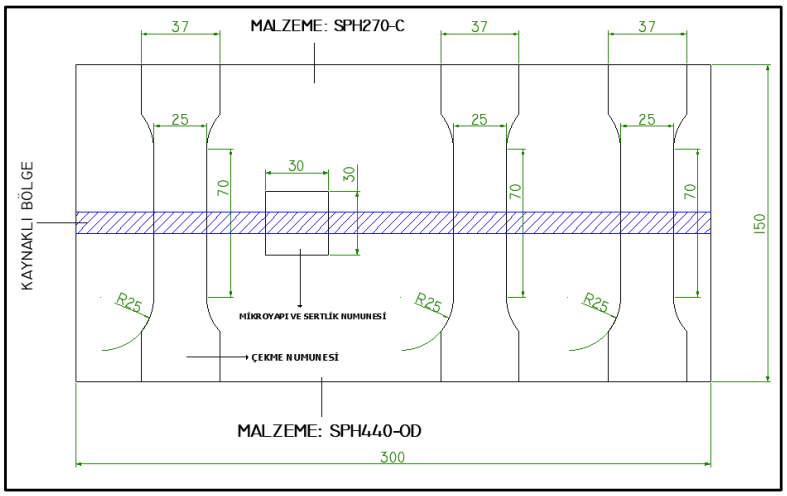
Kaynak Kodu	Tel İlerleme Hızı (m/dk)	Gerilim (V)	Gaz Miktarı (lt/dk)
A1	5	15	14
A2	5,5	15	14
A3	6	15	14
B1	5	17	14
B2	5,5	17	14
B3	6	17	14
C1	5	19	14
C2	5,5	19	14
C3	6	19	14



Şekil 1. 5m/dk- 19 V parametrelerinde elde edilen kaynaklı birleşimlerin makro görüntüsü (a) 300x150 mm boyutlarında hazırlanan numune (b) Kaynaklı birleşimin mikroyapı incelemeleri için hazırlanan kesit alan görüntüsü

Kaynaklı numunelerin mikroyapı incelemesi ve mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyi, sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. BODOR marka lazer kesim makinesinde TS EN ISO 4136 standardına bağlı

kalınarak mikroyapı ve çekme deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2). Mikroyapı çalışmaları için hazırlanan numuneler sertlik ölçümleri için de kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için öncelikle 120, 220, 360, 600, 800 1000 meshlik SiC zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında numune yüzeyi, 3 µm ve 1 µm elmas pasta solüsyonları ile parlatılarak dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi, %2 nital (%98 metanol+%2 nitrik asit) çözeltisinde 2 saniye aralıklarla fazlar tespit edilene kadar tekrarlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı görüntülemeleri için Nikon Eclipse LV1500N marka optik mikroskop kullanılmıştır. EMCO TEST DuraScan 20 marka cihazda HV 0.5 yük 10 saniye süreyle uygulanarak mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Çekme testleri, Shimadzu AG-IC (100 kN) marka çekme-basma cihazında 2 mm/dk çene hızında gerçekleştirilmiştir. Her parametreden üçer adet olmak üzere toplamda 27 adet numune çekme deneyine tabi tutulmuş ve sonuçların aritmetik ortalaması alınarak her parametre için ortalama çekme dayanım değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2. 300x150 mm boyutlarında hazırlanan kaynaklı birleşimden lazer kesim yöntemiyle elde edilen 1 adet mikroyapı ve 3 adet çekme deney numunelerinin ölçüleri

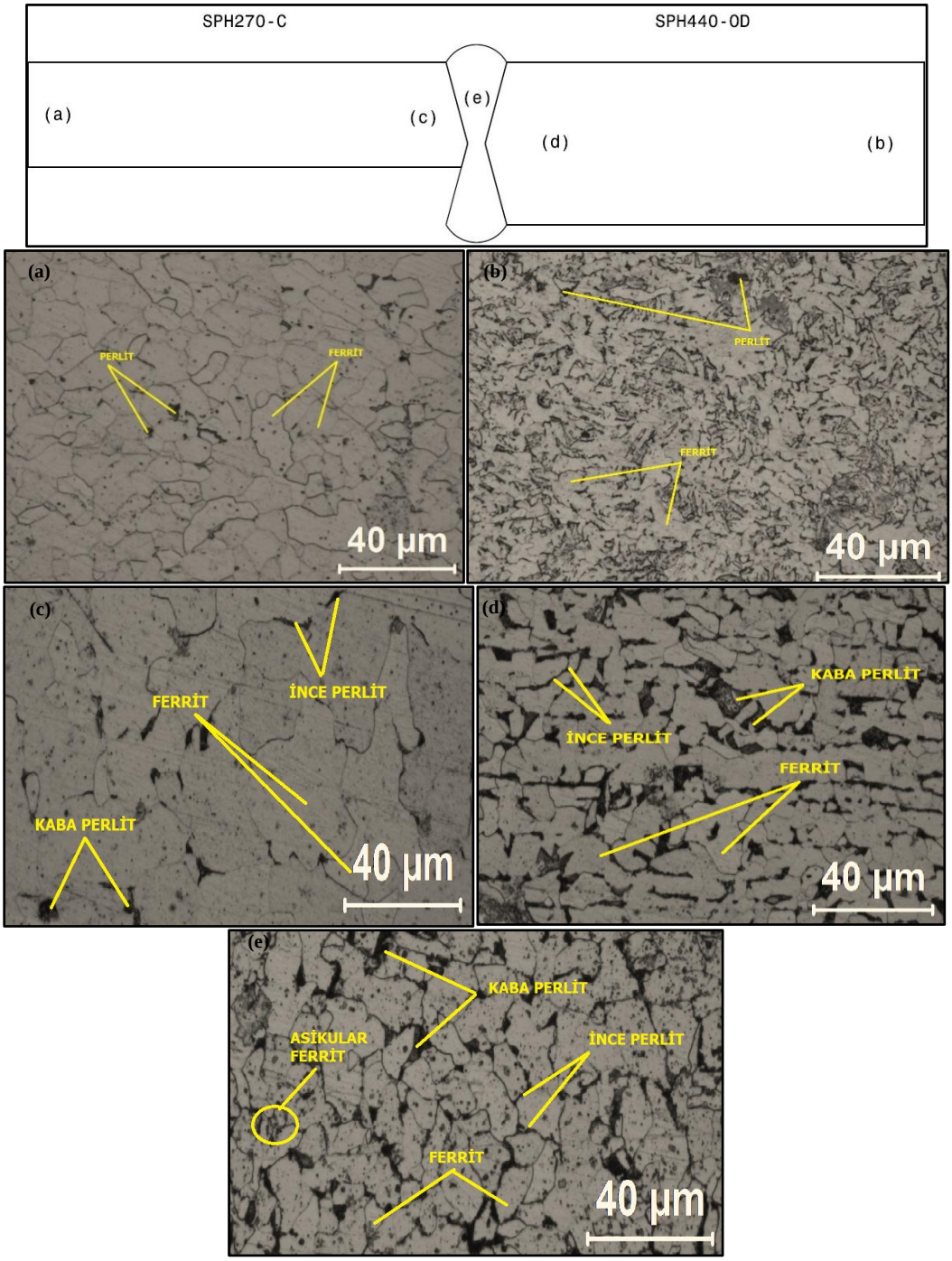
III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. Mikroyapı incelemeleri

MAG gazaltı kaynak işleminde oluşan yüksek ısı ve sonrasında hızlı soğuma neticesinde EM, ITAB ve KM bölgelerinde farklı mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 3a ve 3b'de EM mikroyapısının ince ve homojen dağılımlı ferrit ve perlit yapıda olduğu gözlenmiştir. Şekil 3c ve 3d'de ITAB bölgelerine bakıldığında kaynak işleminde oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle tane irileşmeleri görülmüştür. ITAB bölgelerinden KM'e doğru tane sınırı sayısı artmıştır (Şekil 3e). Tane sınırı sayısı artması dislokasyon hareketini zorlaştırmaktadır. Dislokasyon hareketinin engellenmesi ise KM sertliğinin ve çekme dayanımının diğer bölgelere göre daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. KM, ferrit, perlit ve yer yer asiküler ferrit yapıya sahiptir. Literatür araştırmalarında asiküler ferrit oranının artması ile kaynak metalinin mukavemetinin ve tokluğunun arttığı ifade edilmiştir [14].

Ferrit oda sıcaklığında % 0,009 oranında C bulunduran bir fazdır. Faz bölgesinde karbon miktarının düşük olması sertliğin az olduğu anlamına gelmektedir. Bu fazdaki malzemeler işlemeye elverişli ve sünek yapıdadır. Perlit fazı, ferrit ve sementit (Fe_3C) karışımı olan bir fazdır. Sementit fazı gevrek ve sert yapıya sahiptir. Sementit fazının yapıdaki artışı malzemenin dayanım ve sertliğini arttırır, süneklik ve tokluğunu azaltır. Malzemelerin mekanik özelliklerine sementit oranı dışında fazların tabaka kalınlıkları da etki etmektedir. Perlit fazının bir türü olan ince perlit fazı, ferrit ve sementit yapılarının tekrarlı ve ince tabakalar oluşturduğu bir faz yapısına sahiptir. Kaba perlit yapısına göre dayanıklı ve daha sert olmasına karşın sünekliği daha azdır. Perlitin diğer türü olan kaba perlit, bölgesinde ferrit ve sementit yapılarının tekrarlı ve kalın tabakalar oluşturduğu bir faz düzenine sahiptir. İnce perlite göre yüksek tokluğa, sünekliğe sahiptir [15]. EM bölgesinden farklı olarak ITAB ve KM'de ince perlit fazlarının görülmesi yapıdaki sertliğin artmasına sebep olmuştur.



Şekil 3. MAG kaynak işlemi sonrası oluşan mikroyapı görüntüleri
a) SPH270-C EM b) SPH440-OD EM c) SPH270-C ITAB d) SPH440-OD ITAB e) KM

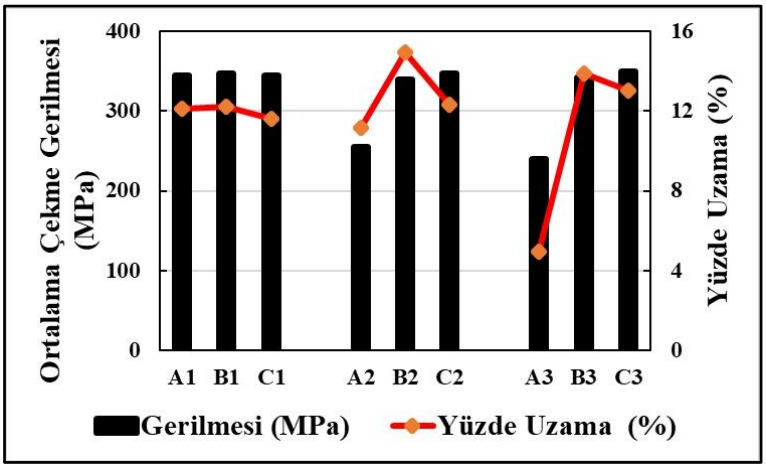
B. Çekme Deneyi ve Kaynak Dikişi İncelemeleri

Tablo 3'te verilen 9 farklı kaynak parametresi için her parametreden 3'er adet numune çekme deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 4 ve Şekil 5' te çekme deneyi sonuçlarına göre ortalama çekme gerilmesi ve yüzde uzama verileri gösterilmiştir.

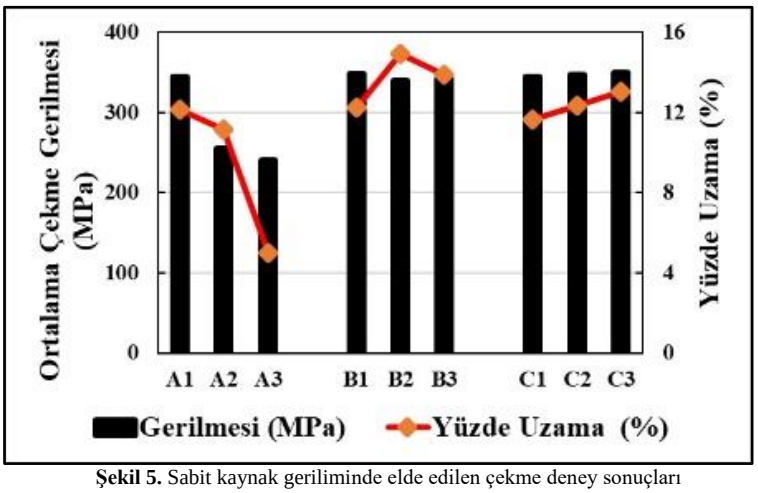
Şekil 4 incelendiğinde en düşük çekme gerilimi ortalaması 239,81 MPa ile A3 kodlu numunede görülmüştür. En yüksek çekme gerilimi değeri 349,87 MPa ile C3 kodlu çekme numunesinde görülmüştür. Yüzde uzama değerlerine bakıldığında ortalama yüzde uzama değerinde en yüksek değere %14,92 ile B2 kodlu numunede ulaşılmıştır. En düşük yüzde uzama değeri ise %4,98 ile A3 kodlu numunede gerçekleşmiştir. Kaynak gerilimi arttıkça 2. grup ve 3. grupta çekme dayanımı düzenli olarak artış göstermiştir. 1. Grupta A1' den B1' e çekme

dayanımında yükselme olsa da C1 numunesinde çekme dayanımında çok az düşme olduğu gözlemlenmiştir. Kaynak esnasında kaynak nüfuziyetinin yeteri kadar sağlanamaması sebebiyle çekme dayanımına olumsuz etki yaptığı düşünülmektedir.

Şekil 5 incelendiğinde, kaynak gerilimi sabit tutulup tel hızının kademeli olarak artırılması durumunda, 3. grupta çekme dayanımında düzenli olarak artış olduğu görülmüştür. Kılınçer ve Kahraman (2009) çalışmalarında, kaynak geriliminin sabit tutulup, tel hızının kademeli olarak artırılması koşullarında gerçekleştirilen MIG kaynağı uygulamasında iki ayrı numunenin çekme deneyi sonuçlarında çekme gerilmesi değerlerinde artış olduğunu ifade etmiştir [16]. 3. Grupta tel ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak çekme gerilmesi değerleri artış göstermiştir. Ancak, 1. ve 2. gruptaki çekme gerilim değerleri incelendiğinde sırasıyla A1'den A3'e, B1' den B3'e çekme dayanımlarında düşüşler yaşanmıştır. Kaynaklı plakada kaynak nüfuziyetinin sağlanamaması sonucu oluşan olumsuz durum bu plakalara ait çekme numunelerinde dayanım artışını engellemiştir. Literatürde farklı metallerin kaynaklı birleşimlerinde bağlantı çekme dayanımlarının, birleştirilen farklı metallerin çekme dayanımının en düşük olanından yüksek olması durumunda birleşimin başarılı olarak kabul edileceği bildirilmiştir [16,17]. SPH270-C çeliğinin çekme dayanımı 270 MPa ve SPH440-OD çeliğinin ise çekme dayanımı 440 MPa' dır. Farklı kaynak parametrelerinde bulunan çekme dayanım değerleri incelendiğinde SPH270-C çeliğine göre A2 ve A3 haricinde tüm numunelerde daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Genel olarak kaynaklı birleşimlerin çekme dayanım değerleri iki ana malzemenin çekme dayanım değerlerinin arasında bulunmuştur.



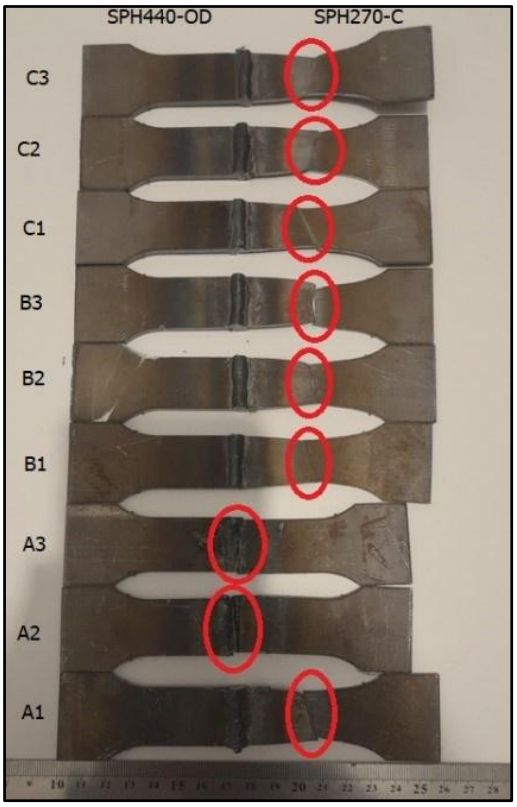
Şekil 4. Sabit tel ilerleme hızında elde edilen çekme deney sonuçları



Şekil 5. Sabit kaynak geriliminde elde edilen çekme deney sonuçları

Kaynaklı numunelerde kopmalar Şekil 6' da görüldüğü üzere A2, A3 numunelerinde KM'de meydana gelmiştir. Bu kaynak parametrelerinde kaynaklanabilirliğin uygun olmadığı görülmüştür. Diğer numunelerde kopmalar ITAB ve KM dışında, SPH270-C otomotiv çeliğinin EM bölgesinde meydana gelmiştir. Yürük vd. (2017) kaynaklı numunelerde kopmaların KM ve ITAB dışında, EM' de meydana geldiğini, kaynaklı bağlantılarda maksimum çekme dayanımı değeri ile % uzama değerlerinin birbirine yakın olduğunu ifade etmişlerdir. Farklı malzemelerin kaynak işleminde ITAB ile KM çekme dayanımı mukavemetinin EM' lerden çekme mukavemeti düşük olandan yüksek bulunması durumunda, kaynak işleminin beklenen şartı sağladığını belirtmişlerdir [18]. A2 ile A3 parametreleri dışında beklenilen şartların sağlandığı görülmüştür. SPH440-OD çeliğinin çekme

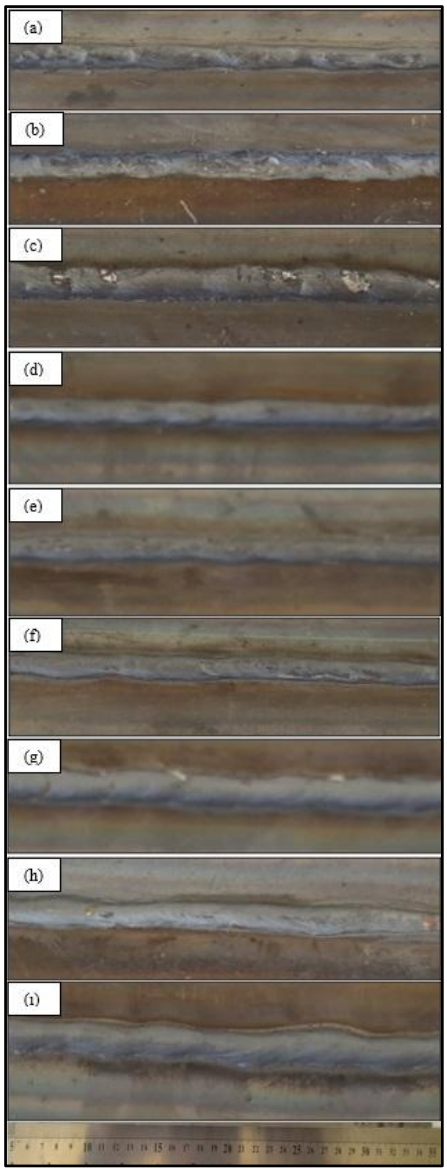
dayanımının SPH270-C çeliğinin çekme dayanımından daha yüksek olması, kopmanın SPH270-C çeliğinde meydana gelmesine sebep olan önemli bir faktördür.



Şekil 6. Çekme testi sonucu farklı parametrelerde elde edilen numunelerin kopma bölgeleri

Tablo 2'de SPH270-C ile SPH440-OD çeliklerinin mekanik özellikleri incelendiğinde sırasıyla %39, %35 uzama verisi görülmektedir. Çekme deneyi sonucunda kaynaklı numunelerde A3 numunesi haricinde diğer parametrelerde uzama %11,15 - %14,92 aralığında gerçekleşmiştir (Şekil 4 ve Şekil 5). Daha düşük yüzde uzama değeri elde edilme sebebi, EM sertliğinin KM sertliğinden daha düşük olması olarak açıklanabilir [17]. Deney sonucunda, birbirine yakın yüzde uzama verileri elde edilmesinin sebebinin, akım etkisine göre ısı girdisi farklılıklarının kaynaklı çekme numunelerinin yüzde uzama değerlerinde farklılık oluşturacağı şeklinde ifade edilmiştir [13]. Çekme deneyi sonucu A2 ile A3 numunelerinde hem kopmaların KM'de meydana gelmiş olması hem de A3 kodlu numunede % uzama değerinin düşük olması, bu kaynak parametrelerinde numunelerin kaynaklanabilirliğinin uygun olmadığını göstermiştir.

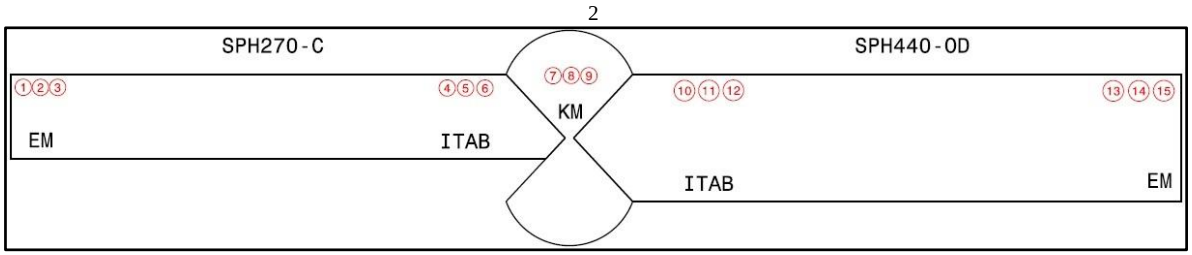
Kaynak işlemi sonrası kaynaklı bölgelerden alınan makro görüntüler Şekil 7' de verilmiştir. Kaynak dikişleri, tel ilerleme hızları sabit tutulup gerilim değerlerinde değişimler yapılarak incelenmiştir. 5 m/dk tel ilerleme hızı ile 15V-17V-19V (Şekil 7 a, d, g) gerilim değerlerinde gerilim değerinin artmasıyla kaynak dikiş genişliğinde artış görülmüştür. Ayrıca, gerilim değeri azaldıkça dikiş yüksekliği artış göstermiştir. Literatürde gerilimin düşük olmasının dar, dışbükey görünümlü dikişlerin oluşmasına sebep olduğu belirtilmiştir [13]. Aynı şekilde tel ilerleme hızı 5,5 m/dk (Şekil 7 b, e, h) ile 6 m/dk (Şekil 7 c, f, ı) için gerilim değerleri değişimlerinde A2 ve A3 numuneleri haricinde kaynak dikişindeki değişimler aynı şekilde meydana gelmiştir. A2 (5,5 m/dk tel hızı, 17 V gerilim) ve A3 (6 m/dk tel hızı, 19 V gerilim) numunelerinde ise, dikiş sürekliliği ve uygun kaynak nüfuziyetinin sağlanmadığı görülmüştür. Diğer parametrelerdeki kaynak işlemlerinde, uygun kaynak hızında ve kaynakçının el becerisi sayesinde birleşimlerde uzama verileri ve çekme gerilimleri yakın sonuçlar göstermiştir. Dikiş sürekliliklerinde olumsuzluklar gözlenmemiştir. Kaynak parametrelerinin uyumlu olması sebebiyle kaynak kalitesi ve mekanik özelliklerin istenilen değerlerde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, A2 ve A3 numuneleri dışında sorun tespit edilmemiştir.



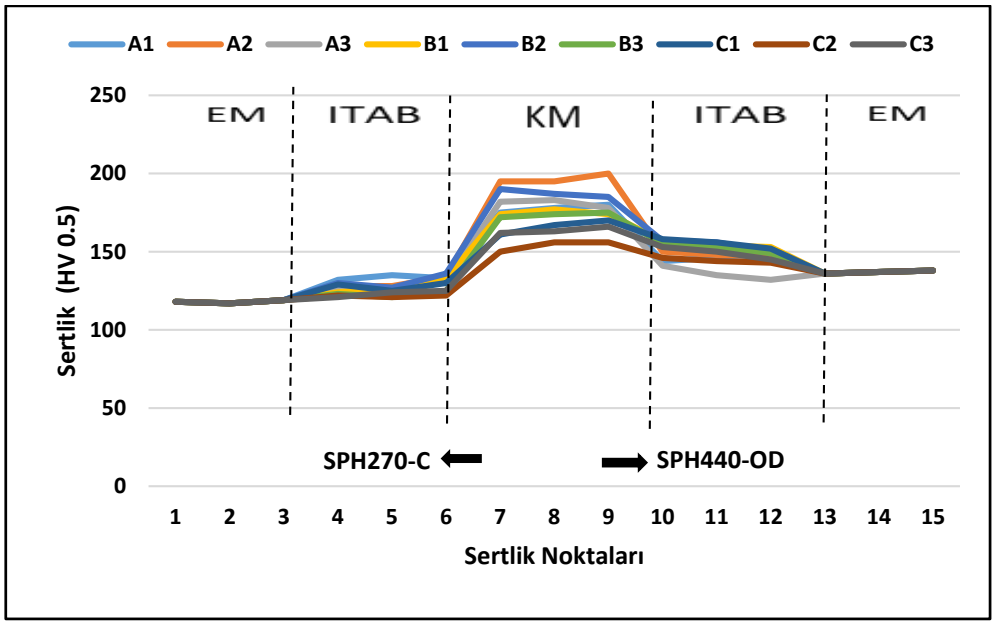
Şekil 7. Kaynak dikişlerinin farklı parametrelerde elde edilen makro görüntüleri a) A1 b) A2 c) A3 d) B1 e) B2 f) B3 g) C1 h) C2 ı) C3

C. Mikrosertlik testi

Numunelerin mikrosertlik ölçümleri sırasıyla EM, ITAB ve KM bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 8' de sertlik ölçüm noktaları şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 9' da Vickers mikrosertlik deneyi ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 8. Sertlik ölçüm noktalarının şematik gösterimi



Şekil 9. Vickers sertlik ölçüm sonuçları

Şekil 9 incelendiğinde, kaynaklı bağlantılardaki ITAB ve KM sertliklerinin her iki metalden de yüksek olduğu görülmüştür. Yürük vd. (2017) çalışmalarında S235JR karbon çeliği ile AISI430 ferritik paslanmaz çeliği MIG gazaltı ark kaynağı yöntemi ile farklı kombinasyonlarda birleştirmiş ve bu birleşime HV 0,5 yük altında Vickers sertlik deneyi uygulamışlardır. Bu deney sonucu EM' den KM' e doğru sertlik değerlerinde artış olduğunu ifade etmişlerdir [18].

ITAB sertliğine bakıldığında, SPH440-OD çeliği ITAB sertliğinin, SPH270-C çeliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Her iki ITAB' ın sertlik değerinin EM sertlik değerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Literatürde her iki ITAB' daki bu sertlik artışına, kaynak sırasındaki ısı girdisi ve kaynak işlemi sonrasında soğuma hızının malzemelerin mikroyapısını etkilemesinin neden olduğu ve bu durumun da ITAB' da sertliğin EM' e göre fazla olmasına sebep olduğu belirtilmiştir [18].

Tüm plakalara ait sertlik değerleri, SPH270-C çeliğinde EM'de 118 HV, ITAB'da 121-138 HV, SPH440-OD çeliğinde EM'de 137 HV, ITAB' da 136-155 HV, KM' de ise 154-196 HV ölçüm aralığında elde edilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri sonucunda, ITAB ve KM'de görülen ince perlitin malzemelerin sertliğini arttırdığı belirtilmişti. ITAB ve KM sertlik değerinin EM' den daha fazla olduğu görülmüş bu sebeple metalografi ve sertlik deney sonuçları birbirini desteklemiştir.

IV. SONUÇLAR

MAG gazaltı kaynak yöntemi ile 2 mm SPH270-C ile 3 mm SPH440-OD çelik malzemelerinin farklı parametrelerde birleştirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- Kaynak işlemleri sonrasında mikroyapıda EM, ITAB ve KM olmak üzere 3 farklı bölge meydana gelmiştir. EM ağırlıklı olarak Ferrit ve perlit fazlarından oluşurken, EM' den KM' e doğru ilerledikçe tane irileşmesi meydana gelmiş ve ITAB' dan KM' e doğru tane sınırı sayısı artmıştır.
- C3 numunesinde en yüksek çekme gerilimi (349,87 MPa) elde edilmiştir. Genel olarak kaynak gerilimi arttıkça çekme dayanımı artış göstermiştir. Ancak tel ilerleme hızı arttıkça 1. ve 2. Grupta çekme dayanım değerleri azalırken 3. Grupta artmıştır.
- Kaynaklı birleşimlerde, SPH440-OD çeliğinden daha düşük dayanıma sahip SPH270-C çeliğine göre genel olarak daha yüksek çekme gerilmesi değerleri elde edilmiştir.
- A2 ve A3 numunelerinde kopmalar KM'de meydana gelirken, diğer tüm numunelerde birleşimlerin SPH270-C EM bölgesinde gerçekleşmiştir.
- 5 m/dk tel ilerleme hızında gerilim değeri arttıkça, kaynak dikiş genişliği artmış ancak kaynak dikiş yüksekliği azalmıştır. 5,5 m/dk ve 6 m/dk tel ilerleme hızı değerlerinde ise gerilim değeri arttıkça A2 ve A3 numuneleri haricinde kaynak dikişindeki değişimler 5 m/dk ilerleme hızı sonuçları ile benzer şekilde meydana gelmiştir.
- Kaynaklı bağlantılardaki ITAB ve KM sertliklerinin her iki metalden de yüksek olduğu görülmüştür. Sertlik değerleri her iki metal için de EM, ITAB ve KM boyunca artış göstermiştir.

KAYNAKLAR

[1] Güney, B. (2021). Microstructure analysis of welding fume of low and medium carbon steels. *Revista de Metalurgia*, 57 (1), 1-9.
[2] Güney, B., Dilay, Y., Solomon, M.M., Gerengi, H., Özkan, A., & Yıldız, M. (2022). Corrosion characteristic of plasma spray, arc spray, high velocity oxygen fuel, and diamond jet coated 30MnB5 boron alloyed steel in 3.5 wt.% NaCl solution. *Corrosion Reviews*, 40 (1), 51–63.
[3] Aliandi, F., Muchlis, A., & Suryady, S. (2021). Manufacturing process and tonase calculation on bumper rear axle bracket Rh. *International Journal of Science, Technology & Management*, 2 (6), 1970-1979.
[4] Ertürk, Ç. (2024). *Gazaltı kaynağı ile birleştirilen farklı otomotiv çeliklerinin mikroyapı ve çekme özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
[5] Kaya, M.B. (2024). *MAG kaynak yöntemi ile birleştirilen SPH440-OD çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik.
[6] Nippon Steel Corporation. (2020). *Hot-Rolled Steel Sheets and Coils*. Marunouchi, Chiyodaku, Tokyo, Japonya, https://www.nipponsteel.com/product/catalog_download/pdf/U001en.pdf, (16.05.2025)
[7] Okuroğulları, Y. (2022). *Gazaltı kaynağı ile birleştirilen farklı özellikteki çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
[8] Weman, C., & Linden, G. (2006). *MIG Welding Guide*. CRC Press, USA, 319.
[9] Kahraman, N., & Gülenç, B. (2020). *Modern Kaynak Teknolojisi ve Kaynak İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği*. Epa-Mat Basım Yayın Ltd. Şti., Ankara, 348.
[10] Kasih, T. P., Kharisma, A., & Suryanto, A. (2018). Optimization of Spot Welding Process Parameters on Dissimilar and Unequal Thickness of Metal Sheets By Using Taguchi Technique. *The 2nd International Conference on Eco Engineering Development 2018 (ICEED 2018)*. 5-6 September, Alam Sutera, 1-6.
[11] Okuyan, A. A., & Uzun, H. (2017). Boru ve lamanın robot ark kaynak tekniğiyle birleştirilmesinde optimum kaynak parametrelerinin belirlenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 297-307.
[12] BBN Steel Co.,Ltd. (2025). *JIS G3113 SAPH440 Chemical & Mechanical Composition*. Zhengzhou, China, http://www.bbnsteelplate.com/news/jis-g3113-saph440-chemical-mechanical-composition_933.html, (24.07.2024)
[13] Kaya, Y. (2018). S235JR ile S355JR yapı çeliklerinin özlü tel elektrotla MAG kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 21 (3), 597-602.
[14] Ulewicz, R., Mazur, M., & Bokuyka, O. (2013). Structure and mechanical properties of fine-grained steels. *Periodica Polyctechnica Transportation Engineering*, 41(2), 111-115.
[15] Kanca, Y. (2024). *Faz Dönüşümleri*. Çorum, Türkiye, https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/duyurular/yusufkanca@hititedutr211220180X7J9S0V.pdf, (29.07.2024)
[16] Kılınçer, S., & Kahraman N. (2009). AISI 409 ve Ç1010 çeliğin östenitik elektrod kullanarak MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (1), 23-31.
[17] Aslanlar, S. (2009), Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları - Elektrik Ark Kaynak ve Gaz Kaynak Teknolojisi Ders Notu, Sakarya Üniversitesi, https://kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/kaynak-teknolojisi-salim-aslanlar.pdf, (16.05.2025).
[18] Yürük, A., Bozkurt B., & Kahraman N. (2017). S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin MİG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 90-97.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 321-332, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1590938
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Bilişsel Kablosuz Algılayıcı Ağlar için IEEE 802.22 tabanlı Düğüm Yerleştirme Yaklaşımının Performans Değerlendirmesi

Performance Analysis of IEEE 802.22 based Node Placement Approach for Cognitive Wireless Sensor Networks

Hüseyin Ekici[1], Muhammed Enes Bayrakdar[2*]

Geliş / Received: 25/11/2024 ***Revize / Revised: 01/01/2025*** ***Kabul / Accepted: 04/01/2025***

ÖZ

Bu çalışmada, bilişsel kablosuz bölgesel alan ağı (WRAN) teknolojisi tabanlı bir algılayıcı ağ yapısı önerilmektedir. WRAN teknolojisinde, bir tüketici tesis ekipmanı (CPE) ve bir baz istasyonu, mevcut haberleşme sistemlerime herhangi bir zararlı müdahaleye neden olmadan, sabit kanallar aracılığıyla fırsatçı bir şekilde iletişim kurmaktadır. Ağ yapısında, CPE'ler sıcaklık, basınç gibi çevresel verileri algılayıp baz istasyonuna iletmek amacıyla zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) tekniğini kullanmaktadır. Önerilen algılayıcı düğüm yerleştirme tekniği sayesinde, geniş bir alana çok sayıda düğüm yerleştirilmiştir. Ayrıca, ağ sürdürülebilirliğini artırmak için bulanık mantık tabanlı röle seçimi yaklaşımı önerilmiştir. Çevresel parametreleri tespit etmek için algılayıcı düğümler tüm bölgeyi kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. Algılayıcı düğümlerin algıladığı veriler merkezi bir konumda sabit olarak bulunan toplayıcı istasyonda toplanmıştır. Önerdiğimiz tekniğin simülasyon modeli Riverbed Modeler kablosuz haberleşme yazılımı ile tasarlanmıştır. Önerdiğimiz algılayıcı düğüm yerleştirme ve röle düğüm seçimi yaklaşımları sayesinde en az sayıda kablosuz algılayıcı düğüm ile belirli bir alanın izlenmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Algılayıcı Ağlar; Bilişsel Radyo; Bulanık Mantık; IEEE 802.22; Düğüm Yerleştirme.

ABSTRACT

In this study, a sensor network structure based on cognitive wireless regional area network (WRAN) technology is proposed. In WRAN technology, a consumer premises equipment (CPE) and a base station communicate opportunistically via fixed channels without causing any harmful interference to existing communication systems. In the network structure, CPEs use the time division multiple access (TDMA) technique to detect environmental data, such as temperature, pressure, etc. and transmit them to the base station. With the help of node placement approach, a large number of sensor nodes are placed in a large area. Additionally, a fuzzy logic-based relay selection approach is proposed to improve network sustainability. To detect environmental parameters, sensor nodes are located to cover the whole area. The values detected by the sensor nodes were collected by the collector station fixed in the center. The simulation model of the proposed approach was implemented using Riverbed

[1]İletişim: huseyinekic@gmail.com (https://orcid.org/0009-0003-2892-3325)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
[2]*Sorumlu yazar iletişim: muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-9446-0988)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

Modeler software. Thanks to the proposed node placement and relay node selection approaches, a certain area is monitored with a minimum number of wireless sensor nodes.

Keywords- Sensor Networks; Cognitive Radio; Fuzzy Logic; IEEE 802.22; Node Placement.

I. GİRİŞ

Kablosuz algılayıcı ağlar, ortamı sezme yeteneğinden dolayı kablosuz haberleşme alanında en yaygın kullanılan teknolojilerden biridir. Kablosuz algılayıcı ağ, algılayıcı düğümlerin algılama yeteneği sayesinde çevresel izleme açısından insanların hayatını kolaylaştırmaktadır. Algılayıcı düğümler her türlü veriyi otomatik olarak algılar ve toplayıcı istasyon algılanan veriye ilişkin gerekli işlemleri gerçekleştirir. İnsan kontrollü sistemlerle karşılaştırıldığında, güvenlik uygulamalarından çevresel izlemeye kadar her alanda büyük önem taşımaktadır.

IEEE 802.22 bilişsel radyo WRAN teknolojisi, kırsal alanlarda kullanılmayan televizyon kanallarından etkin bir şekilde yararlanmak amacıyla standartlaştırılmıştır. Kırsal alanlarda nüfus yoğunluğunun çok düşük olması nedeniyle herhangi bir spektrum maliyeti olmadan WRAN tabanlı kablosuz algılayıcı ağ kullanılarak çevresel izleme yapılması kaçınılmaz bir fırsattır. Ayrıca, WRAN sabit konum tabanlı bir teknolojidir ve çevresel izlemede algılama düğümleri için hareketlilik gerekli değildir. Ayrıca, sabit lisanslı iletişimler WRAN teknolojisinin yardımıyla her türlü zararlı müdahaleden korunmaktadır. WRAN teknolojisinde hem baz istasyonları hem de CPE, televizyon kanallarında sabit lisanslı haberleşmenin varlığını tespit etme yeteneğine sahiptir. Ancak kanal yönetimi kararı sadece baz istasyonu tarafından verildiği için CPE herhangi bir karar vermemektedir.

Kablosuz algılayıcı cihazların fiyatları düşse de, yüzlerce veya binlerce düğüm gerektiren uygulamalar hâlâ yüksek maliyetli olabilmektedir. Bu tür uygulamalarda, algılayıcı düğümlerin yerleşimi büyük önem taşır. Bunun sebebi, kablosuz algılayıcı ağlarda sensör sayısının hem maliyeti hem de sistem performansını doğrudan etkilemesidir. Düğümlerin yerleştirilmesinde, sensör sayısını minimumda tutmak, kapsama alanı ihtiyaçlarını karşılamak ve geniş ağlarda düğümlerin doğru şekilde dağıtımını sağlamak temel gerekliliklerdir.

Algılayıcı düğümler genellikle izlenecek alanın yapısına ve niteliğine bağlı olarak rastgele veya deterministik olarak yerleştirilmektedir. İzlenecek bölgenin özellikleri bilinmiyorsa veya bölgeye ulaşılamıyorsa rastgele dağılım kullanılmaktadır. Bölgeye erişim sağlandığında ve bölgenin özellikleri ayrıntılı olarak bilindiğinde, algılayıcı düğümlerin belirli noktalara yerleştirilmesinde deterministik dağıtım yöntemi uygulanabilir.

Makalenin bilimsel katkısı, bilişsel WRAN teknolojisini kullanarak spektrum maliyeti olmadan kırsal alanlarda çevresel izleme için optimize bir algılayıcı ağ yapısı önermesidir. Bulanık mantık tabanlı röle seçimi ve minimum düğüm yerleştirme stratejileri, ağın sürdürülebilirliğini ve enerji verimliliğini artırmıştır. WRAN teknolojisinin yeni uygulama alanlarına yönelik potansiyelini göstermesiyle literatüre yenilikçi bir perspektif sunmaktadır.

Bu çalışmanın katkıları şunlardır: (i) Çevresel izleme için WRAN teknolojisi tabanlı algılayıcı ağ kullanılmıştır. (ii) Kullanılmayan boş televizyon kanallarından herhangi bir spektrum maliyeti olmadan yararlanılmıştır. (iii) Algılayıcı ağın toplam enerji tüketimi minimum seviyeye düşürülmüştür. (iv) Kablosuz algılayıcı ağ modeli, Riverbed Modeler yazılımı ile simüle edilmiştir. (v) Düğüm yerleştirme yöntemleri için matematiksel formüller oluşturulmuştur. (vi) Farklı düğüm yerleştirme yaklaşımlarında ihtiyaç duyulan algılayıcı düğüm sayıları karşılaştırılmıştır.

II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

İlgili çalışmalarda, bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda düğüm yerleştirme ile ilgili pek çok araştırma bulunmaktadır. Tay ve Şentürk, algılayıcı ağların enerji tüketimini azaltmak ve ömrünü uzatmak amacıyla yeni bir kümeleme algoritması önermişlerdir [1]. Bu amaç doğrultusunda, geliştirdikleri algoritma, popüler kümeleme algoritmaları LEACH ve PEGASIS'ten daha verimli bir algılayıcı ağ yapısı oluştururken CH seçimine yeni bir bakış açısı kazandırmıştır. Li ve diğ., titreşim kontrol problemini çözmek için eyleyicilerin ve sensörlerin yerleşim optimizasyonu yöntemlerini ve merkezi olmayan uyarlanabilir bulanık kontrol yöntemlerini sunmuşlardır [2]. Ayrıca, denklemler oluşturarak kontrol yöntemlerine bağlı olmayan optimizasyon kriterleri önermişlerdir. Leitold ve diğ., dinamik sistemlere ek sensörler atamak için kümeleme benzetimi tabanlı metodoloji önermişlerdir [3]. Önerilen metodoloji sayesinde sistemin gözlemlenmesi basitleştirilmektedir. Zhang ve diğ., yeni bir sensör yerleştirme stratejisi geliştirmişlerdir [4]. Stratejinin ana özelliği, uzaysal dağılımın temel özelliklerinden yararlanarak sensörleri konumlandırmaktır.

Francés-Chust ve diğ., düğüm yerleşiminin nereye kurulacağı kısmını şu unsurlar aracılığıyla ele almışlardır: düğümlerin sızıntıya karşı hassasiyeti, bilgilerin belirsizliği ve koşullu entropi maksimizasyonu [5]. Düğümler arasındaki karşılıklı etkiyi görmek için bir ağdaki aday sensörler arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir. Peng ve diğ., yerleştirme değerlendirilmesini, çok kriterli grup karar verme konusu olarak formüle ederek yeni bir algoritma sunmuşlardır [6]. Ardından bulanık kümesi ve küme çifti analizi kavramlarını doğrudan ve dolaylı olarak sunmuşlardır. Somesula ve diğ., kullanıcı hareketliliğinden ve kullanıcı etkileşim süresinin rastgeleliğinden yararlanan sisteme ele almışlardır [7]. İşbirliğine dayalı bir önbellekleme probleminde, kullanıcı cihazlarının çeşitli hızlarda hareket ettiği gerçekçi bir senaryoyu incelemişlerdir. Irid ve diğ., Gauss karışımı yarı tanımlı programlama adı verilen bir yerelleştirme algoritmasının geliştirilmiş halini sunmuşlardır [8]. Geliştirdikleri algoritma, maksimum olabilirlik konum tahmincisini elde etmek için alınan sinyal gücü değerini kullanmaktadır.

Zahedi ve diğ., sanal ağlarda uygun çözüm kalitesi-hız dengesini sağlamak için bulanık mantık ve genetik algoritmaya dayalı birleşik bir model önermişlerdir [9]. Bu yöntemde, çevrimiçi yerleştirme ve yönlendirme için çok kriterli bulanık çıkarım sistemi kullanmışlardır. Emami ve diğ., bulanık ortalamalar ve aritmetik optimizasyon algoritmasını temel alan hibrit bir yerleştirme yöntemi sunmuşlardır [10]. Bu yöntem, her iki algoritmanın da avantajlarından tam olarak yararlanan çok modlu ve popülasyon tabanlı yinelemeli bir algoritmadır. Sun ve Qu, doğrusal optimizasyon bulanık ortalamaları ve yapay sinir ağlarını kullanan etkili bir fotodedektör yerleştirme yöntemi önermişlerdir [11]. Bu yöntemde, çalışma yüzeyi fotodedektör düzeni için doğrusal optimizasyon kullanılırken, verileri filtrelemek için bulanık ortalamalar yöntemi kullanılmıştır.

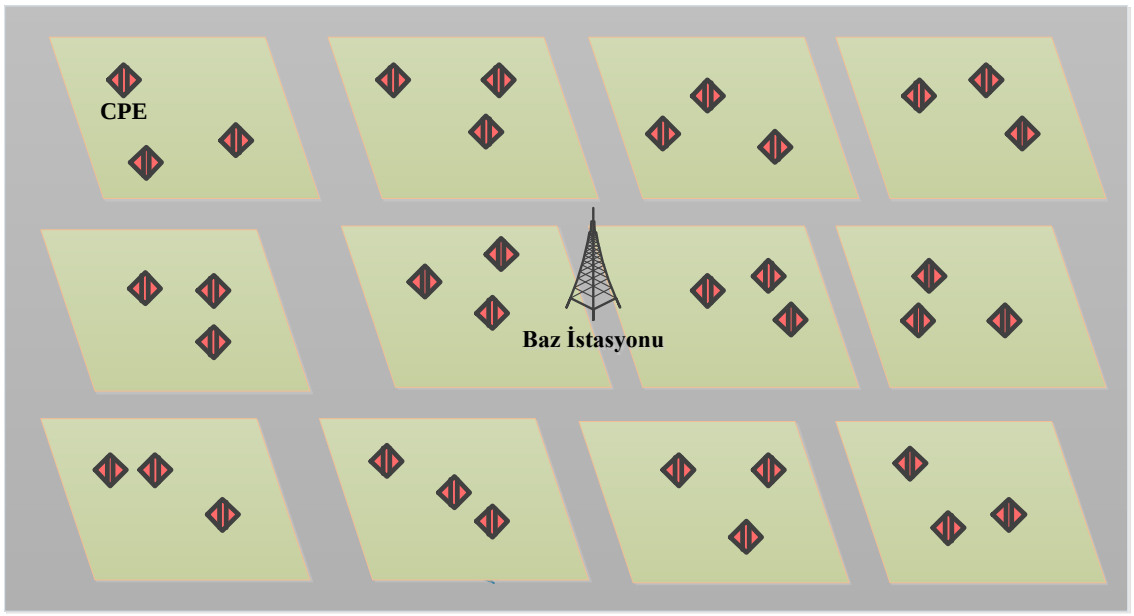
IEEE 802.22 bilişsel radyo kablosuz bölgesel alan ağı ile ilgili sınırlı sayıda makale bulunmaktadır. Shan ve diğ., paket düşme olasılığı, algılama gecikmesi ve toplam verim gibi temel QoS kısıtlamaları altında DA-WRAN'ın enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı amaçlayan bir sistem önermişlerdir [12]. Önerdikleri sistemde, sinyal geri kazanımının doğruluğu ifadesi üstel fonksiyona oturtulmuş ve ilk kez enerji verimliliği optimizasyonu sırasında sıkıştırılmış numune sayısı dikkate alınmıştır. Stevenson ve diğ. bilişsel kablosuz bölgesel alan ağları için IEEE 802.22 standardına üst düzey bir genel bakış sunmuştur [13]. Ko ve diğ. IEEE 802.22 standardının bilişsel radyo işlevselliğini ayrıntılı olarak sunmuş ve kanal algılama, kanal sınıflandırma ve kanal bilgilerinin bakımını kullanarak dinamik kanal yönetimi ile bilişsel işlevselliği sağlamıştır [14].

Ukpong ve diğ. bilişsel radyo ağlarda spektrum paylaşımını geliştirmek için derin takviyeli öğrenme yöntemlerinin kullanımını değerlendirmişlerdir [15]. Bino ve Mohan bilişsel radyo tabanlı IEEE 802.22 WRAN ağlar için dinamik kooperatif spektrum algılama tekniği geliştirmişlerdir [16]. Jain ve diğ. IEEE 802.22 WRAN'da Rayleigh çoklu yol sönümleme kanalı altında yapay sinir ağı tabanlı kooperatif spektrum algılama tekniği önermişlerdir [17].

Literatürdeki çalışmalar, IEEE 802.22 tabanlı bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda en uygun düğüm yerleştirme yaklaşımını ve röle düğüm seçimi için bulanık mantık sistemini dikkate almamaktadır.

III. IEEE 802.22 STANDARDININ TASARIMI

Bu makalede, çevresel izleme için televizyon frekanslarındaki beyaz alanların fırsatçı bir şekilde kullanılması amacıyla bilişsel radyo tabanlı WRAN teknolojisi ele alınmıştır. WRAN teknolojisinin yardımıyla sabit cihazların spektrumundan hiçbir maliyet olmadan yararlanılmıştır. WRAN teknolojisindeki baz istasyonlarının bilişsel radyo yeteneği sayesinde CPE'ler, sabit operasyonlara müdahale etmemişlerdir.

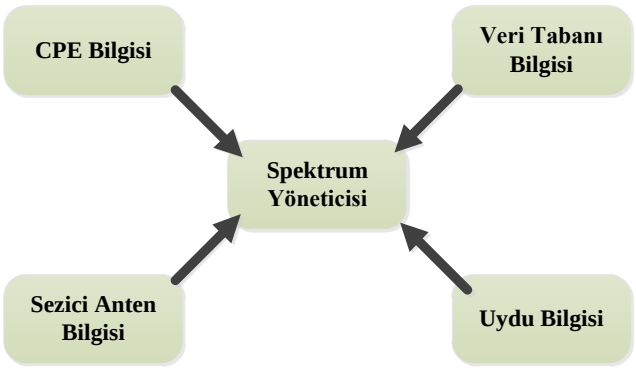


Şekil 1. IEEE 802.22 WRAN ağ yapısı

Şekil 1'de, bilişsel radyo WRAN ortamı gösterilmektedir. Ağ ortamında, baz istasyonu ve 36 adet CPE bulunmaktadır. Sabit CPE düğümlerinin görevleri, spektrumdaki mevcut işlemleri tespit etmek, mevcut işlemleri baz istasyonuna raporlamak, yedek kanal listesini tutmak ve sıcaklık, nem, basınç gibi gerekli çevresel verileri algılamaktır. WRAN teknolojisindeki baz istasyonu, 255 sabit CPE'ye hizmet vermektedir ve yarıçapı maksimum 30 km olan kırsal bir alanı kapsamaktadır. Baz istasyonunun görevleri, CPE'ler arasındaki iletişimi kontrol etmek, spektrumdaki sabit operasyonları tespit etmek, kanal yönetimi kararları vermek, mevcut konum için sabit veri tabanlarının bilgisini edinmek, mevcut kanalları talep etmek, çoklu yedekleme kanallarını tutmak ve CPE'ler tarafından algılanan çevresel verileri toplamaktır.

A. Spektrum Yönetimi

Baz istasyonunun spektrum yöneticisi, yararlanılacak televizyon beyaz alan spektrumuna karar vermek için bilişsel radyo fonksiyonuna sahiptir. Spektrum yöneticisi, baz istasyonunun ortam erişim kontrolü alt katmanında bulunur.

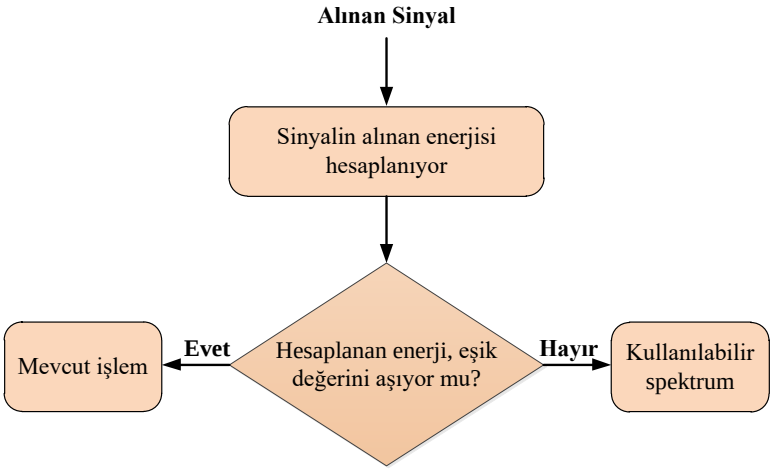


Şekil 2. Baz istasyonu spektrum yöneticisi

Şekil 2'de, spektrum yöneticisi modeli gösterilmektedir. Spektrum yöneticisinin temel görevi CPE, veri tabanı, sezici anten ve uydu bilgilerine göre kanal yönetimi kararlarını vermektir. CPE, spektrum yöneticisini spektrumdaki sabit operasyonlar hakkında bilgilendirmektedir. Spektrum yöneticisi, kanal yönetimi kararını verirken mevcut veri tabanı bilgilerini dikkate almaktadır. Spektrum yöneticisi, spektrum algılama fonksiyonuna göre kendi baz istasyonunun algılama anten bilgilerini elde etmektedir. Uydu bilgileri, coğrafi konumu dikkate alarak mevcut konumu belirlemek amacıyla spektrum yöneticisi tarafından alınmaktadır. Spektrum yöneticisi ilgili birimlerden gelen tüm bilgileri değerlendirerek kanalların durumuna karar vermektedir.

B. Spektrum Sezme Mekanizması

Spektrum sezme mekanizması, lisanslı spektrumu gözlemlemek ve gözlemlenen lisanslı spektrumun sabit operasyonlar tarafından kullanılıp kullanılmadığını belirlemek için kullanılmaktadır. Hem baz istasyonları hem de CPE'ler, WRAN teknolojisinde televizyon beyaz alan spektrumunu tespit etmek için spektrum sezme özelliğine sahiptir. Algılama mekanizması temel olarak dört parametreye dayanmaktadır; (i) algılama alıcısı hassasiyeti, (ii) kanal algılama süresi, (iii) algılama olasılığı ve (iv) yanlış alarm olasılığı. Alıcı duyarlılığının algılanması, beklenen bit hata oranının elde edilmesiyle ilgilidir. WRAN teknolojisinde kanal tespit süresine göre spektrum periyodik olarak tespit edilmektedir. Tespit olasılığı, spektrumda mevcut bir işlemin doğru şekilde tespit edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Yanlış alarm olasılığı, spektrumda gerçekte herhangi bir mevcut işlem yokken, spektrumda mevcut bir işlemin yanlış algılanması olarak tanımlanmaktadır.

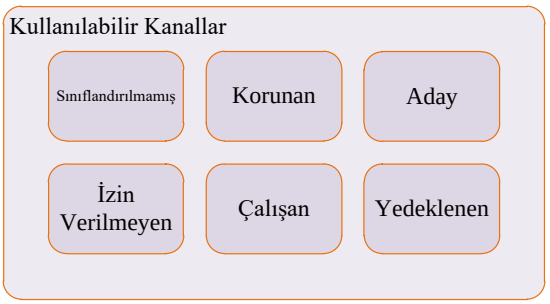


Şekil 3. Spektrum kullanılabilirlik tespiti

Enerji tespit tekniği, düşük karmaşıklığı nedeniyle bu çalışmada spektrum algılama mekanizması olarak kullanılmıştır. Şekil 3'te, enerji algılama tekniğinin akış şeması gösterilmektedir. Enerji tespit tekniğinde, belirli bir spektrumdaki sinyalin alınan enerjisi hesaplanmaktadır. Hesaplanan enerji önceden tanımlanmış bir eşik değeriyle karşılaştırılmaktadır. Alınan enerjinin eşik değerini aşması spektrumda mevcut işlemin var olduğu anlamına gelmektedir. Alınan enerji eşik değerini aşmıyorsa spektrumun fırsatçı kullanıma uygun olduğu anlamına gelmektedir.

C. Kanal Sınıflandırma

Spektrum yöneticisi, spektrum algılama sonuçlarına bağlı olarak televizyon kanallarını kullanılabilir ve kullanılamaz olarak sınıflandırmaktadır. Belirli bir konumdaki mevcut kanallar, mevcut veri tabanlarına göre belirlenmektedir. Herhangi bir yerleşik veri tabanı bilgisi yoksa tüm kanallar kullanılabilir olarak kabul edilmektedir. Mevcut kanallar şu şekilde sınıflandırılmıştır; korunan, sınıflandırılmamış, izin verilmeyen, çalışan, yedeklenen, aday.



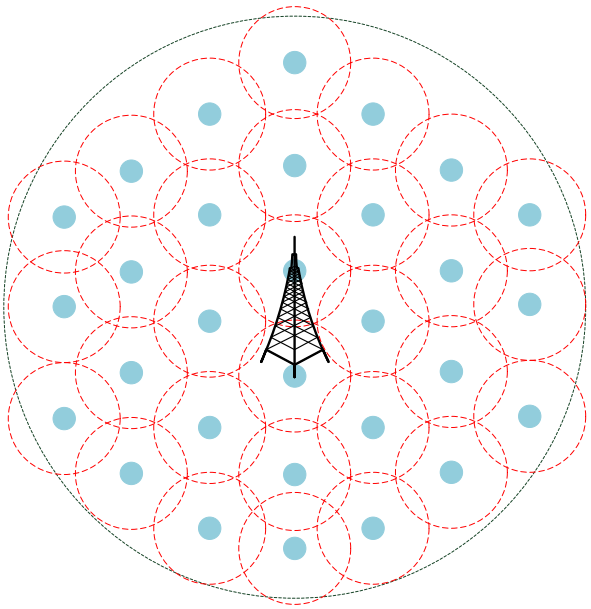
Şekil 4. Kanal sınıflandırma

Şekil 4'te, yerleşik veri tabanı bilgisinin olmaması durumunda mevcut kanalların sınıflandırılması gösterilmektedir. Korunan kanallar algılama yardımıyla tespit edilmektedir ve aday kanal olmaya yatkındırlar. Sınıflandırılmamış kanallar gecikme nedeniyle algılanamaz ancak algılandıktan sonra korunan veya aday olarak

yeniden sınıflandırılabilirler. İzin verilmeyen kanallar düzenleyici kısıtlamalara göre belirlenmektedir. Çalışan kanal, baz istasyonu ile CPE arasındaki mevcut işletim kanalı olarak tanımlanmaktadır. Kanal değiştirmenin gerekli olduğu durumlarda yedeklenen kanallara ihtiyaç duyulmaktadır. Aday kanallar yedeklenen kanal olma konusunda potansiyele sahiptir.

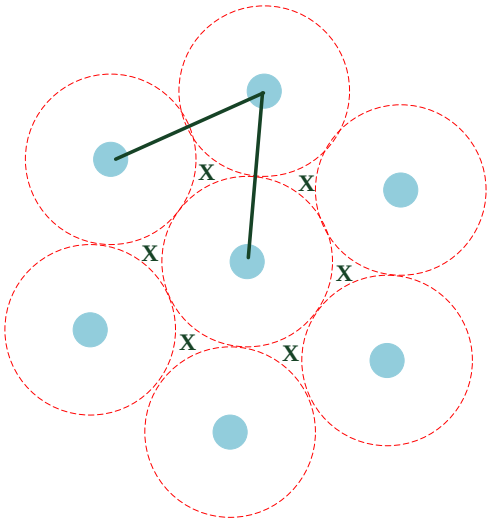
IV. IEEE 802.22 TABANLI DÜĞÜM YERLEŞTİRME YAKLAŞIMI

Bilişsel kablosuz algılayıcı ağlarda düğüm yerleştirme için iki farklı yöntem mevcuttur. İlk yöntem, düğümlerin belirli bir alana rastgele dağıtıldığı rastgele yerleştirme yaklaşımıdır. İkinci yöntem ise algılayıcı düğümlerin, hedef bölgeyi tamamen kapsayacak şekilde yerleştirildiği kapsama temelli yerleştirme yaklaşımıdır. Bu çalışmada, çevresel izleme amacıyla kapsama odaklı yeni bir yerleştirme yöntemi kullanılmıştır.



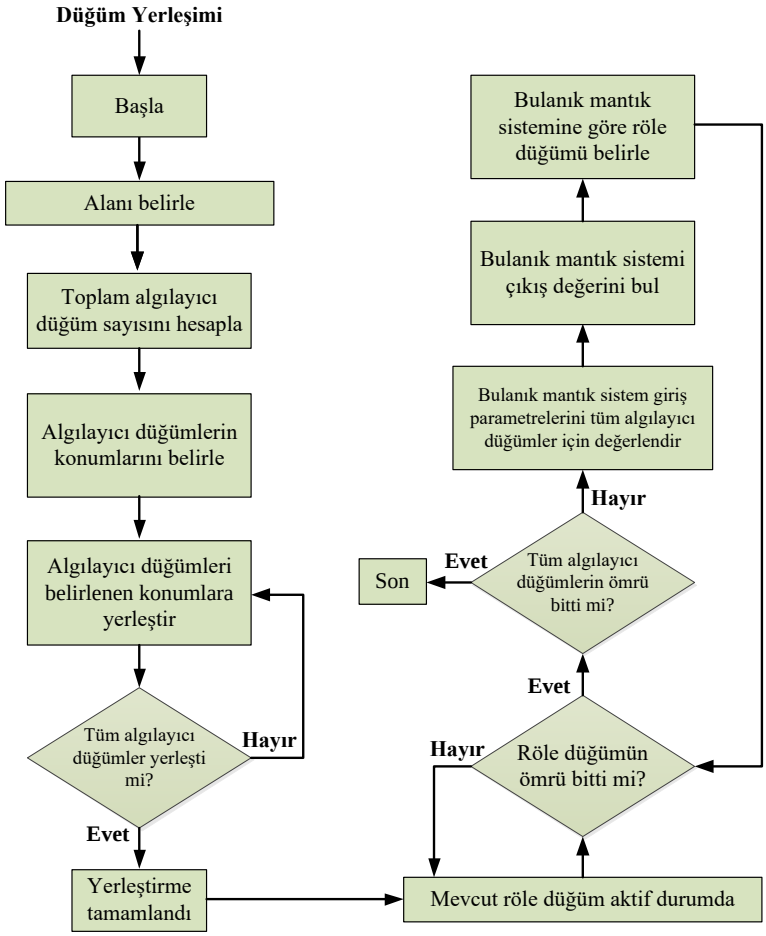
Şekil 5. Kapsama alanına göre yerleştirme işlemi

Şekil 5'te, kapsama odaklı düğüm yerleştirme için oluşturulan simülasyon senaryosu gösterilmektedir. Bu senaryo, birçok algılayıcı düğüm ile bir toplayıcı istasyondan oluşmaktadır. Kablosuz sensör düğümler çevrelerindeki verileri algılayarak toplayıcı istasyona iletilmek üzere röle düğüme göndermektedirler. Toplayıcı istasyon tüm röle düğümlerden gelen verileri toplamaktadır.



Şekil 6. Algılayıcı düğümler arası mesafe

Şekil 6, önerilen yaklaşıma göre düğümler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Düğümler arasındaki mesafe siyah çizgiyle gösterilmiştir. Tüm düğümler birbirine eşit mesafededir. X ile ifade edilen bölgeler, kapsama alanının dışında kalan ve göz ardı edilebilecek kadar küçük alanlardır. Bu bölgeler sayesinde, düğüm sayısı en aza indirilerek kazanç sağlanmaktadır.

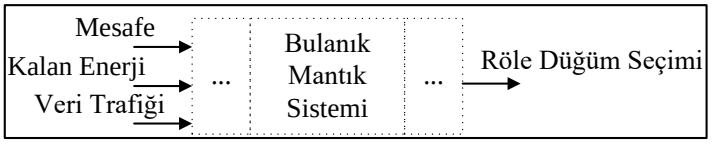


Şekil 7. Akış şeması

Önerilen yaklaşımın akış şeması Şekil 7'de verilmiştir. Önerilen düğüm yerleştirme yönteminin avantajları şunlardır: Tüm bölge, neredeyse kesintisiz bir şekilde izlenebilir hale gelmektedir. Ayrıca, mümkün olan en az sayıda algılayıcı düğüm kullanılmaktadır. Tüm alanın kapsandığı yaklaşıma göre yapılan yerleşimdeki kesişim bölgeleri ortadan kaldırılmıştır. Düğüm yerleşim işlemi başlarken, alan belirlenerek toplam algılayıcı düğüm sayısı hesaplanmaktadır. Algılayıcı düğümlerin konumları belirlenmektedir. Algılayıcı düğümler belirlenen konumlara yerleştirilerek, tüm algılayıcı düğümlerin yerleştirilip yerleştirilmediği kontrol edilmektedir. Yerleştirme işlemi tamamlandıysa mevcut röle düğüm aktif duruma gelmektedir. Röle düğümün ömrünün bitip bitmediği kontrol edilmektedir. Bu kontrol esnasında, tüm algılayıcı düğümlerin ömrü bittiyse akış şeması sonlanmaktadır. Sonrasında, tüm algılayıcı düğümler için bulanık mantık sistemi giriş parametreleri değerlendirilmektedir. Bulanık mantık sistemi çıkış değerleri bulunarak röle düğüm belirlenmektedir.

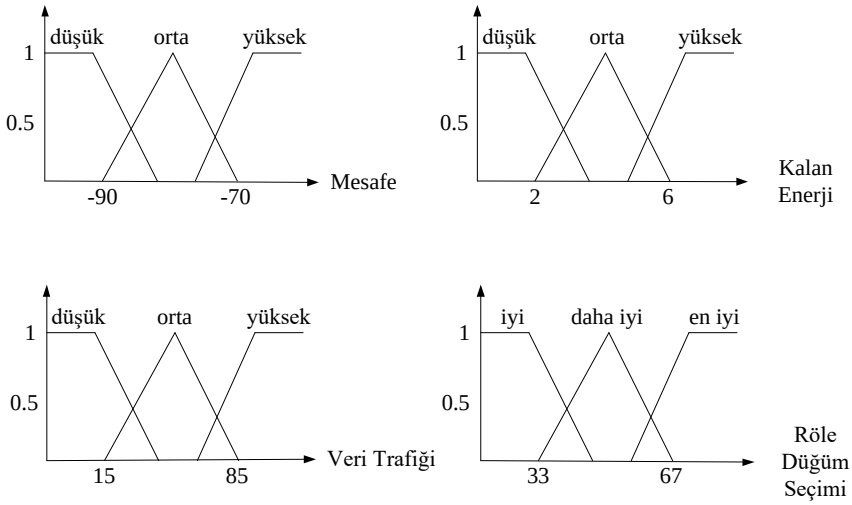
A. Bulanık Mantık tabanlı Röle Düğüm Seçimi

Bulanık mantık tabanlı röle düğüm seçimi için Mamdani bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği parametreleri giriş olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Bulanık sistem yapısı

Şekil 8'de, en iyi röle düğümünün seçilmesi için bulanık mantık tabanlı sistem kullanılmıştır. Bulanık mantık sisteminde tüm algılayıcı düğümler arasından en uygun röle düğümünün seçilebilmesi için mesafe, kalan enerji ve veri trafiği giriş parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 9. Giriş ve çıkış parametreleri

Şekil 9'da, bulanık mantık sisteminin giriş parametreleri ve çıkış parametresi gösterilmektedir. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği giriş parametreleri iken röle düğüm seçimi çıkış parametresidir. Her bir parametre için seviyeler ve değerler tanımlanmıştır. Bulanık mantık sisteminin kuralları da parametrelere göre belirlenmiştir. Mesafe için, düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri -90 ve -70 arasında değişmektedir. Kalan enerji için düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri 2 ve 6 arasında değişmektedir. Veri trafiği için düşük, orta ve yüksek seviyeleri belirlenmiştir. Orta seviyesinin değerleri 15 ve 85 arasında değişmektedir. Röle düğüm seçimi için iyi, daha iyi ve en iyi seviyeleri belirlenmiştir. Daha iyi seviyesinin değerleri 33 ve 67 arasında değişmektedir. Mesafenin birimi dBm, kalan enerjinin birimi j, veri trafiğinin birimi % ve röle düğüm seçiminin birimi %'dir.

B. Benzetim Ortamının Tasarımı

Riverbed Modeler benzetim yazılımı bilişsel kablosuz algılayıcı ağ düğüm yerleştirme işlemleri için kullanılmıştır [18]. Simülasyon modelinde algılayıcı düğümler için kullanılan parametreler ve bunlara ait değerler Tablo 1'de sunulmuştur. Riverbed Modeler, bilişsel kablosuz algılayıcı ağların modellenmesine yönelik kapsamlı bir simülasyon geliştirme platformu olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın benzetim ortamını tasarlarken, Riverbed Modeler ile doğrudan hazır modüller kullanılmasının yanında kod yazılarak geliştirme yapılan kısımlar da olmuştur. Modelin performansı, ayrık olay simülasyonları ile değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Benzetim ortamı parametreleri

Parametre	Değer
Benzetim süresi	3600 s
Ortam erişim tekniği	CSMA
Ortalama anten kazancı	2 dB
Yol kaybı modeli (katsayısı)	Serbest uzay yol kaybı (3,7)
Varyans	13,6 dB
Kullanılan frekans	2,4 Ghz
Standart sapma	6,4 dB
Ortalama kapsama alanı	~ 5 m^2
Ortalama gecikme	5000 ms
Ortalama iletim gücü	0,02 W
Modülasyon tekniği	BPSK
Ortalama veri oranı	1 Mbps

C. Bulgular

Tablo 2'de bulanık mantık sisteminin çıktıları görülmektedir. Mesafe, kalan enerji ve veri trafiği parametrelerinin değerlerine göre röle düğüm seçim kararı verilmiştir. Örnek olarak, mesafe -95 dBm, kalan enerji 6,5 j ve veri trafiği %9 olduğunda en iyi röle düğüm seçimi yapılmaktadır.

Tablo 2. Bulanık mantık sistemi çıktıları

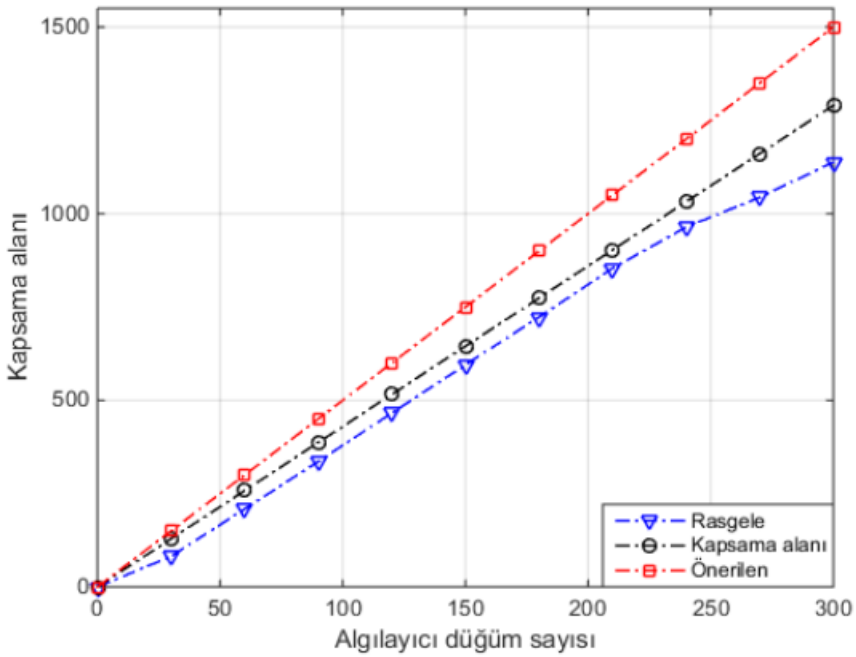
Mesafe	Kalan enerji	Veri Trafiği	Röle düğüm seçimi
- 66 dBm	1,6 j	93 %	iyi
- 95 dBm	6,5 j	9 %	en iyi
- 83 dBm	4,7 j	57 %	daha iyi

Algılayıcı düğüm yerleştirme yönteminin performansını değerlendirmek amacıyla, enerji tüketimi, sensör düğüm sayısı, simülasyon süresi, kapsama alanı ve mesafe gibi parametreler grafiklerle sunulmuştur.

Tablo 3. Farklı yöntemlere göre düğüm sayıları

Yöntem	500 m^2 için gereken düğüm sayısı	750 m^2 için gereken düğüm sayısı
Önerilen	100	150
Rasgele	128	186
Kapsama alanı	116	174

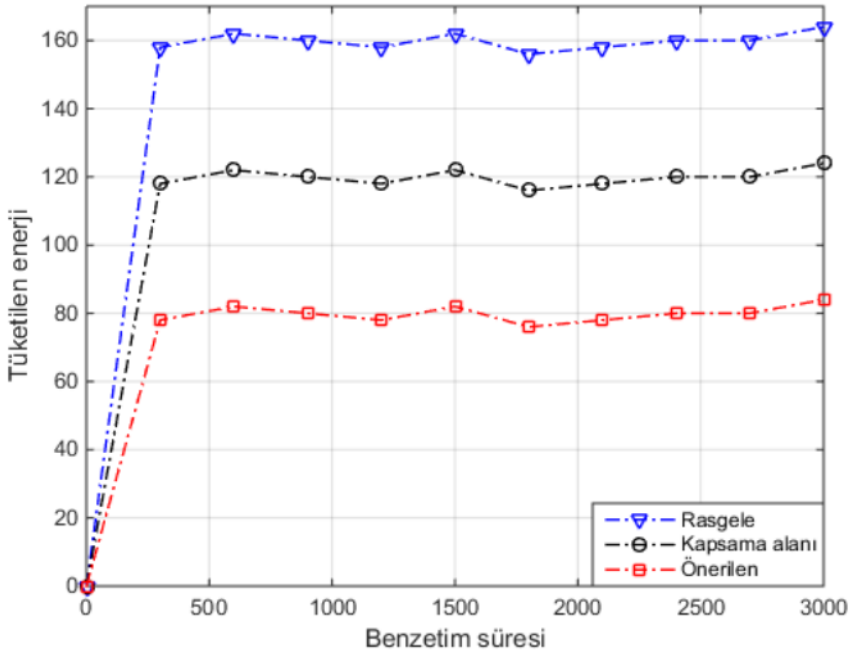
Tablo 3'te, farklı yöntemler için belirli bir alanı kapsamak amacıyla gereken toplam sensör düğüm sayısı karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada önerdiğimiz yöntemin en düşük sayı ile en uygun yöntem olduğu gösterilmiştir.



Şekil 10. Kapsama alanı

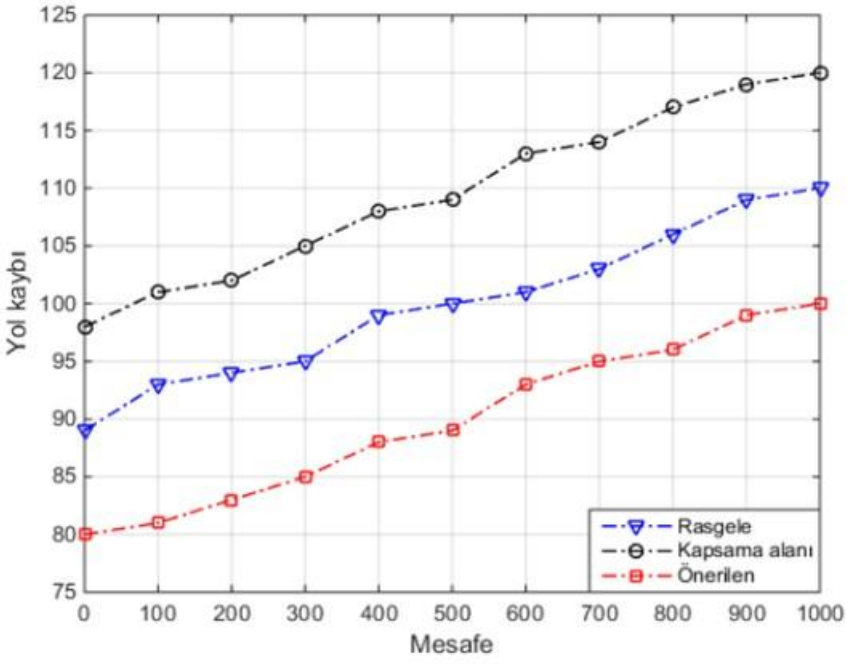
Şekil 10'da, kapsama alanı sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin en fazla alanı kapsadığı net bir şekilde görülmektedir. Kapsama alanı 0 ile 1500 m^2 arasında değişmektedir. Algılayıcı düğüm sayısı ise 0 ile 300 arasında değişmektedir. Örnek olarak, kapsama alanı 1000 m^2 iken, önerilen yaklaşıma göre

200 düğüm, kapsama alanı yaklaşımına göre 225'ten fazla düğüm ve rasgele yaklaşıma göre 250 civarı düğüm kullanılması gerekmektedir.



Şekil 11. Enerji

Şekil 11'de, tüketilen enerji sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin en az enerji tükettiği net bir şekilde görülmektedir. Tüketilen enerji, 0 ile 160 j arasında değişmektedir. Benzetim süresi, 0 ile 3000 s arasında değişmektedir. Benzetim süresi 0 ile 250 s arasında iken, tüm yaklaşımlar için tüketilen enerji artmaktadır, sonrasında belirli seviyelerde yaklaşık sabit kalmaktadır. Örnek olarak, benzetim süresi 1500 s olduğunda, rasgele yaklaşımda 160 j civarı enerji tüketilmektedir, kapsama alanına göre yaklaşımda120 j civarı enerji tüketilmektedir ve önerilen yaklaşıma göre 80 j civarı enerji tüketilmektedir.



Şekil 12. Mesafe

Şekil 12'de, yol kaybına göre mesafe sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Önerilen yöntemin mesafeye göre en az yol kaybına sahip olduğu net bir şekilde görülmektedir. Yol kaybı, 75 ile 125 dB arasında değişmektedir. Mesafe, 0 ile 1000 m arasında değişmektedir. Örnek olarak, mesafe 700 m iken, önerilen yaklaşıma göre yol kaybı 95 dB civarındadır, rasgele yaklaşıma göre 105 dB civarındadır ve kapsama alanı yaklaşımına göre 115 dB civarındadır.

IEEE 802.22 teknolojisi, herhangi bir spektrum maliyeti olmadan, bilişsel özellikler yardımıyla kırsal alanlardaki lisanslı kanallara fırsatçı erişim sağlamaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar, tüm dünyada veri izleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. İzleme sistemlerinin kurulum aşamasındaki düğüm yerleştirme işlemlerinin ve röle düğüm seçim işlemlerinin sağlıklı bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır.

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, herhangi bir spektrum maliyeti olmadan sabit kanalların kullanıldığı bilişsel WRAN teknolojisi tabanlı bir algılayıcı ağ yapısı önerilmiştir. Ağ yapısında, CPE'ler çevresel verileri algılamak için TDMA tekniğini kullanmıştır. Önerilen ağın geçerliliği ve uygulanabilirliği grafiksel sonuçlarla kanıtlanmıştır. Önerilen ağ, kırsal alanlarda herhangi bir spektrum maliyeti olmaksızın kablosuz iletişim olanağı sağlamıştır. Düğümler ve toplayıcı istasyonun kapsama alanı göz önünde bulundurularak, belirli bir bölgenin algılanması için en az sayıda algılayıcı düğüm kullanılmıştır. İstenilen parametrelerin algılanması için algılayıcı düğümler tüm alanı kapsayacak şekilde yerleştirilmiştir. En uygun röle düğümlerini seçmek için bulanık mantık tabanlı yaklaşım kullanılmıştır. Mevcut röle düğümünün ömrü dolduğunda, bulanık mantık sistemi kullanılarak yeni bir röle düğümü seçimi yapılmıştır. Önerilen kablosuz algılayıcı ağ modeli, Riverbed Modeler yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Önerilen düğüm yerleştirme yaklaşımı sayesinde, belirli bir kırsal alan en az sayıda kablosuz sensör düğüm ile tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Tay, M., Senturk, A. (2022). New energy-aware cluster head selection algorithm for wireless sensor networks. *Wireless Pers Commun.*, 122, 2235-2251.
[2] Li, D., Liu, W., Jiang, J. (2011). Placement optimization of actuator and sensor and decentralized adaptive fuzzy vibration control for large space intelligent truss structure. *Sci. China Technol. Sci.*, 54, 853-861.
[3] Leitold, D., Vathy-Fogarassy, A., Abonyi, J. (2018). Network distance-based simulated annealing and fuzzy clustering for sensor placement ensuring observability and minimal relative degree, *Sensors*, 18(9), 3096.
[4] Zhang, X. X., Li, H. X., Qi, C. K. (2010). Spatially constrained fuzzy-clustering-based sensor placement for spatiotemporal fuzzy-control system, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 18(5), 946-957.
[5] Francés-Chust, J., Brentan, B. M., Carpitella, S., Izquierdo, J., Montalvo, I. (2020). Optimal placement of pressure sensors using fuzzy DEMATEL-based sensor influence, *Water*, 12(2), 493.
[6] Peng, X., Garg, H., Luo, Z. (2023). When content-centric networking meets multi-criteria group decision-making: Optimal cache placement policy achieved by MARCOS with q-rung orthopair fuzzy set pair analysis, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 123(A), 106231.
[7] Somesula, M. K., Kotte, A., Annadanam, S. C. (2022). Deadline-aware cache placement scheme using fuzzy reinforcement learning in device-to-device mobile edge networks, *Mobile Netw Appl.*, 27, 2100-2117.
[8] Irid, S. M. H., Hadjila, M., Hachemi, M. H., Souiki, S., Mosteghanemi, R., Mostefai, C. (2023). Node localization based on anchor placement using fuzzy c-means in a wireless sensor network, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 69(1), 99-104.
[9] Zahedi, S. R., Jamali, S., Bayat, P. (2022). EmcFIS: evolutionary multi-criteria fuzzy inference system for virtual network function placement and routing, *Appl. Soft Comput.*, 117, 108427.
[10] Emami, H., Pashazadeh, S., Balafar, M. A. (2023). A novel fuzzy-based algorithm for ONU placement in FiWi broadband access network, *Opt. Fiber Technol.*, 80, 103414.
[11] Sun, K., Qu, J. (2023). Efficient photodetector placement using linear optimization fuzzy c-means and artificial neural networks, *Journal of Electronics & Information Technology*, 45(5), 1766-1773.
[12] Shan, B., Li, X., Ji, H., Li, Y. (2017). A QoS-aware green cooperative compressed sensing scheme in IEEE 802.22 WRAN, *Int. J. Commun. Syst.*, 30, e2890.
[13] Stevenson, C. R., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellhammer, S. J., Caldwell, W. (2009). IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard, *IEEE Commun. Mag.*, 47(1), 130-138.
[14] Ko, G., Franklin, A. A., You, S. J., Pak, J. S., Song, M. S., Kim, C. J. (2010). Channel management in IEEE 802.22 WRAN systems, *IEEE Commun. Mag.*, 48(9), 88-94.
[15] Ukpong, U., Idowu-Bismark, O., Adetiba, E., Dare, O., Owolabi, E., Kala, R. J. (2024). *Deep reinforcement learning applications for coexistence in television whitespace: A mini-review*, International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG), Omu-Aran, Nigeria, 1-9.

[16] Bino, J., Mohan, P. (2024). Analysis of dynamic cooperative spectrum sensing mechanism in IEEE 802.22 WRAN, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 77, 390-398.
[17] Jain S. et al. (2024). Artificial neural network based spectrum sensing in wireless regional area network, *IEEE Access*, 12, 48941-48950.
[18] Riverbed Modeler, Benzetim Yazılımı, *https://www.riverbed.com/*, Yayın Tarihi. Aralık, 2022. Erişim Tarihi. Aralık, 2023.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 333-343, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1440141
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi - Review Article

Mikroplastik Kirliliği: Sağlık Riskleri ve Sürdürülebilir Çözüm Önerileri

Microplastic Pollution: Health Risks and Sustainable Solutions

Burcu Sarı Gençağ[1*]

Geliş / Received: 20/02/2024 ***Revize / Revised: 05/07/2024*** ***Kabul / Accepted: 31/07/2024***

ÖZ

Günlük hayatta yaygın olarak kullanılan plastik malzemeler deniz ekosistemlerinde ciddi bir kirliliğe neden olmaktadır. Plastik atıkların çevreye bırakılmasıyla oluşan mikroplastikler özellikle okyanus ve denizlerde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Mikroplastiklerin su kaynakları, gıdalar ve suda yaşayan canlılar aracılığıyla insan vücuduna geçişi cilt teması ve oral yolla gerçekleşmektedir. Ancak bu geçişin sağlık üzerindeki etkileri tam olarak anlaşılamamıştır. Mikroplastiklerin solunum yoluyla alımı ise sadece atmosferik mikroplastiklerin insan vücuduna geçişi ile olabilmektedir. Yapılan çalışmalar su kaynaklarında ve suda yaşayan canlılarda mikroplastik varlığını ortaya koymuş ve gıda maddelerinde de mikroplastik bulunabileceğini göstermiştir. Bu derlemede mikroplastiklerin oluşumu, insanlara geçişi ve çevre ile insan sağlığı üzerindeki etkileri incelenerek plastik kirliliğiyle mücadelede sürdürülebilir balıkçılık yöntemlerinin önemi vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler - Mikroplastikler, Deniz Ekosistemi, Sağlık, Sürdürülebilir Balıkçılık

ABSTRACT

Plastic materials widely used in daily life cause serious pollution in marine ecosystems. Microplastics, which are formed when plastic wastes are released into the environment, have negative effects especially in oceans and seas. The transfer of microplastics into the human body through water sources, food and aquatic organisms occurs through skin contact and oral route, but the health effects of this transfer are not fully understood. Inhalation of microplastics can only occur with the passage of atmospheric microplastics into the human body. Studies have demonstrated the presence of microplastics in water sources and aquatic organisms and have shown that microplastics may also be present in foodstuffs. In this review, the formation of microplastics, their transfer to humans and their effects on the environment and human health are examined and the importance of sustainable fishing methods in combating plastic pollution is emphasized.

Keywords- Microplastics, Marine Ecosystem, Health, Sustainable Fisheries

[1]*Sorumlu yazar iletişim: burcu.sari@kapadokya.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2847-297X)
Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Kapadokya Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye

I. GİRİŞ

Kıyı ve deniz alanları sürekli ve artan şekilde devam eden insan faaliyetlerinin etkisi altında kalmaktadır. Pestisitler, ağır metaller, plastikler ve mikroplastikler gibi kirletici maddeler deniz ekosistemine zarar vermektedir. Denizlerdeki atık kirliliği, okyanusların tüm bölümlerini etkileyen küresel bir çevre sorunu haline gelmiştir [1]. Temel olarak kötü atık yönetim uygulamaları ve standart altyapı eksikliğinin bir sonucu olan bu durum sağlık, ekonomi ve çevre açısından sorunlara neden olmaktadır [2].

Geçtiğimiz yetmiş yılda plastik üretiminde sürekli bir artış olmuş ve 1950'lerde 1,5 milyon ton iken 2020'de 367 milyon tona yükselmiştir. Plastik üretimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan atık üretimi 1961'de yaklaşık 3,1 milyardan 2015'te yaklaşık 7,3 milyara yükselmiş ve 2050 yılında artan insan nüfusuyla 9 milyarı aşması tahmin edilmektedir [3].

Plastik nesneler çevreye karıştıklarında bozunarak daha küçük parçalara ayrılırlar [4]. Mikroplastikler boyutları 0,1- 5000 µm arasında olan farklı şekillerdeki (parça, lif, granül, boncuk, pelet ve film) parçacıklardır [5]. Mikroplastikler birincil ve ikincil plastikler olarak sınıflandırılmaktadır [6]. Bu küçük plastik parçalar çeşitli yollarla kara ve deniz ortamına girmektedir. Mikroplastikler dünya okyanuslarına dağılmış durumdadır. Bu parçacıkların küçük boyutu onları deniz ortamındaki çok çeşitli organizmalar tarafından kolayca tüketilebilir hale getirmektedir. Zooplankton, midye, karides, balina ve birçok balık türünde mikroplastik bulunduğu araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [7, 8, 9]. Çoğu insan özellikle balık ve diğer deniz ürünlerinin tüketiminden dolayı önemli miktarda mikroplastiğe maruz kalmaktadır. Mikroplastiklerin insan sağlığına etkisi konusunda sınırlı bilgi bulunsa da potansiyel toksik etkileri insanlar için önemli bir tehdit oluşturmaktadır [3]. Deniz ekosistemi, diğer ekosistemlere göre büyük ekonomik değerlere sahip ve biyolojik çeşitlilik açısından zengin bölgelerden biridir. Bilim insanlarının deniz suyundaki mikroplastik kirliliği üzerinde yoğun bir şekilde çalışmaları ve aynı zamanda mikroplastiklerin deniz organizmaları üzerindeki etkilerini belirleyerek, okyanustaki mikroplastik konsantrasyonunu azaltmaya yönelik önerilerde bulunmaları gerekmektedir. Bu çabalar, "sürdürülebilir kalkınma hedefi 14'ü (sürdürülebilir kalkınma için su altındaki yaşamı koruma)" gerçekleştirmeye yönelik önemli bir adım olacaktır [10].

Bu çalışma, deniz ekosistemindeki mikroplastik kirliliğinin kaynaklarına odaklanarak bu tür kirliliğin insan sağlığı üzerindeki olası etkilerini ele almakta ve aynı zamanda sürdürülebilir balıkçılığın önemi üzerine vurgu yaparak çevresel sorunlara karşı farkındalık oluşturmayı amaçlamaktadır.

II. DENİZ EKOSİSTEMLERİNDE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ VE KAYNAKLARI

Günümüzde plastik kirliliği okyanusların ve deniz biotasının karşı karşıya kaldığı en büyük çevre sorunlarından biridir. Plastik maddeler artık kıyı bölgelerden derin deniz tabanına, kuzey kutbundan tropik bölgelere kadar her yerde yaygın olarak bulunmaktadır [16, 17, 18]. Plastik maddeler denizlerde geniş dağılım göstermelerine rağmen belirli bölgelerde birikme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Yüzen plastiklerin okyanus girdaplarının olduğu yerlerde birikme ve ayrıca deniz tabanına doğru batma eğiliminde olduğu artık bilinen bir gerçektir [19].

Son yıllarda mikroplastiklerin su ortamında artış göstermesi çeşitli organizmalara yönelik potansiyel zararlar konusunda endişelere yol açmaktadır [11, 12]. Boyutları 5 mm'nin altında olan bu plastikler, birincil mikroplastikler (doğrudan üretilen) veya ikincil mikroplastikler (makroplastiklerin parçalanmasıyla oluşan) olarak ikiye ayrılmaktadır [13]. Birincil mikroplastikler, belirli endüstriyel veya evsel uygulamalar için mikroskobik boyutta olacak şekilde üretilen mikroplastiklerdir. Bunlar arasında yüz temizleyicisi, diş macunu, duş jeli, kese, peeling, göz farı, deodorant, allık, fondöten, maskara, tıraş kremi, bebek ürünleri, saç boyası, oje ve güneş kremi gibi kozmetik ürünlerinde kullanılan plastik parçacıklar ve sentetik giysiler, temizlik ürünlerinde bulunan aşındırıcılar ve sondaj sıvıları yer almaktadır [9]. Deniz ve karada bulunan daha büyük olan plastik kalıntıları zamanla mikroplastikler haline gelene kadar çeşitli faktörlere (güneş ışığı, sıcaklık, polimer boyutu ve yoğunluğu) maruz kaldıklarında daha küçük parçacıklara ayrılırlar. Bu tür mikroplastikler ikincil mikroplastikler olarak adlandırılır. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçlerin bir araya gelmesi makroplastik döküntülerin yapısal bütünlüğünü azaltarak parçalanmaya yol açar [14]. Her iki mikroplastik türü de (birincil ve ikincil) deniz ekosistemlerinde oldukça yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Her yıl yaklaşık 245 ton mikroplastik üretildiği ve bunların bir kısmının su kütlelerine karışarak deniz organizmalarının vücutlarına ve dokularına dahil olduğu tahmin edilmektedir [9].

Mikroplastiklerin parçalanması parçacıkların türüne ve çevre koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Mikroplastikler lifler, filmler ve parçacıklar gibi çeşitli formlarda bulunur. Lif tipi mikroplastikler çoğunlukla doğal ortamda gözlenmektedir [15].

Türkiye, Avrupa Birliği (AB) üyeliğine başvuran resmi aday ülkelerden biri olup bu katılım sürecinde deniz suları için Deniz Stratejisi Çerçeve Direktifi (DSÇD, Marine Strategy Framework Directive, MSFD)

desteklenmesi gibi çevre konularında AB normlarına uyum sağlamaya çalışmaktadır [20]. Türkiye, Akdeniz ve Karadeniz'deki başlıca plastik kirliliğine sebep olan kaynaklardan biridir. Türkiye sularındaki plastik kirliliği ile ilgili çalışmalar genellikle deniz ortamında yapılmakla birlikte, tatlı su alanlarıyla ilgili araştırmalar sınırlıdır [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Bu çalışmaların çoğunluğu Türkiye'nin kuzeydoğu Akdeniz kıyılarında özellikle İskenderun ve Mersin Körfezlerinde gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin denizleri ve kıyı bölgelerinde birçok araştırma yapılmıştır, bunların büyük çoğunluğu Akdeniz kıyılarında (İskenderun, Mersin ve Antalya körfezleri) gerçekleştirilmiş olup bunu Karadeniz, Marmara Denizi ve bağlı boğazlar ile Ege Denizi takip etmektedir [28]. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmaların bazıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Türkiye karasularında plastik kirliliği ile ilgili yapılan çalışmalar

Çalışma alanı	Uygulama	Bulgular	Kaynakça
Süreyyabey Barajı (Yozgat)	Farklı boyutlardaki ağlar (330 ve 100 µm) kullanılarak Türkiye'deki Süreyyabey Baraj Gölü'ndeki mikroplastiklerin türü, şekli, plastik bileşenleri ve rengi araştırılmıştır.	Liflerin, 330 µm ve 100 µm ağ boyutlarında bulunan toplam mikroplastiklerin sırasıyla %45 ve %80'ini oluşturan en bol parçacık türü olduğu tespit edilmiştir. Tanımlanan mikroplastiklerin renginin, mikroplastik türleri arasında farklılıklar gösterdiği; ancak her ağda baskın renk şeffaf olduğu bulunmuştur. Mikroplastiklerin ana plastik bileşenlerinin polietilen tereftalat, polivinil klorür, polistiren, polietilen ve polipropilen olduğu belirtilmiştir.	[24]
Erzurum'da 2380 m yükseklikteki bir krater gölü	Göl yüzeyinin beş farklı noktasından örnekler toplanmış ve µ-Raman ve SEM cihazları kullanılarak analiz edilmiştir.	Tanımlanan mikroplastiklerin polietilen ve polipropilen olduğu belirlenmiştir. Tespit edilen mikroplastiklerin 8 ila 15 µm arasında farklı şekil ve boyutlara sahip olduğu bildirilmiştir.	[22]
Cevdet Dündar Göleti (Yozgat)	Göletin yüzey suyundan alınan örneklerinde mikroplastik (<5 mm) kirliliği araştırılmıştır.	Gölet suyunun $1m^3$'ünde ortalama 233 mikroplastik parçacığı tespit edilmiştir. %56 oran ile mikroplastik kirliliğinin en fazla gözlemlendiği boyut aralığının 100-250 µm olduğu bildirilmiştir. En yaygın gözlemlenen mikroplastik çeşidinin fiber (%91) olduğu ve renginin ise mavi (%36) olduğu tespit edilmiştir. En yaygın gözlemlenen mikroplastik türevlerinin polipropilen (%50) ve polietilen (%40) olduğu belirtilmiştir.	[21]
Van gölü	15 istasyondan su örnekleri toplanarak Van Gölü'ndeki mikroplastik seviyeleri araştırılmıştır.	Bölgenin yüzey sularının yüksek düzeyde mikroplastiklerle kirlendiği tespit edilmiştir. En sık gözlemlenen mikroplastik türünün, boyutunun, şeklinin ve renginin sırasıyla lif (%40,5), <0,1 mm (%52,3), düzensiz (%40,8) ve mavi (%57,1) olduğu bildirilmiştir. Tespit edilen tüm mikroplastiklerin kimyasal yapısının, polietilen (%60,2), polipropilen (%20,4), polietilen tereftalat (%17,2) ve poli(metil akrilat) (%2,2) olduğu gözlemlenmiştir.	[25]
Uluabat Gölü ve Kocaçay Deltası (Bursa)	Bursa ilinden iki bölge seçilerek mikroplastik birikimi üzerine değerlendirme yapılmıştır.	Uluabat gölünde liflerin en baskın mikroplastik türü olduğu tespit edilmiştir. En çok bulunan renklerin ise şeffaf (%34) siyah (%27), mavi (%19) ve kırmızı (%8) olduğu belirtilmiştir. Kocaçay deltasında, Uluabat Gölü'ne kıyasla daha fazla renk ve türde mikroplastik olduğu tespit edilmiştir. Siyah lifler (%33) en bol olanı iken bunu mavi (%22) ve kırmızı parçacıklar (%20) takip etmektedir.	[26]
Muğla ve Antalya ili kıyıları	Yaz sezonunda (Haziran ve temmuz 2019) Türkiye'nin turistik koylarındaki çöp örnekleri toplanmış ve gezi teknelerinin bu atıkların oluşumuna etkisi araştırılmıştır.	Belirlenen bölgelerin (66 istasyon) %39'unda çöp bulunmuştur. Toplam çöp sayısının yaklaşık üçte birinin plastiklerden (en fazla plastik poşetler ve şişeler) oluştuğu tespit edilmiştir. Yaz aylarında aktif olan gezi teknelerinin sayısıyla çöp miktarlarının da arttığı tespit edilmiştir.	[29]
Marmara Denizi	Pendik-Tuzla yakınlarında açık denizde toplanan örneklerin mikroplastiklerin miktarı ve özellikleri araştırılmıştır.	Toplanan tüm numunelerin mikroplastik içerdiği tespit edilmiştir. Toplanan örneklerde toplam on farklı mikroplastik türü tespit edilmiştir. En bol bulunan plastik türlerinin akrilonitril bütadien stiren, etilen vinil asetat ve polistiren olduğu belirtilmiştir. En yaygın morfolojik özelliklerin siyah ve parçalı düzensiz parçalar olduğu belirtilmiştir.	[30]
Marmara Denizi	Marmara Denizi'ndeki yüzey sularında mikroplastiklerin konsantrasyonu incelenmiştir.	Toplanan parçacıkların minimum boyutunun 0,8 mm, maksimum 65,0 mm olduğu bildirilmiştir. Marmara Denizi'nin doğu kesiminde toplam 1148,0±124,4 adet, batı kesiminde ise 346,0±22,7 adet parçacık tespit edilmiştir. En sık görülen türün plastik parçalar, en baskın rengin ise beyaz olduğu belirtilmiştir.	[31]

Mikroplastikler sentetik giysilerin yıkanması (evsel atık suyu), plastik atıkların degradasyonu gibi farklı yollarla (karasal ve deniz temelli faaliyetler) deniz ortamına girmektedir. Suda yaşayan organizmalar tarafından yutulması ve dokularında birikmesi ise mikroplastiklerin biyolojik etkilerini göstermektedir [32]. Mikroplastikler ayrıca rüzgar ve akıntılar yoluyla da deniz ortamına karışmaktadır [33, 14]. Okyanuslardaki mikroplastik kaynaklarından biri de zooplankton dışkısı olup 2016 yılında yapılan bir çalışmada bu dışkı atıklarının deniz ortamında bir mikroplastik kaynağı oluşturduğu tespit edilmiştir [14].

Yaklaşık 475 farklı balık türünün plastik parçaları yuttuğu bilinmekte olup coğrafi konum, habitat ve besin zinciri seviyesindeki farklılıklar her bir türün plastik alımında değişkenlikler yaratmaktadır [34]. Nüfusun daha yoğun olduğu bölgeleri çevreleyen denizlerde veya birikim bölgelerinde herhangi bir tür için plastik içeren balık sayısı genellikle daha fazla olmuştur [35]. Deniz ortamında biriken plastik atıklar deniz memelileri, deniz kuşları, kaplumbağalar, balıklar ve kabuklular için giderek daha önemli tehlikeler oluşturmaktadır [2]. Birçok araştırmacı plastiklerin ve mikroplastiklerin omurgasızlar (midye, istiridye vb.) ve omurgalılar (deniz kaplumbağaları, balıklar ve deniz memelileri) dahil olmak üzere çok sayıda deniz organizmaları tarafından yutulduğunu belirtmiştir [36, 37, 38, 39]. Sonuç olarak, insanlar tarafından tüketilen çeşitli deniz ürünlerinde mikroplastik tespit edilmiştir [40, 41].

Fransız Polinezyası'ndaki Moorea Adası'ndaki tropikal balıkların mikroplastik varlığının araştırıldığı bir çalışmada 133 balığın %21'inin mikroplastik yuttuğu ve bu mikroplastiklerin %70'inin boyutunun 0,3 mm'yi geçmediği belirtilmiştir. Balıkların sindirim kanallarında lif, film, parça ve boncuk olmak üzere dört farklı türde mikroplastik tespit edilmiş ve %70 oran ile en çok bulunan mikroplastik türünün parça olduğu bildirilmiştir [42].

Kanarya Adaları kıyısındaki Atlantik Kefal Uskumrularında (*Scomber colias*) mikroplastiklerin sindiriminin değerlendirildiği bir çalışmada incelenen 120 balığın %78,3'ünde mikroplastik olduğu ve bunların %74,2'sinin lif, %17,5'unun plastik parçaları ve %16,7'sinin boya olduğu tespit edilmiştir [43].

2013 Haziran ile 2014 Mayıs tarihleri arasında Adriyatik Denizi'ndeki en önemli iki ticari tür olan sardalya (*Sardina pilchardus*) ve hamsinin (*Engraulis encrasicolu*) toplanarak mide içeriğindeki deniz atıklarının ve mikroplastiklerin araştırıldığı çalışmada, örneklerin %90'dan fazlasında deniz atığı ve mikroplastik olduğu bildirilmiştir. Sardalyalarda hamsilere kıyasla daha küçük boyutta ve daha fazla miktarda mikroplastik olduğu belirtilmiştir. Her iki türde de lif ve parçaların en çok temsil eden şekiller olduğu bildirilmiştir [44].

Basra Körfezi'nde bol miktarda bulunan ve ticari olarak değerli olan pelajik (yüzey) balıklarının *(Platycephalus indicus, Saurida tumbil, Sillago sihama, Cynoglossus abbreviatus*) ve karideslerin *(Penaeus semisulcatus*) farklı organlarında mikroplastik birikip birikmediğinin incelendiği çalışmada balıkların bağırsaklarında, derilerinde, kaslarında, solungaçlarında ve karaciğerlerinde toplamda 828 mikroplastik tespit edilmiştir. Tespit edilen mikroplastiklerin şeklinin çoğunlukla lifli olduğu bildirilmiştir. Mikroplastiklerin genellikle solungaçlarda ve mide-bağırsak kanalında diğer organlara göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama mikroplastik miktarları *Cynoglossus abbreviatus* için 0,16 g^{-1}, karides (*Penaeus semisulcatus*) için 1,50 g^{-1} olduğu tespit edilmiştir [45].

Son zamanlarda çok sayıda çalışma mikroplastiklerin balıklar tarafından yutulduğunu bildirmiştir [46]. Bu konuda Türkiye'de yapılmış bazı çalışmalar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Türkiye'de deniz ürünlerinde mikroplastik tespiti ile ilgili yapılan çalışmalar

Uygulama	Bulgular	Kaynakça
Türkiye kıyılarından toplanan Akdeniz midyelerindeki (*Mytilus galloprovincialis*) mikroplastiklerin miktarı, dağılımı ve bileşimi araştırılmıştır.	Örneklerin %64'ünün mikroplastik içerdiği belirlenmiştir. Mikroplastik değerleri açısından Karadeniz, Ege ve Marmara denizi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. Mikroplastiklerin şekilleri parçalar (%67,6), lifler (%28,4) ve filmler (%4,05) olarak gözlemlenmiştir. Midyelerde tespit edilen mikroplastiklerin başlıca polimer türlerinin PET (%32,9), PP (%28,4) ve PE (%19,4) olduğu belirlenmiştir.	[20]
Beyhan baraj gölünde (Elazığ, Türkiye) yaşayan zebra midyesindeki (*Dreissena polymorpha* , Pallas 1771) mikroplastik kirliliği araştırılmıştır.	Toplanan midyelerde toplamda 52 mikroplastik belirlenmiştir. Baskın rengin siyah olduğu bildirilmiştir. Ortak boyut aralığının 1001–2000 µm, baskın polimer şeklinin fiber ve ana polimer tipinin polipropilen (PP) olduğu tespit edilmiştir.	[47]
Van Gölü'nde farklı konumlarda yakalanan İnci kefallerinin (*Alburnus tarichi*) içerdiği mikroplastik miktarı ve türü incelenmiştir.	101 balık örneğinin incelendiği bu çalışmada örneklerin tamamında mikroplastik bulunmuştur. Yutulan parçacıkların çoğunluğunu %74 oran ile liflerin oluşturduğu tespit edilmiştir. Örneklerde en çok bulunan plastiklerin renkleri beyaz (%2), kırmızı (%3), mavi (%58), siyah (%17) ve şeffaf (%17) olarak belirlenmiştir. Plastiklerin boyutların <0,1 mm ila 5,0 mm arasında değiştiği, en yaygın boyutun <0,1 (%25), 0,1–0,3 (%25) ve 1,0–5,0 mm (%27) olduğu belirlenmiştir.	[46]
Akdeniz'in Türk karasularında mikroplastik miktarının ve dağılımının	Balıkların mide ve bağırsaklarında toplamda 1822 mikroplastik parçacık çıkarılmıştır. Parçacıkların çoğunluğunun lifler (%70,0) ve sert plastikler (%20,8)	[48]

araştırıldığı çalışmada toplamda 28 tür ve 14 familyayı temsil eden 1337 balık ve deniz suyu örnekleri incelenmiştir	olduğu bildirilmiştir. İncelenen tüm balıkların %34'ünün midesinde mikroplastik tespit edilmiştir. Yutulan mikropartiküllerin ortalama çapının 656±803 µm olduğu belirtilmiştir.	
Karasu Nehri'nde (Erzurum) yaşayan sazan familyasına ait üç türün (kefal (*Squalius cephalus*), sazan (*Cyprinus carpio*) ve *Alburnus mossulensis* (mossul bleak)) gastrointestinal sistemlerindeki mikroplastik varlığı araştırılmıştır.	Her üç balığın gastrointestinal sisteminde 232 mikroplastik tespit edilmiştir. Belirlenen en yüksek renk siyah (%39-58) iken en sık görülen mikroplastik şeklinin lif (%88) olduğu belirtilmiştir. Polietilen, polyester, poli (vinil stearat), polietilen tereftalat, polipropilen ve selüloz tanımlanan plastik türleridir.	[49]
Karasu Nehri'ndeki (Van) *Unio stevenianus*'un dokularındaki mikroplastik miktarı ve çeşitliliği araştırılmıştır.	Toplanan tüm midye örneklerinde mikroplastik bulunmuştur. Mikroplastik boyutlarının <0,1 ila 5 mm arasında değiştiği ve <0,1 mm boyutunun %44,8 oran ile en baskın boyut olduğu tespit edilmiştir. En sık izole edilen mikroplastik türünün parça (%48,8) ve lif (%47,5) olduğu belirtilmiştir. Siyah renk yumuşak dokularda en sık rastlanan renk olmuştur (%48,8).	[50]
Sürgü Baraj Gölü'nde (Malatya) 62'si *Cyprinus carpio* ve 45'i *Alburnus mossulensis* (mossul bleak) olmak üzere toplamda 107 balık yakalanmış ve mikroplastik miktarı, rengi, boyutu ve türü incelenmiştir.	62 *C. carpio*'nun 27'sinde ve 45 *A. mossulensis*'in 3'ünde en az 1 mikroplastik keşfedilmiştir. *C. carpio* ve *A. mossulensis*'de tespit edilen mikroplastik sayısı sırasıyla 40 ve 4'tür. En sık karşılaşılan mikroplastik türünün lif olduğu belirtilmiştir. En baskın mikroplastik renklerinin şeffaf (%25), mavi ve siyah (%20) olduğu tespit edilmiştir. En çok tespit edilen mikroplastik türlerinin PET ve PP olduğu bildirilmiştir.	[51]
Karadeniz'de 7 ticari balık türünde (*Engraulis encrasicolus, Trachurus mediterraneus, Sarda sarda, Belone belone, Pomatus saltatrix, Merlangius merlangus and Mullus barbatus*) mikro (<5 mm), mezo (5-25 mm) ve makroplastik (>25 mm) oluşumu araştırılmıştır.	Plastikler tüm türlerin gastrointestinal sistemlerinde bulunmuştur. Toplamda 190 örnekten 352 plastik parça çıkarılmıştır. En yaygın plastik türünün lif (%68,5), en yaygın plastik renginin ise siyah (%39,3) olduğu belirtilmiştir. Plastiklerin %93,2'sinin mikroplastik, %6,5'unun mezoplastik ve %0,3'ünün makroplastik olduğu tespit edilmiştir. Karadeniz'deki ticari balıkların plastiklerle kontamine olduğu bildirilmiştir.	[52]

III. DENİZ ÜRÜNLERİ VE MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ: SAĞLIK TEHDİTLERİ

Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında çok az şey bilinmektedir. Ancak dünya çapında artan plastik yoğunluğuna bağlı olarak artan maruziyetin büyük bir tehdit oluşturduğu da açıktır. Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerinde oksidatif stres, solunum sistemi hastalıkları, bağışıklık fonksiyonlarının bozulması, kanserojen ve nörotoksisite gibi önemli etkileri bulunmaktadır [53, 54].

Genel olarak mikroplastikler insan vücuduna beslenme (yiyecek ve su), solunum ve cilt teması (kişisel bakım ürünleri, tekstil) olmak üzere üç ana yoldan girmektedir. İnsan vücudunda mikroplastiklere maruz kalma esas olarak balık, meyve ve sebzeler, et, tahıllar ve baklagiller ve su gibi temel gıdalar dahil olmak üzere yiyecek ve içeceklerin tüketilmesiyle gerçekleşmektedir. Yiyecek ve içeceklerde en yaygın tespit edilen mikroplastikler polipropilen (PP), polietilentereftalat (PET), polivinil klorür (PVC), polietilen (PE), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), poliamid (PA), polistiren (PS), genleştirilmiş polistiren (EPS) vb.'dir [55, 56].

Mikroplastikler mercan, fitoplankton ve diğer deniz hayvanları gibi farklı su biyotalarında bulunmuştur. Toksik alglere maruz kalan mikroplastikler insan sağlığı üzerinde dolaylı olumsuz etkiye sahip olabilecek fitotoksinler üretmektedir. Denizel ekosistemlerde üretilen alg toksini diğer deniz ürünlerinde de birikebilir ve insanlarda tehlikeli semptomlara neden olabilir [57]. Tatlı su ve deniz ortamında bol miktarda bulunan mikroplastikler insanların besin zincirine dahil olmaktadır [56]. Dünyanın dört bir yanından yenilebilir dip, pelajik ve resif balıkları da dahil olmak üzere birçok deniz türleri araştırılmış ve mikroplastiklerin yutulduğu bulunmuştur [58, 59, 60]. Kabuklu deniz ürünleri ve kabuklular, dünya çapında insan gıdası olarak kullanılan ve insanların gıda güvenliği için çok önemli olan bir organizma grubudur. Farklı çalışmalarda, *Mytilidae* familyasından kabuklu deniz ürünleri olan midyelerin 0,20 ile 5,36 parçacık/g arasında değişen çeşitli miktarlarda mikroplastiklere sahip olduğu tespit edilmiştir [61, 62, 63, 56]. Yengeç, ıstakoz, kerevit ve karides gibi çeşitli kabuklu hayvan türlerinde de mikroplastiklerin olduğu bildirilmiştir [64, 45].

Yapılan çalışmalar balık etinde polietilen tereftalat (PET), polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), poliamid (PA) ve polikarbonat dahil olmak üzere çeşitli mikroplastik türlerinin bulunduğunu göstermiştir [65]. Balık etinde en yaygın bulunan mikroplastik türleri kontaminasyon kaynağına ve balığın türüne bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, gökkuşağı alabalığı filetoları üzerinde yapılan bir çalışmada araştırmacılar mikroplastiklerde polietilen, polipropilen ve polistiren dahil olmak üzere altı tür polimer tespit etmiştir [66]. Balık da dahil olmak üzere çeşitli yenilebilir türler üzerinde yapılan bir başka araştırmada mikroplastik içeriğinin türe bağlı olarak değiştiği ve bazı türlerin diğerlerine göre daha yüksek düzeyde mikroplastik içerdiği belirtilmiştir [67].

Mikroplastiklerle kontamine olmuş balıkların tüketilmesi sindirim, sinir ve üreme sisteminde hasara yol açmanın yanında kanser riskini artırma ve bağışıklık sisteminde bozulmaya neden olabilecek çeşitli potansiyel sağlık riskleri beraberinde getirebilmektedir [56].

Mikroplastiklerin temel sorunu, potansiyel toksik etkisi olan plastik parçacıkların bağırsak epiteline nüfuz ederek insanların sistematik olarak bu maddelere maruz kalmasıdır [68]. Plastik parçacıklar mide-bağırsak kanalındaki proteinler, lipitler, karbonhidratlar, nükleik asitler, iyonlar ve su dahil olmak üzere çeşitli moleküllerle etkileşime girebilmektedir [69]. Bağırsak, sindirim ve emilim gibi birçok aktif rol oynayan sindirim sisteminin önemli bir parçasıdır. Bağırsak florası diyabet, beyin hastalığı ve kardiyovasküler hastalık gibi bazı hastalıklarla da ilişkilidir. Normal koşullarda birçok yararlı ve zararlı mikroorganizma barındıran bağırsak mukus tabakası, mikroplastikler gibi eksojen toksinlerin varlığında bağırsaktaki mikrobiyal ekoloji tahrip olarak bağırsak dengesizliği, metabolik aktivite, iltihaplanma gibi çeşitli bağırsak fonksiyonlarının dengesizliğine yol açabilmektedir [70, 71, 72].

Vücut aşırı oksidatif stresi düzenleyemediğinde antioksidan enzimlerin işlevi mikroplastikler tarafından inhibe edilmekte bu da karaciğer hasarına ve metabolik bozukluğa yol açabilmektedir [73]. Mikroplastiklerin glikoz ve lipit metabolizması başta olmak üzere karaciğerin birçok önemli fonksiyonu üzerinde olumsuz etkileri ve insanlarda neden olduğu karaciğer toksisitesi hakkında daha fazla çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir [57].

2020 yılında yapılan bir çalışmada araştırmacılar polistiren mikroplastik (PS-MP'ler) alımının sperm hücrelerinde azalmaya ve spermde şekil bozukluğuna neden olduğunu bildirmiştir [74]. Yakın zamanda yapılan bir başka çalışmada PS-MP'lere maruz kalan farelerin rahim ve yumurtalıklarında birikebileceği belirtilmiştir [75]. Üstelik üreme ve doğurganlık açısından dişi fareler MP'lere karşı erkek farelere göre daha savunmasızdır ve PS-MP'lerin birikimi yumurtalıklarda testislere göre daha yüksektir [76].

Sonuç olarak çalışmalar mikroplastiklerin sinir ve sindirim sistemini etkileyebileceğini ve aynı zamanda bağırsak florası üzerinde etkiye sahip olabileceğini göstermiştir. Ancak mikroplastiklerin insanların bağışıklık ve üreme sistemi üzerindeki etkileri ve kanser riski ile ilgili daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

IV. SÜRDÜRÜLEBİLİR BALIKÇILIK VE MİKROPLASTİKLER

Balıkçılık endüstrisi, okyanuslardaki plastik atıkların önemli bir kaynağı olup atılan balık ağlarıyla da ciddi bir şekilde ilişkilidir. Bu atık yalnızca deniz ekosistemine zarar vermekle kalmamakta aynı zamanda bu ağların bozulmasından kaynaklanan mikroplastiklerin deniz hayvanları tarafından yutulması ve insanların besin zincirine girebilmesi nedeniyle insan sağlığına da tehdit oluşturmaktadır. Bu sorunu çözmek için sürdürülebilir balıkçılık yöntemleri ve atık yönetimi uygulamaları araştırılmaktadır. Deniz koruma alanlarının oluşturulması gibi deniz koruma çabaları, aşırı avlanma ve plastik kirliliğinin önlenme çalışmaları deniz ekosistemleri üzerinde hayati öneme sahiptir. Sürdürülebilir balıkçılık yöntemlerinin etkili atık yönetimi ve koruma stratejileriyle entegre edilmesi, mikroplastiklerin ve plastik atıkların deniz ortamı ve insan sağlığı üzerindeki etkisinin azaltılması açısından önemlidir [77, 78, 79].

Sürdürülebilir balıkçılık yöntemleri, balıkçılığın çevre üzerindeki etkisini en aza indirmeyi ve balık popülasyonlarının uzun vadede yaşayabilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Sürdürülebilir balıkçılık yöntemlerinin bazı örnekleri şunlardır:

1) Seçici balıkçılık: Bu yöntem, belirli balık türlerinin hedeflenmesini ve hedef olmayan türlerin yakalanmasından kaçınmayı içermektedir. Kancalar ve oltalar, tuzaklar ve saksılar gibi seçici avlanma araçları hedef dışı avın azaltılmasına yardımcı olabilmektedir.

2) Balıkçılık kotaları: Hükümetler aşırı avlanmayı önlemek için belirli bir alan veya zaman diliminde yakalanabilecek balık miktarına sınırlamalar getirebilmektedir.

3) Deniz koruma alanları: Balık popülasyonlarının toparlanıp gelişmesini sağlamak için balıkçılığın kısıtlandığı veya yasaklandığı belirlenmiş alanlardır.

4) Su ürünleri yetiştiriciliği: Yabani balık popülasyonları üzerindeki baskıyı azaltabilecek, kontrollü ortamlarda balık yetiştirme uygulamasıdır [80, 81, 82].

Norveç'te balıkçılık faaliyetlerini yürütebilmek ve bu çerçevede düzenlemeler yapabilmek için temel gereklilik balıkçılık lisansıdır. Bu lisans kapsamında, turizm ve diğer balıkçılık faaliyetleri için kiralanmış veya satın alınmış gemi sayıları kontrol edilmektedir. Ayrıca bölgedeki balıkçılığın sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla devlet tarafından kota sistemi uygulanmaktadır. Her gemi için belirlenen bir avlanma kotası bulunmaktadır ve bu kota aşıldığında geminin ticari balıkçılık faaliyetlerini sürdürmesi yasaktır [83, 84].

İzlanda ekonomisinin önemli bir parçası olan balıkçılık faaliyetleri, ülkenin deniz kaynaklarını sürdürülebilir bir şekilde yönetmek amacıyla çeşitli yasal düzenlemelerle kontrol altına alınmıştır. Bu düzenlemeler arasında 1990 yılında yürürlüğe giren Balıkçılık Yönetimi Yasası'nın özellikle önemi büyüktür. Bu yasa balık popülasyonlarının korunmasını ve denizlerdeki verimliliğin arttırılmasını hedeflerken balıkçıları da ekonomik olarak desteklemeyi amaçlamaktadır. İzlanda'daki tüm balıkçılık faaliyetleri balıkçılık ve tarım bakanlığının gözetimi altında gerçekleştirilmektedir. Devredilebilir Kotalar Sistemi (ITQ) gibi bilimsel temellere dayanan sistemlerle denetlenmektedir. Bu sistemler, balıkçı gemilerine belirli bir avlanma kotası tahsis ederek aşırı avlanmayı engeller ve balıkçılığı sürdürülebilir kılar. Ayrıca balıkçıların kota tahsisine uygun şekilde ücretlendirilmesi ve belirli dönemlerde balıkçılık faaliyetlerinin geçici olarak durdurulması gibi önlemler de alınmaktadır. Bu sayede İzlanda'nın balıkçılık sektörü hem ekonomik olarak büyümekte hem de çevresel sürdürülebilirliği sağlamaktadır [84].

Sürdürülebilir balıkçılığın mikroplastik kirliliğin azaltılmasına katkıda bulunduğu yollardan bazıları şunlardır:

1) Plastik atıkların azaltılması: Sürdürülebilir balıkçılık, geri dönüştürülebilir balıkçılık malzemelerinin kullanılması ve tek kullanımlık plastik kullanımının en aza indirilmesi gibi sürdürülebilir balıkçılık uygulamalarını teşvik ederek balıkçılık endüstrisi tarafından üretilen plastik atık miktarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır [68]. Bu da atık ürünlerin okyanuslara karışarak deniz yaşamına zarar verebilecek mikroplastiklere dönüşmesini önlemeye yardımcı olmaktadır [79].

2) Balık ağlarının geri dönüşümü: Bazı sürdürülebilir balıkçılık girişimleri atık balık ağlarının beton gibi malzemelere dönüştürülmesine odaklanmaktadır. Örneğin atık balık ağlarından elde edilen liflerin çimento harcı numunelerinde takviye olarak kullanımının araştırıldığı bir çalışmada deniz atıklarının en aza indirilmesi ve atılan ağların yeniden değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, ağların mikroplastik olarak okyanuslara karışmasının önlenmesine yardımcı olmaktadır [79].

3) Alternatif malzemelerin kullanımı: Sürdürülebilir balıkçılık yöntemleri, olta takımlarındaki sentetik malzemelerin yerine doğal lifler gibi alternatif malzemelerin kullanılmasını da içerebilmektedir. Bu durum balıkçılık endüstrisi tarafından üretilen plastik atık miktarının azaltılmasına ve deniz ortamları üzerindeki etkinin en aza indirilmesine yardımcı olabilmektedir [79].

Sürdürülebilir balıkçılık uygulamaları plastik atıkların azaltılması, balık ağlarının geri dönüştürülmesi ve olta takımlarında alternatif malzemelerin kullanılması yoluyla mikroplastik kirliliğin azaltılmasında önemli bir rol oynayabilmektedir. Bu uygulamalar hem deniz yaşamına hem de insan sağlığına fayda sağlayacak şekilde daha temiz ve sağlıklı bir okyanus ortamına katkıda bulunabilmektedir.

V. TÜKETİCİ BİLİNCİ VE ÇÖZÜMLER

Tüketiciler günlük yaşamlarında çeşitli uygulamaları benimseyerek mikroplastiklerle kontrollü bir şekilde baş edebilirler. Bu uygulamalardan bazılarına aşağıda yer verilmiştir [85].

1) Mikroplastik içermeyen ürünlerin kullanımı: Kozmetik ve kişisel bakım ürünlerinde mikroplastik içeren ürünler yerine şeker, tuz veya meyve tohumları gibi doğal peeling maddeleri içeren ürünler tercih edilmelidir.

2) Tek kullanımlık plastik ürünlerin azaltılması: Su şişeleri, pipetler ve tek kullanımlık çatal bıçak takımı gibi tek kullanımlık plastik ürünlerin kullanımı azaltılmalıdır.

3) Atıkların uygun şekilde geri dönüştürülmesi: Plastik şişeler, torbalar ve diğer atıkları okyanuslara karışma olasılıklarını en aza indirebilmek için belirlenmiş geri dönüşüm kutularına atılmalıdır.

4) Çevreye duyarlı şirketlerin desteklenmesi: Tedarik zincirlerinde veya ürünlerinde mikroplastikleri azaltmak için aktif olarak çalışan şirketlerin ürünleri tercih edilmelidir.

5) Kendinizin ve çevrenizin eğitilmesi: En başta kendiniz olmak üzere arkadaş, aile ve meslektaşlarınızla bilgi paylaşarak mikroplastik kirliliği ve bunun deniz yaşamı ve insan sağlığı üzerindeki etkisi hakkında farkındalığı artırabilirsiniz. Ayrıca okul öncesi çağdan itibaren tüm eğitim öğretim kademelerindeki öğrencilere çevre eğitimi verilerek mikroplastik azaltıcı uygulamaların benimsenmesi teşvik edilmelidir.

Tüketiciler bu uygulamaları benimseyerek ve mikroplastik kirliliğini azaltan politikaları destekleyerek hem deniz yaşamı hem de insanlar için daha temiz ve sağlıklı bir çevreye katkıda bulunabilmektedir [85].

İnsanların deniz ürünlerini satın alırken ve tüketirken daha bilinçli seçimler yapmaları gerekmektedir. Sürdürülebilir balıkçılık için standartlar belirlemeyi amaçlayan bir kuruluş olan Deniz Koruma Konseyi (Marine Stewardship Council (MSC)) veya diğer saygın sertifikasyon kuruluşlar tarafından onaylanan işletmelerdeki deniz ürünlerinin tercih edilmesi [82], sürdürülebilir deniz ürünleri seçenekleri ve farklı balıkçılık yöntemlerinin çevresel etkileri konusunda kendinizin ve çevrenizin eğitilmesi [81], denizel biyoçeşitliliği korumak için aşırı avlanan veya

nesli tükenmekte olan türlerin satın alımından kaçınılması [78] ve eğer hobi olarak balıkçılık yapılıyorsa deniz yaşamı üzerindeki etkiyi en aza indirmek için kullanılmış olta gibi balıkçılık atıklarının çevreye duyarlı bir şekilde imha edilmesi [81] gibi tüketici tercihleri deniz ekosisteminin sürdürülebilirliğine katkıda bulunabilmektedir.

Tüketicilerin deniz ürünleri satın alırken arayabilecekleri çeşitli sürdürülebilir deniz ürünleri sertifikasyon programları bulunmaktadır. Deniz Koruma Konseyi (MSC) (Marine Stewardship Council), Su Ürünleri Yönetim Konseyi (ASC) (Aquaculture Stewardship Council), Deniz Dostu (FOS) (Friend of the Sea) ve İyi Su Ürünleri Uygulamaları (BAP) (Best Aquaculture Practices) bu programlara örnek verilebilir [86, 82].

VI. SONUÇ

Mikroplastikler deniz ortamında yaygın olarak bulunan ve deniz ürünlerine bulaşabilen küçük plastik parçacıklardır. Balık ve diğer deniz ürünleri mikroplastiği sindirim sistemlerinde, solungaçlarında ve dokularında biriktirebilirler. Bu durum hem deniz ekosistemi hem de insan sağlığı için endişe vericidir. Balıklarda biriken mikroplastikler ve insanların balık tüketimi arasındaki ilişki insanların da bu kirlilik ile etkileşimde olduğunu göstermektedir. Geri dönüşümü ve plastiksiz alternatifleri tercih ederek plastik kullanımının azaltılması, daha sürdürülebilir balıkçılık yöntemlerinin kullanılması, daha etkili atık yönetim politikaları oluşturulması, endüstriyel ve ticari sektörlerin mikroplastik kullanımını azaltması ve tüketicilerin mikroplastik konusunda bilinçlendirilmesi gibi hususlar mikroplastik sorununun çözümü için atılması gereken adımlardır.

Sonuç olarak mikroplastik kirliliğiyle mücadelede tüm paydaşların iş birliği yapması gerekmektedir. Sürdürülebilirlik, bilinçlenme ve daha çevreci alışkanlıkların benimsenmesi denizlerimizi ve balık tüketimini daha güvenli hale getirerek gelecek nesillere daha temiz bir çevre bırakmamızı sağlayabilir. Bu sorunun çözümü için atılacak her adım denizlerimizin ve insan sağlığının korunmasına büyük katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

[1] Shim, W. J., & Thomposon, R. C. (2015). Microplastics in the ocean. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69, 265-268.

[2] Alomar, C., Estarellas, F., & Deudero, S. (2016). Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Marine Environmental Research*, 115, 1-10.

[3] Alberghini, L., Truant, A., Santonicola, S., Colavita, G., & Giaccone, V. (2022). Microplastics in fish and fishery products and risks for human health: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 789.

[4] Chen, J. Y. S., Lee, Y. C., & Walther, B. A. (2020). Microplastic contamination of three commonly consumed seafood species from Taiwan: A pilot study. *Sustainability*, 12(22), 9543.

[5] Santonicola, S., Volgare, M., Cocca, M., Dorigato, G., Giaccone, V., & Colavita, G. (2023). Impact of Fibrous Microplastic Pollution on Commercial Seafood and Consumer Health: A Review. *Animals*, 13(11), 1736.

[6] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597.

[7] Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., & Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646-6655.

[8] Ferreira, P., Fonte, E., Soares, M. E., Carvalho, F., & Guilhermino, L. (2016). Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish Pomatoschistus microps: gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquatic Toxicology*, 170, 89-103.

[9] Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*, 102, 165-176.

[10] Biswas, T., & Pal, S. C. (2024). Emerging threats of microplastics on marine environment: A critical review of toxicity measurement, policy practice gap and future research direction. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139941.

[11] Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2), 170-179.

[12] Kazour, M., Terki, S., Rabhi, K., Jemaa, S., Khalaf, G., & Amara, R. (2019). Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 608-618.

[13] Koelmans, A. A., Gouin, T., Thompson, R., Wallace, N., & Arthur, C. (2014). Plastics in the marine environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(1), 5-10.

[14] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597.

[15] Kim, J. A., Kim, M. J., Song, J. A., & Choi, C. Y. (2023). Effects of microfiber exposure on medaka (Oryzias latipes): Oxidative stress, cell damage, and mortality. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 265, 109535.
[16] Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175-9179.
[17] Chiba, S., Saito, H., Fletcher, R., Yogi, T., Kayo, M., Miyagi, S., & Fujikura, K. (2018). Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris. *Marine Policy*, 96, 204-212.
[18] Ivar do Sul, J. A., Costa, M. F., & Fillmann, G. (2014). Microplastics in the pelagic environment around oceanic islands of the Western Tropical Atlantic Ocean. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1-13.
[19] Everaert, G., Van Cauwenberghe, L., De Rijcke, M., Koelmans, A. A., Mees, J., Vandegehuchte, M., & Janssen, C. R. (2018). Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. *Environmental Pollution*, 242, 1930-1938.
[20] Gedik, K., & Eryaşar, A.R. (2020). Microplastic pollution profile of Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*) collected along the Turkish coasts. *Chemosphere*, 260, 127570.
[21] Erdoğan, Ş. (2020). Microplastic pollution in freshwater ecosystems: A case study from Turkey. *Su Ürünleri Dergisi*, 37(3), 213-221.
[22] Çomaklı, E., Bingöl, M. S., & Bilgili, A. (2020). Assessment of microplastic pollution in a crater lake at high altitude: A case study in an urban crater Lake in Erzurum, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, 1-6.
[23] Karaoğlu, K., & Gül, S. (2020). Characterization of microplastic pollution in tadpoles living in small water-bodies from Rize, the northeast of Turkey. *Chemosphere*, 255, 126915.
[24] Tavşanoğlu, Ü.N., Başaran Kankılıç, G., Akca, G., Çırak, T., & Erdoğan, Ş. (2020). Microplastics in a dam lake in Turkey: type, mesh size effect, and bacterial biofilm communities. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 45688-45698.
[25] Atıcı, A. A., Sepil, A., Sen, F., & Karagoz, M. H. (2022). First evaluation of microplastic pollution in the surface waters of the Van Bay from Van Lake, Turkey. *Chemistry and Ecology*, 38(1), 1-16.
[26] Almas, F. F., Bezirci, G., Çağan, A. S., Gökdağ, K., Çırak, T., Kankılıç, G. B., & Tavşanoğlu, Ü. N. (2022). Tracking the microplastic accumulation from past to present in the freshwater ecosystems: A case study in Susurluk Basin, Turkey. *Chemosphere*, 303, 135007.
[27] Gündoğdu, S., Kutlu, B., Özcan, T., Büyükdeveci, F., & Blettler, M. C. (2023). Microplastic pollution in two remote rivers of Türkiye. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 791.
[28] Çevik, C., Kıdeyş, A. E., Tavşanoğlu, Ü. N., Kankılıç, G. B., & Gündoğdu, S. (2021). A review of plastic pollution in aquatic ecosystems of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 26230-26249.
[29] Mutlu, E., Özvarol, Y., Şahin, A., Duman, G. S., & Karaca, D. (2020). Macro litter distribution of the Turkish Mediterranean coasts dominated by pleasure crafts. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110833.
[30] Baysal, A., Saygin, H., Ustabasi, & G. S. (2020). Microplastic occurrences in sediments collected from Marmara Sea-Istanbul, Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105, 522-529.
[31] Tunçer, S., Artüz, O. B., Demirkol, M., & Artüz, M. L. (2018). First report of occurrence, distribution, and composition of microplastics in surface waters of the Sea of Marmara, Turkey. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 283-289.
[32] Lee, H., Shim, W. J., & Kwon, J. H. (2014). Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals. *Science of the Total Environment*, 470, 1545-1552.
[33] Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., & Quinn, B. (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5800-5808.
[34] Markic, A., Gaertner, J. C., Gaertner-Mazouni, N., & Koelmans, A. A. (2020). Plastic ingestion by marine fish in the wild. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(7), 657-697.
[35] Pereira, J. M., Rodríguez, Y., Blasco-Monleon, S., Porter, A., Lewis, C., & Pham, C. K. (2020). Microplastic in the stomachs of open-ocean and deep-sea fishes of the North-East Atlantic. *Environmental Pollution*, 265, 115060.
[36] Lusher, A. L., Hernandez-Milian, G., O'Brien, J., Berrow, S., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: the True's beaked whale Mesoplodon mirus. *Environmental Pollution*, 199, 185-191.
[37] Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2016). Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, Nephrops norvegicus. *Environmental Pollution*, 218, 895-900.
[38] Arossa, S., Martin, C., Rossbach, S., & Duarte, C. M. (2019). Microplastic removal by Red Sea giant clam (Tridacna maxima). *Environmental Pollution*, 252, 1257-1266.
[39] Baalkhuyur, F. M., Qurban, M. A., Panickan, P., & Duarte, C. M. (2020). Microplastics in fishes of commercial and ecological importance from the Western Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 152, 110920.

[40] Li, J., Yang, D., Li, L., Jabeen, K., & Shi, H. (2015). Microplastics in commercial bivalves from China. *Environmental Pollution*, 207, 190-195.
[41] Karami, A., Golieskardi, A., Ho, Y. B., Larat, V., & Salamatinia, B. (2017). Microplastics in eviscerated flesh and excised organs of dried fish. *Scientific Reports*, 7(1), 5473.
[42] Garnier, Y., Jacob, H., Guerra, A. S., Bertucci, F., & Lecchini, D. (2019). Evaluation of microplastic ingestion by tropical fish from Moorea Island, French Polynesia. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 165-170.
[43] Herrera, A., Ŝtindlová, A., Martínez, I., Rapp, J., Romero-Kutzner, V., Samper, M. D., & Gómez, M. (2019). Microplastic ingestion by Atlantic chub mackerel (Scomber colias) in the Canary Islands coast. *Marine Pollution Bulletin*, 139, 127-135.
[44] Renzi, M., Specchiulli, A., Blašković, A., Manzo, C., Mancinelli, G., & Cilenti, L. (2019). Marine litter in stomach content of small pelagic fishes from the Adriatic Sea: sardines (Sardina pilchardus) and anchovies (Engraulis encrasicolus*). Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2771-2781.
[45] Abbasi, S., Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., & Hassanaghaei, M. (2018). Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf. *Chemosphere*, 205, 80-87.
[46] Atıcı, A. A., Sepil, A., Sen, F. (2021). High levels of microplastic ingestion by commercial, planktivorous Alburnus tarichi in Lake Van, Turkey. *Food Additives & Contaminants*, 38(10), 1767-1777.
[47] Atamanalp, M., Kokturk, M., Gündüz, F., Parlak, V., Ucar, A., Alwazeer, D., & Alak, G. (2023). The use of zebra mussel (Dreissena polymorpha) as a sentinel species for the microplastic pollution of freshwater: the case of Beyhan Dam Lake, Turkey. *Sustainability*, 15(2), 1422.
[48] Güven, O., Gökdağ, K., Jovanović, B., & Kıdeyş, A. E. (2017). Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish. *Environmental Pollution*, 223, 286-294.
[49] Atamanalp, M., Köktürk, M., Parlak, V., Ucar, A., Arslan, G., & Alak, G. (2022). A new record for the presence of microplastics in dominant fish species of the Karasu River Erzurum, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 7866-7876.
[50] Atıcı, A. A. (2022). The first evidence of microplastic uptake in natural freshwater mussel, Unio stevenianus from Karasu River, Turkey. *Biomarkers*, 27(2), 118-126.
[51] Turhan, D. Ö. (2021). Evaluation of microplastics in the surface water, sediment and fish of Sürgü Dam Reservoir (Malatya) in Turkey. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22, 1-12.
[52] Aytan, U., Esensoy, F. B., Şentürk, Y., Arifoğlu, E., Karaoğlu, K., Ceylan, Y., & Valente, A. (2022). Plastic occurrence in commercial fish species of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22, 13.
[53] Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.
[54] Çıtar Dazıroğlu, M. E., & Bilici, S. (2023). The hidden threat to food safety and human health: microplastics. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 21913-21935.
[55] Afrin, S., Rahman, M. M., Hossain, M. N., Uddin, M. K., & Malafaia, G. (2022). Are there plastic particles in my sugar? A pioneering study on the characterization of microplastics in commercial sugars and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 837, 155849.
[56] Al Mamun, A., Prasetya, T. A. E., Dewi, I. R., & Ahmad, M. (2023). Microplastics in human food chains: Food becoming a threat to health safety. *Science of the Total Environment*, 858, 159834.
[57] Sharma, S., & Chatterjee, S. (2017). Microplastic pollution, a threat to marine ecosystem and human health: a short review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 21530-21547.
[58] Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5(1), 1-10.
[59] Bråte, I. L. N., Eidsvoll, D. P., Steindal, C. C., & Thomas, K. V. (2016). Plastic ingestion by Atlantic cod (Gadus morhua) from the Norwegian coast. *Marine Pollution Bulletin*, 112(1-2), 105-110.
[60] Walkinshaw, C., Lindeque, P. K., Thompson, R., Tolhurst, T., & Cole, M. (2020). Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110066.
[61] De Witte, B., Devriese, L., Bekaert, K., Hoffman, S., Vandermeersch, G., Cooreman, K., & Robbens, J. (2014). Quality assessment of the blue mussel (Mytilus edulis): Comparison between commercial and wild types. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1), 146-155.
[62] Van Cauwenberghe, L., Claessens, M., Vandegehuchte, M. B., & Janssen, C. R. (2015). Microplastics are taken up by mussels (Mytilus edulis) and lugworms (Arenicola marina) living in natural habitats. *Environmental Pollution*, 199, 10-17.
[63] Qu, X., Su, L., Li, H., Liang, M., & Shi, H. (2018). Assessing the relationship between the abundance and properties of microplastics in water and in mussels. *Science of the Total Environment*, 621, 679-686.

[64] Devriese, L. I., Van der Meulen, M. D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L., & Vethaak, A. D. (2015). Microplastic contamination in brown shrimp (Crangon crangon, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1-2), 179-187.
[65] Kadac-Czapska, K., Knez, E., & Grembecka, M. (2022). Food and human safety: The impact of microplastics. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(11), 3502-3521.
[66] Alak, G., Köktürk, M., Ucar, A., Parlak, V., Kocaman, E. M., & Atamanalp, M. (2022). Thermal processing implications on microplastics in rainbow trout fillet. *Journal of Food Science*, 87(12), 5455-5466.
[67] Rodríguez-Pérez, C., de Rodrigáñez, M. S., & Pula, H. J. (2023). Occurrence of nano/microplastics from wild and farmed edible species. Potential effects of exposure on human health. *Advances in Food and Nutrition Research*, 103, 273-311.
[68] Yee, M. S. L., Hii, L. W., Looi, C. K., Lim, W. M., Wong, S. F., Kok, Y. Y., & Leong, C.O. (2021). Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials*, 11(2), 496.
[69] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *Efsa Journal*, 14(6), 4501.
[70] You, C., Chen, B., Wang, M., Wang, S., Zhang, M., Sun, Z., & Li, Y. (2019). Effects of dietary lipid sources on the intestinal microbiome and health of golden pompano (Trachinotus ovatus). *Fish & Shellfish Immunology*, 89, 187-197.
[71] Yang, G., Yuan, X., Jin, C., Wang, D., Wang, Y., Miao, W., & Jin, Y. (2020). Imidacloprid disturbed the gut barrier function and interfered with bile acids metabolism in mice. *Environmental Pollution*, 266, 115290.
[72] Yin, K., Wang, Y., Zhao, H., Wang, D., Guo, M., Mu, M., & Xing, M. (2021). A comparative review of microplastics and nanoplastics: Toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system. *Science of the Total Environment*, 774, 145758.
[73] Liu, J., Dong, C., Zhai, Z., Tang, L., & Wang, L. (2021). Glyphosate-induced lipid metabolism disorder contributes to hepatotoxicity in juvenile common carp. *Environmental Pollution*, 269, 116186.
[74] Xie, X., Deng, T., Duan, J., Xie, J., Yuan, J., & Chen, M. (2020). Exposure to polystyrene microplastics causes reproductive toxicity through oxidative stress and activation of the p38 MAPK signaling pathway. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190, 110133.
[75] Liu, Z., Zhuan, Q., Zhang, L., Meng, L., Fu, X., & Hou, Y. (2022). Polystyrene microplastics induced female reproductive toxicity in mice. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127629.
[76] Wei, Z., Wang, Y., Wang, S., Xie, J., Han, Q., & Chen, M. (2022). Comparing the effects of polystyrene microplastics exposure on reproduction and fertility in male and female mice. *Toxicology*, 465, 153059.
[77] Kumartasli, S., & Avinc, O. (2020). Recycling of marine litter and ocean plastics: a vital sustainable solution for increasing ecology and health problem. *Sustainability in the Textile and Apparel Industries*, 117-137.
[78] Church, G., Benbow, S., & Duffy, H. (2023). Putting communities at the heart of marine conservation. *Oryx*, 57(2), 137-138.
[79] Suárez Lejardi, E. (2018). *Recycling fishing nets into concrete*. Master Thesis, Danmarks Tekniske Universitet, Kongens Lyngby, Danmarks.
[80] Verma, R., Sharma, P., & Upadhyay, L. (2022) A survey on the traditional and indigenous fishing methods in the Kali River, Uttarakhand, India. *Flora and Fauna*, 28(2), 362-368.
[81] Shchetinskiy, V., & Petrov, B. (2020). Exploration of Northern Commercial Fishing Area Resources and Sustainable Use Challenges and Ways to Resolve them. *KnE Life Sciences*, 763-770.
[82] Vidman, R. (2018). *Sustainable fishing - How and why to change the industry*. Master Thesis, Lund University School of Economics and Management, Lund, Sweden.
[83] Monkness, E., Gjøsæter, J., Mikkelsen, E., & Lagaillarde, G. (2011). Effects of Fishing Tourism in a Coastal Municipality: a Case Study from Risør, *Ecology and Society*, 16(3), 11.
[84] Arıcı, E. (2022). *İskandinav ülkelerinde ekoturizm faaliyetleri*. Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
[85] Saini, A., & Sharma, J. G. (2022). Emerging microplastic contamination in ecosystem: An urge for environmental sustainability. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 10(5), 66-75.
[86] Arton, A., Leiman, A., Petrokofsky, G., Toonen, H., & Longo, C. S. (2020). What do we know about the impacts of the Marine Stewardship Council seafood ecolabelling program? A systematic map. *Environmental Evidence*, 9, 1-20.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 344-353, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1453071
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi- Review Article

Meyve Bazlı Probiyotiklere Genel Bir Bakış

An Overview of Fruit-Based Probiotics

Gizem Tiryaki[1*], Emine Nakilcioğlu[2]

Geliş / Received: 14/03/2024 ***Revize / Revised: 03/07/2024*** ***Kabul / Accepted: 22/07/2024***

ÖZ

Probiyotikler, yeterli miktarlarda alındığında kişiye fayda sağlayan canlı mikroorganizmalardır. Probiyotiklerin, bağırsak mikrobiyotası dengesini korumak ve bağışıklık sistemini düzenlemek gibi başlıca fonksiyonları bulunmaktadır. İnsan sağlığının sürdürülmesinde kritik bir rol oynayan bağırsak mikrobiyotası, düzenli probiyotik tüketimi ile dengelenebilmektedir. Son yıllarda veganların artması, tüketicilerin süt proteinlerine alerjik reaksiyonlar göstermesi ve laktoz intoleransı nedeniyle süt bazlı probiyotiklerin tüketimi azalmaktadır. Süt bazlı probiyotiklerin yerine meyve bazlı probiyotiklerin kullanılması iyi bir alternatiftir. Meyveler probiyotiklerin büyümesini teşvik eden bir dizi besin içerdikleri için meyve bazlı probiyotik tüketimi, vücuda probiyotikleri taşımak için mükemmel bir araçtır. Meyve bazlı probiyotiklerin canlılığını sürdürerek etkili bir sonuç verebilmeleri için dayanıklı olduğu bilinen probiyotik suşları seçmek oldukça önemlidir. Bu derlemenin amacı, probiyotik mikroorganizmaların sağlık etkileri ve meyve bazlı ürünlerde kullanımı hakkında bilgiler vermektir. Bu derleme, probiyotik kavramını, meyvelerin probiyotik kaynağı olarak kullanımını, meyve bazlı probiyotiklerin fermantasyon mekanizmasını ve fermantasyon sonrasında meydana gelen fizikokimyasal değişikleri içermektedir.

Anahtar Kelimeler- Probiyotik, Meyve bazlı probiyotikler, Fermantasyon

ABSTRACT

Probiotics are living microorganisms that provide benefits to the person when consumed in sufficient amounts. Probiotics have major functions, such as maintaining intestinal microbiota balance and regulating the immune system. The intestinal microbiota, which plays a critical role in maintaining human health, can be balanced with regular probiotic consumption. In recent years, the consumption of milk-based probiotics has been decreasing due to the increase in vegans, consumers' allergic reactions to milk proteins, and lactose intolerance. Using fruit-based probiotics instead of milk-based probiotics is a good alternative. Fruits, containing a variety of nutrients that promote the growth of probiotics, are an excellent carrier for delivering probiotics to the body. For fruit-based probiotics to maintain their viability and provide effective results, it is very important to choose probiotic strains that are known to be resistant. The aim of this review is to provide information about the health effects of probiotic microorganisms and their use in fruit-based products. This review includes the concept of probiotics, the use of fruits as probiotic sources, the fermentation mechanism of fruit-based probiotics and the physicochemical changes that occur after fermentation.

Keywords- Probiotics, Fruit based probiotics, Fermentation

[1]*Sorumlu yazar iletişim: gizemmtiryaki@gmail.com (https://orcid.org/0000-0001-5608-9815)
Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 35040, İzmir, Türkiye
[2]İletişim: emine.nakilcioglu@ege.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-4334-2900)
Gıda Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 35040, İzmir, Türkiye

I. GİRİŞ

Son yıllarda, tüketicilerin sağlık bilincinin gıda pazarını etkileyen kritik bir unsura dönüşmesi göze çarpmaktadır [1]. Günümüzde tüketicilerin, daha yüksek besin değerlerine sahip olan sağlıklı ürünleri tercih etme eğiliminde oldukları görülmektedir. Bu tercih, sağlık sorunlarını önleme, yaşam kalitesini arttırma ve insan ömrünü uzatma amacını taşımaktadır [2]. Bu yönelim, tüketicilerin sağlığını destekleyen ve kronik hastalıkların olasılığını azaltan gıda ürünlerinin küresel pazarlara etkili bir şekilde giriş yaparak hızla pazar payı elde etmesini sağlamıştır [3].

Tüketicilerin artan sağlık ihtiyaçlarıyla birlikte, probiyotiklerin gıdalar ve içecekler aracılığıyla tüketimi giderek daha popüler bir hale gelmiştir [4]. Probiyotiklerin gastrointestinal hastalıkları tedavi etme konusundaki yüksek terapötik potansiyeli gibi faydalarının halk arasında giderek daha çok bilinmesi nedeniyle, probiyotik özelliklere sahip mikroorganizmalara olan talep hızla artmaktadır [5]. Probiyotikler, onları tüketen organizmalar üzerinde olumlu etkilere sahip olan yararlı bakterilerdir. Probiyotik ürünlerin, olumlu etki sağlamak için depolama boyunca 10^6 ile 10^7 CFU/mL konsantrasyonlarındaki canlı mikroorganizmaları içermeleri gerekmektedir [2]. İnsan sindirim sisteminde karşılaşılan zorlu koşullara dayanabilmeleri gereken probiyotiklerin, doğal antibiyotik direnç genlerine sahip olmamaları gerekmektedir [4]. Antikanserojenik, antimutojenik ve immünomodülatör etki göstermeleri beklenen probiyotiklerin, gastrointestinal sistemde mukoza bütünlüğünü korumaları da gerekmektedir [6,7].

Günümüzde süt endüstrisi, geniş probiyotik çeşitliliği ve sayısını içeren en büyük gıda sektörüdür [8]. Probiyotikler bu sektörde yoğurt, ekşi/fermente süt, peynir, dondurma, tereyağı, krema, kefir ve kımız gibi gıda ürünlerinde sıkça kullanılmaktadır [2]. Süt ürünleri, insan beslenmesi açısından gerekli besin maddelerini içeren önemli ürünler arasında yer almaktadır [9]. Genel olarak, süt ürünlerinin sağlığa yararları, zararlarının verdiği etkiyi büyük ölçüde aşmış olsa da ileride fazla süt ürünü tüketiminin bir dizi kronik hastalık riskini arttıracağı düşünülmektedir [10]. Süt tüketimi üzerine yapılan bazı çalışmalar, genel olarak süt ürünlerinin makro besin öğeleri açısından zengin olduğunu gösterirken [11], bazı çalışmalar ise aşırı süt tüketiminin diyabet, kardiyovasküler hastalıklar ve kanser gibi çeşitli hastalıkların riskini arttıracağını öne sürmektedir [12].

Süt ürünlerinin kardiyovasküler hastalıklar üzerindeki olumsuz etkileri, toplam süt yağının %70'inin doymuş yağ içermesinden kaynaklanmaktadır [13]. Doymuş yağ, düşük yoğunluklu lipoproteinleri (LDL) ve toplam kolesterolü arttırmaktadır [14]. Bu durum, doymuş yağ tüketiminin kardiyovasküler hastalık riski artışı ile ilişkilendirilmektedir [15]. Yapılan bazı çalışmalarda az yağlı ve tam yağlı süt çeşitlerinin, kardiyovasküler hastalık riski üzerindeki etkileri incelenmiştir [16,17]. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek yağlı süt ürünlerinin tüketiminin düşük yağlı süt ürünlerine kıyasla daha yüksek olması, önemli ölçüde kardiyovasküler hastalık riski ile ilişkilendirilmiştir [16].

Kanser, çok faktörlü bir yapıya sahip olduğundan, tek bir gıda ve/veya besinin kanserin ortaya çıkışı ve gelişimi üzerindeki etkisini kanıtlayacak yeterli kanıt bulunmamaktadır. Yapılan birkaç çalışmada, orta düzeyde süt tüketiminin bazı kanser türlerini etkilemediği ya da olumlu etki gösterdiği belirtilmektedir [18]. Ancak, bazı veriler yüksek süt tüketimiyle kanser riskinin arttığını göstermektedir [19]. Bazı süt bileşenleri, kanser ve kardiovasküler hastalıkların oluşumunu önlerken, bazı bileşenleri ise bu hastalıkların riskini arttırabilmektedir. Süt tüketiminin kanser hastalığı riski üzerindeki olumsuz etkisi, yağ içeriğine ve insülin benzeri büyüme hormonuna (IGF-1) atfedilmektedir [13]. Yapılan bir çalışmada süt tüketiminin IGF-1 üzerindeki etkileri incelenmiştir [20]. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda süt tüketimiyle birlikte IGF-1 değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. IGF-1 değerinin artması, meme ve prostat kanseri riskini arttırmaktadır [21]. Aşırı süt tüketimi, laktoz alımıyla rahim kanseri, kalsiyum alımı nedeniyle de prostat kanseri risklerini arttırmaktadır. Ayrıca tam yağlı süt tüketimi, yağın androjenler ve östrojenler üzerindeki etkisi nedeniyle meme kanseri riskini de arttırabilmektedir. Bununla birlikte, belirtilen durum tüm kanser türleri için geçerli değildir. Yeterli düzeyde süt tüketimi bazı kanser türlerinde koruyu etki gösterebilmektedir. Ayrıca aşırı süt tüketimi, düşük yoğunluklu lipoprotein (LPLP) miktarını arttırmaktadır. Kanda bulunan LDLP miktarının artması, kardiyovasküler hastalık, obezite ve tip II diyabet gibi kronik hastalıkların giderek artmasına neden olmaktadır [8].

Aşırı süt tüketiminin yanı sıra, orta düzeyde süt tüketimiyle de tüketicilerin karşılaştığı bazı problemler bulunmaktadır. Bu problemler arasında tüketicilerin laktoz intoleransına sahip olmaları ve süt proteinlerine alerjik reaksiyon göstermeleri yer almaktadır [13]. Laktoz intoleransı, laktaz enzim aktivitesinin işlevini yerine getirememesinden kaynaklanan, laktozun sindirilememesi durumdur [22]. Laktoz intoleransı olan bireylerde, sütte bulunan laktozun sindirilememesi nedeniyle mide ve bağırsak semptomları görülmektedir. Bu semptomların şiddeti bağırsak florası, bağırsak mukozasında bulunan laktaz konsantrasyonu ve tüketilen laktoz miktarı gibi birkaç faktöre bağlıdır [23]. Bağışıklık sisteminin süt proteinlerine karşı aşırı tepki vermesi sonucunda alerjik reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Süt proteinlerine alerjik reaksiyon gösteren bireylerde solunum zorluğu, kusma ve ishal gibi gastrointestinal rahatsızlıklar ile ürtiker gibi cilt problemleri görülebilmektedir [24].

Sonuç olarak, süt ürünlerinin tüketimi laktoz intoleransı ve süt proteinlerine alerjisi olan bireyler için sınırlıdır [25]. Bu bireylerin, besin ihtiyaçlarını karşılamak için laktozsuz süt ürünleri ve uygun besin takviyeleri kullanmaları gerekmektedir. Belirtilen durumlar göz önüne alındığında, süt ve süt ürünleri dışında probiyotiklere yönelik araştırmanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu derlemede probiyotik mikroorganizmaların sağlık etkileri ve meyve bazlı ürünlerde kullanımı hakkında bilgiler verilmektedir.

II. PROBİYOTİKLER VE SAĞLIĞA YARARLARI

Probiyotikler, Dünya Sağlık Örgütü'ne göre yeterli miktarlarda alındığında kişiye fayda sağlayan canlı mikroorganizmalardır [26]. Probiyotiklerin, bağırsak mikrobiyotası dengesini korumak ve bağışıklık sistemini düzenlemek gibi başlıca fonksiyonları bulunmaktadır [27]. İnsan sağlığının sürdürülmesinde kritik bir rol oynayan bağırsak mikrobiyotası, düzenli probiyotik tüketimi ile dengelenebilmektedir [28]. Probiyotiklerin insan sağlığına yararlı olabilmeleri için minimum 10^6 CFU/mL konsantrasyonundaki canlı hücre sayısına sahip olmaları gerekmektedir [2].

Çoğu probiyotik takviyesi, laktik asit bakterisi ve diğer bazı maya cinslerini içeren mikroorganizmalar kullanılarak üretilmektedir. Probiyotik ürünlerde kullanılan bazı bakteriler arasında *Laktobasil* ve *Bifidobakteri* cinslerine ait olan gram-pozitif bakteriler ile *Streptokok, Bacillus, Escherichia* ve *Propiyonibakterium* gibi türler bulunmaktadır [2].

Gıdalar ve takviyeler aracılığıyla tüketilen probiyotikler, ağız yoluyla alındıktan sonra mideye gelerek asidik içeriğe maruz kalmaktadır [2]. Probiyotikler, mide asiditesine ve safra tuzlarına maruz kaldıklarında hayatta kalmaları için çeşitli mekanizmalara sahiptirler. Mide asiditesine dayanıklılık, probiyotiklerin midenin düşük pH seviyelerine dayanabilme yeteneklerini içermektedir. Safra tuzları ise, ince bağırsakta probiyotiklerin hücre zarını ve DNA'sını etkileyerek hayatta kalma oranlarını düşürebilmektedir. Bu gibi zorlu ortamlarda probiyotiklerin hayatta kalabilme yetenekleri, onların etkinliği açısından kritik öneme sahiptir [29].

Probiyotiklerin sağlığa yararları arasında gastrointestinal stabiliteyi arttırma, laktoz intoleransını azaltma, obeziteyi önleme, bağışıklığı güçlendirme, ishali hafifletme ve kolesterolü düşürme gibi avantajları bulunmaktadır [30]. Ayrıca alerjik reaksiyonlara olumlu etkileri gözlemlenen probiyotiklerin, depresyon gibi belirli hastalıkların riskini azaltma gibi etkileri de vardır [2]. Probiyotiklerin antioksidatif, anti inflamatuar, antihipertansif, antijen toksik, antikanserojen, profilaktik, anti osteoporotik ve antidiyabetik gibi özelliklere sahip oldukları bilinmektedir [8]. Probiyotikler, zararlı mikroorganizmalara karşı savaşarak insan sindirim sistemini kolonize edebilmektedir. İnsan vücudunu değerli yan ürünler ile besleyen probiyotikler, besinleri fermantasyon yoluyla daha küçük kompleks maddelere ayırarak sağlığa yararlı etkiler göstermektedir [28]. Probiyotikler, bağırsakta zararlı bakterilerin büyüme ve aktivitesini engelleyerek, besinler için rekabet etmekte ve patojen mikroorganizmaların yerleşmesini önleyerek enfeksiyon riskini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

A. Probiyotik Seçimi

Probiyotik suşların seçimi, genellikle *in vitro* olarak araştırılarak bazı özellikleri içermesi gerektiği belirtilmektedir [31]. İnsan kaynaklı olmaları gereken probiyotik suşların, gastrointestinal epitelyumuna yapışabilme yeteneğine sahip olmaları ve bu sistemde kolonize olarak varlıklarını sürdürebiliyor olmaları gerekmektedir. Bu suşların gastrointestinal sistem sağlığını iyileştirmeleri ve mukoza bütünlüğünü korumaları gerekmektedir. Ayrıca patojenik ve toksik olmaması gereken probiyotik suşların toksin bağlayıcı maddeler üretmeleri beklenmektedir [7]. Tükürük enzimi, mide asidi, safra tuzu gibi faktörlere karşı dirençli olmaları istenen probiyotik suşların konak tarafından kullanılmayan galaktan, fruktan ve früktooligosakkarit (FOS) gibi bileşenleri hidrolize etmeleri istenmektedir [32].

Gıda ürünlerinde kullanılacak olan probiyotiklerin seçimi, tüketici sağlığını temel almalıdır. Probiyotik takviyesi yapılacak olan gıdanın bileşiminin ve üretim sürecinin gözden geçirilmesi gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan probiyotik besinler arasında fermente sütler, kuru tahıllar ve meyve suları bulunmaktadır [33].

Laktobasil ve Bifidobakteri cinslerinin çeşitli türleri ve suşları probiyotik yararlarıyla bilinmektedir. Bu bakterilerin, *Streptokok, Saccharomyces boulardii, Bacillus, Enterococcus, Propionibacterium, Escherichia coli* (patojenik olmayan suşlar) *ve Pediococcus* olmak üzere, diğer türlerden daha baskın probiyotik yararları bulunmaktadır [34].

III. MEYVELERİN PROBİYOTİK MİKROORGANİZMA TAŞIYICISI OLARAK KULLANILMASI

Meyveler vitamin, mineral, karbonhidrat, amino asit, polifenol, lif ve biyoaktif bileşenler bakımından oldukça zengin bir kaynaktır. Meyve tüketimi, içerdiği yüksek biyoaktif bileşenler sayesinde birçok kronik hastalığın önlenmesinde rol oynamaktadır [35]. Meyve ve ürünlerinin günlük diyete eklenmesi kolesterolü düşürmekte, kan şekerini düzenlemekte, immünolojik ve sindirim sitemini düzenleyerek insan sağlığına doğrudan fayda sağlamaktadır [32]. Meyvelerin sağladığı koruyucu etkiler askorbik asit, β-karoten ve α-tokoferol gibi

antioksidanların varlığından kaynaklanmaktadır [36]. Selüloz, hemiselüloz ve pektin gibi bileşenler meyve liflerinin başlıca bileşenleri arasında bulunmaktadır. Bu bileşenler, meyvelere prebiyotik özellik kazandırarak bağışıklık sisteminin düzenlenmesini sağlamaktadır [37]. Meyve liflerinin tüketimi ile diyabet ve obezite riski azaltılmakta, bazı kanser türlerinin gelişimi önlenebilmekte ve sağlıklı bağırsak fonksiyonları elde edilebilmektedir [38]. Pek çok meyve türü, önemli antioksidan potansiyele sahip olan B, C ve E vitaminleri ile karotenoidler bakımından zengindir [39].

Son yıllarda tüketiciler beslenme ve sağlık konusunda farkındalık kazanarak fonksiyonel gıda tüketimini tercih etmeye başlamışlardır [40]. Laktoz intoleransı olan bireyler probiyotikleri, laktozsuz süt ürünleri, fermente süt ürünleri ve bitki bazlı süt alternatifleri dışında yer alan süt ürünleri ile vücutlarına alamamaktadırlar [41, 42]. Ayrıca süt proteinlerine alerjisi olan bireyler ve hayvansal bazlı gıdaları tüketmeyen veganlar için de meyve bazlı probiyotiklerin yaygınlaşması iyi bir gıda alternatifi olacaktır. Gıda endüstrisinde probiyotik gıdalara alternatif olarak meyve suları, kurutulmuş meyveler, fermente sebzeler ve besin takviyeleri gibi çeşitli formülasyonlarda bulunabilmektedir [43]. Meyveler, vitamin, mineral, şeker ve diğer birçok fitonütrientler açısından oldukça zengin olduğundan mikrobiyal büyüme için ideal bir ortam sunmaktadır [25]. Ayrıca meyveler, fenol ve fitatlar gibi anti-besinsel faktörler, fruktoolisakkaritler ve lif bakımından zengin olduğundan iyi birer prebiyotik kaynağı olarak kullanılabilmektedir [44]. Probiyotik mikroorganizmalar ile zenginleştirilmiş meyveler kimyasal koruyuculardan arınmış olarak tüketicilere taze olarak sunulabilmektedir [45]. Probiyotik ile zenginleştirilmiş fermente meyve suları, gıda takviyeleri olarak işlev görerek sağlığa katkıda bulunmaktadır. Meyveler, faydalı probiyotik bakterilerin etkili olabileceği potansiyel substratlar olarak kullanılabilmektedir [39]. Ayrıca meyve bazlı probiyotik tüketimi ile antioksidan bileşikler gibi fonksiyonel bileşiklere erişim sağlanmaktadır.

Fonksiyonel gıdalar, bazı gıdaların daha fazla besleyici hale getirilmesi için takviye ve/veya iyileştirmeler yapılmış gıdalar anlamına gelmektedir. Fonksiyonel gıdaların tanımına göre probiyotik meyve suları, “geleneksel beslenme şeklini, sağlığa teşvik edici bir bileşen ile iyileştiren ürünler" olarak belirtilmektedir [39]. Meyve sularının doğal yapısında sağlıklı besinler yer aldığından ve laktoz ile kazein gibi alerjenleri içermediğinden probiyotik kültürlerin eklenmesi için uygun birer matris haline gelmektedir. Meyve suları, tüm yaş gruplarına hitap eden lezzet profillerine sahiptir. Bu özellikler, meyve sularının probiyotik kültür taşıyıcı olarak kullanılması için önemli ölçütlerdir [46].

Meyve suları, probiyotik canlılığının sürdürülebilmesi için uygun bir ortam sunması ve yüksek antioksidan içeriğiyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, meyve sularının asiditesi ve bazı aroma ile koruyucu maddelerin varlığı (azot gazı ve benzeri) probiyotiklerin canlılığını azaltabilmektedir. Ancak olumsuz koşullar uygun suş seçimi ve işleme teknikleri ile aşılabilmektedir [47]. Dolayısıyla, meyvelerin probiyotik kaynağı olarak kullanılması bazı zorluklar barındırsa da sağlık yararları ve süt ürünlerine alternatif olarak sunduğu avantajlar daha ağır basmaktadır [48].

Günümüzde probiyotik mikroorganizmalar ile zenginleştirilmiş meyveler ve meyve bazlı probiyotik içecekler gıda pazarında yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu ürünler arasında yaban mersini, çilek, ejder meyvesi, dut, muz gibi gıdalar bulunmaktadır [49]. Meyve probiyotiklerine örnekler Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Farklı meyve probiyotik türleri ve kullanılan mikroorganizmalar

Substrat	Mikroorganizma	Referans
Jak meyve suyu	*Lacticaseibacillus casei ATCC334*	[50]
Greyfurt suyu	*Lactiplantibacillus plantarum 01, Limosilactobacillus fermentum D13, Lactobacillus rhamnosus B01725, Bifidobacterium bifidum B7.5*	[51]
Yaban mersini suyu	Laktik asit bakterileri	[52]
Kızılcık suyu	*Lactiplantibacillus plantarum*	[53]
Ananas suyu	*Lacticaseibacillus casei, Lactobacillus rhamnosus*	[54]

Tablo 2. (Devamı)

Substrat	Mikroorganizma	Referans
Elma ve limon kabuğu	*Lacticaseibacillus casei, Lactobacillus rhamnosus, Lactiplantibacillus plantarum*	[55]
Kivi meyvesi	Laktik asit bakterileri	[56]

IV. PROBİYOTİK İÇEREN MEYVELERİN/MEYVE SULARININ FERMANTASYONU

Probiyotik içeren içeceklerde probiyotiğin eklenmesi, doğrudan suya eklenerek ya da suyun probiyotik bakterilerle fermantasyonu şeklinde yapılmaktadır. Probiyotik bakteriler ile fermente edilen yöntem, daha iyi uyum sağlayan mikrobiyal suşlar ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca daha düşük şeker içeriğine sahip ürünler elde edilebilmektedir. Bu nedenle bu yöntem, bakterilerin hayatta kalma oranlarını arttırarak daha çok tercih edilmektedir [2]. İnsan sindirim sisteminde prebiyotikler ince bağırsak sindirimine uğramadan kolona bütün olarak ulaşmakta ve burada Lactobacilli ve Bifidobacteria gibi sağlıklı bakteriler tarafından fermente edilmektedir [57]. Fermantasyon işlemi, şekerlerin organik asitlere dönüştürülmesiyle gerçekleşmektedir. Süt bazlı probiyotiklerin fermantasyonu sırasında laktik asit üretilmektedir. Glikoliz yol olarak bilinen bu süreçte laktoz, glukoz ve galaktoza indirgenmektedir. Daha sonra galaktoz, bir fosfat alımı ile meyve şekeri olan glukoza dönüşmektedir. Glikoliz süresinde oluşan bu dönüşümler sonucunda pirüvat oluşmaktadır. Pirüvat, döngüde oluşan indirgeme enerjisini kullanarak NADH formunda laktik aside indirgenmektedir [58].

Laktik asit fermantasyonu, meyve ve sebze gibi bozulabilir gıdaların raf ömrünü uzatmak ve hammaddelerin besinsel ve duyusal özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir tekniktir [35]. Bu bağlamda, laktik asit bakterileri tarafından fermente edilen meyve içecekleri, söz konusu ihtiyaçları karşılamak ve meyve tüketimini teşvik etmek için umut vadeden bir alternatif haline gelmiştir.

Meyve fermantasyonu, hammaddede bulunan *Enterococcus* spp., *Fructobacillus* spp. ve *Lactobacillus* spp. gibi laktik asit mikrobiyotası tarafından uygun koşullar altında gerçekleştirilmektedir. Meyve fermantasyonlarında laktik asit bakterileri içeren starter kültürlerinin kullanılması, güvenli ve kaliteli son ürünler elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, bu starter kültürlerin fermente meyve ve sebzelerin hazırlanmasında kullanımı halen sınırlıdır [59]. Bitki temelli gıdalarda starter kullanımının bazı gereksinimlere uygun olması gerekmektedir. Ana gereksinim, çevre koşullarına uyum sağlayarak az besinsel ihtiyaç ile hızlı büyüme yeteneğinin bulunmasıdır [60]. Karbonhidrat, diyet lifi, vitamin ve mineral içeriği bakımından zengin bir kaynak olan meyveler, laktik asit fermantasyonu için iyi matrislerdir. Laktik asit bakterilerinin farklı meyve ekosistemlerine uyum sağlaması, bu bakterilerin türlerine bağlı olarak değişmektedir. Laktik asit bakterileri seçiminin, duyusal ve besinsel kriterlere dayanması, meyve fermantasyonunun başarılı ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır [59].

Meyve fermantasyonunda kullanılan laktik asit bakterileri içeren starter kültürleri için istenen kriterler arasında düşük pH derecelerinde varlığını sürdürebilmeleri ve fenolik bileşiklere karşı tolere edebilme yeteneklerinin bulunması yer almaktadır. Ayrıca gıda kaynaklı patojenlerin eliminasyonuyla güvenliği sağlamak ve raf ömrünü uzatmak amacıyla laktik asit bakterilerinin antimikrobiyal bileşikleri sentezleme yeteneğine sahip olmaları beklenmektedir [61]. Duyusal kriterler arasında seçilen laktik asit bakterilerinin aroma bileşenlerini sentezlemeleri beklenmektedir. Bu sayede tüketici açısından tatmin edici lezzet ve kokulara sahip fermente ürünler elde edilmektedir. Aynı zamanda aldehit gibi istenmeyen tat oluşumuna neden olan bileşen miktarları azalmaktadır [62].

A. Fermantasyon Sonrasında Oluşan Değişiklikler

Fermantasyon sırasında bileşenlerde bazı değişiklikler gözlemlenmektedir. Bu değişiklikler arasında asit konsantrasyonunda ve mikrobiyal hücre sayısında artış, çözünür şeker miktarında azalma bulunmaktadır. Meyve bazlı probiyotik ürünlerde fermantasyon sırasında pH'ta, hücre sayısında, toplam polifenol içeriğinde değişiklikler gözlemlenmektedir [2].

Bakteri popülasyonun zaman içinde artmasıyla daha fazla asit oluşumu nedeniyle pH içeriğinde düşüşler meydana gelmektedir. Probiyotik ürünlerin fermantasyonu sırasında pH derecesinde düşüş yaşanması, fermantasyon süresinin belirlenmesinde önemlidir [51]. Kaprasob vd. [63], *Lactiplantibacillus plantarum* ile fermente edilmiş kaju elma suyu ve 11,4 ◦Brix konsantrasyonunda kaju elma suyu kullanarak 72 saat boyunca pH değerlerindeki değişiklikleri gözlemlemişlerdir. 12 saatlik fermantasyon sürecinin ardından *Lactiplantibacillus plantarum* ile fermente edilmiş kaju elma suyunun pH değerinin, 4'ten 3,50'ye düştüğü ve geri kalan 60 saatlik

fermantasyon süresince sabit kaldığı gözlemlenmiştir. 11,4 ◦Brix konsantrasyonundaki kaju elma suyunun ise pH değeri ilk 24 saatlik fermantasyon sürecinde 4.50'den 4.73'e yükselmiş, 72 saatlik fermantasyonun sonunda yavaşça azalarak 4.45 değerine düşmüştür. Cai vd. [56] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise laktik asit bakterileri ile fermente edilmiş kivi meyvesi kullanılarak depolama süresince pH değerlerindeki değişiklikler gözlemlenmiştir. Kivi özütlerinin 3.66 ± 0.01 olan pH değerleri, 5. günde 3.4-3.7 aralığında değişim göstermiştir. Hossain vd. [64] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise, *Limosilactobacillus fermentum* ve *Lactiplantibacillus plantarum* fermantasyonu yapılmış elma ve yıldız meyve suları kullanılmıştır. Örneklerin her yedi günde bir üç hafta boyunca depolama süresince pH değerlerindeki değişiklikler incelenmiştir. Sonuçlar, elma ve yıldız meyve sularının depolama süresi arttıkça pH derecelerinin azaldığını göstermiştir. Başlangıç pH değeri 4.74 olan elma suyu kontrol örneğinin *Lactiplantibacillus plantarum* ile inoküle edildiğinde 4.26; *Limosilactobacillus fermentum* ile inoküle edildiğinde ise 4.33 pH değerlerine düştüğü görülmektedir. 21 günlük depolama sonrasında ise bu değerler, *Lactiplantibacillus plantarum için* 4.30; *Limosilactobacillus fermentum* için 4.067 olarak elde edilmiştir. Yıldız meyve suyu kontrol örneğinin ise başlangıç pH değeri 3.345 iken bu değer 21. gün sonunda 3.32 pH değerine düşmüştür. *Lactiplantibacillus plantarum* ile fermente edilen yıldız meyve suları başlangıçta 3.12 pH değerine sahip iken 21. gün sonunda bu değer 2.95 pH derecesine düşmüştür. Aynı azalma *Limosilactobacillus fermentum* ile fermente edilen yıldız meyve sularında da gözlemlenmiştir. Başlangıç pH değeri 3.18 olan *Limosilactobacillus fermentum* ile fermente edilen yıldız meyve sularının 21. gün sonunda 2.93 pH değerine düştüğü görülmüştür.

Probiyotik ürünlerin pH değerleri ile yakından ilişkili olan asidite, laktik asit bakteri fermantasyonu yapılan örneklerde hızla artmaktadır [63]. Bakteriler basit şekerleri parçalayarak düşük miktarda organik asit üretmekte ve asiditeyi arttırmaktadır [54]. Yapılan bir çalışmada, yaban mersini suyunda laktik asit bakterilerinin fermantasyonu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 48 saatlik fermantasyonun ardından laktik asit içeriğinin 0 mg/L'den 2184,90 ± 335,80 mg/L'nin üzerine çıktığı ve malik asit içeriğinin 511,47 ± 10,50 mg/L'den 146,38 ± 3,79 mg/L'nin altına düştüğü gözlemlenmiştir [52]. Bir başka çalışmada ise laktik asit bakterileri ve maya ile fermente edilmiş kivi meyvesi kullanılarak asiditedeki değişiklikler gözlemlenmiştir. Laktik asit bakterileri ile fermente edilmiş örneklerde bu bakterilerin anaerobik koşullarda laktik asit üreterek çoğalması nedeniyle asitliğin arttığı görülmüştür. Maya ile fermente edilmiş örneklerde de kivi meyvesinin bir miktar asetobakter ve laktik asit bakteri içermesi nedeniyle asitlik artmıştır. Laktik asit bakterileri ile fermente edilmiş örneklerin pH değerleri 20. günde yaklaşık 3,5 iken, maya ile fermente edilmiş örneklerin pH değeri yaklaşık 3,8'dir. Asiditenin pH değerleri ile yakından ilişkili olmasından dolayı, laktik asit bakterileri ile fermente edilmiş örneklerde 20. gündeki asidite, maya ile fermente edilmiş örnek asiditesinden daha düşük bulunmuştur [56].

Toplam çözünmüş katı maddelerin zamanla azalmasının nedeni olarak fermantasyon sırasında bakterilerin bu maddeleri kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [65]. Bakteriler, depolama süresi boyunca çözünmüş katı maddeleri enerji kaynağı olarak kullanmaktadır. Cai vd. [56] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, laktik asit bakteri fermantasyonu yapılmış kivi meyvesindeki biyoaktif bileşiklerinin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, fermantasyonun ilk on gününde örneklerdeki çözünmüş katı madde içeriğinin hızla azaldığı yönündedir. Fermantasyonun son günlerinde ise çözünmüş katı madde içeriği yaklaşık 10-15 ◦Brix civarında sabit kalma eğilimi göstermiştir. Hossain vd. [64] tarafından elma ve yıldız meyve suları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, örneklerin her yedi günde bir üç hafta boyunca depolama süresince toplam çözünmüş katı maddelerdeki değişiklikler incelenmiştir. *Limosilactobacillus fermentum* ve *Lactiplantibacillus plantarum* ile fermente edilen elma ve yıldız meyve sularının depolama süreleri arttıkça toplam çözünmüş katı maddelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Başlangıçta 13 ± 0,5 °Brix olan elma suyu örneklerinin toplam çözünmüş katı içeriği, 21. gün sonunda *Limosilactobacillus fermentum* için 10,33 ± 0,28 °Brix; *Lactiplantibacillus plantarum* için 10,34 ± 0,28 °Brix olarak bulunmuştur. Aynı eğilim yıldız meyve suyunda gözlemlenerek başlangıçta 4.50 ± 0,50 °Brix olan yıldız meyve suyu örneklerinin toplam çözünmüş katı içeriği, 21. gün sonunda *Limosilactobacillus fermentum* için 3.50 ± 0.50 °Brix; *Lactiplantibacillus plantarum* için 3,66 ± 0,28 °Brix olarak bulunmuştur.

Fermantasyon sonrasında hücre sayısında artış gözlemlenmektedir. Fakat belli bir süreden sonra bu hücrelerin sayısında azalma gözlenmektedir [2]. Bunun nedeni olarak mevcut oksijen veya iz miktardaki azot moleküllerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. pH derecesinin düşmesiyle, hücre içinde pH'ı korumak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, ATP'nin azalmasına ve sonuçta hücre duvarının parçalanarak hücre ölümlerine neden olmaktadır. Kaprasob vd. [63], tarafından *Lactiplantibacillus plantarum* fermante edilmiş kaju elma suyu ve 11,4 ◦Brix konsantrasyonunda kaju elma suyu incelenmiştir. Fermantasyonun 72. saatinde, *Lactiplantibacillus plantarum* popülasyonu başlangıçta 9,18 Log10 CFU/mL'den kaju elma suyunda 5,12 Log10 CFU/mL'ye ve 11,4 ◦Brix konsantrasyonundaki kaju elma suyunda 4,95 Log10 CFU/mL'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Bir başka çalışmada ise *Lacticaseibacillus casei* ile fermante edilmiş jak meyvesi suyu incelenmiştir. Fermantasyonun 24. saatinde, canlı hücre sayısının 6 Log10 CFU/mL'den 8,176 Log10 CFU/mL'ye arttığı gözlemlenmiştir. Fakat 3 haftalık sürenin ardından bu sayının 7,672 Log10 CFU/mL'ye düştüğü görülmüştür. Fermantasyon koşulları, hammadde bileşimi ve depolama koşulları, hücre sayısı üzerinde önemli bir

etkiye sahiptir. Fermantasyonun ilk 24 saatinde hücre sayısının artması, probiyotiklerin meyve sularını fermente etme yetenekleri ile uygun büyüme koşullarında hücre sayılarını hızla arttırma yeteneklerinden kaynaklanmaktadır. Depolamanın ikinci ve üçüncü haftasında hücre sayısında gözlemlenen azalma ise fermente jak meyvesi suyunun nihai pH derecesinin 3,69 olmasından kaynaklanmaktadır [50].

Tran vd. [51] farklı Lactobacillus ve Bifidobacterium suşlarını yaklaşık 10^6 CFU/mL hücre konsantrasyonunda greyfurt suyuna enjekte etmişlerdir. Her bir laktik asit bakterisi, greyfurt suyunda besin takviyesi olmaksızın çoğalma göstermiştir. Fermantasyonun 24. saatinde *Lactobacillus rhamnosus* B01725 dışındaki tüm suşların 10^9 CFU/mL hücre sayısına ulaştığı görülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada ise laktik asit bakterileri ve bifidobakteriler ile probiyotik noni suyu üretilmiştir [66]. Örneklerde *Lacticaseibacillus casei, Lactiplantibacillus plantarum, Bifidobacterium longum* suşlarının 48 saatlik fermantasyonun ardından artarak 10^9 CFU/mL'ye ulaştığı görülmüştür. Li vd. [52] *Lactiplantibacillus plantarum* ve *Limosilactobacillus fermentum* türlerini meyve bazlı üründe kullanarak canlı hücre sayısını belirlemişlerdir. Yaban mersini kullanarak gerçekleştirilen bu çalışmada, fermantasyonun ilk 24 saatinde fermente edilmiş yaban mersini suyundaki canlı mikroorganizma sayılarının arttığı gözlemlenmiştir. İnokülasyondan sonra yaklaşık 7,5 log CFU/mL olan mikrobiyal hücre sayısı, fermantasyon sonunda 10 log CFU/mL'nin üzerine çıkmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda tüm suşlar arasında *Lactiplantibacillus plantarum* LSJ-TY-HYB-T9 10,40 log CFU/mL ile en yüksek canlı hücre sayısına sahip iken, *Limosilactobacillus fermentum* LSJ-TY-HYB-H33 10,19 log CFU/mL ile en düşük canlı hücre sayısına sahip olduğu tespit edilmiştir.

Bakteri kültürleri kullanılarak gerçekleşen fermantasyon sonrasında toplam fenolik ve toplam flavonoid içeriğinin arttığı gözlemlenmektedir. Yapılan bir çalışmada 5 farklı *Limosilactobacillus fermentum* ve 4 farklı *Lactiplantibacillus plantarum* türü tarafından fermente edilen yaban mersini suyu kullanılmıştır. Bakteri türlerinin, yaban mersini suyunun fenolik içeriğini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Başlangıçta 866,15 ± 19,23 mg/L olan toplam fenolik içeriğinin önemli ölçüde arttığı belirtilmektedir. *Limosilactobacillus fermentum* LSJ-TY-HYBH33 ile yapılan çalışmada toplam fenolik içeriğinin %57,9; *Lactiplantibacillus plantarum* LSJ-TY-HYB-T9 ile yapılan çalışmada ise toplam fenolik içeriğinin %41,8 oranında arttığı gözlemlenmiştir [52]. Kaprasob vd. [63], kaju elma suyunun toplam fenolik içeriğini belirlemek amacıyla çalışmışlardır. *Lactiplantibacillus plantarum* ile fermente edilmiş kaju elma suyunun başlangıç toplam fenolik içeriği (123,97 mg GAE/L), 11,4 ◦Brix konsantrasyonundaki kaju elma suyunun toplam fenolik içeriğinden (164,75 mg GAE/L) daha düşüktür. Fermente kaju elma suyunun 0-24 saat aralığındaki toplam fenolik içeriği yavaşça artış gösterirken (123,97 mg GAE/L'den 128,20 mg GAE/L'ye), 24-72 saatlik fermantasyon süresince yavaşça azalma göstermiştir. 0-24 saat aralığındaki fermente kaju elma suyunun toplam fenolik içeriğindeki artış, laktik asit bakterileri aracılığıyla artmış olan biyoaktif bileşikler ile ilişkilendirilmektedir. 11,4 ◦Brix konsantrasyonundaki kaju elma suyunun toplam fenolik içeriği, fermente kaju elma suyundan daha yüksek değerler göstererek, 0-72 saat boyunca 164,75 ile 169,21 mg GAE/L değerleri arasında kalmıştır. Bir başka çalışmada ise, kızılcık suyu serbest ve immobilize *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC14917 ile fermente edilerek dört hafta boyunca depolanmıştır. Fermente edilmeyen kızılcık suyunun toplam fenolik içeriği 169,32 mg GAE/100 mL'den 135,19 mg GAE/100 mL'ye değişim göstermiştir. Serbest ve immobilize *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC14917 ile fermente edilen örneklerde ise toplam fenolik içerik sırasıyla 165,02 mg GAE/100 mL'den 195,02 mg GAE/100 mL'ye ve 214,41 mg GAE/100 mL'den 249,61 mg GAE/100 mL'ye değişim göstermiştir. Dört haftalık sürecin sonucunda fermente kızılcık sularında fenolik içeriklerin arttığı tespit edilmiştir [53].

V. SONUÇ

Probiyotikler, bağırsak duvarlarına bağlanabilen ve onları tüketen organizmalar üzerinde olumlu etkilere sahip olan yararlı mikroorganizmalardır. Çoğu probiyotik takviyesi, laktik asit bakterileri kullanılarak oluşturulmaktadır. Probiyotik ürünlerin olumlu etki sağlamak için 10^6 ila 10^7 CFU/mL konsantrasyonlarındaki canlı mikroorganizmaları içermeleri gerekmektedir. Probiyotikler, onları tüketen mikroorganizmaların bağırsak florasını düzenleyerek çeşitli hastalıkları tedavi etmektedir. Süt bazlı ve süt bazlı olmayan olmak üzere iki adet probiyotik türü bulunmaktadır. Son yıllarda veganların artması, tüketicilerin süt proteinlerine alerjik reaksiyonlar göstermesi ve laktoz intoleransı nedeniyle süt bazlı probiyotiklerin tüketimi azalmıştır. Süt bazlı probiyotiklerin yerine meyve bazlı probiyotiklerin kullanılması iyi bir alternatiftir. Meyve bazlı probiyotikler, biyoaktif bileşen, antioksidan, diyet lifi, vitamin ve mineral bakımından iyi bir kaynaktır. Meyve bazlı probiyotiklerin fermantasyonu sırasında meyvede bulunan şekerlerden organik asit üretilmektedir. Bu durum, şekerin pirüvata dönüştürülmesi ve laktik aside indirgenmesi ile gerçekleşmektedir. Meyve bazlı probiyotiklerin fermantasyonu sonrasında bazı fizikokimyasal değişiklikler gözlemlenmektedir. Bu değişiklikler arasında asit konsantrasyonu ile mikrobiyal hücre sayısında artış ve çözünür şeker miktarında azalma bulunmaktadır. Aynı zamanda pH'ta, hücre sayısında, toplam polifenol içeriğinde azalma gözlemlenmektedir. Fermantasyon sonrasında duyusal özelliklerde minimum düzeyde değişiklikler görülmektedir. Alternatif bir kullanım yaklaşımı olarak, meyve bazlı probiyotiklerin kullanılması, çeşitli terapötik etkilere sahip faydalı içecekler geliştirmeye yardımcı olabilmektedir. Bu probiyotik içeceklerin, meyve atıklarını değerlendirerek, iyi bir katma değerli ürün eldesine imkân sağlayacağı

düşünülmektedir. Aynı zamanda meyvenin farklı şekillerde daha uzun süre kullanabilmesine yardımcı olabilmekte ve elde edilen yeni ürünler piyasaya ticari olarak katkı sağlayabilecektir. İleride meyve bazlı probiyotiklerin, süt bazlı probiyotikler kadar yaygın kullanılması için daha fazla araştırmanın yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Annunziata, A., & Pascale, P. (2009). *Consumers' behaviours and attitudes toward healthy food products: The case of Organic and Functional foods.* AgEcon Search, https://ageconsearch.umn.edu/record/57661?ln=en&v=pdf, (16.05.2025).

[2] Manoj, P. M., Mohan, J. R., Khasherao, B. Y., Shams, R., & Dash, K. K. (2023). Fruit based probiotic functional beverages: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, *14*.

[3] Childs, N. M. (1997). Functional foods and the food industry: Consumer, economic and product development issues. *Journal of Nutraceuticals, Functional and Medical Foods*, *1*(2), 25–43.

[4] Wolfe, W., Xiang, Z., Yu, X., Li, P., Chen, H., Yao, M., Fei, Y., Huang, Y., Yin, Y., & Xiao, H. (2023a). The Challenge of Applications of Probiotics in Gastrointestinal Diseases. *Advanced Gut & Microbiome Research*, *2023*, 1–10.

[5] Wolfe, W., Xiang, Z., Yu, X., Li, P., Chen, H., Yao, M., Fei, Y., Huang, Y., Yin, Y., & Xiao, H. (2023b). The Challenge of Applications of Probiotics in Gastrointestinal Diseases. *Advanced Gut & Microbiome Research*, *2023*, 1–10.

[6] Bhan, Maharaj Kishan, (2011). Guidelines For Evaluation Of Probiotics In Food, Department of Health Research, Ministry of Health & Family Welfare, New Delhi.

[7] Markowiak, P., & Ślizewska, K. (2017). Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. In *Nutrients 9*(9). MDPI AG.

[8] Syiemlieh, I., & Morya, S. (2022). Dairy and non-dairy based probiotics: a review. *Pharma Innov J*, *11*, 2956-64.

[9] Davoodi, H., Esmaeili, S., & Mortazavian, A. M. (2013). Effects of milk and milk products consumption on cancer: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *12*(3), 249–264.

[10] Thorning, T. K., Raben, A., Tholstrup, T., Soedamah-Muthu, S. S., Givens, I., & Astrup, A. (2016). Milk and dairy products: good or bad for human health? An assessment of the totality of scientific evidence. *Food & nutrition research*, *60*(1), 32527.

[11] Rice, B. H., Quann, E. E., & Miller, G. D. (2013). Meeting and exceeding dairy recommendations: Effects of dairy consumption on nutrient intakes and risk of chronic disease. *Nutrition Reviews*, *71*(4), 209–223.

[12] Melnik, B. C. (2009). Milk - The promoter of chronic Western diseases. *Medical Hypotheses*, *72*(6), 631–639.

[13] Pereira, P. C. (2014). Milk nutritional composition and its role in human health. *Nutrition*, *30*(6), 619-627.

[14] Siri-Tarino, P. W., Sun, Q., Hu, F. B., & Krauss, R. M. (2010). Saturated fat, carbohydrate, and cardiovascular disease. In *American Journal of Clinical Nutrition* (Vol. 91, Issue 3, pp. 502–509).

[15] Mozaffarian, D., Micha, R., & Wallace, S. (2010). Effects on coronary heart disease of increasing polyunsaturated fat in place of saturated fat: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *PLoS Medicine*, *7*(3).

[16] Hu, F. B., Stampfer, M. J., Manson, J. E., Ascherio, A., Colditz, G. A., Speizer, F. E., Hennekens, C. H., & Willett, W. C. (1999). Dietary saturated fats and their food sources in relation to the risk of coronary heart disease in women. *The American journal of clinical nutrition*, *70*(6), 1001-1008.

[17] Larsson, S. C., Männistö, S., Virtanen, M. J., Kontto, J., Albanes, D., & Virtamo, J. (2009). Dairy foods and risk of stroke. *Epidemiology*, *20*(3), 355-360.

[18] Huncharek, M., Muscat, J., & Kupelnick, B. (2008). Dairy products, dietary calcium and vitamin D intake as risk factors for prostate cancer: a meta-analysis of 26,769 cases from 45 observational studies. *Nutrition and cancer*, *60*(4), 421-441.

[19] Elwood, P. C., Givens, D. I., Beswick, A. D., Fehily, A. M., Pickering, J. E., & Gallacher, J. (2008). The survival advantage of milk and dairy consumption: an overview of evidence from cohort studies of vascular diseases, diabetes and cancer. *Journal of the American College of Nutrition*, *27*(6), 723S-734S.

[20] Qin, L. Q., He, K., & Xu, J. Y. (2009). Milk consumption and circulating insulin-like growth factor-I level: a systematic literature review. *International journal of food sciences and nutrition*, *60*(sup7), 330-340.

[21] Qin LiQiang, Q. L., Xu JiaYing, X. J., Wang PeiYu, W. P., Tong Jian, T. J., & Hoshi, K. (2007). Milk consumption is a risk factor for prostate cancer in Western countries: evidence from cohort studies. *Asia Pacific journal of clinical nutrition*, *16*(3).

[22] Fassio, F., Facioni, M. S., & Guagnini, F. (2018). Lactose malabsorption and intolerance: What should be the best clinical management? World Journal of Gastrointestinal Pharmacology and Therapeutics, 9(2), 48.

[23] Misselwitz, B., Pohl, D., Frühauf, H., Fried, M., Vavricka, S. R., & Fox, M. (2013). Lactose malabsorption and intolerance: Pathogenesis, diagnosis, and treatment. United European Gastroenterology Journal, 1(3), 151-159.

[24] Fiocchi, A., Schünemann, H. J., Brozek, J., Restani, P., Beyer, K., Troncone, R., ... & Lockey, R. F. (2010). Diagnosis and rationale for action against cow's milk allergy (DRACMA): a summary report. *Journal of Allergy and clinical immunology*, *126*(6), 1119-1128.
[25] Panghal, A., Janghu, S., Virkar, K., Gat, Y., Kumar, V., & Chhikara, N. (2018). Potential non-dairy probiotic products–A healthy approach. *Food bioscience*, *21*, 80-89.
[26] Mazziotta, C., Tognon, M., Martini, F., Torreggiani, E., & Rotondo, J. C. (2023). Probiotics mechanism of action on immune cells and beneficial effects on human health. *Cells*, *12*(1), 184.
[27] Chung, H., Pamp, S. J., Hill, J. A., Surana, N. K., Edelman, S. M., Troy, E. B., Reading, N. C., Villablanca, E. J., Wang, S., Mora, J. R., Umesaki, Y., Mathis, D., Benoist, C., Relman, D. A., & Kasper, D. L. (2012). Gut immune maturation depends on colonization with a host-specific microbiota. *Cell*, *149*(7), 1578–1593.
[28] Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegay, Z., Tefera, G., & Aynalem, E. (2018). Health benefits of probiotics. *J Bacteriol Infec Dis*, *2*(1).
[29] Morelli, L., & Capurso, L. (2012). FAO/WHO guidelines on probiotics: 10 years later. *Journal of clinical gastroenterology*, *46*, S1-S2.
[30] Gheorghita, R., Anchidin-Norocel, L., Filip, R., Dimian, M., & Covasa, M. (2021). Applications of biopolymers for drugs and probiotics delivery. *Polymers*, *13*(16), 2729.
[31] James, A., & Wang, Y. (2019). Characterization, health benefits and applications of fruits and vegetable probiotics. *CyTA-Journal of Food*, *17*(1), 770-780.
[32] Mohanty, D., Misra, S., Mohapatra, S., & Sahu, P. S. (2018). Prebiotics and synbiotics: Recent concepts in nutrition. *Food bioscience*, *26*, 152-160.
[33] Latif, A., Shehzad, A., Niazi, S., Zahid, A., Ashraf, W., Iqbal, M. W., ... & Korma, S. A. (2023). Probiotics: Mechanism of action, health benefits and their application in food industries. *Frontiers in microbiology*, *14*, 1216674
[34] Mani-López, E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2023). Advances in probiotic incorporation into cereal-based baked foods: Strategies, viability, and effects–A review. *Applied Food Research*, *3*(2), 100330.
[35] Mazzoni, L., Ariza Fernández, M. T., & Capocasa, F. (2021). Potential health benefits of fruits and vegetables. *Applied Sciences*, *11*(19), 8951.
[36] Garcia-Salas, P., Morales-Soto, A., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2010). Phenolic-compound-extraction systems for fruit and vegetable samples. *Molecules*, *15*(12), 8813-8826.
[37] Dreher, M. L. (2018). Whole fruits and fruit fiber emerging health effects. *Nutrients*, *10*(12), 1833.
[38] Zahid, H. F., Ranadheera, C. S., Fang, Z., & Ajlouni, S. (2021). Utilization of mango, apple and banana fruit peels as prebiotics and functional ingredients. *Agriculture (Switzerland)*, *11*(7).
[39] Naseem, Z., Mir, S. A., Wani, S. M., Rouf, M. A., Bashir, I., & Zehra, A. (2023). Probiotic-fortified fruit juices: Health benefits, challenges, and future perspective. *Nutrition*, *115*, 112154
[40] Salvetti, E., & O'Toole, P. W. (2017). When regulation challenges innovation: The case of the genus Lactobacillus. *Trends in Food Science & Technology*, *66*, 187-194.
[41] Facioni, M. S., Raspini, B., Pivari, F., Dogliotti, E., & Cena, H. (2020). Nutritional management of lactose intolerance: the importance of diet and food labelling. *Journal of translational medicine*, *18*, 1-9.
[42] Giugliano, R., Musolino, N., Ciccotelli, V., Ferraris, C., Savio, V., Vivaldi, B., Ercolini, C., Bianchi, D. M., & Decastelli, L. (2023). Soy, rice and oat drinks: Investigating chemical and biological safety in plant-based milk alternatives. *Nutrients*, *15*(10), 2258.
[43] Champagne, C. P., da Cruz, A. G., & Daga, M. (2018). Strategies to improve the functionality of probiotics in supplements and foods. *Current Opinion in Food Science*, *22*, 160-166.
[44] Septembre-Malaterre, A., Remize, F., & Poucheret, P. (2018). Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation. *Food research international*, *104*, 86-99.
[45] Barbosa, A. A. T., Mantovani, H. C., & Jain, S. (2017). Bacteriocins from lactic acid bacteria and their potential in the preservation of fruit products. *Critical reviews in biotechnology*, *37*(7), 852-864.
[46] Pimentel, T. C., Klososki, S. J., Rosset, M., Barão, C. E., & Marcolino, V. A. (2019). Fruit juices as probiotic foods. In *Sports and energy drinks*, 483-513, Woodhead Publishing.
[47] Vinderola, C. G., Costa, G. A., Regenhardt, S., & Reinheimer, J. A. (2002). Influence of compounds associated with fermented dairy products on the growth of lactic acid starter and probiotic bacteria. *International Dairy Journal*, *12*(7), 579-589.
[48] Di Gioia, D., & Biavati, B. (2018). Probiotics and prebiotics in animal health and food safety: conclusive remarks and future perspectives. *Probiotics and prebiotics in animal health and food safety*, 269-273.
[49] Delgado, G. T. C., & Tamashiro, W. M. D. S. C. (2018). Role of prebiotics in regulation of microbiota and prevention of obesity. *Food Research International*, *113*, 183-188.
[50] Joint, F. A. O. (2006). Probiotics in food. Health and nutritional properties and guidelines for evaluation.

[51] Tran, A. M., Nguyen, T. B., Nguyen, V. D., Bujna, E., Dam, M. S., & Nguyen, Q. D. (2020). Changes in bitterness, antioxidant activity and total phenolic content of grapefruit juice fermented by Lactobacillus and Bifidobacterium strains. *Acta Alimentaria*, *49*(1), 103–110.

[52] Li, S., Tao, Y., Li, D., Wen, G., Zhou, J., Manickam, S., Han, Y., & Chai, W. S. (2021). Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles. *Chemosphere*, *276*.

[53] Wang, C. Y., Ng, C. C., Su, H., Tzeng, W. S., & Shyu, Y. T. (2009). Probiotic potential of noni juice fermented with lactic acid bacteria and bifidobacteria. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *60*(sup6), 98-106.

[54] Ghafari, S., & Ansari, S. (2018). Microbial viability, physico-chemical properties and sensory evaluation of pineapple juice enriched with Lacticaseibacillus casei, Lactobacillus rhamnosus and inulin during refrigerated storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *12*(4), 2927–2935.

[55] Gupta, E., mishra, N., Mishra, P., Shiekh, A., Gupta, K., & singh, P. (2020). FRUIT PEELS: A STRONG NATURAL SOURCE OF ANTIOXIDANT AND PREBIOTICS. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, *12*(5), 134–143.

[56] Cai, L., Wang, W., Tong, J., Fang, L., He, X., Xue, Q., & Li, Y. (2022). Changes of bioactive substances in lactic acid bacteria and yeasts fermented kiwifruit extract during the fermentation. *LWT*, *164*.

[57] Guarino, M. P. L., Altomare, A., Emerenziani, S., Di Rosa, C., Ribolsi, M., Balestrieri, P., Iovino, P., Rocchi, G., & Cicala, M. (2020). Mechanisms of action of prebiotics and their effects on gastro-intestinal disorders in adults. *Nutrients*, *12*(4), 1037.

[58] Bintsis, T. (2018). Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics. *AIMS Microbiology*, *4*(4), 665–684.

[59] Ruiz Rodríguez, L. G., Zamora Gasga, V. M., Pescuma, M., Van Nieuwenhove, C., Mozzi, F., & Sánchez Burgos, J. A. (2021). Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds. Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages. *Food Research International*, *140*.

[60] Szutowska, J. (2020). Functional properties of lactic acid bacteria in fermented fruit and vegetable juices: A systematic literature review. *European Food Research and Technology*, *246*(3), 357-372.

[61] Fessard, A., & Remize, F. (2017). Why are Weissella spp. not used as commercial starter cultures for food fermentation?. *Fermentation*, *3*(3), 38.

[62] Ayed, L., M'hir, S., & Hamdi, M. (2020). Microbiological, biochemical, and functional aspects of fermented vegetable and fruit beverages. *Journal of Chemistry*, *2020*(1), 5790432.

[63] Kaprasob, R., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N., Thumthanaruk, B., & Shetty, K. (2018). Changes in physico-chemical, astringency, volatile compounds and antioxidant activity of fresh and concentrated cashew apple juice fermented with *Lactiplantibacillus plantarum*. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(10), 3979–3990.

[64] Hossain, M. A., Das, R., Yasin, M., Kabir, H., & Ahmed, T. (2022). Potentials of two *Lactobacilli* in probiotic fruit juice development and evaluation of their biochemical and organoleptic stability during refrigerated storage. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, *23*(2), 131-140.

[65] Jin, X., Chen, W., Chen, H., Chen, W., & Zhong, Q. (2018). Comparative Evaluation of the Antioxidant Capacities and Organic Acid and Volatile Contents of Mango Slurries Fermented with Six Different Probiotic Microorganisms. *Journal of Food Science*, *83*(12), 3059–3068.

[66] Muhialdin, B. J., Hussin, A. S. M., Kadum, H., Hamid, A. A., & Jaafar, A. H. (2021). Metabolomic changes and biological activities during the lacto-fermentation of jackfruit juice using *Lactobacillus casei* ATCC334. *Lwt*, *141*, 110940.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 354-366, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1476075
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi- Review Article

Research in Applications of Eggshell in Different Industries

Yumurta Kabuğunun Farklı Endüstrilerdeki Uygulamalarına Yönelik Araştırmalar

Deniz Türköz Altuğ[1*], Taner Kalaycı[2], Neslihan Kaya Kınaytürk[3], Belgin Tunalı[4]

Geliş / Received: 30/04/2024 ***Revize / Revised: 07/08/2024*** ***Kabul / Accepted: 07/08/2024***

ABSTRACT

In addition to using eggs as a food source, eggshells are also used in various applications in different fields. While eggshells are considered a byproduct of the food industry, they have been the subject of extensive research in recent years due to their unique properties and versatile use potential. This study aims to examine the various uses of eggshell and highlight its potential advantages. Eggshells have a structure consisting mainly of calcium carbonate ($CaCO_3$) and organic substances. While this structure ensures the mechanical durability of the shells, it also allows properties such as porous structure and surface area to change. These properties make eggshells an ideal candidate for many applications. In this study, the areas where eggshell is used are examined. According to this, Its potential in areas such as agriculture, calcium supplementation in food, medical applications, ceramic raw material, adsorption applications, construction and nanocomposite applications is explained. The aim of this study is to evaluate the broad use potential of eggshells and their effects in different industrial sectors. Understanding the role of eggshells in various applications could be an important step towards sustainability, environmental protection, and industrial innovation. This initiative is intended to provide a perspective on the evaluation of eggshells and lay the foundation for future research.

Keywords- Eggshell, Biowaste, Biomaterial, Industrial usage, Recycled materials

ÖZ

Yumurtanın besin kaynağı olarak kullanılmasının yanı sıra yumurta kabukları farklı alanlardaki çeşitli uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yumurta kabukları gıda endüstrisinin bir yan ürünü olarak kabul edilirken, benzersiz özellikleri ve çok yönlü kullanım potansiyeli nedeniyle son yıllarda kapsamlı araştırmalara konu olmuştur. Bu çalışma, yumurta kabuğunun çeşitli kullanımlarını incelemeyi ve potansiyel avantajlarını vurgulamayı amaçlamaktadır. Yumurta kabukları ağırlıklı olarak kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve organik maddelerden oluşan bir yapıya sahiptir. Bu yapı kabukların mekanik dayanıklılığını sağlarken aynı zamanda gözenekli yapı ve yüzey alanı gibi özelliklerin değişmesine de olanak sağlar. Bu özellikler yumurta kabuklarını

[1]*Corresponding Author Contact: denizturkoz@sdu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-1861-6263)
Department of Mathematics and Science Education, Süleyman Demirel University, East Campus, Isparta 32260, Turkey
[2]Contact: tanerkalayci@bandirma.edu.tr (https://orcid.org/ 0000-0002-6374-2373)
Vocational School of Health Services, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Balıkesir, Turkey
[3]Contact: nkinayturk@mehmetakif.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2170-1223)
Department of Nanoscience and Nanotechnology, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Turkey
[4]Contact: btunali@mehmetakif.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0768-679X)
Department of Nanoscience and Nanotechnology, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, Turkey

birçok uygulama için ideal bir aday haline getirir. Bu çalışmada yumurta kabuğunun kullanıldığı alanlar incelenmiştir. Buna göre; tarım, gıda endüstrisinde kalsiyum takviyesi, tıbbi uygulamalar, seramik hammaddesi, adsorpsiyon uygulamaları, inşaat ve nanokompozit uygulamaları gibi alanlardaki potansiyeli gibi konulara değinilmiştir. Bu çalışmanın amacı yumurta kabuğunun geniş kullanım potansiyelini ve farklı endüstriyel sektörlerdeki etkilerini değerlendirmektir. Yumurta kabuklarının çeşitli uygulamalardaki rolünü anlamak sürdürülebilirlik, çevre koruma ve endüstriyel inovasyona yönelik önemli bir adım olabilir. Bu çalışma sayesinde yumurta kabuklarının değerlendirilmesine yönelik bir bakış açısı sunması ve gelecekteki araştırmalara temel oluşturması amaçlanıyor.

Anahtar Kelimeler- Yumurta kabukları, Biyoatık, Biyomalzeme, Endüstriyel kullanım, Geri dönüştürülmüş malzeme

I. INTRODUCTION

It is noteworthy that many scientific studies have been conducted on eggshells. As a result of the search made with the keyword eggshell in the Web of Science database, 10886 pieces of literature were found. These literature studies are primarily classified according to scientific fields. The second stage of the screening was done using the filtering method and the keywords eggshell/quail, eggshell/partridge, eggshell/goose, eggshell/ostrich, and eggshell/chicken. All scanning data are summarized in Figure 1 with their percentage and numerical values.

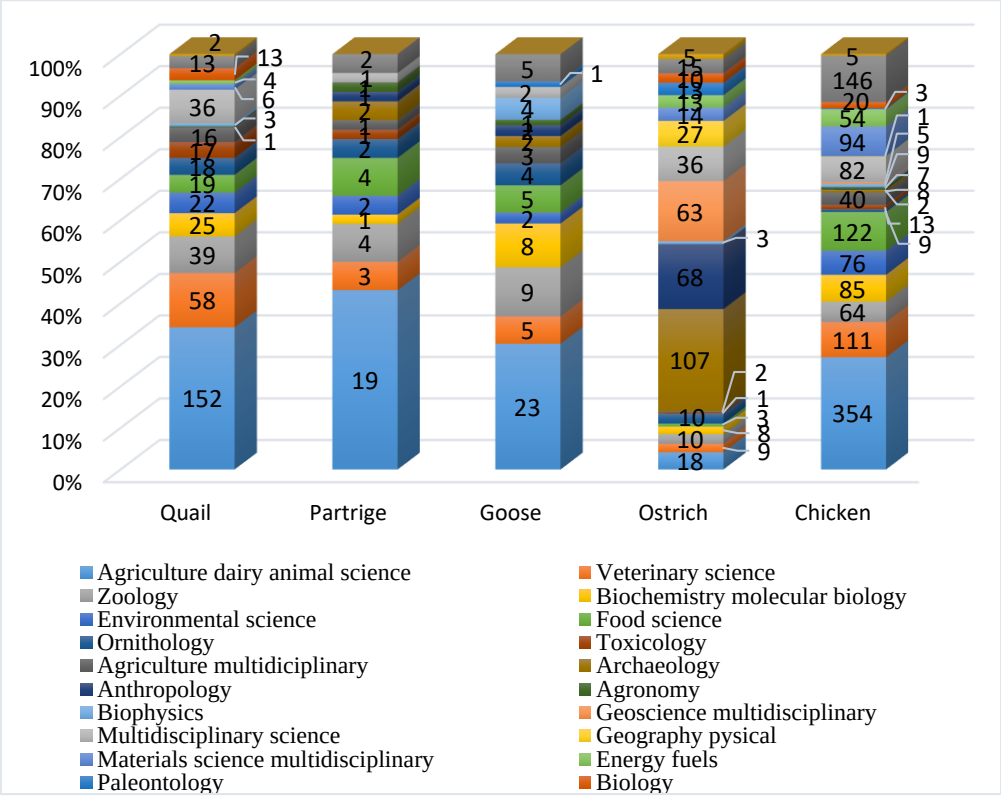


Figure 1. All Articles on Eggshell Species According to the WOS Database

It is seen that the preferred eggshells vary according to the study areas. When the Figure 1 is examined, it can be seen that research on ostrich eggshells focuses on archaeology, anthropology, and physical geography, while quail eggshells are more preferred in studies conducted in the fields of veterinary science, molecular biology, and food science. In studies on environmental science and toxicology, classical chicken eggshells and quail eggshells were generally preferred, but ostrich eggshells were not preferred. Partridge and goose eggshells were primarily preferred in studies agriculture and dairy animal science. In addition, detailed information about the usage areas of eggshells is given below in the form of sectoral headings.

A. Agricultural Applications

It is inexpensive and environmentally friendly to use eggshells as fertilizer due to their calcium content. When eggshells were added to fertilizers as a supplement, it was observed that soil calcium levels increased [1]. Calcium supplementation is therefore an easy way to treat infected plants. Eggshells are an inexpensive and

environmentally friendly supplement for fertilizer preparation [2]. The mixture made from eggshells can be used as a soil rehabilitation and improvement product [3]. To enrich soil with nutrients, eggshell powder can be added as fertilizer. To provide nutrients to plants, eggshell powder can also be mixed with fertilizers. This supplement increases the nutritional value of the plants. It is 90% easier for eggshells or eggshell powder to absorb calcium than some others [1]. At the same time, plants grow better when the soil's pH is increased or neutralized by calcium in eggshells [2].

On the other hand, calcium affects the pH level in soil [4]. It was seen that using eggshells to fertilize red clover plants resulted in larger growth (10 mm) than that of non-fertilized plants. Gaonkar and Chakraborty also used eggshells as a source of plant fertilizer [1]. Deficient calcium in the soil causes tomatoes to grow more inefficiently. To develop the soil's calcium content, calcium was extracted from eggshells and added to it. Using eggshell as a fertilizer enriched soil with calcium and maintained its pH level, according to the results. Berry plants can also be treated with these eggshells for blossom end root disease. As a fertilizer, eggshell powder has been found to be effective in improving all the features in potato and pea plants according to Wazir, Gul, and Hussain (2018) [5]. In addition to improving the mean height of the plant, eggshell powder also improved the size of several nodes, leaves, leaf areas, branches, and tubers.

B. Calcium Supplement in Food

Considering the studies examined as a calcium supplement, animals and humans can use calcium from eggshells to treat calcium deficiency [6]. It was investigated that the powdered eggshell has antirachitic effects in rats and stimulates cartilage cell growth in chick embryos [7]. Additionally, eggshell powder can reduce pain and increase bone density. Proteins found in eggshells act as calcium binders and are involved in mineralization [8]. Calcium-binding properties have been reported for eggshell extracts that are insoluble or soluble [9].

Milk tablets are solid products composed of powdered milk base and at least one binding agent. There is less water content in them, and they taste decent, and they are easier to chew and more bioavailable than many other types of supplements. Milk tablets contain powdered milk, sugars, and calcium; calcium is necessary for humans. Nanotechnological research increases the bioavailability of calcium in food products compared to others. It means the human body can absorb a great amount of nutrient and store it. Additionally, it has been revealed in a study [10] that there is no significant difference between nano-sized calcium powder and milk tablets.

For individuals with lactose intolerance, Fina, Brun, and Rigalli prepared lactose-free milk using eggshell powder and kefir [11]. By fermenting milk with lactic acid and carbon dioxide, kefir milk can be produced. This type of milk does not cause lactose intolerance, demineralization is prevented, and heart health is improved. Three samples were prepared and compared with a control (milk). A calcium source was added to one test sample by adding eggshell powder, a kefir grain source was added to the second sample, and a calcium source was added to the third sample by adding 200 grams of eggshell powder. As a result of this study, it was stated that people with lactose intolerance can consume calcium-treated milk, as the lactose content is reduced, and the calcium content is higher.

Moreover, many calcium salts are commonly found in calcium supplements; however, they are not always effective. There are certain calcium supplements made from oyster shells that are sold in stores. Since oyster shells are scarce, calcium extraction from them is not only time-consuming but also expensive. Therefore, eggshells appear to be a promising alternative source to include in calcium supplements because they are easy to gather, calcium extraction from them is much simpler than from other natural shells, and they have excellent solubility. In addition, eggshell powder is acidic, has a high calcium concentration, and is simple to ionize.

C. Medical Applications

It has been seen in the literature study that eggshell is used for medicine and medical applications, especially in dentistry. In the literature, some prominent factors in the preference for eggshells in medical applications can be listed as biocompatibility, disease-freeness, easy accessibility, ease of application, and ease of bone regeneration.

Onwubu et al. obtained clinically acceptable polished dental prosthesis surfaces by reducing the surface roughness of the dental prosthesis [12]. In another study, Onwubu et al. synthesized an acid-resistant nano-sized dental material using eggshell and titanium. They determined the characterization of this material and performed its in-vitro evaluation [13]. Mony et al. evaluated chicken eggshell solutions at different pHs and determined that high pH solutions have the potential to store the minerals lost from the tooth surface during the tooth decay process [14]. Kongpaopon et al. prepared bio-cellular glass-ceramic composite materials containing calcium phosphate from eggshells as a biomaterial source. They suggested that the biomaterials they prepared could be used as an alternative in medicine and dentistry applications and could support the strength and thermal stability of teeth and bones [15]. Durmuş et al. investigated whether varnish-containing bioactive glass, eggshell, eggshell membrane proteins and eggshell and eggshell membrane protein treated with STMP has a remineralizing effect similar to

varnish containing furur on demineralized enamel. It has been emphasized that combining biological or bioactive components into dental polishes instead of fluoride can reduce cytotoxicity [16]. Feroz et al. carried out an in vitro study on artificially induced tooth erosion to determine the protective effect of chicken eggshell powder solution and determined that the surface roughness of all treated tooth samples decreased and had a protective effect against erosive enamel loss [17].

Muhammed synthesized membranes from eggshells at different rates (1%, 3%, 5%, and 7%) and determined the mechanical parameters of these membranes and determined the possibilities of using them as membranes in tooth production [18].

Than et al. investigated eggshell powder as a pharmaceutical supplement in tablet dosage form. In their study, they prepared four different eggshell powders by using paracetamol as a model drug. As a result of their research, they recommended eggshell powder to the pharmaceutical industry as an excipient to increase the release [19]. A very similar study was done by Habib et al. In their study, they examined the release of aceclofenac in tablets prepared using eggshell powder [20].

Li et al. emphasized that the product they created by synthesizing nanoscale calcium citrate layers using eggshells supports new bone formation [21].

Verma et al. developed an eggshell-derived apatite drug delivery system. They explained that this drug delivery system will prevent post-cancer inflammation, contribute to bone repair and regeneration, and is very suitable for curing osteosarcoma [22].

D. Raw Material in Ceramics

Eggshell is a calcium phosphate-based bio-ceramic reproduced from natural biowastes such as fish and bovine bone. The reason why calcium phosphates (CaP) are a preferred biomaterial is their non-toxicity and high bioactivity [23].

Kazami et al. synthesized nanostructured diopside bioceramics using eggshell in their study and observed that the diopside samples they obtained were thermally stable [24]. Ho et al. In their study titled "Calcium phosphate bioceramics synthesized from eggshell powders via solid state reaction", they proposed eggshells as a potential material that could be used in future waste management, ecology, as well as calcium phosphate synthesis [25].

In the literature research, it has been seen that the use of eggshells is given importance in the production of glass-ceramic foam in order to increase energy efficiency and provide thermal insulation in buildings [26,27]. A similar study was done by Noor et al. In their study, they synthesized wollastonite glass ceramics in different compositions using eggshell and waste glass and performed characterization analyses [28].

Freire and Holland conducted a characterization study targeting the use of bird eggshell waste in ceramic wall tile paste and indicated that powdered eggshell solid waste can be taken into account as a recent raw material for the production of single-fired ceramic wall tile materials. [29]. Vilarinho et al. aimed to improve an eco-ceramic wall tile containing bio-calcium carbonate from eggshell waste as a raw material. In their studies, the paste was prepared by using eggshell waste instead of limestone, which is a natural raw material, and they proved that limestone could be completely replaced with eggshell waste [30].

Adeogun et al. developed nano-sized calcium hydroxyapatite-based ceramics by preparing pure hydroxyapatite from uncalcined eggshells. They focused on synthesis and characterization methods in their studies. In addition to the eggshell, the eggshell membrane has also been the subject of research in the production of ceramic raw materials. It is known that perovskite ceramics have a highly crystalline structure [31]. Dong et al. synthesized crystalline perovskite ceramics using a bio-template eggshell membrane via strong metal-protein bonding. As a result of their research, they produced a mixed oxide ceramic material that preserves the interwoven fibrous structure of the material at 1000°C [32]. In the literature, some studies on the applicability of glass-ceramic materials in the medical field have been found. Ayawanna et al. synthesized a permanent implant to support ocular tissues in eye diseases by using eggshell waste [33].

E. Adsorption Applications

1) Elements And Ions Adsorption:

Some scientific studies have explored the potential of eggshells for elements or ion adsorption, which involves the removal of elements or ion contaminants from wastewater or soil. It has been suggested that the phosphorus element can be removed from wastewater by using eggshells and calcined eggshells, as it may contribute to the deterioration of the organism balance in nature by mixing with water and to the reduction of oxygen in the water [34-36]. Heavy metals have harmful effects on the environment and human health. Cu(II) [37], Pb(II) and Zn(II) ions, which cause severe problems by polluting nature, were removed from aqueous

solutions using eggshells [38]. The very small amount of Cd (II) ion in the environment also causes serious problems for living organisms. Therefore, studies have been carried out to remove it from wastewater [39-41]. When the adsorption of Cd(II) ion by eggshell was compared with the adsorbing of Ag(I) and Zn(II) ions, it was revealed that there was a correlation in the form of Ag(I) > Cd(II) > Zn(II) [40]. In another study, the ability of eggshell waste to adsorb Co(III), Zn(II), Hg(II), and Pb(II) heavy metal ions was compared and Co(III) ion was the ion most adsorbed by eggshells [42]. Cr(VI) , Cd(II), and Eu(III) heavy metal ions are also well adsorbed by eggshells, just like the metal ions listed above [43,44]. Polat and Aslan, in their study of adsorption of Cu ion using eggshells, explained that this reaction is endothermic [45]. Eggshells and calcined eggshells were used to remove Ni(II) ions from the synthetic solution, and it was revealed that calcined eggshells adsorbed Ni(II) ions 60 times more [46]. Abbas et al. conducted a study of removing Bi(III) from aqueous solution using eggshells, and suggested that adsorption took place using SEM-EDS and FTIR analyses [47]. As an adsorbent, eggshells were used to remove Floride ions from the aqueous solution and proved by Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies [48].

Eggshells calcined at 800^0C were highly effective for the adsorption of F^- ions [49]. Oke et al. mentioned the importance of the size of the eggshell particles in removing As ions from the aqueous solution using eggshells. They stated that with the decrease in particle size, the percentage of adsorption would also increase [50].

These studies collectively demonstrate that eggshells, with their high calcium carbonate content, offer potential as a highly cheap and environmentally friendly adsorbent for elements and ions harmful to the ecosystem to removal. The adsorption mechanisms involve both physical and chemical interactions between the heavy metal ions and the surface of eggshells, including ion exchange, surface complexation, and chemical reactions. Eggshells can be used as a valuable bioresource for heavy metal adsorption applications in water treatment and wastewater management.

2) Molecules Adsorption:

Phenol compounds have a toxic effect when mixed with drinking water. It also gives a bad taste to drinking water. Therefore, removal processes are required as these compounds are priority pollutants [44,51]. It has been shown by Kuśmierek et al, that Pentachlorophenol can be effectively extracted from aqueous solution using eggshell [52]. There is a study showing that H_2S, which is harmful to human health and the environment in many respects, can be adsorbed by calcined eggshells [53]. In another study, it was shown that Cypermethrin, Deltamethrin, and Indoxacarb compounds used as pesticides were adsorbed by various types of eggshells [54]. Especially in the swine industry, p-cresol, which is formed when animal wastes come together with other organic pollutants, can cause harmful effects in terms of human health. Therefore, eggshells were used to remove this unwanted molecule from the p-cresol solution [55]. Due to the CO_2 generated during the calcination process of the eggshells, the ashing of the material is reduced. Therefore, it has been reported that the affinity of calcined eggshells for phosphate ions increases when CO_2 is removed using N_2 [56]. Dyes, which can also be considered molecules, can cause negative effects in terms of the environment and human health. There are also various studies using eggshells to remove these dyes (for example, triphenylmethane, methylene blue, crystal violet dye, direct blue, Reactive Black 5, Acid Violet 90, Acid Yellow 194) [57-60].

These studies demonstrate the potential of eggshells as adsorbents for the removal of various molecules. Eggshells offer a promising option for the development of cost-effective and sustainable adsorbents in water treatment applications for the removal of different contaminants and molecules [61-68].

3) Modified eggshell's

In some studies, eggshells were modified to form a stronger adsorbent for metal or molecule adsorption [61-68].

These studies highlight the importance of modifying eggshells to improve their properties and expand their application. Modified eggshells exhibit improved adsorption capacities, increased surface area, improved stability, antibacterial properties, and broader functionality, making them valuable in various environmental, biomedical and materials science applications.

F. Construction Applications

There are also studies showing that eggshells can be used as construction materials. In these studies, it has been suggested that it is promising for applications such as Concrete, Cement, and Aggregate [69-79], Soil Stabilization and asphalt [80-88], Building Insulation [89-91].

It's important to note that while there have been promising findings in these areas, the utilization of eggshells as a construction material is still an active area of research. Further studies are needed to explore the optimization of eggshell incorporation, assess long-term performance, and evaluate the economic feasibility of implementing eggshell-based solutions in construction applications.

G. Nanocomposite Applications

In the study of eggshell nanocomposites containing silver nanoparticles [92], low-cost cleaning powder for household items, as well as antibacterial properties of silver-doped nanocomposites obtained from eggshells were revealed. In another similar study [93], nanocomposites were formed with eggshells after silver nanoparticles were obtained from plant extract by the green synthesis method. In this study, which is bifunctional, Ag/Eggshell nanocomposites have both eliminated the damages of 4 nitrophenols in water and disinfected water with their antibacterial properties.

In another study, eggshell nanocomposite formed with silver additive was used for heavy metal adsorption, removal of toxic dyes, and microbial pollutants from water [94]. The silver additive was made with biologically synthesized silver nanoparticles.

In a review study [95], the use of eggshell as a filling material, the use of eggshell in metal-composites or polymer composites, as well as the use of matrix material, as bio-composite and hybrid composites were also mentioned.

It has been stated that nano eggshells can be used as an effective additive to improve the mechanical properties and better workability in mixtures of cement composites containing nano eggshells [96].

Üllen et al. developed a low alloy steel foam coated with eggshell-based kappa-carrageenan-polyvinyl alcohol nano biocomposite [97].

Nano eggshell is a potential for construction applications indicating that it is a nanostructure candidate. For this reason, new composite forms of eggshell have been used in cement content in the studies, and their advantages have been indicated in these studies [96,98].

The use of eggshell as a filling material [99] is another area that attracts attention as much as the studies investigating the antimicrobial effects [100,101] of nanocomposites formed by various processes of eggshell.

Studies showing the antibacterial activity of nanocomposites of waste eggshells can be found in the literature [102,103].

While the eggshell is a suitable material for adsorption with its porous structure, studies have taken place in the literature that it is a suitable candidate for curcumin [104] and formaldehyde [105] adsorption by processing it into nanocomposite.

II. CONCLUSION

It has been observed that eggshells are used in agricultural and agriculture-related applications such as healing infected plants, increasing soil fertility as a fertilizer, enriching the soil in terms of calcium, and balancing the pH level.

Eggshells appear to be a promising alternative source for inclusion in calcium supplements; because they are easy to obtain, the extraction of calcium from them is much simpler than from other natural shells, and they have excellent solubility. In addition, eggshell powder is acidic, has a high calcium concentration and is easy to ionize. Due to these properties, it can be considered a promising candidate as a calcium supplement, by adding it to milk tablets, and in individuals with lactose intolerance.

The prominent factors why eggshell is preferred in medical applications are; These can be listed as biocompatibility, easy accessibility, ease of application and its effect on bone regeneration. There are studies on how more durable materials that can be used in dentistry can be produced with various additives made to eggshells.

It is seen that ceramics provide energy efficiency and increase durability thanks to the eggshell added as an additive to the ceramic raw material. Additionally, it is understood that eggshell ceramics can be used in construction and healthcare fields in terms of their usage areas.

Studies have shown that adsorption on eggshells is an effective method in preventing environmental pollution and removing pollutants such as ions, heavy metals and toxic molecules from wastewater or soil. Additionally, modified eggshells appear to make the adsorption process more effective.

It is suggested that eggshells are promising for applications such as Concrete, Cement, Aggregate, Asphalt and building insulation in the construction industry.

Nanocomposite materials created from eggshells; Due to its antibacterial properties, it has been used as a disinfectant and filling material in various sectors. It was appropriated to reveal the potential under the following headings together with the literature comparison.

A. Agricultural Applications

No studies have been found in the literature that distinguish eggshells based on type. It is thought that considering species-dependent diversity, especially in terms of calcium content, can enable soil fertility to be adjusted at an optimum level.

B. Calcium Supplement in Food

In this field, there are studies conducted with eggshells of CCJ [106], SC [107], and duck [90]. Ali and Badawy suggested that there is no significant difference between species in terms of calcium supplementation of eggshells [106]. Safety in food packaging can ensure that all eggshells are treated indiscriminately as waste for reinforcement purposes.

C. Medical Applications

Irokanulo and colleagues suggested that the antimicrobial properties of CCJ eggshells could be used [108]. Syafaat and Yusuf emphasized that the calcium level of CCJ eggshells is higher than that of hen and duck eggshells and preferred CCJ as the main material in the Hydroxyapatite synthesis application [109].

Durmuş et al. have demonstrated the possible beneficial effects of external and internal ostrich eggshell membranes alone and in combination with shell powder on bone regeneration in rabbit cranial defects using radiological, clinical, and histological methods [16].

Boldaji and Sheishi presented in their study that ostrich eggshell pulverized by ultrasound is more beneficial for bone healing compared to natural bone healing [110].

Dupoirieux et al. used ground eggshells of different sizes and implanted them into the bone. As a result, they suggested that eggshell could be a resorbable implant, but its degradation kinetics depended on size [111].

D. Raw Material in Ceramics

A study shows that CCJ eggshells can be used in ceramic production [69].

Sangmala et al. synthesized chicken eggshell waste as hydroxyapatite for flux replacement in ceramic production and showed that ceramic samples with various hydroxyapatite contents affected the improvement of physical and mechanical properties after heat treatment in the temperature range of 1000-1200°C [112].

The issue of using waste instead of natural raw materials in the ceramic industry has brought about different studies. In the literature, it is seen that eggshells are preferred instead of glass waste and polished tile waste in ceramic production [113]. In addition to the use of eggshells in the construction industry, there are studies showing that they are also used in the field of bioceramics as a bone repair material [114].

E. Adsorption Applications Elements, Ions, And Molecules Adsorptions

It has been demonstrated that eggshells, with their high calcium carbonate content, offer potential as a cost-effective, sustainable, and environmentally friendly adsorbent for elements, ions, and molecules harmful to the ecosystem to removal. Studies with CCJ [69,114], AC, DH [114,115], AA [115], and SC [117] have also been found to support this result.

1) Modified Eggshells:

Modified eggshells exhibit improved adsorption capacities, increased surface area, improved stability, antibacterial properties, and broader functionality, making them valuable in various environmental, biomedical and materials science applications. Studies in the field of modified eggshells are generally carried out with eggshells of unspecified type. In most of the studies, waste eggshells consumed in daily life were preferred.

The different pore diameters of different eggshell types provide selectivity in the adsorption process and allow a prediction to be made between the pore diameter in the eggshell and the molecule size of the eggshell to be adsorbed [116,117].

F. Construction Applications

It's important to note that while there have been promising findings in these areas, the utilization of eggshells as a construction material is still an active area of research. Further studies are needed to explore the optimization of eggshell incorporation, assess long-term performance, and evaluate the economic feasibility of implementing eggshell-based solutions in construction applications. In the studies proving that eggshells can be used as construction material, no studies were found based on the species differences of eggshells. The reason for this is that large amounts of eggshells will be needed in the construction industry and building materials, and thus

far, studies in this field are limited. It can be said that the field of ceramics, where less material is needed to reveal the potential differences between species, will be preferred over the construction sector.

G. Nanocomposite Applications

CCJ eggshells have been used to increase the strength in bio composite production [119] while SC has been used for bio-composite film production [120]. In such studies, it is seen that eggshell is used as a $CaCO_3$ support both to increase the strength and to reduce the moisture content in the bio composite. In our experimental results, it was determined that the highest calcium rate belonged to SC, DH, and AA eggshells with 98%. For this reason, using other eggshells instead of CCJ will provide the desired properties in bio composites.

ACKNOWLEDGEMENTS

The present work was supported by Research Projects with Foundation Number BAP-22-1003-006, Bandırma Onyedi Eylül University, Scientific Research Commission, Turkey.

REFERENCES

[1] Gaonkar, M., Chakraborty, A. P., & Professor, A. (2007). Application of Eggshell as Fertilizer and Calcium Supplement Tablet. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO Certified Organization)*, *3297*(3), 3520–3525.

[2] King'ori, A. M. (2011). A Review of the uses of poultry eggshells and shell membranes. *International Journal of Poultry Science*, *10*(11), 908–912.

[3] Quina, M. J., Soares, M. A. R., & Quinta-Ferreira, R. (2017). Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource. *Resources, Conservation and Recycling*, *123*, 176–186.

[4] Commey, A., & Mensah, M. (2019). An experimental study on the use of eggshell powde r as a pH modifier: Production of lime from eggshells. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, *4*, 766–768.

[5] Wazir, A., Gul, Z., & Hussain, M. (2018). Comparative Study of Various Organic Fertilizers Effect on Growth and Yield of Two Economically Important Crops, Potato and Pea. *Agricultural Sciences*, *09*(06), 703–717.

[6] Omi, N., & Ezawa, I. (1998). Effect of Egg-Shell Ca on Preventing of Bone Loss after Ovariectomy. *J. Home Econ. Jpn*, *49*(3), 277–282.

[7] Norrie, I. (2019). Letters to the Editor. *Logos*, *13*(2), 109–111.

[8] Wheeler, A. P., & Sikes, C. S. (1984). Regulation of carbonate calcification by organic matrix. *Integrative and Comparative Biology*, *24*(4), 933–944.

[9] Gautron, J., Hincke, M. T., & Nys, Y. (1997). Precursor matrix proteins in the uterine fluid change with stages of eggshell formation in hens. *Connective Tissue Research*, *36*(3), 195–210.

[10] Lee, Y. K., Kim, A. Y., Min, S. G., & Kwak, H. S. (2016). Characteristics of milk tablets supplemented with nanopowdered eggshell or oyster shell. *International Journal of Dairy Technology*, *69*(3), 337–345.

[11] Fina, B. L., Brun, L. R., & Rigalli, A. (2016). Increase of calcium and reduction of lactose concentration in milk by treatment with kefir grains and eggshell. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *67*(2), 133–140.

[12] Onwubu, S. C., Vahed, A., Singh, S., & Kanny, K. M. (2017). Reducing the surface roughness of dental acrylic resins by using an eggshell abrasive material. *Journal of Prosthetic Dentistry*, *117*(2), 310–314.

[13] Onwubu, S. C., Mdluli, P. S., Singh, S., Madikizela, L., & Ngombane, Y. (2019). Characterization and in vitro evaluation of an acid resistant nanosized dental eggshell-titanium dioxide material. *Advanced Powder Technology*, *30*(4), 766–773.

[14] Mony, B., Rajesh Ebenezar, A. V., Ghani, M. F., Narayanan, A., Anand, S., & Mohan, A. G. (2015). Effect of chicken eggshell powder solution on early enamel carious lesions: An invitro preliminary study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, *9*(3), ZC30–ZC32.

[15] Kongpaopong, K., Ratchatawatanapipat, N., & Tangboriboon, N. (2021). Bio-cellular glass–ceramic composite with embedded calcium phosphate from eggshell for alternative biomaterials in medical and dental applications. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(20).

[16] Durmuş, E., Kölüş, T., Çoban, E., Yalçınkaya, H., Ülker, H. E., & Çelik, I. (2023). In vitro determination of the remineralizing potential and cytotoxicity of non-fluoride dental varnish containing bioactive glass, eggshell, and eggshell membrane. *European Archives of Paediatric Dentistry*.

[17] Feroz, S., Moeen, F., & Nisar Haq, S. (2017). Protective Effect of Chicken Egg Shell Powder Solution (CESP) on Artificially Induced Dental Erosion: An in Vitro Atomic Force Microscope Study. *International Journal of Dental Sciences and Research*, *5*(3), 49–55.

[18] Alaa Mohammed, R. (2022). Pmma – Eggshell Composite Preparation and Studying Mechanical Properties as a Dental Material. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *24*(2), 30–47.

[19] Than, M. M., Lawanprasert, P., & Jateleela, S. (2012). Utilization of eggshell powder as excipient in fast and sustained release acetaminophen tablets. *Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences*, *39*(3–4), 32–38.

[20] Habib, M. A., Mahmud, M. F., Islam, T., Hasan, M., Koushik Ahamed, S., Billah, M., & Arefin, P. (2015). New Approach for Sustained Release Dosage Form Design: Aceclofenac. *Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences*, *42*(2), 93–100.

[21] Li, J., Liu, Y., Gao, Y., Zhong, L., Zou, Q., & Lai, X. (2016). Preparation and properties of calcium citrate nanosheets for bone graft substitute. *Bioengineered*, *7*(5), 376–381.

[22] Verma, A. H., Kumar, T. S. S., Madhumathi, K., Rubaiya, Y., Ramalingan, M., & Doble, M. (2019). Curcumin Releasing Eggshell Derived Carbonated Apatite Nanocarriers for Combined Anti-Cancer, Anti-Inflammatory and Bone Regenerative Therapy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *19*(11), 6872–6880.

[23] Awogbemi, O., Von Kallon, D. V., & Aigbodion, V. S. (2022). Pathways for Sustainable Utilization of Waste Chicken Eggshell. *Journal of Renewable Materials*, *10*(8), 2217–2246.

[24] Kazemi, A., Abdellahi, M., Khajeh-Sharafabadi, A., Khandan, A., & Ozada, N. (2017). Study of in vitro bioactivity and mechanical properties of diopside nano-bioceramic synthesized by a facile method using eggshell as raw material. *Materials Science and Engineering C*, *71*, 604–610.

[25] Ho, W. F., Hsu, H. C., Hsu, S. K., Hung, C. W., & Wu, S. C. (2013b). Calcium phosphate bioceramics synthesized from eggshell powders through a solid state reaction. *Ceramics International*, *39*(6), 6467–6473.

[26] Ponnuchamy, M., Kapoor, A., Senthil Kumar, P., Vo, D. V. N., Balakrishnan, A., Mariam Jacob, M., & Sivaraman, P. (2021). Sustainable adsorbents for the removal of pesticides from water: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2425–2463). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

[27] Mumit, M. A., Pal, T. K., Alam, M. A., Islam, M. A. A. A. A., Paul, S., & Sheikh, M. C. (2020). DFT studies on vibrational and electronic spectra, HOMO–LUMO, MEP, HOMA, NBO and molecular docking analysis of benzyl-3-N-(2,4,5-trimethoxyphenylmethylene)hydrazinecarbodithioate. *Journal of Molecular Structure*, *1220*.

[28] Hazlin, A., Noor, M., Hj, S., Aziz, A., Syuhaida, S., Rashid, A., Hafiz, M., Zaid, M., Alassan, Z. N., Matori, K. A., & Composites, G. C. (2015). Synthesis and Characterization of Wollastonite Glass-Ceramics from Eggshell and Waste Glass. *Journal of Solid State Science and Technology Letters*, *16*(1), 1–5.

[29] Freire, M. N., & Holanda, J. N. F. (2006). Caracterização de resídua de casca de ovo visando seu aproveitamento em revestimento cerâmico poroso. *Ceramica*, *52*(324), 240–244.

[30] Vilarinho, I. S., Filippi, E., & Seabra, M. P. (2022). Development of eco-ceramic wall tiles with bio-CaCO3 from eggshells waste. *Open Ceramics*, *9*(January), 100220.

[31] Adeogun, A. I., Ofudje, A. E., Idowu, M. A., & Kareem, S. O. (2018). Facile Development of Nano Size Calcium Hydroxyapatite Based Ceramic from Eggshells: Synthesis and Characterization. *Waste and Biomass Valorization*, *9*(8), 1469–1473.

[32] Dong, D., Wu, Y., Zhang, X., Yao, J., Huang, Y., Li, D., Li, C. Z., & Wang, H. (2011). Eggshell membrane-templated synthesis of highly crystalline perovskite ceramics for solid oxide fuel cells. *Journal of Materials Chemistry*, *21*(4), 1028–1032.

[33] Ayawanna, J., Kingnoi, N., & Laorodphan, N. (2019). A feasibility study of eggshell-derived porous glass–ceramic orbital implants. *Materials Letters*, *241*, 39–42.

[34] Fritzen, R. R., & Domingues Benetti, A. (2021). Phosphorus removal in domestic wastewater treatment plant by calcined eggshell. *Water Science and Technology*, *84*(4), 995–1010.

[35] Kim, D., Kim, Y., Choi, J. H., & Ryoo, K. S. (2020). Evaluation of Natural and Calcined Eggshell as Adsorbent for Phosphorous Removal from Water. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, *41*(6), 650–656.

[36] Köse, T. E., & Kivanç, B. (2011). Adsorption of phosphate from aqueous solutions using calcined waste eggshell. *Chemical Engineering Journal*, *178*, 34–39.

[37] Hess, B. J., Kolar, P., Classen, J. J., Knappe, D., & Cheng, J. J. (2018). Evaluation of waste eggshells for adsorption of copper from synthetic and swine wastewater. *Transactions of the ASABE*, *61*(3), 967–976.

[38] Torit, J., & Phihusut, D. (2019). Phosphorus removal from wastewater using eggshell ash. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(33), 34101–34109.

[39] Kuh, S. E., & Kim, D. S. (2000). Removal characteristics of cadmium ion by waste eggshell. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *21*(8), 883–890.

[40] Baláž, M., Ficeriová, J., & Briančin, J. (2016). Influence of milling on the adsorption ability of eggshell waste. *Chemosphere*, *146*, 458–471.

[41] Segneanu, A. E., Marin, C. N., Vlase, G., Cepan, C., Mihailescu, M., Muntean, C., & Grozescu, I. (2022). Highly efficient engineered waste eggshell-fly ash for cadmium removal from aqueous solution. In *Scientific Reports* (Vol. 12, Issue 1). Nature Publishing Group UK.

[42] Hassan, E. S. R. E., Rostom, M., Farghaly, F. E., & Abdel Khalek, M. A. (2020). Bio-sorption for tannery effluent treatment using eggshell wastes; kinetics, isotherm, and thermodynamic study. *Egyptian Journal of Petroleum*, *29*(4), 273–278.

[43] OAbatan, O. G., Alaba, P. A., Oni, B. A., Akpojevwe, K., Efeovbokhan, V., & Abnisa, F. (2020). Performance of eggshells powder as an adsorbent for adsorption of hexavalent chromium and cadmium from wastewater. *SN Applied Sciences*, *2*(12), 1–13.

[44] Daraei, H., Mittal, A., Noorisepehr, M., & Mittal, J. (2015). Separation of chromium from water samples using eggshell powder as a low-cost sorbent: kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, *53*(1), 214–220.

[45] Polat, A., & Aslan, S. (2014). Kinetic and isotherm study of cupper adsorption from aqueous solution using waste eggshell. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *22*(2), 132–140.

[46] Kristianto, H., Daulay, N., & Arie, A. A. (2019). Adsorption of Ni(II) Ion onto calcined eggshells: A study of equilibrium adsorption Isotherm. *Indonesian Journal of Chemistry*, *19*(1), 143–150.

[47] Abbas, A., Chen, L., Liao, Y. L., Wu, Z. Z., Yu, Y. Q., & Yang, J. Y. (2021). Removal of bismuth ion from aqueous solution by pulverized eggshells. *Desalination and Water Treatment*, *213*(June), 395–405.

[48] Bhaumik, R., Mondal, N. K., Das, B., Roy, P., Pal, K. C., Das, C., Banerjee, A., & Datta, J. K. (2012). Eggshell powder as an adsorbent for removal of fluoride from aqueous solution: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *E-Journal of Chemistry*, *9*(3), 1457–1480.

[49] Lee, J. I., Hong, S. H., Lee, C. G., & Park, S. J. (2021). Fluoride removal by thermally treated eggshells with high adsorption capacity, low cost, and easy acquisition. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(27), 35887–35901.

[50] Oke, I. A., Olarinoye, N. O., & Adewusi, S. R. A. (2008). Adsorption kinetics for arsenic removal from aqueous solutions by untreated powdered eggshell. *Adsorption*, *14*(1), 73–83.

[51] Kashi, K. (2017). On the analysis of phenol removal from drinking water by batch reactor using powdered eggshell Giti. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, *10*(2), 276–286.

[52] Kuśmierek, K., Idźkiewicz, P., Świątkowski, A., & Dąbek, L. (2017). Adsorptive removal of pentachlorophenol from aqueous solutions using powdered eggshell. *Archives of Environmental Protection*, *43*(3), 10–16.

[53] Habeeb, O. A., Kanthasamy, R., Ali, G. A. M., Yunus, R. B. M., & Olalere, O. A. (2017). Kinetic, isotherm and equilibrium study of adsorption of hydrogen sulfide from wastewater using modified eggshells. *IIUM Engineering Journal*, *18*(1), 13–25.

[54] Kinaytürk, N. K., Tunali, B., & Türköz Altuğ, D. (2021). Eggshell as a biomaterial can have a sorption capability on its surface: A spectroscopic research. *Royal Society Open Science*, *8*(6).

[55] Wakchaure, G. C., Das, L., & Kolar, P. (2016). Eggshell as an inexpensive adsorbent for removal of P-cresol. *Transactions of the ASABE*, *59*(3), 965–974.

[56] Photiou, P., & Vyrides, I. (2022). Calcined eggshells in anaerobic digestion: Buffering acidification in AD and evaluating end products from phosphate adsorption as soil conditioners. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(3).

[57] Ngadi, N., Ee, C. C., & Yuszff, N. A. (2013). Removal of Methylene Blue Dye by Using Eggshell Powder. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, *65*(1), 63–71.

[58] Chowdhury, S., Chakraborty, S., & Saha, P. Das. (2013). Removal of crystal violet from aqueous solution by adsorption onto eggshells: Equilibrium, kinetics, thermodynamicsand artificial neural network modeling. *Waste and Biomass Valorization*, *4*(3), 655–664.

[59] Abbas, R. A., Farhan, A. A. R., Abdalraheem Al Ani, H. N., & Nechifor, A. C. (2019). Determination of the optimal condition of direct blue dye removal from aqueous solution using eggshell. *Revista de Chimie*, *70*(4), 1108–1113.

[60] Çelebi, H. (2019). The applicability of evaluable wastes for the adsorption of Reactive Black 5. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(1), 135–146.

[61] Guo, Z., Li, J., Guo, Z., Guo, Q., & Zhu, B. (2017). Phosphorus removal from aqueous solution in parent and aluminum-modified eggshells: thermodynamics and kinetics, adsorption mechanism, and diffusion process. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(16), 14525–14536.

[62] Ren, J., Bopape, M. F., Setshedi, K., Kitinya, J. O., & Onyango, M. S. (2012). sorpcija Pb(II) i Cu(II) na jeftinom magnetnom prahu ljuski jajeta i Fe 3O 4. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, *18*(2), 221–231.

[63] Hosseini, S. S., Hamadi, A., Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., & Ramavandi, B. (2022). Decontamination of Cd2+ and Pb2+ from aqueous solution using a magnetic nanocomposite of eggshell/starch/Fe3O4. *Journal of Water Process Engineering*, *48*(March).

[64] Markovski, J. S., Marković, D. D., Dokić, V. R., Mitrić, M., Ristić, M. D., Onjia, A. E., & Marinković, A. D. (2014). Arsenate adsorption on waste eggshell modified by goethite, α-MnO2 and goethite/α-MnO2. *Chemical Engineering Journal*, *237*, 430–442.

[65] Ferraresi-Curotto, V., Echeverría, G. A., Piro, O. E., Pis-Diez, R., & González-Baró, A. C. (2014). An experimental and DFT study of a disulfide-linked Schiff base: Synthesis, characterization, and crystal structure of bis (3-methoxy-salicylidene-2- aminophenyl) disulfide in its anhydrous and monohydrate forms. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *118*, 279–286.

[66] Yan, Y., Yang, S., Jiang, F., Luo, Y., Gao, H., & Liao, Y. (2020). Efficient removal of lead ions from aqueous solutions using ZnSe/ZnO/Bio-CaCO3. *Water Science and Technology*, *81*(1), 91–101.

[67] Zhao, C., Zhang, Z., Deng, Q., Song, G., Wu, Y., Zhang, H., Li, X., Ma, X., Tan, B., Yin, Y., & Jiang, Q. (2022). Adsorption of deoxynivalenol by APTS-TEOS modified eggshell powder. *Food Chemistry*, *391*(February).

[68] Chen, D., Xiao, X., & Yang, K. (2016). Removal of phosphate and hexavalent chromium from aqueous solutions by engineered waste eggshell. *RSC Advances*, *6*(42), 35332–35339.

[69] Niyasom, S., & Tangboriboon, N. (2021). Development of biomaterial fillers using eggshells, water hyacinth fibers, and banana fibers for green concrete construction. *Construction and Building Materials*, *283*(February), 122627.

[70] Othman, R., Chong, B. W., Jaya, R. P., Mohd Hasan, M. R., Al Bakri Abdullah, M. M., & Wan Ibrahim, M. H. (2021). Evaluation on the rheological and mechanical properties of concrete incorporating eggshell with tire powder. *Journal of Materials Research and Technology*, *14*, 439–451.

[71] Shekhawat, P., Sharma, G., & Singh, R. M. (2019). Strength behavior of alkaline activated eggshell powder and flyash geopolymer cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, *223*, 1112–1122.

[72] Hakeem, I. Y., Abd-Al Ftah, R. O., Tayeh, B. A., & Hafez, R. D. A. (2023). Eggshell as a fine aggregate replacer with silica fume and fly ash addition in concrete: A sustainable approach. *Case Studies in Construction Materials*, *18*.

[73] Zaini, M. S. I., Hasan, M., Yie, L. S., Masri, K. A., Jaya, R. P., Hyodo, M., & Winter, M. J. (2022). the Effect of Utilizing Silica Fume and Eggshell Ash on the Geotechnical Properties of Soft Kaolin Clay. *Jurnal Teknologi*, *84*(1), 159–170.

[74] Alsharari, F., Khan, K., Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, U., Mutnbak, M., Houda, M., & Yosri, A. M. (2022). Sustainable use of waste eggshells in cementitious materials: An experimental and modeling-based study. *Case Studies in Construction Materials*, *17*(October).

[75] Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mohamad, N., Mo, K. H., & Sohu, S. (2020). Incorporation of palm oil fuel ash and eggshell powder as supplementary cementitious materials in sustainable foamed concrete. *Tehnicki Vjesnik*, *27*(5), 1394–1402.

[76] Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, K., Al-Hashem, M. N., Deifalla, A. F., & Ahmad, A. (2023). Testing and modeling methods to experiment the flexural performance of cement mortar modified with eggshell powder. *Case Studies in Construction Materials*, *18*(October 2022).

[77] Izquierdo, I. S., Izquierdo, O. S., & Ramalho, M. (2018). Physical and mechanical properties of concrete using residual powder from organic waste as partial cement replacement. *Revista Ingenieria de Construccion*, *33*(3), 229–240.

[78] Adediran, A. A., Balogun, O. A., Akinwande, A. A., Adesina, O. S., & Olasoju, O. S. (2020). Influence of chemical treatment on the properties of cement-paper hybrid composites for ceiling board application. *Heliyon*, *6*(7).

[79] Poorveekan, K., Ath, K. M. S., Anburuvel, A., & Sathiparan, N. (2021). Investigation of the engineering properties of cementless stabilized earth blocks with alkali-activated eggshell and rice husk ash as a binder. *Construction and Building Materials*, *277*.

[80] Consoli, N. C., Caicedo, A. M. L., Beck Saldanha, R., Filho, H. C. S., & Acosta, C. J. M. (2020). Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(11), 1–7.

[81] Zaini, M. S. I., Hasan, M., Yie, L. S., Masri, K. A., Jaya, R. P., Hyodo, M., & Winter, M. J. (2022). The effect of utilizing silica fume and eggshell ash on the geotechnical properties of soft kaolin clay. *Jurnal Teknologi*, *84*(1), 159-170.

[82] Saldanha, R. B., da Rocha, C. G., Caicedo, A. M. L., & Consoli, N. C. (2021). Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. *Construction and Building Materials*, *298*.

[83] Anburuvel, A., Sathiparan, N., Dhananjaya, G. M. A., & Anuruththan, A. (2023). Characteristic evaluation of geopolymer based lateritic soil stabilization enriched with eggshell ash and rice husk ash for road construction: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, *387*(April), 0–1.

[84] Reis, J. B., Pelisser, G., Levandoski, W. M. K., Ferrazzo, S. T., Mota, J. D., Silveira, A. A., & Korf, E. P. (2022). Experimental investigation of binder based on rice husk ash and eggshell lime on soil stabilization under acidic attack. *Scientific Reports*, *12*(1), 1–11.

[85] Oluwatuyi, O. E., Adeola, B. O., Alhassan, E. A., Nnochiri, E. S., Modupe, A. E., Elemile, O. O., Obayanju, T., & Akerele, G. (2018). Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction. *Case Studies in Construction Materials*, *9*.

[86] Wang, X. (2021). *Bitumen Blended with Waste Eggshell Powder*.

[87] Masri, K. A., Ganesan, E., Ramadhansyah, P. J., Doh, S. I., Nur Syafiqah, S. M. Z., Mohamed Jaafar, Z. F., & Mashros, N. (2021). Stress and Strain Characteristic of Stone Mastic Asphalt Incorporating Eggshell Powder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *682*(1).

[88] Huang, J., Shiva Kumar, G., Ren, J., Sun, Y., Li, Y., & Wang, C. (2022). Towards the potential usage of eggshell powder as bio-modifier for asphalt binder and mixture: workability and mechanical properties. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(10), 3553–3565.

[89] Han, X., Ding, S., Zhu, L., & Wang, S. (2023). Preparation and characterization of flame-retardant and thermal insulating bio-based composite aerogels. *Energy and Buildings*, *278*.

[90] Tangboriboon, N., Moonsri, S., Netthip, A., Sangwan, W., & Sirivat, A. (2019). Enhancing physical-thermal-mechanical properties of fired clay bricks by eggshell as a bio-filler and flux. *Science of Sintering*, *51*(1), 1–13.

[91] Bani-Ahmad, M. M., Noor Azman, N. Z., Jasmine, J. N. Z., Almarri, H. M., Alshipli, M., & Ramzun, M. R. (2022). Radiation attenuation ability of bentonite clay enriched with eggshell as recyclable waste for a physical rradiation barrier. *Radiation Physics and Chemistry*, *201*(August).

[92] Yorseng, K., Siengchin, S., Ashok, B., & Rajulu, A. V. (2020). Nanocomposite egg shell powder with in situ generated silver nanoparticles using inherent collagen as reducing agent. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, *5*(2), 101–107.

[93] Huang, X., Chang, L., Lu, Y., Li, Z., Kang, Z., Zhang, X., Liu, M., & Yang, D. P. (2020). Plant-mediated synthesis of dual-functional Eggshell/Ag nanocomposites towards catalysis and antibacterial applications. *Materials Science and Engineering C*, *113*(April), 111015.

[94] Dayanidhi, K., Vadivel, P., Jothi, S., & Eusuff, N. S. (2020). Facile synthesis of Silver@Eggshell nanocomposite: A heterogeneous catalyst for the removal of heavy metal ions, toxic dyes, and microbial contaminants from water. *Journal of Environmental Management*, *271*(January), 110962.

[95] Sunardi, S., Ariawan, D., Surojo, E., Prabowo, A. R., Akbar, H. I., Cao, B., & Carvalho, H. (2023). Assessment of eggshell-based material as a green-composite filler: Project milestones and future potential as an engineering material. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, *32*(1).

[96] Pehlivan, A. O., Karakuş, S., Karapınar, I. S., Özbay, A. E. Ö., Yazgan, A. U., Taşaltın, N., & Kilislioğlu, A. (2020). Effect of novel synthesized nanoeggshell on the properties of cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *18*(5), 294–306.

[97] Beköz Üllen, N., Karabulut, G., & Karakuş, S. (2022). Investigation of Surface Properties of Eggshell based Kappa-Carrageenan-Polyvinyl Alcohol Nanobiocomposite Coated Low Alloyed Steel Foam. *European Journal of Science and Technology*, *32*, 1188–1193.

[98] Sanrı-Karapınar, I., Pehlivan, A. O., Karakuş, S., Özsoy-Özbay, A. E., Yazgan, A. U., Taşaltın, N., & Kilislioğlu, A. (2020). Application of novel synthesized nanocomposites containing κ-carrageenan/PVA/eggshell in cement mortars. *Materiales de Construccion*, *70*(340), 1–14.

[99] Hassan, T. A., Rangari, V. K., & Jeelani, S. (2014). Value-added biopolymer nanocomposites from waste eggshell-based CaCO 3 nanoparticles as fillers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *2*(4), 706–717.

[100] El-Nahhal, I. M., Salem, J. K., Okal, H. Z. L., Kodeh, F. S., & Elmanama, A. A. (2022). Waste eggshell-derived CaO-Ag composite and Ca(II) Curcumin Complex antimicrobial materials. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *101*(2), 370–379.

[101] Lashkarizadeh, F. (2021). Green synthesis of ZnO/eggshell nanocomposite using ferulago macrocarpa extract and its photocatalytic and antimicrobial activity in water disinfection. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, *0*(0), 1–12.

[102] Gupta, P. K., Palanisamy, S., Gopal, T., Rajamani, R., Pandit, S., Sinha, S., & Thakur, V. K. (2021). Synthesis and characterization of novel fe3 o4 /pva/eggshell hybrid nanocomposite for photodegradation and antibacterial activity. *Journal of Composites Science*, *5*(10), 1–9.

[103] Aghaee, M., & Manteghi, F. (2023). *A Modified Silver–Egg Shell Nanocomposite Applied for Antibacterial Activities*. 80.

[104] Oukal, H. Z. L. (2019). *Adsorption of Curcumin and Silver-Nanoparticles by Using Eggshells Powder*.

[105] Wang, S., Lv, F., Jiao, T., Ao, J., Zhang, X., & Jin, F. (2015). A Novel Porous Carrier Found in Nature for Nanocomposite Materials Preparation: A Case Study of Artemia Egg Shell-Supported TiO2 for Formaldehyde Removal. *Journal of Nanomaterials*, *2015*.

[106] Ali, M., & Badawy, W. (2017). Utilization of Eggshells By-Product as A Mineral Source for Fortification of Bread Strips. *Journal of Food and Dairy Sciences*, *8*(11), 455–459.

[107] Ferreira, J. R. M., Da Rocha, D. N., Louro, L. H. L., & Prado Da Silva, M. H. (2014). Phosphating of calcium carbonate for obtaining hydroxyapatite from the ostrich egg shell. *Key Engineering Materials*, *587*, 69–73.

[108] Irokanulo, E. O., Nwonuma, C. O., & Chukwudi, F. C. (2017). In vitro Antimicrobial Potential of Coturnix japonica Egg Shell and Membrane Powder. *Natural Products: An Indian Journal*, *14*(1), 1–10.

[109] Syafaat, F. Y., & Yusuf, Y. (2018). Effect of ca:P concentration and calcination temperature on hydroxyapatite (HAp) powders from quail eggshell (coturnix coturnix). *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, *11*, 51–58.

[110] Boldaji, H. S., & Sheishi, P. G. (2021). *Egyptian Journal of Veterinary Sciences*. *52*(3), 373–378.

[111] Dupoirieux, L., Pourquier, D., Neves, M., & Te, L. (n.d.). *Scientific Foundations.*

[112] Sangmala, A. (2021). *Replacement of hydroxyapatite from chicken eggshell waste for ceramic properties improvement*. *July*, 2132–2142.

[113] S Hossain, S. S., & Roy, P. K. (2020). Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, *8*(4), 984–1009.

[114] Ho, W. F., Hsu, H. C., Hsu, S. K., Hung, C. W., & Wu, S. C. (2013a). Calcium phosphate bioceramics synthesized from eggshell powders through a solid state reaction. *Ceramics International*, *39*(6), 6467–6473.

[115] N Kaya Kınaytürk, N., Kalaycı, T., & Tunalı, B. (2021). Experimental and computational investigations on the molecular structure, vibrational spectra, electronic properties, and molecular electrostatic potential analysis of phenylenediamine isomers. *Spectroscopy Letters*, *54*(9), 693–706.

[116] Kalayci, T., Türköz Altuğ, D., Kaya Kinaytürk, N., & Tunali, B. (2023). Quantum Chemical Calculations of m-Toluidine and Investigation of Its Adsorption on Eggshells. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *16*(1), 169–183.

[117] Rápó, E., Aradi, L. E., Szabó, Á., Posta, K., Szép, R., & Tonk, S. (2020). Adsorption of Remazol Brilliant Violet-5R Textile Dye from Aqueous Solutions by Using Eggshell Waste Biosorbent. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–12.

[118] Li, X., Liu, Y., Su, L., & Xin, L. (2021). Adsorption properties of modified eggshell on phosphorus in water. *E3S Web of Conferences*, *252*.

[119] Mohd Norsham, I. N., Baharin, S. N. A., Raoov, M., Shahabuddin, S., Jakmunee, J., & Sambasevam, K. P. (2020). Optimization of waste quail eggshells as biocomposites for polyaniline in ammonia gas detection. *Polymer Engineering and Science*, *60*(12), 3170–3182.

[120] Koşarsoy Ağçeli, G. (2022). Development of ostrich eggshell and nano-levan-based edible biopolymer composite films: characterization and bioactivity. *Polymer Bulletin*, *79*(12), 11201–11215.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 367-375, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1499645
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi - Review Article

Altınotu (Helichrysum italicum Mill.): Yetiştiriciliği ve Kullanım Alanları

Immortelle *(Helichrysum italicum* Mill.*):* Cultivation and Usage Areas

Selim Taşgın[1*], Zehra Aytaç[2]

Geliş / Received: 11/06/2024 ***Revize / Revised: 04/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 06/10/2024***

ÖZ

Altınotu bitkisi *Asteraceae* familyasının *Helichrysum* cinsine ait yarı çalımsı çok yıllık bir bitkidir. *Helichrysum italicum* Mill. Türkiye florasında olmamasına rağmen tipik bir Akdeniz bitkisidir. Dünya'da Hırvatistan, Bosna-Hersek, Arnavutluk ve Fransa'da yetiştiriciliği yapılmakla birlikte Türkiye'nin değişik illerinde de yetiştiriciliği yapılmaktadır. *H. italicum* kuru, kumlu ve kayalık bölgelerde doğal olarak yetişmektedir. Bitki yüksek yaz sıcaklıklarına ve kuraklığa dayanıklıdır. *H. italicum* hem generatif hemde vejetatif olarak çoğaltılabilmektedir. Ancak tohumları çok küçük olduğu için tohumların viyol ya da kasalara ekilmesi önerilmektedir. Vejetatif olarak ise 1 yıllık sürgünlerden alınan çelikler kullanılmaktadır. Fideler dikildikleri yıl verimleri genellikle düşük olmaktadır. En yüksek verim 3-6. yıllar arasında alınmaktadır. Ortalama taze herba verimi 700-800 kg/da, uçucu yağ verimi ise 0,8-1,2 kg/da arasında değişmektedir. Uçucu yağın önemli bileşenleri nerol, neril asetat, rosifiliol, selinen ve kurkumin türevleridir. *Helichrysum* cinsleri tarih boyunca geleneksel halk hekimliğinde kullanılmıştır. Genellikle diüretik ve safra düzenleyici olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında antimikrobiyal, antibakteriyal, antiviral, antifungal, antioksidan ve antiinflamatuar etkileri olduğu da bilinmektedir. *H.italicum* bitkisinin uçucu yağları kozmetik sektöründe ve parfümeri sanayinde de kullanılmaktadır. Güney Asya ve Orta Doğu'da et yemeklerinde, taze peynirlerde ve salatalarda köri aroması olarak kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Helichrysum italicum, uçucu yağ, üretim, verim, kullanım alanları

ABSTRACT

The immortelle plant is a semi-shrub perennial plant belonging to the *Helichrysum* genus of the Asteraceae family. Although *Helichrysum italicum* Mill. is not found in the flora of Türkiye, it is a typical Mediterranean plant. Moreover, it is grown in Croatia, Bosnia-Herzegovina, Albania, France, and different regions of Türkiye. *H. italicum* grows naturally in dry, sandy, and rocky areas. The plant is resistant to high summer temperatures and drought. *H. italicum* can be propagated both generatively and vegetatively. However, since the seeds are very small, it is recommended to plant them in seedlings trays or boxes. For vegetative propagation, cuttings taken from one-year-old shoots are used. The yield of seedlings is usually low in the first year they are planted. The highest yield is obtained between the 3rd and 6th years. The average fresh herb yield ranges between 700-800 kg per decare, and the essential oil yield varies between 0.8-1.2 kg per decare. Major constituents of the essential oil include nerol, neryl acetatet, rosifoliol, selinene, and derivatives of curcumen. Species of the *Helichrysum* genus have been

[1]* Sorumlu yazar iletişim: selim-tasgin@hotmail.com (https://orcid.org/0000-0001-8606-0626)
Tarla Bitkileri Bölümü, Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü, Eskişehir-Türkiye
[2]İletişim: zehrak@ogu.edu.tr (https://orcid.org/ 0000-0002-8663-093X)
Tarla Bitkileri Bölümü, Eskişehir Osmangaazi Üniversitesi, Eskişehir-Türkiye

historically utilized in traditional folk medicine. They are predominantly employed as diuretic and choleretic agents. Additionally, they have been reported to possess antimicrobial, antibacterial, antiviral, antifungal, antioxidant, and anti-inflammatory properties. The essential oils of H. italicum are also widely used in the cosmetics and perfumery industries. Furthermore, in South Asia and the Middle East, they are employed as a curry-like flavoring in meat dishes, fresh cheeses, and salads.

Keywords- Helichrysum italicum, essential oils, production, yield, usage areas

I. GİRİŞ

Helichrysum cinsi Asteraceae familyasından yarı çalımsı, otsu çok yıllık bir bitkidir. Bitkinin boyu yaklaşık 30-70 cm dir. *Helichrysum* cinslerinin gövdeleri tüylü ve bu tüyler yün veya keçe şeklindedir. Yaprakları ise düz, tam ve basit şeklinde ters mızrak, uca doğru düz şekilde genişleyen spatula formunda ya da almaşıklı yapıdadır. Çiçekleri gövdenin üst kısmında tek bir korimbus şeklinde olup, küre şeklinde tabanı yukarıda olan ters üçgen veya dairesel, disk şeklinde olup; boyu 3-12 mm arasında değişmektedir. Brakteler çevresel olarak dizilmiştir. Çiçekler solup gittiklerinde şekil değiştirir ve renkleri daha az canlı hale gelir. Brakteler beyaz, saman renginde, sarı-turuncu veya kırmızı renktedir. Brakteler renklerini kaybetmezler. Çiçekler düzenli veya çok az düzensiz üst üste binmiş şekilde dizilmiştir. Çiçek tablası ise düz ve çıplaktır. Çiçekler hermafrodit ya da kenarlarında bir sıra dişi çiçek şeklinde bulunmaktadır. Tohumları çok az yayvan ve daire şeklindedir [1,2,3,4,5]. *Helichrysum*'un güçlü kökleri sayesinde zorlu koşullara adapte olmuştur. En güçlü güneş, su eksikliği ve şiddetli rüzgarlar ona zarar veremez. Her ilkbaharda çıplak kayalardan büyür ve hayatta kalır [6].

Helichrysum cinsinin dünyada yaklaşık olarak 600'e yakın türü bulunmaktadır. Türkiye florasında ise 21 türün 15'i endemiktir [1,2,3,4,7,8,9,10]. Türkiye'de bu cinsin % 55'i endemik olup özellikle *Helichrysum arenarium*, *Helichrysum armenium* ve *Helichrysum plicatum* gibi türlerin çok sayıda alttürü bulunmaktadır. Bu durum ise Anadolu'nun *Helichrysum*'ların gen merkezi konumunda olduğunu göstermektedir [3].

Dünya'da yaklaşık 3 ton altınotu uçucu yağı üretimi yapıldığı tahmin edilmektedir. Üretimlerin büyük bir kısmını Hırvatistan, Bosna-Hersek, Arnavutluk ve Fransa yapmaktadır. Ülkemizde ise altınotu üretim alanları hakkında veri bulunmamasına rağmen Manisa, İzmir, Burdur, Ankara, Balıkesir, Çanakkale, Kütahya, Afyonkarahisar ve Isparta illerinde üretimi yapıldığı tahmin edilmektedir [11].

Helichrysum yunanca kökenli olup "Helios" güneş ve "krysos" altın anlamındadır. "Altuni güneş" adı, kuvvetli sarı renkteki çiçeklerinden gelmektedir. Ayrıca, *Helichrysum* bitkisinin adının, derin köklere sahip olan bu bitkinin dayanıklılığından kaynaklandığı da muhtemeldir. Diğer Avrupa dillerindeki isimleri İtalyanca'da "perpetuino" ve "semprevivo", Fransızca'da "immortelle", İngilizce'de "curry plant", "immortelle" ve "everlasting", İspanyolca'da ise "siempreviva" olarak bilinir [5]. Türkiye'de *Helichrysum* türleri farklı isimlerle anılmaktadır. Genel olarak Ölmez Çiçek, Alay Çiçeği, Altınbaşak, Altın Çiçeği, Altın Otu, Arı Çiçeği, Bozoğlan, Herdemtaze, Kovan Otu, Kudama, Leblebi Çiçeği, Mantı Çiçeği, Mantıvar, Mantuvar Çiçeği, Sarı Çiçek, Sarı Savran, Yayla Çiçeği, Yayla Gülü, Yayla Otu, Yılan Gülü gibi isimlerle de anılmaktadır [7,12].

Helichrysum italicum Mill. tipik bir Akdeniz bitkisidir. *H.* türünün farklı alt türleri bulunmaktadır. Akdeniz adalarında *Helichrysum italicum* subs. *microphyllum* (Wild.) Nyman, İber yarımadasında *Helichrysum italicum* subsp. *serotinum* (Boiss.) Fourn., Akdeniz havzasında *Helichrysum italicum* subsp. *italicum;* Fransa, Italya, Portekiz, İspanya'da *Helichrysum italicum* subsp. *picardii;* Argentario, Gargano, Conero Dağında (İtalya) *Helichrysum italicum* subsp. *pseudolitoreu*; *Sicilya'da Helichrysum italicum subsp. Siculum* 'da yayılış göstermektedir [5, 13].

II. *HELICHRYSUM ITALICUM* İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR VE KULLANIM ALANLARI

A. Yetiştiricilik Üzerine Araştırmalar

H. italicum uçucu yağının bileşimi bitkinin yetiştirildiği toprağa, rakım seviyesine, iklim koşullarına, yağışa ve hasat zamanına bağlı olarak değişmektedir [14]. *Helichrysum italicum* Mill. bitkisi Akdeniz bölgesinin kuru, kumlu ve kayalık bölgelerinde doğal olarak yetişen kserofitik bir tür olup, 0- 2200 m arasındaki rakımlarda yetişebilmektedir [15]. Bitki gün uzunluğu bakımından nötr gün bitkisidir ve 5,8-6,2 toprak pH'sı arasında daha iyi yetişmektedir [16]. Altınotu yüksek yaz sıcaklılarına ve kuraklığa dayanıklı olup en sert kış koşullarında da yetiştiriciliği yapılan bir bitkidir [17].

H. italicum, hem generatif hem de vejetatif olarak çoğaltılmaktadır [15,16]. Altınotu bitkisinin tohumları çok küçüktür. 1000 tane ağırlığı 0,027-0,031 g olup 1 g tohumda yaklaşık 32.000-37.000 tohum bulunur ve bunların yaklaşık %50'si çimlenmektedir [11,15]. Tohumlar fide üretimi için viyol ya da kasalara tohum ekimi yapılarak çimlendirilir. Yetişen fideler 3-4 yapraklı dönemde tarlaya şaşırtılır. Altınotu bitkisinde yabancı döllenme görüldüğünden dolayı bitkiler arasında morfolojik olarak farklılıklar olabilir [11].

Vejetatif çoğaltımında, Mart ayında ya da güz ayında 1 yıllık sürgünlerden alınan çeliklerin dikimleri viyollere dikimleri yapılır. Viyollere dikilen çelikler yaklaşık 8-10 gün içerisinde köklenmeye başlamaktadır. Çelikleri köklendirmek için köklendirme hormonu uygulamaya gerek yoktur [11,16]. Köklenen çelikler 1 ay içerisinde araziye dikim için uygun hale gelmektedir. Köklü fidelerin dikimi iklim şartlarına göre Ekim- Kasım ya da Mart- Nisan aylarında yapılabilir [10]. Fidelerin dikimi 50-90 cm sıra arası ve 30-40 cm sıra üzeri mesafelerde gerçekleşir [11,15,18,19].

Fidelerin dikimi sonrasındaki ilk yıl verimleri genellikle düşük olur. Ancak ikinci yıldan itibaren verim kademeli olarak artmakta ve en yüksek verim 3-6. yıllar arasında alınmaktadır [11,18]. Bitki kuraklığa dayanıklı olsa da ilk yıl sulama yapılması önerilmektedir ve sonraki yıllarda kurak iklim şartlarında yapılacak sulamanın verimi artırdığı bildirilmiştir [17].

Altınotunda hem verimin hem de kalitenin yüksek olması için düzenli bitki besleme önerilmektedir. Bu sayede hem verim hem de kalite artışı sağlanmaktadır [17]. Bitki gübrelemeye ihtiyaç duymamakla birlikte yılda 5 kg/da azot ve fosfor uygulaması ile bitkiden tatminkar bir verim alınabilir [20].

Son yıllarda *H. italicum*'un organik yetiştiriciliği önem kazanmıştır. Organik üretimde gübreleme, yeşil gübre, organik kökenli ve doğal mineralli gübreler kullanılmaktadır [17]. Yapılan çalışmalarda *H. italicum* yetiştiriciliğinde sıvı organik gübre, yarasa ve doğal tatlı su gölü sapropelin'in verim ve kaliteyi olumlu etkilediği bildirilmiştir [17,21].

Hasat bitkinin çiçeklenme döneminde toprak seviyesinden 15 -20 cm üstten kesilerek yapılmaktadır. Verim, fidelerin yaşına ve yetiştiği çevre koşullarına göre değişmektedir. Yapılan çalışmalarda elde edilen taze herba verimi 700-800 kg/da ve kuru herba verimi 350-400 kg/da'dır. İyi bakım koşullarında ekonomik olarak bitkiden 8 yıla kadar verim alınabilmektedir. Uçucu yağ verimi 0,8-1,2 kg/da arasında değişmektedir [15,18]. Uşak ve Hatay koşullarında yetiştirilen *H. italicum* bitkileri için en uygun hasat zamanı Uşak koşullarında sonbahar hasadı, Hatay koşullarında yüksek uçucu yağ içeriği elde etmek için ilkbahar hasadı önerilmektedir [22].

Altınotu bitkisinin önemli zararlıların başında *Frankliniella occidentalis Pergande* ve *Macrosiphoniella* cinsi yaprak bitleri gelmektedir. Bu yaprak bitleri genellikle altınotu fidelerinde görülmektedir. Bu cinsler genellikle İtalya'nın Campania ve Lazio bölgelerinde, Bosna Hersek de yetiştirilen altınotu fidelerine önemli zararlar vermektedir [23]. Polonya'da ise *H. arenaria* türünün önemli zararlıları, *Vanessa cardui* L., Lepidoptera takımına ait *Bucculatrix gnaphaliella, Eublemma minutata, Pyrausta aerealis* ve *Coleophora gnaphalii* 'dir [23,24].

B. Uçucu Yağ Üzerine Araştırmalar

Helichrysum türleri, farklı ekotipler de farklı kemotipleri bulunmaktadır. Yapılan kimyasal çalışmalarda *Helichrysum* türlerinin geniş bir metabolit dizisini sentezledikleri bildirilmiştir. Bu özelliklerinden dolayı farmasötik ve kozmetik uygulamalarda uçucu yağ bileşenleri önemlidir [25]. Yapılan bir çok çalışmada *H. italicum* bitkisinin uçucu yağ oranı % 0,05-0,6 arasında değişmektedir [15,22,26,27,28,29,30,31,32].

Bitkilerdeki ikincil metabolitler bitki genetiği, iklim ve çevresel koşullara bağlıdır. Özellikle aromatik bitkilerin uçucu yağ bileşenleri bir çok faktörden etkilenmektedir [31]. *H. italicum* 'un uçucu yağ bileşenleri nerol ve neril asetat yanında rosifiliol, selinen ve kurkumin türevlerini de içermektedir [12,25,26,30,31,32,33]. Bu bileşenlerin yanında limonen, α–Sedren, α–Pinen, eudesm-5-en-11-ol, β-selinen gibi bileşenler de bulunmaktadır [27,29,31,32,33,34]. Uçucu yağ bileşenlerinde oksijenlenmiş monoterpenler, monoterpen ve seskiterpen hidrokarbonlar bulunmaktadır [27,29,30,31,32]. Ana bileşenleri nerol ve esterleri olan tipler kemotip A (~50%), yüksek miktarda rosifoliol (~%20) içerenler de kemotip B olarak sınıflandırılmıştır. Üçüncü bir kimyasal profil ise seskiterpen hidrokarbonlar β-selinen ve γ-kurkumine içeren uçucu yağlardır [26].

Tyrrhenian (Tiren) *Helichrysum'un* uçucu yağları, *H. italicum* alt türlerinin ve diğer *Helichrysum* türlerinin uçucu yağından önemli ölçüde farklıdır. Bitki yüksek oranda (%25-45) neril esterler (asetat, izobutirat, izovalerat) içeriği ile karakterize edilir. Ayrıca uçucu yağın seskiterpenoid fraksiyonu (yaklaşık %10-20) bisabolen türevi kurkumin, bisabolen sikloadduktları (italicenes) ve eudesmane alkolleri (rosifoliol) içerir. Balkan yarımadasından ve İtalya'nın Adriyatik kıyısından *Helichrysum* yağları çoğunlukla pinenler içerir ve Fransız yetiştiriciliğinde yüksek bir kurkumin (yaklaşık %20) içeriğine sahiptirler [5].

H. italicum uçucu yağının *Aedes* cinsi sivrisineklerin larvaları üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaya göre *Helichrysum italicum* Mill. uçucu yağının larvalar için yüksek toksik etki yaptığı bildirilmiştir [35].

C. Geleneksel Halk Hekimliğinde Kullanımı

Helichrysum cinsine ait taksonlar geleneksel halk hekimliğinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bu taksonlar genel olarak diüretik ve safra düzenleyici etkilerinden dolayı kullanılmaktadır. Bu hastalıkların yanında enfeksiyonlar, yara, soğuk algınlığı ve solunum rahatsızlıkların tedavisinde de faydalanıldığı bildirilmiştir [29,36].

M.Ö. 2.-3. Yüzyıllarda Yunan Theophrastus of Eresos'un "Historia Plantarum" adlı eserinde *Helichrysum* türlerinin tıbbi olarak kullanılabileceğinden bahsedilmiştir. Eserde cinse ait türlerin yanıklarda ve zehirli hayvaların sokması veya ısırmalarının tedavisinde kullanılabileceğini bildirmiştir [5, 37]. *Helichrysum*'un tıbbı özelliklerine dair diğer bir eski kaynakta M.S. 1. yüzyılda Yunan Pedanius Dioscorides tarafından yazılan dördüncü kitabında *Helichrysum* çiçeklerinin idrar söktürücü, idrar yolu rahatsızlıkları, yılan ısırıkları, siyatik ve fıtık tedavilerinde kullanılmasıdır [38]. Rönesans dönemiyle ilgili olarak, *Helichrysum* türlerinin Güney Afrika'da tıbbi olarak kullanımlarına ait ilk yazılı kayıt, 1727 yılında Hollandalı botanikçi Herman Boerhaave'ye aittir [39]. Napolyon'un Korsika'ya gemiyle dönerken altın otunun kokusuyla yönlendirildiğini ve adayı görmezden evvel kokusunu aldığı bildirilmiştir [5]. *Helichrysum italicum*'un tıbbi özelliği ile ilgili ilk klinik çalışmayı Leonardo Santini 20. yy'da sedef hastalığına karşı yapmıştır [35].

Helichrysum türlerinin ülkemizin farklı bölgelerinde farklı amaçlarda kullanılmaktadır [38,39]. Ülkemizde idrar ve safra arttırıcı ve idrar söktürücü, böbrek hastalıklarına karşı ve böbrek taslarının düşürülmesinde, karın, böbrek ve mide ağrılarına karşı, kalp atışlarındaki düzensizliğe, karaciğer ve safra rahatsızlıklarına, sarılığa karşı, yaraların ve yanıkların, el ve ayaklardaki çatlakların iyileştirilmesinde, ishale karşı, astım tedavisinde, kulak ağrısında kullanıldığı bildirilmiştir. Özellikle ülkemizde doğal olarak yetişen *Helichrysum* türleri böbrek taşının düşürülmesi için halk arasında çayı yapılarak kullanılmaktadır. Tüm bu özellikleri bu türün içerdiği flavanoidlerden kaynaklanmaktadır [7].

H. italicum zeytinyağı ile karıştırılarak güneş, ateş yanıkları için ve yara iyileşmesi için dermatolojik tedavide kullanılır. Veteriner hekimliğinde, eşeklerde öksürüğün tedavisinde, atlarda ve eşeklerde eklem rahatsızlıklarında kullanılmaktadır [5].

D. Modern Tıp Alanında Kullanımı

Leonardo Santini, *Helichrysum* ile ilgili modern çalışmaların öncüsü olarak kabul edilir. Santini'nin *Helichrysum'la* ilgisi, William Withering'in *Digitalis purpurea'nın* özelliklerini tesadüfen keşfetmesine benzemektedir. Withering'in köydeki yaşlı bir kadın tarafından yüksük otunun özellikleri anlatması gibi, Santini de bir katırcının, eşeklerinin öksürüğünü "canugioro" (*H. italicum*) kullanarak başarıyla tedavi ettiğini öğrenmesi Santini'yi bu bitkinin iyileştirici özelliklerini araştırmaya teşvik etmiştir. Santini, Helichrysum dekoksiyonlarıyla bronşit ve astım öksürüğü çeken hastalarında denemeler yapmış ve bu hastaların sadece solunum sorunlarının değil, aynı zamanda sedef ve artrit gibi diğer rahatsızlıklarının da iyileştiğini gözlemlemiştir [5].

Santini, 1930'ların sonlarında *H. italicum* dekoksiyonları ve şurupları ile deneyler yapmaya başlamış ve bulgularını 1949 ile 1953 yılları arasında yayınlamıştır. Santini *Helichrysum'un* klinik aktivitesinin, o dönemde zor bulunan bir ilaç olan kortizona benzer olduğunu belirlemiştir. Ayrıca hayvan deneylerinde insulin duyarlılığı artıcı bir aktivitesini bildirmiştir. Önerilen kortizon benzeri bileşiğe helichrysin adı verildi, ancak kimyasal olarak hiçbir zaman karakterize edilmediğini bildirmiştir. Santini, yüzlerce sedef hastasını başarıyla tedavi etmiş ve bu bulgular 1950'lerde yapılan iki bağımsız klinik çalışma tarafından doğrulanmıştır. 1995 yılında yapılan küçük bir çalışma, sedef hastalığı tedavisinde %5'lik bir dekoksiyonun kullanılmasını desteklemiş ve tüm katılımcıların üç haftalık tedavi sonrasında iyileştiğini göstermiştir. Ayrıca *Helichrysum* dekoksiyonunun alerjik Rinit için Aerosolize tedavisinde ve *Helichrysum* merheminin ise güneş, ateş yanıklıkları, soğuk yanıkları, kronik venöz yetmezlik, varis ve hemoroidlerin tedavisinde olumlu sonuçlar verdiğini bildirmiştir. *Helichrysum arenarium'dan* elde edilen ekstrakt topikal eski Sovyetler Birliği'nde radyasyon yanıklarının tedavisi kullanılmıştır [5].

Helichrysum türlerinin genel olarak antikarsinojen, karsinojen, genotoksik, antimikrobiyal, antibakteriyal, antiviral, antifungal, antioksidan, antiinflamatuar ve larvisidal etkileri olduğu bilinmektedir [42,43].

Helicrysum ceres türünün kök ve yaprakları erkek Sprague-Dawleyf farelerine verildiğinde farelerin idrar akış hızlarında artış olduğu ve idrar Na^+ atılımında ve diürezde önemli ölçüde artış olduğu bildirilmiştir [44]. *H. stoechas* bitkisinin ekstraktının taş oluşumunu azalttığı, ayrıca ekstrakt gruplarında idrar örneklerinin ürik asit ve oksalat düzeylerinde azalma ve idrar sitrat düzeylerindeki yükselme olduğu bildirilmiştir [45].

Antibiyotiklere karşı bakteri direnci önemli bir halk sağlığı sorunudur. İnsan ve hayvan sağlığında bol miktarda kullanılan antibiyotiklerin seçici baskısı altında dirençli bakterilerin ortaya çıktığı ve bu dirençli bakterilerin farklı şartlarda yayıldığı bilinmektedir. Bu gibi sebeplerden dolayı araştırmalarda yeni arayışlara yönelim oluşmuştur. Bu bağlamda bitki uçucu yağları, antibiyotike dirençli bakteri ve dayanıklı mantar türlerine karşı kuvvetli antimikrobiyal aktivite göstermektedir. Ayrıca uçucu yağlar antimikrobiyal olarak, doğal kökenli olması nedeniyle insanlar ve çevre için daha fazla güvenilirdir. Diğer bir önemli nokta da patojenik mikroorganizmaların uçucu yağların antimikrobiyal etkileri nedeniyle direnç gelişimlerinin zayıflamasıdır [28].

Tablo 1. *Helichrysum* Türlerinin Antibakteriyel Etkileri

Bakteri Türü / Bitki Türleri	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Kaynak
H. arenarium	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+								7,42,45, 46, 48
H. plicatum	+				+					+	+	+	+								7,46,
H. *stoechas*	-	+							+							+	+				48,49,50
H. italicum	-	+			+	+						+		+			+	+	+		28,34,46,51,52, 53
H. sanguineum	+	+	+		+	+		+													48
H. lacteum	+				-										+		+			-	54
H. graveolens	+																				46

1-Staphylococcus aureus 2-Bacillus cereus,3-Listeria monocytogenes,4-Salmonella typhimurium, 5-Escherichia coli, 6-Micrococcus luteus, 7-Pseudomonas tolaasii, 8-Salmonella enteritidis, 9-Staphylococcus epidermidis, 10-Morganella morganii, 11-Mycobacterium smegmatis, 12-Proteus mirabilis, 13-Yersinia enterocolitica, 14-Enterococcus cereus, 15- Pseudomonas syringae, 16- Enterobacter coleacae, 17- Klebsiella pneumonae, 18- Bacillus subtilis, 19- Pseudomonas aeruginosa 20- Shigella sp.

Tablo 2. *Helichrysum* Türlerinin Mantarlar Üzerine Etkileri

Mantar Türü / BitkiTürleri	1	2	3	4	5	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	Kaynak
H. arenarium	-	-	+	+	+	+	+							42,47
H. italicum		+	-					-	+	+	+			34,51,52,53
H. *stoechas*			+									-	-	50

1-*Aspergillus flavus, 2-Aspergillus niger, 3-Candida albicans, 4-Candida parapsilosis, 5-Penicillium fumiculosum,6-Cladosporium cladosporioides, 7-Trichoderma viride 8-Saccharomyces cerevisiae* ATCC 9763 9- *Fusarium solani var. coeruleum* 10- *Alternaria alternata* 11- *Ascochyta rabiei 12- Candida tropicalis 13- Torulopsis glabrata*

+ Etkili
- Düşük etkili

E. Süs bitkisi olarak kullanımı

Çiçeklerinin altın sarısı renginden dolayı park ve bahçelerde süs bitkisi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Anadolu'da bitkinin çiçekleri kurutularak evlerde süs bitkisi olarak kullanıldığı bilinmektedir [32].

Kentsel alanlarda yeşil çatıların birçok faydaları vardır. Sürdürülebilir yeşil çatı inşaatı olumsuz çevre şartlarını azaltmaktadır. Bunun için bu alanlarda birçok malzeme ve bitki kullanılmaktadır. Ancak *Helichrysum* türleri alt katman derinliği yeterli olmadığından yeşil çatı inşaatlarından kullanılması önerilmemiştir [55].

F. Helichrysum italicum bitkisinin aromaterapi ve kozmetik alanlarında kullanımı

Helichrysum uçucu yağı, çeşitli bölgelerden (Balkan Yarımadası, Ukrayna, Korsika, Sardunya, Provans ve İspanya) elde edilir ve bir zamanlar pipo tütünlerinin aromatizasyonunda da kullanılmıştır. *Helichrysum* aromaterapi, parfümeri ve kozmetikte artan popüleritesinin yanında 1990'ların Balkan savaşlarıyla ilgi daha da artmıştır. Bu artan talep ile birlikte bitki materyali kıtlığına yol açtı ve bu da özellikle Korsika ve Sardunya'da Batı Akdeniz bölgesinde tarımı ve doğadan toplanmayı teşvik etti. *H. italicum* yağının aromaterapide kullanımı Fransa'da başlamış ve aromaterapist ve yazar Kurt Schnaubelt tarafından İngilizce konuşulan ülkelerde popüler hale getirilmiştir. Schnaubelt, pinen zengin yağlar ve neril ester zengin yağlarının birçok kullanımını birbirinin yerine kullanılabilir olarak görmektedir [5,56].

H. italicum bitkisinden elde edilen uçucu yağların cilt yenilenmesine ve yara iyileşmesine yardımcı olduğunu bildirmiştir. Voinchet ve Giraud-Robert (2007) [57] göre *H. italicum* uçucu yağı ile Rosa rubiginosa yağının masere edilerek kozmetik ve cerrahi sonrası iyileştirmelerini araştırmışlar. Çalışmada *H. italicum* 'un uçucu yağının ana bileşeni olan neril asetatın ağrıların giderilmesine katkıda bulunduğu ve bu bileşenin antihematon (kan toplanmayı önleyici) özelliğinden dolayı olduğu bildirilmiştir. Bu özelliğinden dolayı Aromaterapi'nin Süper Arnikası olarak isimlendirilmektedir. Yüzdeki kızarıklıkları, kan toplanması ve ciltteki morarmalara karşı kullanılacağı ifade edilmiştir.

Tablo 3. *H. italicum* bitkisinin Aromaterapi'de kullanımı [58]

Sistem	*Helichrysum italicum'un* karışım yapıldığı uçucu yağlar
Deri (egzama, enflamasyon, yara iyileştirici)	Lavanta, Roman Papatyası, Geranium, Civanperçemi, Vetiver, Paçuli, Sandalağacı, Selvi ve Gül yağı. Direkt veya (10-50%) oranda seyreltilerek kullanılabilir
İmmün (Allerjik)	Gül, Sandalağacı, Alman papatyası

H. italicum birçok kozmetik preparatın içerisinde bulunmanın yanında içerdiği uçucu yağlardan dolayı parfümlerin içerisinde de bulunmaktadır. *Helichrysum italicum* bitkisinden hazırlanan kremlerin cilt yaşlanmasını önleyici etkisiyle kozmetik ürünlerinin içerisinde yer aldığını bildirilmiştir [32].

H. italicum bitkisinin kokusu gül, egzotik ve baharatlı olarak tanımlanan kokusuyla ünlüdür. Kendine özgü kokusu, MS 1. yüzyılda Pliny the Elder tarafından Naturalis Historia, adlı eserinde bitkinin kokusunu rahatsız edici olmadığı ve giysileri güvelerden koruyabildiğinden bahsetmiştir [5].

H. italicum türünün çiçekleri ve yaprakları derin, tatlı, zengin, dumanlı, bal benzeri, sıcak, odunsu, baharatlı bir kokuya sahiptir. Esansiyel yağlar ve mutlak benzersiz koku profilleri sayesinde parfümeride değerlidir. H. italicum içeren doğal parfüm, deniz, sıcaklık ve yaz anılarını çağrıştırmaktadır. Çiçeksi bir notaya sahip olmasına rağmen kokunun gücü ve "rengi" nedeniyle neredeyse alt notalara uygun görünmektedir. Parfüm içerisine çok az miktarda katılmalı ve *Chamaemelum nobile, Cistus ladanifer, Lavandula angustifolia, Evernia prunastri, Pelargonium graveolens, Rosa damascena, Salvia sclerea, Eugenia caryophyllata* ve narenciye yağları ile uyum sağlamaktadır [59].

H. italicum bitkisinden elde edilen hidrosol, damıtıldıktan sonra sıklıkla atılırdı. Ancak son birkaç yılda yaygın olarak kullanılmaya başlandı. *H. italicum* hidrosol, şişlikleri tedavi etmek için kompres olarak, ağrılı adet krampları için oturma banyolarında, karaciğeri dahili olarak temizlemek için, diş eti iltihabıyla mücadele etmek için gargara olarak ve olgun ciltler için cilt bakımında tonik olarak kullanılabilir. Ameliyatlardan sonra çok faydalıdır çünkü iyileşmeyi hızlandırır ve şişliği azaltır, aynı zamanda karaciğeri anesteziden arındırır [60].

G. Gıda Biliminde Kullanım ve Uygulamalar

Helichrysum cinsine ait taksonların genellikle Afrika'da genellikle yaprakları pişirilerek yenildiği bildirilmiştir [61]. *H. italicum* türü köriye yakın tadı nedeniyle yemeklerde kullanılır. Bitki Hint baharat karışımı

olan körinin içerisinde kullanılmamaktadır, ancak kokusu benzemektedir. Yaprakları birçok yemekte hoş koku vermektedir. Güney Asya mutfaklarında ve Orta Doğu et yemeklerinde, taze peynirlerde, salatalarda köri aroması olarak kullanıldığı bilinmektedir [9]. Bitkinin tatlı ve balımsı bir koku yaydığı bilinmektedir [5]. Asya'da Vietnam mutfağında "banh khuc"u yapımında da altınotu bitkisinin filizleri ve fideleri kullanılmaktadır. Ayrıca "miele di spiaggia" olarak bilinen Avrupa ballarının kaynağıdır [11]. Bazı *Helichrysum* türünün uçucu yağı sarımsak sosu, taze yada kuru yaprakları, pirinç, sebze, et ve balık gibi birçok yemekleri lezzetlendirmek için kullanıldığı bildirilmiştir [9].

III. SONUÇ VE ÖNERİLER

Altınotu *(Helichrysum italicum)* bitkisi yarı çalımsı çok yıllık tıbbi ve aromatik bir bitkidir. Bitki kuru, kumlu ve kayalık bölgelerde doğal olarak yetişmekte ve yüksek yaz sıcaklıklarına ve kuraklığa dayanıklıdır. *Helichrysum* cinsleri tarih boyunca geleneksel halk hekimliğinde diüretik ve safra düzenleyici olarak kullanılmıştır.

Çiçeklerinin altın sarısı renginden dolayı park ve bahçelerde ve çiçekleri kurutularak süs bitkisi olarak da kullanılmaktadır. Ayrıca Güney Asya ve Orta Doğu'da yemeklerde de kullanılmaktadır. *Helichrysum* türleri genel olarak antimikrobiyal, antibakteriyal, antiviral gibi etkileri olduğu bilinmektedir. Bu bitkinin türleri farklı ekolojilerde farklı kimyasal özellikler göstermektedir. Yetiştiriciliğinin yapıldığı bölgelerde uçucu yağ oranı %0,05-0,6 arasında değişmektedir. Uçucu yağın ana bileşenleri nerol ve neril asetat dır. Elde edilen uçucu yağlardan cilt yenileme, yara iyileştirme ve cilt yaşlanmasını önleyici kozmetik ürünler ve parfümeri sanayinde kullanılmaktadır.

Bitki hem generatif hem de vejetatif olarak çoğaltılabilmektedir. Dünya'da en fazla altınotu uçucu yağ üretim yapan ülkelerin başında Hırvatistan, Bosna-Hersek, Arnavutluk ve Fransa gelmektedir. Ülkemizde ise altınotu üretimi hızla artmaktadır. *H. italicum* bitkisinden farklı yetiştirme koşullarında farklı uçucu yağ oranı ve bileşenleri açığa çıktığından bitkinin uygun koşullarda yetiştiriciliğinin tespiti için agronomik çalışmaların yapılması ve üreticilere aktarılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Davis, P.H., (Ed.) (1975). "Flora of Turkey and the East Aegean Islands" University Press, Edinburg, Vol.5, s:80-97.
[2] Davis, P.H., Mill R.R., Tan K., (Ed) (1988). "Flora of Turkey and the East Aegean Islands-Supplement" University Press, Edinburg, Vol.10, s:159-160,342.
[3] Öztürk, B. (2004). Türkiye *Helichrysum*'larının Flavonoid ve Uçucu yağ İçerikleri Açısından Karşılaştırması ve Antioksidan, Antimikrobial Aktivite Potansiyelleri. T.C. Ege Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Farmasötik Botanik Anabilim Dalı Programı Doktora Tezi.
[4] Coşkun, M. T. (2019). *Helichrysum Compactum Boiss.(Asteraceae)* Üzerinde Morfolojik, Mikromorfolojik ve Palinolojik Çalışmalar (Master's Thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
[5] Appendino, G., Minassi, A., Pollastro, F., Taglialatela-Scafati, O., Ballero, M., Maxia, A., & Sanna, C. (2015). *Helichrysum italicum*: the sleeping giant of Mediterranean herbal medicine. *Herbalgram*, (105).
[6] Ličina, A., & Kralj, V. R. (2016). Mediterranean Gold—*Helichrysum italicum*. *Corsican Helichrysum*, 5.
[7] Albayrak, S., (2008). Türkiye *Helichrysum Mill.*(Asteraceae) Taksonlarının Biyoaktiviteleri. T.C. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı Doktora Tezi. Kayseri.
[8] Ok, D. (2009). Türkiye *Helichrysum* Mıll. (Asteraceae) Taksonlarının Polen Morfolojileri. T.C Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.
[9] Hassine, D. B., Khlifi, D., Ferhout, H., Raoelison, E. G., & Bouajila, J. (2016). Curry Plant (*Helichrysum Sp.)* Oils. *Essential Oils İn Food Preservation, Flavor and Safety*, 395-403.
[10] İnsel, B. (2019). Piyasada Ölmez Çiçek (*Helichrysum Sp.*) Olarak Satılan Kurutulmuş Bitki Örneklerinin Kalite Parametrelerinin Değerlendirilmesi (Master's Thesis, Sağlık Bilimleri Enstitüsü).
[11] Anonim, (2021). Ölmez Çiçek (*Helichrysum italicum*) Tarımı ve Endüstrisi Fizibilite raporu, BAKA. https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/lmez-cicek-tarimi-ve-endustrisi-fizibilite-raporu.pdf
[12] Eroğlu, H. E. (2018). Türkiye Helichrysum Taksonlarının Türkçe ve Diğer Dillerdeki İsimleri. Avrasya Terim Dergisi, 6(1), 26-34.
[13] Bianchini, A., Tomi, P., Costa, J., & Bernardini, A. F. (2001). Composition of *Helichrysum italicum (Roth) G. Don fil. subsp. italicum* essential oils from Corsica (France). *Flavour and fragrance journal*, *16*(1), 30-34.
[14] Maksimovic, S., Tadic, V., Skala, D., Zizovic, I. (2017). Separation of phytochemicals from *Helichrysum italicum* : An analysis of different isolation techniques and biological activity of prepared extracts. *Phytochemistry*, 138, 9-28.

[15] Miloradovic, Z., Glamoclija, D., Popovic, V., Jovanovic, L., Popovic, S., Ugrenovic, V., & Filipovic, V. (2018). Fresh yield biomass immortelle and essential oils contents depending on the growing locality. In *Proceeding of the Eco-Conference: Ecological Movement of Novi Sad, Novi Sad, Serbia* (pp. 26-28).
[16] Anonymus, (2021). https://www.syngentaflowers-us.com/sites/g/files/zhg721/f/media/2020/03/05/culture_vegetative_curryplant_helichrysumitalicum.pdf.
[17] Jovović, Z., Salkić, B., Velimirović, A., Vukićević, P., & Salkić, A. (2018). Production of immortelle seedlings according to the principles of organic production. *International Journal of Plant & Soil Science*, *21*(6), 1-5.
[18] Pohajda I.. Dragun G.. Puharić-Visković N. (2015). Smilje. Savjetodavna služba. Zagreb.
[19] Čagalj, M., Grgić, I., Zrakić, M., & Ivanković, M. (2019). Economic evaluation (efficiency) of investment in organically grown immortelle [*Helichrysum italicum ssp. italicum*] in Bosnia and Herzegovina. The first report from Mediterranean. *Journal of Central European Agriculture*, *20*(1), 524-541.
[20] Stepanović B, Radanović D, Turšić I, Nemčević N, Ivanec J. (2009). Uzgoj ljekovitog i aromatičnog bilja. Jan-Spider d.o.o.,Pitomača.
[21] Jočić, A., (2017). Efficiency of new liquid fertilizers chap liquid in immortelle plantation production system (*Helichrysum italicum (Roth) G. Don fil.*). *Proceedings conference of agronomy students with international participation*, 451.
[22] Bahadırlı, N. P., Yıldırım, M. U., & Sarıhan, E. O. (2024). Diurnal, and seasonal dynamics in essential oil content and composition of cultivated Helichrysum italicum (Roth) G. Don. *Biochemical Systematics and Ecology*, 117, 104888.
[23] Ostojić, I., Zovko, M., Petrović, D., & Bošnjak, L. (2018). Štetnıcı Smılja [*Helichrysum İtalicum (Roth) G. Don.*] U Plantažnom Uzgoju Na Području Hercegovıne. *Fragmenta Phytomedica*, 32(1), 21-30.
[24] Wrzesińska, D., Sawılska, A, K. (2010). Butterflies infesting dwarf everlast [H*elichrysum arenarium* (L.) Moench]. *Prog. Plant Prot*., Vol. 50, 3: 1322 - 1326.
[25] Perrini R, Morone-Fortunato I, Lorusso E, Avato P. (2009). Glands, essential oils and *in vitro* establishment of *Helichrysum italicum* (Roth) G. Don ssp. *italicum*. *Ind. Crop. Prod*. 29:395-403.
[26] Roussis, V., Tsoukatou, M., Petrakis, P. V., Chinou, I., Skoula, M., & Harborne, J. B. (2000). Volatile constituents of four Helichrysum species growing in Greece. *Biochemical Systematics and Ecology*, 28(2), 163-175.
[27] Bianchini, A., Tomi, P., Bernardini, A. F., Morelli, I., Flamini, G., Cioni, P. L., ... & Marchetti, M. (2003). A comparative study of volatile constituents of two *Helichrysum italicum* (Roth) Guss. Don Fil subspecies growing in Corsica (France), Tuscany and Sardinia (Italy). *Flavour and fragrance journal*, *18*(6), 487-491.
[28] Rossi, P. G., Berti, L., Panighi, J., Luciani, A., Maury, J., Muselli, A., ... & Bolla, J. M. (2007). Antibacterial action of essential oils from Corsica. *Journal of Essential Oil Research*, *19*(2), 176-182.
[29] Kladar, N. V., Anačkov, G. T., Rat, M. M., Srđenović, B. U., Grujić, N. N., Šefer, E. I., & Božin, B. N. (2015). Biochemical characterization of *Helichrysum italicum (Roth) G. Don subsp. italicum* (Asteraceae) from Montenegro: Phytochemical screening, chemotaxonomy, and antioxidant properties. *Chemistry & biodiversity*, *12*(3), 419-431.
[30] Leonardi M, Ambryszewska KE, Melai B, Flamini G, Cioni PL, Parri F, Pistelli L. (2013). Essential-oil composition of *Helichrysum italicum (Roth) G.Don ssp. italicum* from Elba Island (Tuscany, Italy). *Chem Biodivers.* 10(3):343-55. doi: 10.1002/cbdv.201200222. PMID: 23495152.
[31] Melito, S., Petretto, G. L., Podani, J., Foddai, M., Maldini, M., Chessa, M., & Pintore, G., (2016). Altitude and climate influence *Helichrysum italicum subsp. microphyllum* essential oils composition. *Industrial Crops and Products*, *80*, 242-250.
[32] Kılıçarslan, G. (2020). İstanbul Silivri ve İzmir Menemen Bölgesinde Kültürü Yapılan *Helichrysum Italıcum* (Roth) Guss. Don. Bitkisinin Uçucu Yağı Ve Sıvı Ekstrelerinin Karşılaştırılması Bezmialem Vakıf Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Farmakognozi Ve Doğal Ürünler Kimyası Anabilim Dalı Farmakognozi Ve Doğal Ürünler Kimyası Programı Yüksek Lisans Tezi.
[33] Jerković, I., Rajić, M., Marijanović, Z., Bilić, M., & Jokić, S. (2016). Optimization of supercritical CO2 extraction of dried *Helichrysum italicum* flowers by response surface methodology: GC-MS profiles of the extracts and essential oil. *Separation Science and Technology*, 51(18), 2925-2931.
[34] Djihane, B., Wafa, N., Elkhamssa, S., Maria, A. E., & Mihoub, Z. M. (2017). Chemical constituents of *Helichrysum italicum* (Roth) G. Don essential oil and their antimicrobial activity against Gram-positive and Gram-negative bacteria, filamentous fungi and Candida albicans. *Saudi Pharmaceutical Journal*, *25*(5), 780-787.
[35] Viegas, D. A., Palmeira-de-Oliveira, A., Salgueiro, L., Martinez-de-Oliveira, J., & Palmeira-de-Oliveira, R. (2014). *Helichrysum italicum*: From traditional use to scientific data. *Journal of ethnopharmacology*, *151*(1), 54-65.

[36] Rigano, D., Formisano, C., Pagano, E., Senatore, F., Piacente, S., Masullo, M., ... & Borrelli, F. (2014). A new acetophenone derivative from flowers of *Helichrysum italicum (Roth) Don ssp. italicum*. *Fitoterapia*, *99*, 198-203.
[37] Scarborough,J.,(1978).Theophrastus on herbals and herbal remedies. *J. Hist. Biol*. 11, 353–385.
[38] Bahadırlı NP. (2022). Herdemyeşil sanguineum (L.) Kostel'in ticari açıdan genişlemesinin değerlendirilmesi. Tıbbi VeAromatik Bitkilerin Fonksiyonel Kullanım Alanları, Ticareti Ve Sürdürülebilirliği (Ed: Rüveyde Tunçtürk) (İçindeTürkçe).
[39] Yabalak, E., Bahadırlı, N. P., Yetkin, D., Yaldız, F. D., & Han Türkseven, Ç. (2024). Unlocking nature's potential: anticancer potential of Helichrysum sanguineum (L.) Kostel on breast cancer cells and its chemical composition. *International Journal of Environmental Health Research*, 1-13.
[40] Quer, P.F., (1993). Plant as Medicinales, El Dioscórides Renovado,14 th ed. Editoral Labor, S.A., Barcelona.
[41] Lourens, A. C., Viljoen, A. M., van Heerden, F. R., (2008). South African *Helichrysum* species: a review of the traditional uses, biological activity and phytochemistry. *J. Ethnopharmacol*. 119,630–652.
[42] Babotă, M., Mocan, A., Vlase, L., Crișan, O., Ielciu, I., Gheldiu, A. M., ... & Păltinean, R. (2018). Phytochemical analysis, antioxidant and antimicrobial activities of Helichrysum arenarium (L.) Moench. and Antennaria dioica (L.) Gaertn. flowers. *Molecules*, *23*(2), 409.
[43] Albayrak, S., Aksoy, A., Sagdic, O., & Hamzaoglu, E. (2010). Compositions, antioxidant and antimicrobial activities of Helichrysum (Asteraceae) species collected from Turkey. *Food chemistry*, *119*(1), 114-122.
[44] Musabayane, C. T., Munjeri, O., & Mdege, N. D. (2003). Effects of *Helichrysum* ceres Extracts on Renal. *Renal failure*, *25*(1), 5-14.
[45] Onaran, M., Orhan, N., Farahvash, A., Ekin, H. N., Kocabıyık, M., Gönül, İ. I., ... & Aslan, M. (2016). Successful treatment of sodium oxalate induced urolithiasis with *Helichrysum* flowers. *Journal of ethnopharmacology*, *186*, 322-328.
[46] Coşar, G., Çubukçu, B., (1990). Antibacterial activity of *Helichrysum* species growing in Turkey, *Fitoterapia*; LXI: 161–4.
[47] Rančić, A., Soković, M., Vukojević, J., Simić, A., Marin, P., Duletić-Laušević, S., & Djoković, D. (2005). Chemical composition and antimicrobial activities of essential oils of *Myrrhis odorata* (L.) Scop, *Hypericum perforatum* L and *Helichrysum arenarium* (L.) Moench. *Journal of Essential Oil Research*, *17*(3), 341-345.
[48] Aslan, M., Katircioglu, H., Orhan, I., Atici, T., & Sezik, E. (2007). Antibacterial potential of the capitula of eight Anatolian Helichrysum species. *Turk J Pharm Sci*, *4*(2), 71-77.
[49] Chinou, I. B., Roussis, V., Perdetzoglou, D., Tzakou, O., & Loukis, A. (1997). Chemical and Antibacterial Studies of two Helichrysum Species of Greek Origin1. *Planta medica*, *63*(02), 181-183.
[50] Sobhy, E. A., & El-Feky, S. S. (2007). Chemical constituents and antimicrobial activity of *Helichrysum stoechas*. *Asian journal of plant sciences*.
[51] Mollova, S., Fidan, H., Antonova, D., Bozhilov, D., Stanev, S., Kostova, I., & Stoyanova, A. (2020). Chemical composition and antimicrobial and antioxidant activity of Helichrysum italicum (Roth) G. Don subspecies essential oils. *Turkish journal of agriculture and forestry*, *44*(4), 371-378.
[52] Oliva, A., Garzoli, S., Sabatino, M., Tadić, V., Costantini, S., Ragno, R., & Božović, M. (2020). Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Helichrysum italicum* (Roth) G. Don fil. (Asteraceae) from Montenegro. *Natural product research*, *34*(3), 445-448.
[53] Bacıc, A., Prazına, N., Hadzıc-Hasanovıc, V., Dacıc, M., Ajanovıć, A. And Mahmutovıc, O. (2021). Chemıcal Composıtıon and Antımıcrobıal Actıvıty of The Essentıal Oıl Of *Helichrysum İtalicum* (Roth) G. Don From Bosnıa And Herzegovına. *Plant Cell Biotechnology and Molecular* Biology 22(49&50):67-73.
[54] Bouchaala, M., Ramdani, M., Lograda, T., Chalard, P., & Figueredo, G. (2017). Chemical composition, antibacterial activity and chromosome number of *Helichrysum lacteum*, endemic from Algeria. *Int. J. Pharma Res. Health. Sci*, *5*(1), 1539-1545.
[55] Eksi, M., Sevgi, O., Akburak, S., Yurtseven, H., & Esin, I. (2020). Assessment of recycled or locally available materials as green roof substrates. *Ecological Engineering*, *156*, 105966.
[56] Başer, K.H.C. (2015). Ölmezçiçek (Helichrysum Mill.). *Bağ Bahçe* 58: 16-18.
[57] Voinchet V, Giraud-Robert AM., (2007). Utilisation de l'huile essentielle d'hélichryse italienne et de l'huile végétale de rose musquée après intervention de chirurgie plastique réparatrice et esthétique. *Phytothérapie*. 5: 67-72.
[58] Guinoiseau, E., Lorenzi, V., Luciani, A., Muselli, A., Costa, J., Casanova, J., & Berti, L. (2013). Biological properties and resistance reversal effect of Helichrysum italicum (Roth) G. Don. *Microbial pathogens and strategies for combating them: science, technology and education*, *2*, 1073-1080.
[59] Lawless J. (2002). The Encyclopedia of Essential Oils. *London: Thorsons*. p107.
[60] Catty S. (2001). Hydrosols: the next Aromatherapy. *Vermont: Healing Arts Press*. p96–97.
[61] Mathekga, A., Meyer, J.J.M., Horn, M.M., Drewes, S.E., (2000). An acylated phloroglucinol with antimicrobial properties from *Helichrysum caespititium*. *Phytochemistry* 53, 93–96.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
12(1), 376-383, 2025
DOİ: 10.35193/bseufbd.1537475
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi - Review Article

Siyanobakterilerin Gıda ve Gıda Bileşeni Olarak Kullanımı

Use of Cyanobacteria as Food and Food Component

Merve Karakurluk[1*], Tuğba Demiriz Yücer[2]

Geliş / Received: 22/08/2024 ***Revize / Revised: 25/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 27/10/2024***

ÖZ

Mikroalgler zengin biyokimyasal bileşimleri sayesinde hem fonksiyonel kalite hem de besin değeri özelliğiyle geleceğin sürdürülebilir bir gıda kaynağı olarak görülmektedir. Karbonhidrat, lipit, kaliteli protein, vitamin, mineral bileşimi ile çeşitli besinlere göre daha zengin bir içeriğe sahiptir. Buna bağlı olarak antitümör, antihipertansif, antiinflamatuar, antioksidan, antibakteriyal, antiviral, ürünlerin zengin biyoaktif bileşimi gibi faydalı etkiler göstermektedir. Mikroalglerin kullanımı insan gıdalarında bisküvi, atıştırmalık gibi ürünlerde besleyici değerini arttırma, gıdanın yapısını geliştirme; hayvansal ürünlerde ise yemlerin yapısına eklenerek verimliliği arttırma alanlarıdır. Bazı durumlarda ise mikroalglerden elde edilen lipit, protein, vitamin gibi besin bileşenleri toz hale getirilerek besin takviyeleri formunda, pigmentasyon özelliği ile makyaj malzemelerinde yararlanılmaktadır. Bu derlemenin amacı mikroalglerin gıdalarda kullanım alanlarının incelenmesidir.

Anahtar kelimeler- Siyanobakteri, Mikroalg, Nütrasötik, Biyoteknoloji, Fonksiyonel Gıda

ABSTRACT

Microalgae are seen as a sustainable food source of the future with both functional quality and nutritional value thanks to their rich biochemical composition. It has a richer content than various nutrients, with its carbohydrate, lipid, quality protein, vitamin and mineral composition. Accordingly, it shows beneficial effects, such as antitumor, antihypertensive, anti-inflammatory, antioxidant, antibacterial, antiviral, and the rich bioactive composition of the products. The use of microalgae in human foods, such as biscuits and snacks, increases the nutritional value and improves the structure of the food; In animal products, they are areas of increasing productivity by adding them to the structure of feed. In some cases, nutritional components such as lipids, proteins and vitamins obtained from microalgae are pulverized and used in the form of nutritional supplements or in make-up materials with their pigmentation properties. The aim of this review is to examine the uses of microalgae in foods.

Keywords- Cyanobacteria, Microalgae, Nutraceuticals, Biotechnology, Functional Food

[1]*Sorumlu yazar iletişim: merve78.karakurluk@gmail.com (https://orcid.org/0009-0002-2301-1282)
Gıda Toksikolojisi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye
[2]İletişim: tugbayucer@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2494-4511)
Beslenme ve Diyetetik, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

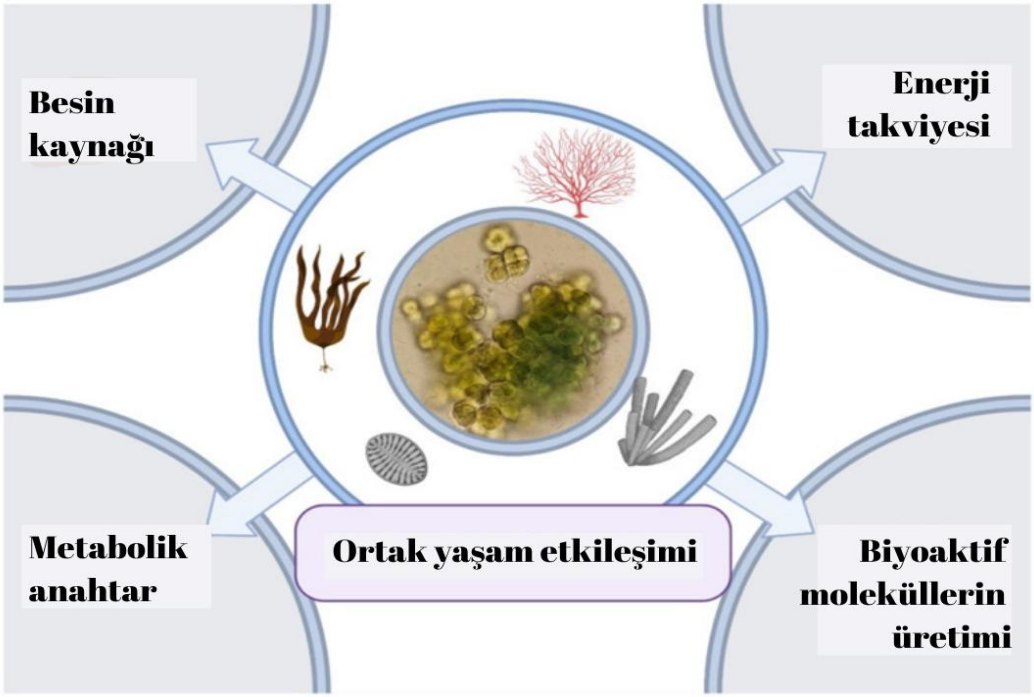
I. GİRİŞ

Siyanobakteriler tatlı su gölleri, okyanuslar, sıcak jeotermal kaynaklar ve karasal ortamlarda bulunan fotosentetik mikroorganizmalardır [1,2]. Mikroalgler, hızlı bir şekilde çoğalabilme ve tek hücreli veya basit çok hücreli yapıları sayesinde olumsuz şartlarda bile yaşayabilmektedir [3]. Mikroalgler, genellikle ototrofik olarak yaşarlar ve pigmentlerini kullanarak fotosentez yaparlar. Fotosentez yaparak, karbondioksit, su ve güneş ışığını biyokütleye dönüştürürler [4]. Mikroalgler *Cyanophyta, Chlorophyta, Rhodophyta, Glaucophyta, Euglenophyta, Chlorarachniophyta, Charophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Heterokontophyta* ve *Dinophyta* olmak üzere on bir şubeye ayrılmıştır [5].

Mikroalgler koruyucu ve pigmentasyon, gıdaların besin içeriğini geliştirme ve ürünlerin teknolojik kullanımını geliştirme özelliklerine sahiptir [6]. En önemlisi, organik madde üretme becerilerinden dolayı yaygın kullanıma sahiptir [7]. Mikroalgler antioksidan benzeri yararlı biyoaktif bileşenler ve toksin olarak nitelendirilen bazı bileşikler de dâhil ikincil metabolitler sentezlemektedir. Siyanobakterilerden 200'den fazla metabolit elde edilmektedir [5].

Siyanobakteriler genel olarak içme suyunda istenmeyen tat ve kokulara sebep olan sosyo-ekonomik değere sahip bileşikler ve aynı zamanda toksinler üretmeleri ile tanınmaktadır [8]. Meydana gelen siyanotoksinler insan sağlığına zararlı etkilere neden olmaktadır [9,10]. Örneğin hepatotoksinler karaciğeri etkiler, dermatotoksinler ciltte tahrişe sebep olur ve nörotoksinler ise sinir sistemine etki etmektedir [11,12].

Siyanobakteriler insan fizyolojisi üzerinde önemli etkilere sahiptir [13]. Siyanobakteriler ve konakçı arasında sinyaller, reseptörler ve kimyasalların etkileşimine bağlı olarak fizyolojik rol oynar [14]. Siyanobakteriler, konağı koruyucu etki gösteren savunma mekanizmalarına sahiptir. Mikrobiyota bileşimi, gelişimi, davranışı, biyoaktif moleküllerin üretimi gibi oluşan bu etkileşimler Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Siyanobakterilerin ortak yaşam etkileşimi [15]

II. MİKROALGLERİN BİYOKİMYASAL BİLEŞİMİ

Mikroalglerin biyokimyasal bileşimi karbonhidratlar, proteinler, lipitler, vitaminler ve minerallerden oluşmaktadır. Siyanobakteriler veya bunların biyomolekülleri önemli vitamin, mineral, protein, çoklu doymamış yağ asiti kaynakları olarak kullanılabilmektedir [16, 17]. Aynı zamanda siyanobakteriler ve ökaryotik mikroalgler antioksidanlar gibi potansiyel açıdan faydalı biyoaktif maddeler ve metabolitleri de sentezlemektedir [18].

Örneğin mikroalg türlerinden olan *Arthrospira*, yüksek kalite protein, linoleik asit içeriği sayesinde antikanser, antioksidan ve antiinflamatuar özelliğe sahiptir. *Chlorella* cinsindeki yeşil algler, amino asit, nükleik asit, vitamin, mineral ve büyüme faktörü sağladığı yapılan çalışmalarda görülmüştür. Tüm bileşimler ile

antioksidan, antibakteriyal ve antitümör etki sergilemektedir. Fakat tüketimine bağlı alerji, mide bulantısı, kusma gibi yan etkilerinden dolayı dikkat edilmesi gerekmektedir [5].

A. Protein

Mikroalglerdeki protein içeriği geleneksel protein kaynaklarına göre kıyaslanabilecek derecededir. Çeşitli siyanobakterilerin protein içeriği %42-70 oranında değişiklik göstermektedir. Mikroalglerdeki proteinlerin kalitesi ise memelilerin sentezleyemediği temel amino asitleri içermektedir. Yumurta albümini ve soya gibi yüksek kalite profiline sahip besinlerdeki amino asit profiline benzerdir [5]. Mikroalgler, diğer proteinli gıdalar ile kıyaslandığı zaman daha yüksek verimlilikte çeşitli protein ürünleri üretmek için metabolik veya genetik olarak tasarlanabilir [19]. Bakteriler, mantarlar, mikroalgler ve yüksek bitkiler, DHA (Dokosaheksaenoik Asit) ve EPA (Eikosapentaenoik Asit)'nın ticari üretimi için potansiyel alternatif kaynaklardır.

B. Karbonhidrat

Mikroalgler glikoz ve nişasta gibi enerji depolama ürünleri ve hücre duvarı yapısal bileşenleri sentezler [5, 19]. Mikroagler karbonhidratların kaynağı açısından faydalı karbonhidratlar içermektedir. Fakat gıdalardaki kullanımı ise oldukça kısıtlıdır [5]. Mikroalg türlerinden *Prymnesium parvum, Scenedesmus quadricauda* yüksek karbonhidrat içeriğine sahiptir. Ayrıca alglerdeki karbonhidrat metabolizması ve bileşimi türden türe farklılık gösterebilmektedir.

C. Lipit

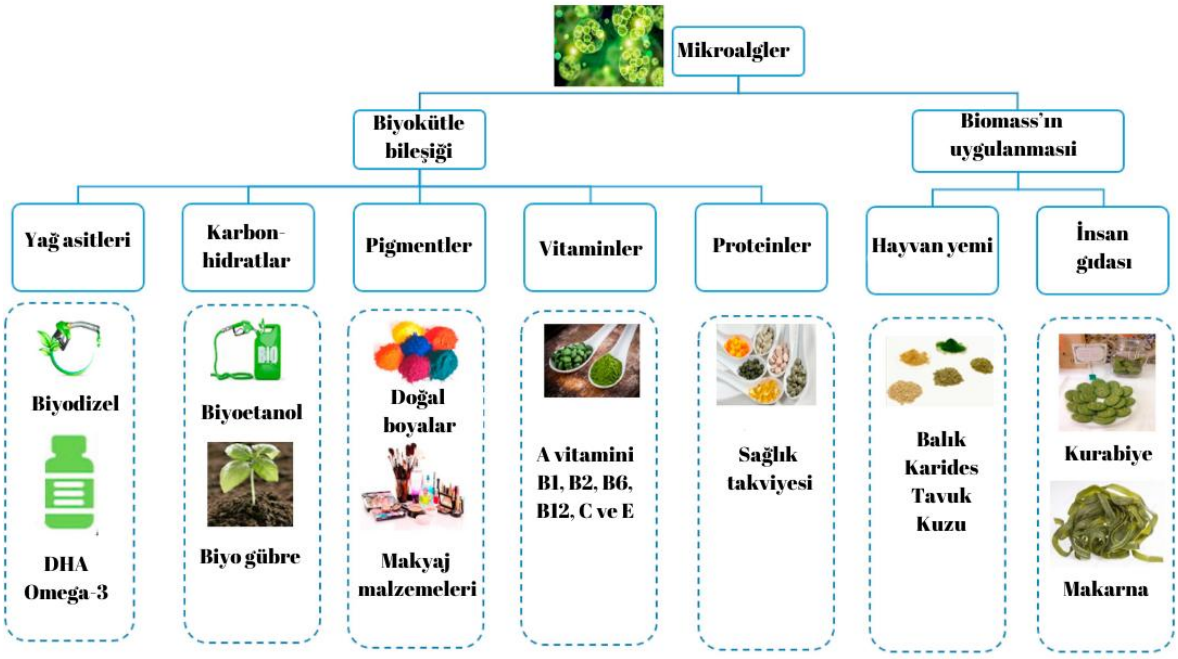
Çoklu doymamış yağ asitleri (omega yağ asitleri) ticari amaçlarla nutrasötikler olarak ve bebek formülasyonlarında zenginleştirici olarak kullanılmaktadır. Mikroalglerin kuru biyokütlesinin %20-50'si lipitlerden oluşmaktadır. Lipit üretimi mikroalg türlerine göre, sentez sırasındaki ışık, pH, sıcaklık, besin mevcudiyeti gibi durumlara göre değişkenlik göstermektedir. Mikroalglerin lipit profili esas olarak asilgliserolleri, serbest yağ asitlerini ve karotenoidleri (örneğin, β-karoten) içeren nötr lipitlerden ve çeşitli fosfolipitler ve galaktolipidler gibi polar lipitlerden oluşur. Mikroalglerin yağ asidi profili genellikle C16 ve C18 doymuş ve doymamış yağ asitleri ve ayrıca birçok omega yağ asidi ile de karakterize edilir. Mikroalgler ayrıca DHA ve EPA ile birlikte alfa-linolenik asit (ALA), gama-linolenik asit (GLA), linoleik asit (LA) ve araşidonik asit (ARA) gibi diğer esansiyel yağ asitlerini de üretir [5].

D. Vitaminler

İnsan vücudu makro elementler (karbonhidrat, protein, yağ) kadar mikro elementlere de (vitamin, mineral) ihtiyaç duymaktadır. Vitaminler bağışıklık, enerji metabolizması, antioksidan etki gösterdiği gibi, eksikliğinde ise iskorbüt, beriberi gibi hastalıklar meydana gelmektedir. Mikroalgler önemli bir vitamin kaynağıdır. *Spirulina* sp. benzeri mikroalgler, bitki veya hayvan bazlı gıda kaynaklarıyla kıyaslandığında daha yüksek B12 vitamini içermektedir. B12 eksikliği halsizlik, yorgunluk belirtileri ile karakterize olan megaloblastik anemiye neden olmaktadır. Bir başka mikroalg olan *Euglena gracilis*, E vitamini türü olan a-tokoferol içeriğine sahiptir. E vitamini kanser, göz, kalp sağlığı için büyük öneme sahiptir. Kahverengi mikroalg olan *Eisenia arborea* ise C vitamini kaynaklarından birisidir. C vitamininin ise antioksidan görevi dışında büyümü, immün sistemi güçlendirme özellikleri de bulunmaktadır [19].

III. MİKROALGLERİN KULLANIM ALANLARI

Mikroalglerin kullanım alanının en çok olduğu ürünler pigmentler ve yağ asitleridir. Ticari olarak büyük öneme sahip karotenoid olan astaksantin, tatlı su yeşil algi olan *Haematococcus pluvialis'*den elde edilmektedir. Ayrıca mikroalglerden dokosaheksaenoik asit (DHA) sentezlenmekte ve bebek mamalarında besin takviyesi olarak kullanımı oldukça yaygındır [5].



Şekil 2. Algal biyokütleden elde edilen biyoürünler ve uygulamaları [19]

Mikroalglerin kullanım alanları Şekil 2'de belirtilmiştir. Örneğin biyoteknolojik uygulamalar ile atık su biyoremediasyonu, besin takviyeleri, gıda bileşeni, kozmetik sanayii ve biyodizel üretimi gibi pek çok alanında kullanılmaktadır [20, 21]. Son zamanlarda ise mikroalgler nutrasötikler ve fonksiyonel gıdalarda sağlık açısından faydalı ürünler üretilmesinde kullanımı yaygın hale gelmiştir [22]. Nutrasötik üretim amacıyla mikroalglerin işlenmesi gerekmektedir [23].

Mikroalg üretiminde ekim ve yoğunlaştırma işlemlerinden sonra hasat işlemi yapılmaktadır. Hasat, yetiştirilen mikroalgal biyokütlenin sonraki kurutma, yağ ekstraksiyonu vb. işlemler için hazırlanmasıdır. İstenilen mikroalg konsantrasyonuna ulaşmak için bir veya iki hasat uygulaması gerçekleştirilebilir. Mikroalgal hasat prosesi, hasattan sonraki işlemler için zararlı olmamalı ve kontaminasyona sebep olmamalıdır [24]. Ekstraksiyon işlemi, bir maddeyi veya bileşeni bir fazdan diğerine aktarma işlemidir. Mikroalglerde ekstraksiyon işlemlerinde mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılmaktadır [25]. Mekanik yöntemler, mikrodalga yardımıyla ekstraksiyon, ultrasonik esaslı ekstraksiyon ve mekanik sıkıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen ekstraksiyon işlemleridir. Kimyasal yöntemler, solvent yardımıyla yapılan ekstraksiyon, süperkritik CO_2 esaslı ekstraksiyon ve iyonik sıvılar kullanılarak yapılan ekstraksiyon işlemleridir [26]. Mikroalg biyokütle üretim proses aşaması Şekil 3' de gösterilmektedir.

Elde edilen mikroalg biyokütlesi, pek çok Asya ülkesinde tablet, kapsül, sıvı ve toz şeklinde gıda ürünlerinin üretiminde ticari amaçla kullanılmaktadır [27]. Ayrıca mikroalg biyokütleleri çeşitli içecek, tahıl, erişte, atıştırmalık, şarap gibi gıdalarda da kullanılabilmektedir [28]. Mikroalg türlerinden elde edilen biyokütledeki değerli bileşenler, kullanılan mikroalglerin çeşitliliği ile ilişkilidir [29].



Şekil 3. Mikroalg biyokütle üretiminin proses akış diyagramı [29]

Çeşitli mikroalg türleri arasından *Chlamydomonas* sp., *Scenedesmus* sp., *Porphyridium* sp. [30], *Chlorella vulgaris, Spirulina platensis, Spirulina maxima, Haematococcus pluvialis, Dunaliella salina, Chlorella pyrenoidosa, Crypthecodinium cohnii* ve *Schizochytrium aggregatum* gibi en bilinen türler gıda katkı maddeleri ve sağlık takviyeleri üretimi amacıyla ticari olarak kullanılmaktadır [31, 32].

Mikroalglerden elde edilen çeşitli metabolitlere karotenoidler, omega-3 yağ asitleri, polifenoller örnek verilebilir [33, 34]. Bu ve benzeri metabolitlerden bir kısmı, zengin antioksidan, antiinflamatuar, antikanser, antiaging, antiviral, nöroprotektif ve immün sistemi destekleyici etkilere sahiptir [35-37]. Bu özellikleri nedeniyle mikroalgler ve türevi olan mikroorganizmalar, yapay besin takviyelerinden ziyade sürdürülebilir doğal ürünler oluşturma ve vücuttaki çeşitli anormallikleri engelleme, yönetme ve tedavi amacıyla beslenmeye takviye olarak kullanımı önemli bir etkiye sahiptir [38].

Siyanobakteriler, endüstriyel koşullarda hem beslenme hem de gıda üretiminde zamanla daha yaygın bir şekilde kullanılır hale gelmiştir. Makroaglerin gıda amaçlı kullanımı Asya ülkelerinde yüzyıllardır devam etmektedir [39]. Siyanobakteri ve diğer mikroalglerin, insan beslenmesindeki kullanımı geçmişe dayanmaktadır. [40]. Mikroalg ve siyanobakteriyel biyoteknolojik gelişmelerin modern çağı 1940'ların başında başlamıştır. 1960'lı yıllarda ise mikroalglerden biri olan *Chlorella* sp. gıda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda ise *Spirulina* sp. ve *Chlorella* sp. başta olmak üzere mikroalglerin endüstriyel olarak üretimi Çin, ABD, Tayvan, Hindistan, İsrail, Almanya, Avustralya'ya yayılmıştır [41]. Günümüzde ise 70'den fazla ülkede siyanobakterilerden elde edilen besinlerin ticareti yapılmaktadır [42].

Gıda olarak kullanılan mikroalglerin fonksiyonel değeri, proteinlerin, çoklu doymamış yağ asitlerinin, polisakkaritlerin, pigmentlerin, vitaminlerin, minerallerin, fenolik bileşiklerin, uçucu bileşiklerin ve sterollerin yüksek içeriğinden kaynaklanmaktadır [41]. Siyanobakterilerin büyük kısmı protein ve diğer besin bileşenlerinden oluşmaktadır. Örneğin *Arthrospira* %50-70 proteine ulaşır ve çoklu doymamış yağ asitleri (%1,5-2), lipitler (%5-6) ve çeşitli vitaminler üretmektedir [40].

Siyanobakterilerden *Spirulina*, içeriğinde çeşitli vitamin ve mineral bulundurmasından dolayı oldukça değerlidir. Mineraller arasında kalsiyum, potasyum, magnezyum, selenyum, demir, çinko, aynı zamanda vitaminlerden de B grubu vitaminleri bakımından zengindir. Mikroalglerin kullanımında ortaya çıkan çeşitli zorlukları (renk, tat) önlemek için kapsülleme yöntemi kullanılmaktadır [43]. Bu şekilde yoğurtta kullanılan siyanobakterilerin, antioksidan, antiinflamatuar, stabilite oranlarının daha yüksek olduğu, homojen bir görünüm sağladığı bildirilmiştir [44].

Mikroalglerin koyulaştırıcı ve jelleştirici özellikleri sayesinde gıda sektöründe gıda katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu özelliği sağlayan ise yapısındaki ekzopolisakkaritlerdir (EPS). Eps'nin antioksidan, antitümör, antihiperlipidemi, antibakteriyal özllikleri de vardır. Yapısındaki sterol sayesinde, insanlarda LDL kolesterolü düşürücü etki göstererek antiinflamatuar, antiaterojenik özelliğe sahiptir [45].

Nutrasötik üretimi amacıyla güncelde kullanılan doğal gıdaların yerini daha iyi besin kalitesi, çeşitliliği ve miktarı sağlayan mikroalglerin alması gündemdedir [45].

Son zamanlarda tüketicilerin 'sağlıklı gıda' veya 'sağlıklı' ürünlere karşı merakı giderek artmaktadır. Sağlığın önemine sahip bireyler, daha sağlıklı olmayı, yaşam süresini uzatmayı ve çeşitli hastalıkların oluşumunu

önlemeyi amaçlayan ürünlere olan talep ve ilgiyi artırmaktadır. Bu nedenle mikroalgler ve ürünlerinin kullanımı gıda sektöründe yenilikçi bir yaklaşımı beraberinde getirmektedir. Bu alanda en sık kullanılan alg *Spirulina* türüdür [46].

A. Hayvan Yemi

Karbonhidrat, lipit, protein, vitamin ve mineral içeriğiyle hayvan yemlerinde kullanımı değişiklik göstermektedir. Kullanılan bu yem hayvanın fizyolojik yapısına, yeme uyumuna ve yemin antibakteriyal gibi özelliklerine göre değerlendirilmelidir. Yemin tüketimine bağlı olarak hayvanlarda mikrobiyal protein üretimi, hayvanlardan elde edilen ürünlerin verimliliği, ürünlerin sağlığa olumlu etkisinde iyileşmeler gözlenmiştir [47].

B. İnsan Besini

İnsanların tüketim alanında çoğunlukla *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Schizochytrium* ve *Spirulina* kullanılmaktadır. Mikroalglerdeki protein, lipit, vitamin benzeri besin bileşiklerinin kurutulması ile toz halde tüketime sunulabilmektedir [44]. Makarna, şekerleme, bisküvi gibi tüketilen gıdaların içeriğine eklenerek piyasada yer verilmektedir. Böylece gıdaların besleyici değerlerin zenginleştirilmesine katkı sağlamaktadır [22].

Dünya nüfusunun her geçen gün artış göstermesi ve bununla birlikte doğal kaynak kullanımı ve tüketimine yönlendirme, siyanobakteriler ekilebilir arazileri kullanmadan büyüyebilme yetenekleri ve endüstriyel atık ürünlerini kullanma özellikleri sebebiyle yaygınlaşmış uygulamalar için umut verici adaylardır [48]. Metabolik özellikleri ile, sürdürülebilir üretim amacıyla gıda ve besin üretimi gibi biyomühendislik uygulamalarında ilgi çekici hale gelmiştir [49]. Ayrıca siyanobakterilerin üretmiş olduğu metabolitler, gıda katkı maddeleri, farmasötikler ve diğer endüstriyel işlemlerde ticari değeri olan bileşiklerin üretiminde kullanılmaktadır [50].

IV. SONUÇ

Mikroalgler, yıllardır kullanılmasına karşın günümüzde dikkat çekici hale gelmiştir. Yalnızca besin maddesi olarak kullanılmazken, kozmetik endüstrisi, hayvan yemleri, sağlık ile ilişkili faydaları, besin takviyeleri, biyodizel gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle gıdaların bileşiminde kullanılarak sağlık üzerine olan etkisi değerlendirilmektedir. Mikroalgleri yararlı karbonhidrat, kaliteli protein, lipit, C, B ve E vitaminleri gibi besin bileşikleri yönünden önemli bir kaynak olması gıda endüstrisinde kullanımına teşvik etmektedir. Mikroalgler içeriğindeki değerli besin bileşimi sayesinde antikanser, antioksidan, antibakteriyal, antiinflamatuar etki göstermektedir. Bu nedenle mikroalglerin gıda alanındaki kulanım alanlarının daha fazla incelenip genişletilmesi, alternatif gıda olarak kullanılması ve gelecekteki gıda krizinin engellenmesi için önemli bir girişimdir. Şu ana kadar yapılan çalışmalar, mikroalglerin detaylı incelenmesi ve değerlendirilmesi adına yeterli olmaması nedeniyle daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Metcalf, J.S., Banack, S.A., Richer, R., & Cox, P.A. (2015). Neurotoxic amino acids and their isomers in desert environments. *Journal of Arid Environments*, 112, 140-144

[2] Carmichael, W.W., & Boyer, G.L. (2016). Health impacts from cyanobacteria harmful algae blooms: Implications for the North American Great Lakes. *Harmful Algae*, 54, 194-212.

[3] Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., González-López, C., & Acién-Fernández, F. G. (2020). *Spirulina* for the food and functional food industries. *Food Research İnternational* (Ottawa, Ont.), 137, 109356.

[4] Pragya N., Pandey K.K., & Sahoo P.K. (2013). A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 24, 159-171.

[5] Barkia, I., Saari, N., & Manning, S. R. (2019). Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. *Marine Drugs*, 17(5), 304.

[6] Barba, F. J., Grimi, N., & Vorobiev, E. (2015). New approaches for the use of non-conventional cell disruption technologies to extract potential food additives and nutraceuticals from microalgae. *Food Engineering Reviews*, 7, 45-62.

[7] Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*, 101(2), 87–96.

[8] Falconer, I. R. (1999). An overview of problems caused by toxic blue–green algae (cyanobacteria) in drinking and recreational water. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 14(1), 5-12.

[9] Drobac, D., Tokodi, N., Simeunović, J., Baltić, V., Stanić, D., & Svirčev, Z. (2013). Human exposure to cyanotoxins and their effects on health. *Arhiv Za Higijenu Rada İ Toksikologiju*, 64(2), 119–130. https://doi.org/10.2478/10004-1254-64-2013-2320

[10] Zanchett, G., & Oliveira-Filho, E. C. (2013). Cyanobacteria and cyanotoxins: from impacts on aquatic ecosystems and human health to anticarcinogenic effects. *Toxins*, 5(10), 1896-1917.

[11] Griffiths, D. J., & Saker, M. L. (2003). The Palm Island mystery disease 20 years on: a review of research on the cyanotoxin cylindrospermopsin. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 18(2), 78-93.

[12] Kuiper-Goodman, T., Falconer, I., & Fitzgerald, J. (1999). Human health aspects. In: Chorus, I. & Bartram, J., Eds., Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring, and Management. E & FN Spon, London, UK, 112–153.
[13] Vandenkoornhuyse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., & Dufresne, A. (2015). The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206(4), 1196-1206.
[14] Mutalipassi, M., Fink, P., Maibam, C., Porzio, L., Buia, MC, Gambi, MC, Patti, F. P., Scipione, M. B., Lorent, M., & Zupo, V. (2020). Ocean acidification alters the responses of invertebrates to wound-activated infochemicals produced by epiphytes of the seagrass *Posidonia oceanica*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 530 , 151435.
[15] Mutalipassi, M., Riccio, G., Mazzella, V., Galasso, C., Somma, E., Chiarore, A., de Pascale, D., & Zupo, V. (2021). Symbioses of Cyanobacteria in Marine Environments: Ecological Insights and Biotechnological Perspectives. *Marine Drugs*, 19(4), 227.
[16] Chouhan, P. K., & Kumawat, D. K. (2014). Screening of Cyanobacteria from Black Cotton soil and evaluate their potential to survive under wet and dry condition for biofertilizer production. *Sch J Agric Vet Sci*, *1*(2), 90-99.
[17] Minocheherhomji, F.P., & Pradhan, A. (2016). Evaluation of total protein production by soil cyanobacteria in culturefiltrate at various incubations periods. *International Journal of advances in Pharmacy, Biology and Chemistry*, 5:346, 349
[18] Vasconcelos, V., Leao, P., & Campos, A. (2015). Cyanobacterial toxins. *Phycotoxins: Chemistry and Biochemistry*, Spain, 225-238.
[19] Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Yen, H. W., Huang, C. Y., & Chang, J. S. (2021). Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans - Biotechnological and environmental aspects. *Chemosphere*, 271, 129800.
[20] Demirbaş, A., & Demirbaş, MF (2011). Biyodizel kaynağı olarak alg yağının önemi. Enerji dönüşümü ve yönetimi, 52 (1), 163-170.
[21] Craggs, R. J., Adey, W. H., Jenson, K. R., John, M. S. S., Green, F. B., & Oswald, W. J. (1996). Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber. *Water Science and Technology*, 33(7), 191-198.
[22] Borowitzka, M. A. (2013). High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology*, 25, 743-756.
[23] Rocca, S., Agostini, A., Giuntoli, J., & Marelli, L. (2015). Biofuels from algae: technology options, energy balance and GHG emissions. *JRC Available at: http://publications. jrc. ec. europa. eu/repository/bitstream/JRC98760/algae_biofuels_report_21122015. pdf*.
[24] Elcik, H., & Çakmakcı, M. (2017). Mikroalglerden Yenilenebilir Biyoyakit Üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 795-820.
[25] Halim, R., Danquah, M. K., & Webley, P. A. (2012). Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology advances*, 30(3), 709–732.
[26] Mubarak M., Shaija A., & Suchithra T. V. (2015) A review on the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production. *Algal Research*, 7, 117-123.
[27] Raja, R., Hemaiswarya, S., Kumar, N. A., Sridhar, S., & Rengasamy, R. (2008). A perspective on the biotechnological potential of microalgae. *Critical Reviews in Microbiology*, 34(2), 77-88.
[28] Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2019). Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(4), 709-722.
[29] Tan, K. Y., Low, S. S., Manickam, S., Ma, Z., Banat, F., Munawaroh, H. S. H., & Show, P. L. (2023). Prospects of microalgae in nutraceuticals production with nanotechnology applications. *Food Research İnternational*, 169, 112870.
[30] Bishop, W. M., & Zubeck, H. M. (2012). Evaluation of microalgae for use as nutraceuticals and nutritional supplements. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 2(5), 1-6.
[31] Silva, S. C., Ferreira, I. C., Dias, M. M., & Barreiro, M. F. (2020). Microalgae-derived pigments: A 10-year bibliometric review and industry and market trend analysis. *Molecules*, 25(15), 3406.
[32] Man, C. H., Shimura, Y., & Suzuki, I. (2022). Identification of extracellular proteases induced by nitrogen-limited conditions in the thraustochytrids *Schizochytrium* aggregatum ATCC 28209. *Marine Biotechnology*, 24(1), 243-254.
[33] Goiris, K., Muylaert, K., Fraeye, I., Foubert, I., De Brabanter, J., & De Cooman, L. (2012). Antioxidant potential of microalgae in relation to their phenolic and carotenoid content. *Journal of Applied Phycology*, 24, 1477-1486.
[34] Haimeur, A., Ulmann, L., Mimouni, V., Guéno, F., Pineau-Vincent, F., Meskini, N., & Tremblin, G. (2012). The role of Odontella aurita, a marine diatom rich in EPA, as a dietary supplement in dyslipidemia, platelet function and oxidative stress in high-fat fed rats. *Lipids in Health and Disease*, 11(1), 1-13.

[35] Galasso, C., Gentile, A., Orefice, I., Ianora, A., Bruno, A., Noonan, D. M., Sansone, C., Albini, A., & Brunet, C. (2019). Microalgal derivatives as potential nutraceutical and food supplements for human health: A focus on cancer prevention and interception. *Nutrients*, 11(6), 1226.
[36] Xia, S., Gao, B., Li, A., Xiong, J., Ao, Z., & Zhang, C. (2014). Preliminary characterization, antioxidant properties and production of chrysolaminarin from marine diatom *Odontella aurita*. *Marine Drugs*, 12(9), 4883-4897.
[37] Lauritano, C., Andersen, J. H., Hansen, E., Albrigtsen, M., Escalera, L., Esposito, F., Helland, K., Hanssen, K., Romano, G., & Ianora, A. (2016). Bioactivity screening of microalgae for antioxidant, anti-inflammatory, anticancer, anti-diabetes, and antibacterial activities. *Frontiers in Marine Science*, 3, 68.
[38] Beetul K., Gopeechund A., Kaullysing D., Mattan-Moorgawa S., Puchooa D., & Bhagooli R. (2016). Challenges and Opportunities in the Present Era of Marine Algal Applications. In: Thajuddin N., Dhanasekaran D., editors. *Algae-Organisms for Imminent Biotechnology*, 237–276.
[39] Hur, S. B., Bae, J. H., Youn, J. Y., & Jo, M. J. (2015). KMMCC-Korea marine microalgae culture center: list of strains. *Algae*, 30(sup), 1-188.
[40] Grosshagauer, S., Kraemer, K., & Somoza, V. (2020). The True Value of *Spirulina*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(14), 4109-4115.
[41] Andrade, L. M., Andrade, C. J., Dias, M., Nascimento, C., & Mendes, M. A. (2018). *Chlorella* and *Spirulina* microalgae as sources of functional foods. *Nutraceuticals, and Food Supplements*, 6(1), 45-58.
[42] Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., & Swapnil, P. (2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 22, 100737.
[43] da Silva, S. C., Fernandes, I. P., Barros, L., Fernandes, Â., Alves, M. J., Calhelha, R. C., Pereira, C., Barreira, J., Manrique, Y., Colla, E., Ferreira, I., & Barreiro, M. F. (2019). Spray-dried *Spirulina platensis* as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions. *Journal of Functional Foods*, 60, 103427.
[44] Chacón-Lee, T.L., & González-Mariño, G.E. (2010), Microalgae for "Healthy" Foods—Possibilities and Challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9: 655-675.
[45] García, J. L., de Vicente, M., & Galán, B. (2017). Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1017–1024.
[46] Sorrenti, V., Castagna, D. A., Fortinguerra, S., Buriani, A., Scapagnini, G., & Willcox, D. C. (2021). *Spirulina* Microalgae and Brain Health: A Scoping Review of Experimental and Clinical Evidence. *Marine Drugs*, 19(6), 293.
[47] Ekmay, R., Gatrell, S., Lum, K., Kim, J., & Lei, X. G. (2014). Nutritional and metabolic impacts of a defatted green marine microalgal (*Desmodesmus* sp.) biomass in diets for weanling pigs and broiler chickens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(40), 9783-9791.
[48] Graham, A. E., & Ledesma-Amaro, R. (2023). The microbial food revolution. *Nature Communications*, 14(1), 2231.
[49] Liu, D., Liberton, M., Hendry, L.I., Aminian-Dehkordi, J., Maranas C.D., & Pakrasi H.B. (2021). Engineering biology approaches for food and nutrient production by cyanobacteria. *Current Opinion in Biotechnology*, 67, 1-6.
[50] Watson, S., Monis, P., Baker, P., & Giglio, S. (2016) Biochemistry and genetics of taste- and odor-producing cyanobacteria. *Harmful Algae*, 54, 112-127.