YAYINCI
PUBLISHER

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN

e-ISSN: 1308-6693

Cilt/Volume: 13 **Sayı**/Issue : 2 **Haziran**/June 2025

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi / *Journal of Engineering Sciences and Design*

http://www.dergipark.org.tr/tr/pub/jesd
e-ISSN: 1308-6693

İmtiyaz Sahibi / *Owner*

Deanery *of Engineering and Natural Sciences Faculty, Suleyman Demirel University, Isparta, TURKIYE*

Editörler / *Editors*

Nevzat Özgü YİĞİT
Suleyman Demirel University, Isparta
(Baş Editör / Editor-in-Chief)

Fatma AKSEVER
Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Fatih Ahmet SENEL
Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Karani KURTULUS
Suleyman Demirel University, Isparta
(Editör Yrd. / Co-Editor)

Ali AGCAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Caglayan BALKAYA
Suleyman Demirel University, Isparta

Atilla BAYRAM
Van Yuzuncu Yıl University, Van

Mehmet AVCAR
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali BELEN
İskenderun Technical University, İskenderun

Ahmet CAGLAR
Akdeniz University, Antalya

Habib GURBUZ
Suleyman Demirel University, Isparta

Muhammed Maruf ÖZTÜRK
Suleyman Demirel University, Isparta

Tahir Serkan IRMAK
Kocaeli University, Kocaeli

Mesud KAHRIMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Ayberk KAYA
Recep Tayyip Erdoğan University, Rize

Şemsettin KILINCARSLAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Onur OLGUN
Suleyman Demirel University, Isparta

Işıl BARUTÇU MAZI
Ordu University, Ordu

Muhammed Maruf OZTURK
Suleyman Demirel University, Isparta

Savas OZUN
Suleyman Demirel University, Isparta

Yunus PAMUKOGLU
Suleyman Demirel University, Isparta

Olcay POLAT
Pamukkale University, Denizli

Hakan TONGAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Volkan UZ
Izmir Institute of Technology, Izmir

Ali YALCIN
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Ali YALCINKAYA
Kırşehir Ahi Evran University, Kırşehir

Savaş ÖZÜN
Suleyman Demirel University, Isparta

Demet YILMAZ
Suleyman Demirel University, Isparta

MÜHENDİSLİK
BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

Meltem KAÇIKOÇ
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur GÖLBAŞI
Middle East Technical University, Ankara

Selma Demer
Suleyman Demirel University, Isparta

Celal Fadıl KUMRU
Suleyman Demirel University, Isparta

Fehmi MUTLU
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet Alper DEMİRAY
Suleyman Demirel University, Isparta

Hüsnü Arda YURTSEVER
Adana Alparslan Turkes Science and Technology University, Adana

Turgay AYDOĞAN
Suleyman Demirel University, Isparta

İ. Ethem KARADİREK
Akdeniz University, Antalya

Can BAŞARAN
Afyon Kocatepe University, Afyon

Güncel SARIMAN
Muğla Sıtkı KoçmanUniversity, Muğla

Gülhan GÜLER
Erciyes University, Kayseri

Bilge ERTEKİN FİLİZ
Suleyman Demirel University, Isparta

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi / *Journal of Engineering Sciences and Design*

http://www.dergipark.org.tr/tr/pub/jesd
e-ISSN: 1308-6693

Danışma Kurulu / *Editorial Advisory Board*

Michael G. KAY
North Carolina State University, USA

Bedri TUC
Baskent University, Ankara, TR

Yun-Chia LIANG
Yuan Ze University, Taoyuan, TW

Erol TUTUMLUER
University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA

Alice E. SMITH
Auburn University, Auburn, USA

Fatma YALCINKAYA
Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

Ravi SANKAR
University of South Florida, Florida, USA

Gerhard-Wilhelm WEBER
Poznan University of Technology, Poznan, PL

Yayın Editörleri / *Technical Editors*

Ayse ÖZÇELİK
Suleyman Demirel University, Isparta

Onur Mustafa ÜZÜM
Suleyman Demirel University, Isparta

Mehmet KIR
Suleyman Demirel University, Isparta

Burak İKİNCİ
Suleyman Demirel University, Isparta

Sıla YAMAN
Suleyman Demirel University, Isparta

Umut Bekçi
Suleyman Demirel University, Isparta

Yabancı Dil Editörü / *Foreign Language Editor*

Ahmet UNAL
Suleyman Demirel University, Isparta

Dizin ve İndeksler / *Abstracting & Indexing*

/ TR-DIZIN / EBSCOhost / SCILIT / ROAD / EuroPUB / SOBIAD / / Google Scholar / CrossRef

Duyurular / *Announcements*

Dergiye 01 Haziran 2022 tarihinden itibaren özgün "Araştırma Makalesi" türü dışındaki başvurular kabul edilmemektedir.

As of 01 June 2022, submissions other than the original "Research Paper" type will not be submitted.

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi / *Journal of Engineering Sciences and Design*

http://www.dergipark.org.tr/tr/pub/jesd
e-ISSN: 1308-6693

Cilt 13 Sayı 2 / *Volume 13 Issue 2* ***2025***

İçindekiler / *Contents*

Araştırma / *Research*	**Sayfa** / *Pages*
1. OTO YIKAMA İSTASYONLARINDAKİ ÇALIŞMA DURUŞLARININ REBA VE JSI YÖNTEMİ İLE ERGONOMİK ANALİZİ Caner Çil*, Hatice Esen	382-396
2. VERİ GÜDÜMLÜ KONTROLDE VERİ KALİTESİNİN KRİTİK ROLÜ: BİR DA MOTOR UYGULAMASI Güray Sonugür*	397-411
3. DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKI TERSLEYEN MOTOR (ATM) TASARIMI VE OPTİMİZASYONU Harun Serhat Gerçekcioğlu*	412-425
4. YALAKDERE FAYI'NIN AKTİF TEKTONİK VE PALEOSİSMOLOJİK ÖZELLİKLERİ, KOCAELİ, TÜRKİYE Ercan Sangu*	426-439
5. BİYOMİMİKRİ YÖNTEMİYLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMASI Şenay Balbay*	440-453
6. GELECEKTE KURAKLIK SONUCU ETKİLENEBİLECEK ENDÜSTRİYEL SEKTÖRLERİN HAVZA BAZLI DEĞERLENDİRİLMESİ Alperen Kır*, Mehmet Kitiş	454-465
7. CLASSIFICATION OF COGNITIVE WORKLOAD FROM EEG SIGNALS USING MULTIDIMENSIONAL FEATURES WITH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING Yavuz Bahadir Koca*	466-479

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

8. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA SAHİP EVSEL UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT ANAHTARLI BİR DA/AA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN FARKLI GÜÇ KOŞULLARI ALTINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ 480-493
Hakan Akça*, Uğur Savaş Selamoğulları

9. ERZURUM BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ (BAAT) İLAÇ KALINTILARININ TESBİTİ VE FOTO-OKSİDASYONLA ARITILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ 494-508
Zeynep Eren*, Gökhan Yılmaz

10. INVESTIGATION OF DESIGN AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MATERIALS USED IN CEMENT MORTAR MIXTURES DESIGNED FOR SEMI-RIGID PAVEMENTS 509-527
Alev Akıllı El*, Erkut Yalçın , Mehmet Yılmaz

11. PROJE EFOR TAHMİNİ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE SHAP YÖNTEMİ KULLANILARAK AÇIKLANMASI 528-544
Esma Nur Kaya , Yasin Görmez*

12. DERİ DOKUSUNUN FARKSAL BAĞLAŞIMLI VÜCUT İÇİ HABERLEŞME KANALININ DAĞITIK PARAMETRELİ İLETİM HATTI MODEL ANALİZİ 545-555
Kayhan Ateş*, Şükrü Özen

13. ELMA SUYU, VİŞNE SUYU VE GÜL YAĞI İŞLEME ATIKLARINDAN SELÜLOZ LİFİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ 556-569
Ece Söğüt*

14. HASTANELERDE SÜRTÜNMELİ SARKAÇ TİPİ İZOLATÖRLERİN TAŞIYICI SİSTEME ETKİSİ 570-581
Mehdi Öztürk*

15. IMPACT OF LOW-SEVERITY WILDFIRE ON LARGE WATER BODIES: WATER QUALITY AND DISINFECTION BY-PRODUCT PRECURSORS 582-593
Habibullah Uzun*

16. INVESTIGATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PERCEPTIONS OF PRIVATE SECTOR EMPLOYEES AND AWARENESS OF PARTICULARLY RADIATION EXPOSURE ISSUE 594-612
Umarettin Uçak , Kenan Şentürk*

MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ ve TASARIM DERGİSİ
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND DESIGN
YAYINCI PUBLISHER
e-ISSN: 1308-6693

17. A CROSS-POLARIZER METASURFACE DESIGN FOR K- AND KA-BAND APPLICATION STUDIES
Abdülkadir Çıldır* 613-622

18. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE AND FINENESS OF KAOLIN FROM BALIKESİR REGION ON POZZOLANIC ACTIVITY
Nuri Işıldar*, Mutlu İrem Tuncer , Metin Davraz , Şemsettin Kılınçarslan 623-631

19. TÜNEL YAPILARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN JEOFİZİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ: BURSA İLİ DOĞANCI TÜNELİ ÖRNEĞİ
Mustafa Kirici , Hakan Karslı* 632-648

20. POTANSİYEL YER ALTI SUYU BÖLGELERİNİN ANALİTİK HİYERARŞİ YÖNTEMİ (AHY) VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) TEKNİKLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ: GEDİZ NEHRİ HAVZASI ÖRNEĞİ
Cansu Yurteri* 649-674

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 382-396, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1559095

Araştırma Makalesi Research Article

OTO YIKAMA İSTASYONLARINDAKİ ÇALIŞMA DURUŞLARININ REBA VE JSI YÖNTEMİ İLE ERGONOMİK ANALİZİ

Caner ÇİL[1*], Hatice ESEN[1]

[1] Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler
Çalışma Duruşu Analizi,
Ergonomi,
JSI,
REBA,
Oto Yıkama.

Öz

İnsanların faaliyet gösterdiği alanlardaki uygunsuz çalışma duruşları uzun vadede kas- iskelet sistemi rahatsızlıklarına (KİSR) sebep olmaktadır. Uygun olmayan çalışma durumlarının analizi için ergonomik risk değerlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile elde edilen çalışma duruşuna ait risk skorları değerlendirilerek gerekli iyileştirilmelerin planlaması yapılabilmektedir. Bu çalışmada, bir akaryakıt istasyonunun oto yıkama ünitesinde gerçekleşen çalışma duruşlarının ergonomik risk düzeyleri REBA (Rapid Entire Body Analysis) ve JSI (Job Strain Indeks) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Oto yıkama işlemi köpükleme, fırçalama ve yıkama olmak üzere 3 bölüme ayrılmıştır. Elde edilen sonuçlarda köpükleme işlemi için REBA skoru 2; JSI skoru 0,5, fırçalama için REBA skoru 9; JSI skoru 12 ve yıkama işlemi için REBA skoru 9; JSI skoru 12 olarak bulunmuştur. Yıkama ve fırçalama işlemleri için ergonomik iyileştirmenin gerekmesinden dolayı iyileştirme önerilmiştir. Yapılacak iyileştirme ile birlikte ergonomik risk düzeyi kabul edilebilir seviyeye getirilmesi ve oluşabilecek kas-iskelet sistemi hastalıklarının önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

ERGONOMIC ANALYSIS OF WORKING POSTURES IN CAR WASH STATIONS WITH REBA AND JSI METHODS

Keywords
Working Posture Analysis,
Ergonomics,
JSI,
REBA,
Car Wash.

Abstract

Inappropriate working postures in areas where people operate cause losses for employees by causing musculoskeletal disorders (MSDs) in the long term. Ergonomic risk assessment methods are used for the analysis of inappropriate working situations. The risk scores of working postures obtained with these methods can be evaluated and necessary improvements can be planned. In this study, ergonomic risk levels of working postures in a gas station car wash unit were determined using REBA (Rapid Entire Body Analysis) and JSI (Job Strain Index) methods. The car wash process was divided into 3 parts as foaming, brushing and washing. In the obtained results, REBA score was found as 2 for foaming process; JSI score as 0.5, REBA score as 9 for brushing; JSI score as 12 and REBA score as 9 for washing process; JSI score as 12. Improvement was suggested due to the need for ergonomic improvement for washing and brushing processes. The aim of the improvement is to bring the ergonomic risk level to an acceptable level and to prevent possible musculoskeletal diseases.

Alıntı / Cite

Çil, C., Esen, H., (2025). Oto Yıkama İstasyonlarındaki Çalışma Duruşlarının REBA ve JSI Yöntemi ile Ergonomik Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 382-396.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
C. Çil, 0000-0003-4929-2297
H. Esen, 0000-0003-3641-4611

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	01.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	14.01.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.01.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: canercil.fb@gmail.com, +90-531-702-9669

ERGONOMIC ANALYSIS OF WORKING POSTURES IN CAR WASH STATIONS WITH REBA AND JSI METHODS

Caner ÇİL[1†], Hatice ESEN[1]
[1] Kocaeli University, Institute of Science, Department of Industrial Engineering, Kocaeli, Türkiye

Highlights

- In this study, the ergonomic risk levels of working postures in the car wash unit of a gas station were determined using the REBA and JSI methods.
- The car wash process is divided into three parts: foaming, brushing and washing.
- The results obtained were as follows: REBA score for foaming process was 2; JSI score was 0.5, REBA score for brushing was 9; JSI score was 12 and REBA score for washing process was 9; JSI score was 12.
- Since ergonomic improvement is required for the washing and brushing process, improvements have been suggested to reduce bending and twisting that occur during washing and to reduce lifting the load on the shoulder.

Purpose and Scope
This study aimed to conduct an ergonomic risk analysis of the posture disorders that occur during foaming, brushing and washing operations of employees working in car wash units at a gas station.

Design/methodology/approach
Ergonomic risk levels of working postures were determined using REBA (Rapid Entire Body Analysis) and JSI (Job Strain Index) methods. The car wash process is divided into 3 parts: foaming, brushing and washing. The posture positions of the employees were analyzed with free software.

Findings
The results obtained were as follows: REBA score for foaming process was 2; JSI score was 0.5, REBA score for brushing was 9; JSI score was 12 and REBA score for washing process was 9; JSI score was 12.Since ergonomic improvement is required for the washing and brushing process, improvements have been suggested to reduce bending and twisting that occur during washing and to reduce lifting the load on the shoulder.

Originality
This study is important because it explains the postures of employees in car wash units at gas stations by using the REBA and JSI methods in an integrated manner.

† Corresponding author: canercil.fb@gmail.com, +90-531-702-9669

1. Giriş (Introduction)

Gelişen teknoloji ile birlikte sanayi alanında insan gücüne olan talep azalmış olmasına karşın bazı sektörlerde halen daha insan gücüne dayalı bir çalışma bulunmaktadır. İnsan gücüne yoğun olarak ihtiyaç duyan iş yerlerinde, çalışma duruşlarının uygun olmaması kas- iskelet sistemi üzerinde hastalıklar meydana getirmektedir. Kullanılan fiziksel yük miktarı arttıkça çalışanlarda oluşabilecek kas- iskelet sistemi hastalıkları (KİSR) da artmaktadır (Kahya vd., 2019). İş istasyonlarının ergonomik açıdan uygun hale getirilmemesi, yetersiz aydınlatma, nem, yüksek sıcaklık, gürültü, iş sağlığı bakımından yetersiz ortamlar çalışanlar üzerinde fiziksel ve psikolojik rahatsızlıklara neden olabilmektedir.

İnsanların verimlilikleri fiziksel ve psikolojik etmenlerden etkilendiği gibi ergonomik faktörlerden de etkilenmektedir. Bu nedenle çalışma duruşlarının ve sistemlerinin ergonomik risk analizlerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Ergonomi, insanın, anatomik, fizyolojik, psikolojik vb. özelliklerine göre çalışma ortamlarında insan- makine- ortam uyumunun oluşmasını sağlayan disiplinler arası bir yöntemdir. Ergonominin nihai amacı, çalışanların sağlığını koruyarak yapılan işin verimini arttırmaktır (Sabancı, 2015). Yapılan araştırmalara göre çalışanların yaklaşık %34'ü, kaldırma, indirme, taşıma, tutma vb. faaliyetlerden dolayı bel rahatsızlıkları çekmektedir (Akay, 2009).

Kas iskelet sistemi hastalıklarının etiyolojisinde genel olarak çalışma ortamında sıklıkla karşılaşılan tekrarlayıcı hareketlerin art arda yapılması, vücudun uygun olmayan pozisyonlarda uzun süre kalması ve vibrasyon maruziyeti ile ortaya çıkan birikimli travmaların etkisi söz konusudur (Bilir, 2011). Literatür incelendiğinde çalışanların ergonomik duruşlarının incelendiği birçok yöntem bulunmaktadır. İşyerlerindeki çalışma ortamlarında ergonomik risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak elde edilen analizlere göre iyileştirmeler yapılmalıdır. OWAS (Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi), NEPRA (Yeni Ergonomik Duruş Değerlendirme Yöntemi), QEC (Hızlı Risk Değerlendirme) vb. risk değerlendirme faktörlerinden bazılarıdır. Bu yöntemlerden birisi de REBA (Rapid Entire Body Assessment – Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi)'dır. REBA ile hem dinamik hareketler hem de statik duruşların, çalışanların tüm vücudu üzerinde oluşturacağı yük binişleri analiz edilmektedir.

Bu çalışmada, bir akaryakıt istasyonundaki oto yıkama ünitelerinde görevli çalışanların çalışma duruşları REBA ve JSI (Job Strain Indeks – İş Zorlanma Endeski) yöntemleri ile analiz edilmiştir. REBA herhangi bir çalışma duruşu sırasında çalışanın tüm vücudunun değerlendirilmesini sağladığından dolayı ve JSI ise üst uzuvları değerlendirme yöntemi olduğundan dolayı kullanılmıştır. Kullanılan ekipmanların ve duruşların farklı olmasından dolayı oto yıkama işlemi köpükleme, fırçalama ve yıkama olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Literatür incelendiğinde hem ulusal hem de uluslararası alanda REBA ve JSI yöntemlerinin kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Kocabaş (2009), metal eşya sektöründe çalışanların duruşlarını OWAS ve REBA yöntemleriyle incelemiştir. Paulsen (2013), bir peynir üretim tesisinde ergonomik risk analizi için OCRA-JSI yöntemlerini kullanmıştır. Ansari vd., (2014), Hindistan'da 15 işçi üzerinde REBA ve RULA yöntemlerini kullanmışlardır. Elde edilen RULA sonuçlarında çalışanların çoğunluğunun yüksek risk seviyeleri altında olduğu ve acil değişiklik gerektiği belirlenirken REBA sonuçlarında çalışanların çoğunluğunun yüksek risk seviyesinde duruş pozisyonunda çalıştığını görmüşlerdir. Meyers vd., (2014), bir imalat sektöründe JSI yöntemini kullanarak çalışanlar üzerinde ergonomik risk analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sağıroğlu vd., (2015), yaptıkları çalışmada seçtikleri bir kompresör fabrikasında 10 adet iş istasyonunda çalışanların duruş analizlerini REBA yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Ünver ve Kaya (2015), Trabzon'da orman fidanlığında çalışan 70 kadın işçinin çalışma duruşlarını REBA yöntemiyle analiz ederek REBA skoru elde etmişlerdir. REBA skoru 7 olarak bulunmuş ve çalışanların orta düzeyde risk altında oldukları görülmüştür. Polat vd., (2017), Denizli'deki bir mobilya işletmesinde REBA yöntemini kullanarak çalışanların duruşlarını analiz etmişler ve önerilerde bulunmuşlardır. Deros vd., (2017), elle malzeme taşıma gerçekleştiren çalışanların tekrarlı taşıma, itme, çekme vb. faaliyetlerindeki duruşları ile ilgili toplam 11 kişi üzerinde REBA ile ergonomik risk değerlendirmesi yapmışlardır. REBA skorunu 9 olarak hesaplamışlar ve çözüm önerileri sunmuşlardır. Ulutaş vd., (2017), kablo imalatı yapılan bir işletmede 2 iş istasyonunda REBA yöntemini uygulamışlardır. Aygün vd., (2018), mandalina hasadında çalışanların fiziksel yüklenmelerini REBA ve RULA yöntemlerini kullanarak 30 çalışan üzerinde analiz etmişlerdir. Yadi vd., (2018), kimya endüstrisinde REBA ve RULA yöntemlerini kullanarak ergonomik risk değerlendirme çalışması yapmışlardır. CATIA yazılımını kullanarak benzetim çalışmaları yapmışlar ve önerilerde bulunmuşlardır. Özay ve Doğanbatır (2018), bir süpermarketin kasap, depo ve manav reyonlarında ve temizlik işlerinde çalışanların çalışma duruşlarını REBA yöntemiyle analiz etmişlerdir. Ayrıca el ile yük kaldırma işleri için de NIOSH yöntemini kullanmışlardır. Restuputri vd., (2020), OCRA ve JSI yöntemleri kullanılarak operatörlerin vücut duruşlarının ergonomik analizi yapılmıştır. Buna göre OCRA değerleri sağ el için 3,35 ve sol el için 1,13 olarak bulunmuştur. JSI değerleri ise sağ el için 9 ve sol el için 4,5 olarak hesaplanmıştır. Widodo vd., (2020), REBA ve JSI yöntemleri

kullanılarak mevcut çalışanların ergonomik duruşlarının analizi yapılmıştır. Sonuçlarda REBA skorunun 11 ve JSI skorunun 39 olduğu görülmüştür.

Bundan dolayı yeni bir tasarım önerilmiş ve bu tasarım sonucunda REBA skorunun 7 ve JSI skorunun ise 6,8'de düştüğü hesaplanmıştır. Kee (2021), granit ve mermer ünitelerinde çalışan işçiler üzerinde REBA yöntemi ile ergonomik risk değerlendirmesi yapmıştır. Ayvaz vd., (2023), hemşirelerin çalışma duruşlarını REBA ve RULA yöntemleri ile analiz etmişlerdir. Araştırma sonuçlarında hemşirelerin çalıştıkları bölümlerdeki risklerin genel olarak orta seviye risk olduğunu belirlenmiştir. Kibria, (2023), inşaat işçilerinin çalışma duruşları REBA ve RULA yöntemleri kullanılarak ergonomik olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, kiriş ve kolon dökümü ve duvar işçilerinin iş sırasında uygun çalışma duruşlarını sürdürmemeleri nedeniyle yüksek yaralanma riski altında olduğunu ortaya koyulmuştur. Muhacir vd., (2023), bir tekstil işletmesindeki bakım onarım bölümünde çalışan operatörlerde oluşan kas- iskelet sistemi bozuklukları REBA- RULA ile analiz edilmiştir. Sonuçlarda acil müdahale gerektiren sıkıştırma, frezeleme ve tornalama işlemleri için iyileştirme önerileri olarak mekanik parçaların risk seviyelerini en aza indirecek şekilde yerinde uygulanmasına karar verilmiştir. Kodle vd., (2023), Hindistan'daki madencilik sektöründe çalışanların kas- iskelet sistemleri üzerinde maruz kaldığı baskıların REBA yöntemi ile ergonomik risk analizini yapmışlardır. Araştırma sonuçlarında yeni bir ergonomik iş istasyonu önerilmiştir. Kurniaty'nin çalışmasında (2024), MOST (Maynard Operation Sequence Technique) ve REBA yöntemleri kullanılarak operatörlerin ergonomisi ve iş verimliliği analiz edilmiştir. REBA sonuçlarında mevcut çalışma koşullarının ve duruşların optimum standartları sağlamadığı görülmüştür. MOST sonuçlarında ise tüm operasyonların tamamlanması gereken sürenin yaklaşık 0,0702 dakika olduğu hesaplanmıştır. Pundhir vd., (2024), Hindistan'daki tarım sektöründeki çalışanlarda ergonomik risk analiz yöntemlerinden REBA ve RULA yöntemlerini kullanarak çalışanların duruşlarını analiz etmişlerdir. Sonuç olarak RULA ve REBA puanlarının arazı hazırlama, dikim, ot ayıklama, sulama ve hasat faaliyetlerinde yüksek olduğu görülmüştür. Bera vd., (2024), kuyumcular üzerinde RULA ve REBA yöntemlerini kullanarak ergonomik risk analizi yapmışlardır.

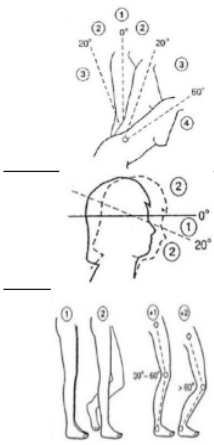
Literatürde oto yıkama istasyonlarında REBA ve JSI yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma ile literatürdeki bu açığın kapatılması hedeflenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmanın materyali bir akaryakıt istasyonundaki oto yıkama ünitesinde görevli çalışanların görsel olarak kayıt altına alınan vücut duruş pozisyonlarından oluşmaktadır.

3.1. REBA Yöntemi (REBA Method)

REBA yöntemi çalışanların hem dinamik hem de statik hareketlerini analiz edebilmektedir. Böylece çalışanın kas-iskelet sistemini zorlayan noktaları tespit ederek ergonomik iyileştirmeler önerilmesini hedeflemektedir. REBA yönteminde çalışma duruşu sırasında boyunda, gövdede, bacakta, üst kollarda, alt kollarda ve bileklerde ortaya çıkan bükülme, esneme ve bu çalışma sırasında çalışanın maruz kaldığı yüklere göre 1- 15 arasında bir skor belirlenmektedir. REBA skoru belirlenirken vücut A ve B olarak iki gruba ayrılmaktadır. A grubunu gövde, boyun ve bacak oluştururken B grubunu ise üst kol, alt kol ve bilek oluşturmaktadır. REBA yönteminde ilk olarak gövde, boyun ve bacak duruşları analiz edilerek A skoru belirlenir. Eğer duruş sırasında uygulanan bir yük var ise bu yük A skoruna eklenir. Şekil 1'de A grubu puanlaması yer almaktadır (Kara vd., 2014). Tablo 1'de A grubu vücut bölümleri puanlaması yer alırken Tablo 2'de ise yük/ kuvvet puanlaması bulunmaktadır (Stanton vd., 2005).



Gövde

Hareket	Skor	Skor değişimi
Dik duruş	1	Eğer bükme ya da yana doğru dönme hareketi de varsa skora +1 ekle
0° - 20° bükülme 0° - 20° uzanma	2	
20° - 60° bükülme >20° uzanma	3	
>60° bükülme	4	

Boyun

Hareket	Skor	Skor değişimi
0° - 20° bükülme	1	Eğer bükme ya da yana doğru dönme hareketi de varsa skora +1 ekle
> 20° bükülme ve uzanma	2	

Bacak

Hareket	Skor	Skor değişimi
Ağırlık iki bacak üstünde, yürüme ya da oturma durumunda	1	Eğer dizlerde 30°-60 °arası bükülme varsa skora +1
Ağırlık tek bacak üstünde, dengesiz durumunda	2	Eğer >60° bükülme varsa skora +2 ekle (ayakta durma durumunda)

Şekil 1. REBA yönteminde A grubu puanlaması (Group A scoring in REBA method)

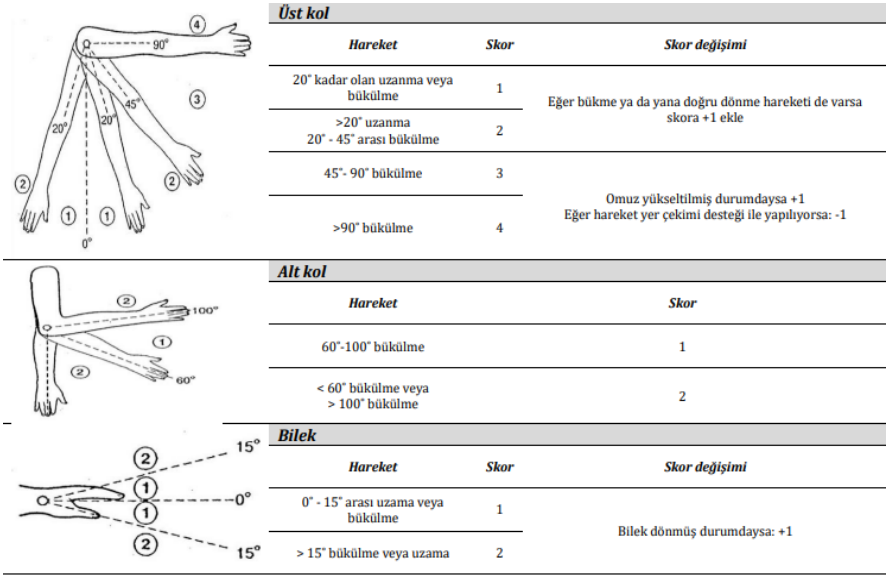
Tablo 1. REBA Yönteminde A grubu vücut bölümleri puanlaması (Group A body parts scoring in REBA method)

BACAKLAR	BOYUN											
	1				2				3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
GÖVDE												
1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tablo 2. REBA yönteminde A grubu için yük/kuvvet puanlaması (Load/strength scoring for group A in REBA method)

	1	2	3
<5kg	5-10 kg	>10 kg	Ani ve hızla artan güç kullanımı gerektiğinde

Daha sonra üst kol, alt kol ve bilek duruşları analiz edilerek B skoru belirlenir. Eğer bu duruş esnasında bir kavrama var ise bu da B skoruna eklenir. Şekil 2'de B grubu puanlaması yer almaktadır (Kara vd., 2014). Tablo 3'te B grubu vücut bölümleri puanlaması yer alırken Tablo 4'te ise yük kavrama puanlaması bulunmaktadır (Stanton vd., 2005).



Şekil 2. REBA yönteminde B grubu puanlaması (Group B scoring in REBA method)

Tablo 3. REBA yönteminde B grubu vücut bölümleri puanlaması (Group B body parts scoring in REBA method)

BİLEK	ALT KOL					
	1			2		
	1	2	3	1	2	3
ÜST KOL						
1	1	2	2	1	2	3
2	1	2	3	2	3	4
3	3	4	5	4	5	5
4	4	5	5	5	6	7
5	6	7	8	7	8	8
6	7	8	8	8	9	9

Tablo 4. REBA yönteminde B grubu için yük/kuvvet puanlaması (Load/strength scoring for group B in REBA method)

0 (İYİ)	1 (ORTA)	2 (ZAYIF)	3 (KABUL EDİLEMEZ)
Elle iyi kavrama ve orta vade güçlü kavrama	Elle kavrama kabul edilebilir, ancak ideal değil ya da kavrama vücudun başka bir bölümüyle kabul edilebilir	Mümkün olmasına rağmen elle kavrama kabul edilemez	Elle kavrama uygunsuz ve güvensiz, tutacak yok ya da kavrama vücudun diğer bölümlerinin kullanılmasıyla kabul edilemez

Elde edilen A ve B skorları ile C skoru hesaplanmaktadır. C skoruna faaliyet skoru da eklenerek REBA skoru elde edilmektedir. Tablo 5'de faaliyet puanlaması yer almaktadır (Kara vd., 2014). Tablo 6'da C grubu puanlaması yer alırken Tablo 7'de REBA risk dereceleri bulunmaktadır (Stanton vd., 2005). Şekil 3'te REBA puanlama şablonu verilmiştir bulunmaktadır (Kara vd., 2014).

Tablo 5. REBA yönteminde faaliyet puanlaması (Activity scoring in REBA method)

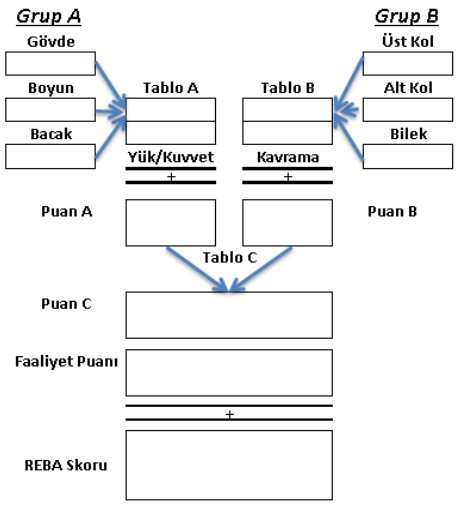
SKOR	TANIM
+1	Bir ya da daha fazla vücut bölümü statikse, örneğin 1 dakikadan daha uzun süre tutma
+1	Tekrarlanan kısa aralıklı eylemler varsa, örneğin dakikada 4 kereden fazla tekrarlama (yürüme hariç)
+1	Eylem, duruşta hızlı büyük değişikliklere neden oluyorsa ya da dengesiz duruş

Tablo 6. REBA yönteminde C grubu puanlaması (Group C scoring in REBA method)

TABLO C													
		B SKORU											
A SKORU		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tablo 7. REBA yönteminde risk düzeyleri (Risk levels in REBA method)

DERECE	REBA SKORU	RİSK SEVİYESİ	ÖNLEM DÜZEYİ
0	1	İhmal edilebilir	Gerekli değil
1	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa zaman için gerekli
4	11-15	Çok yüksek	Hemen gerekli



Şekil 3. REBA yöntemi puanlama şeması (REBA method scoring scheme)

3.2. İş Zorlanma İndeksi (Job Strain Index)

Çalışanlar üzerinde DUE (Distal Üst Estremite) bozuklukları ortaya çıkma ihtimalinin olup olmadığını tahmin etmek için kas- iskelet maruz kalma durumlarını değerlendirmede kullanılan yöntemlerden birisi SI yöntemidir (Stevens vd., 2004). Bu yöntem çalışanların duruş pozisyonlarını, hareket frekanslarını değerlendirirken el, bilek ve dirsek duruşlarını göz önüne almakta fakat titreşim ve yük faktörlerini göz ardı etmektedir (Moore ve Garg, 1995). JSI yöntemi eforun şiddeti, eforun süresi, dakika başına çaba, el- bilek duruşu, işin hızı ve görevin günlük süresi değişkenlerinin ölçümlerini gerektirir. Bu değişkenlerin hesaplanması ile elde edilen çarpanlar sonucunda SI skoru hesaplanır. SI skoru ilk olarak 5 ve 5'ten büyük işler tehlikeli, 5'ten küçük işler güvenli olarak yorumlanmıştır. Alternatif olarak ise 3'ten küçük işler güvenli, 3-7 arası muhtemel güvensiz ve incelenmeli, 7'den büyük olan işler ise tehlikeli olarak yorumlanmaktadır (Moore ve Garg, 1995). Moore ve Garg (1995), tarafından ortaya çıkartılan JSI yönteminin hesaplanması için gerekli olan değişkenlere karşılık gelen değerler Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 8. SI değerleri (SI values)

DERECE	1	2	3	4	5
Efor Şiddeti	Hafif	Biraz zor	Zor	Çok zor	Maksimuma yakın
Efor Süresi	<10	10-29	30-49	50-79	≥80
Dakika Başına Çaba	<4	4-8	9-14	15-19	≥20
El/Bilek Duruşu	Çok iyi	İyi	Uygun	Kötü	Çok kötü
İşin Hızı	Çok yavaş	Yavaş	Uygun	Hızlı	Çok hızlı
Görevin Günlük Süresi	<1	1-2	2-4	4-8	>8

Tablo 9. SI çarpanları (SI factors)

DERECE	1	2	3	4	5
Efor Şiddeti	1	3	6	9	13
Efor Süresi	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Dakika Başına Çaba	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
El/Bilek Duruşu	1,0	1,0	1,5	2,0	3,0
İşin Hızı	1,0	1,0	1,0	1,5	2,0
Görevin Günlük Süresi	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada, bir akaryakıt istasyonundaki oto yıkama ünitelerinde görevli çalışanların çalışma duruşları REBA ve JSI yöntemi ile analiz edilmiştir. REBA herhangi bir çalışma duruşu sırasında çalışanın tüm vücudunun, JSI ise üst uzuvların değerlendirmesini sağladığından dolayı kullanılmıştır. Kullanılan ekipmanların ve duruşların farklı olmasından ötürü oto yıkama işlemi köpükleme, fırçalama ve yıkama olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Bu üç bölüm için de ayrı ayrı REBA ve JSI skorları elde edilmiştir. Oto yıkama işlemi için ekipman olarak fırça, su tabancası ve köpük kullanılmıştır. Çalışan erkek olup 40-45 yaş aralığına sahiptir ve sektörde deneyim sahibidir. Elde edilen analizlerde skorların yüksek çıktığı bölümler ile ilgili iyileştirme önerileri verilmiştir.

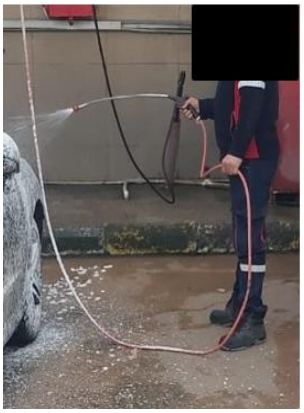
4.1. Köpükleme İçin REBA ve JSI Analizi (REBA and JSI Analysis for Foaming)

Köpükleme işleminde çalışan, köpük tabancasını kullanarak araçlara köpük püskürtmektedir. Bu işlemi dik bir şekilde, bacaklarını bükmeden veya eğilmeden yalnızca araç etrafında dönerek gerçekleştirmektedir. Şekil 4'te ve Şekil 5'te çalışanın köpükleme işlemi görselleri yer almaktadır.

Köpükleme işlemi için REBA analizinde ilk olarak 1 numaralı köpükleme görseline ait A skoru hesaplanmıştır. A grubu gövde, boyun ve bacaklardan oluşmaktadır. Köpükleme işleminde çalışan dik pozisyonda olduğundan dolayı gövde puanı "1", boyun puanı 0^0- 20^0 arasında bükülme olduğundan dolayı "2" ve ağırlık iki bacak üzerinde olup dizlerde 30^0- 60^0 arasında bükülme olduğundan dolayı bacak puanı "2" alınmıştır. Yük/ kuvvet puanı ise köpükleme tabancasının 5 kg'dan daha düşük olduğu için "0" olarak kabul edilmiştir. Böylece A skoru "2" olarak bulunmuştur.

B grubu ise üst kol, alt kol ve bileklerden oluşmaktadır. Köpükleme işleminde çalışanın üst kolu 20^0'den fazla bir açıya sahip olduğundan dolayı "2", alt kolu 60^0-100^0 arasında bükülmeye sahip olduğundan dolayı "1" ve bilekleri ise 0^0-15^0 arasında bir uzamaya sahip olduğundan dolayı "1" olarak alınmıştır. Kavrama puanı ise elle olan

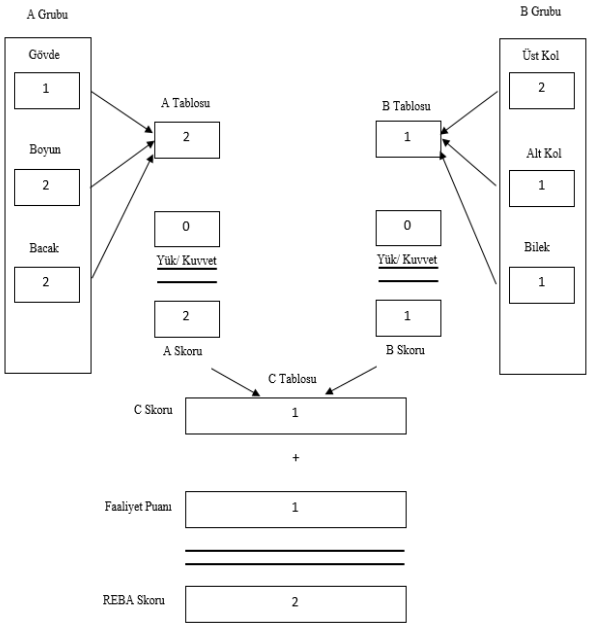
kavramanın iyi ve uzun vadede güçlü olmasından dolayı “0” olarak kabul edilmiştir. Böylece B skoru “1” olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 1 numaralı köpükleme işlemine ait çalışma duruşu (Working posture of foaming process No. 1)

Şekil 5. 2 numaralı köpükleme işlemine ait çalışma duruşu (Working posture of foaming process No. 2)

Elde edilen A ve B skorları ile C skoru hesaplanmış ve “1” olarak bulunmuştur. C skoruna eklenmek üzere faaliyet puanı “1” olarak değerlendirilmiş ve sonuçta köpükleme işlemi için REBA skoru “2” olarak hesaplanmıştır. Bu REBA skoru, risk düzeylerine göre değerlendirildiğinde risk seviyesinin “düşük” ve önlem olarak “gerekli olabilir” olduğu görülmüştür. Risk seviyesinin düşük olmasından dolayı köpükleme işlemi için bir iyileştirme çalışması önerilmemiştir. Şekil 6’da köpükleme işlemine ilişkin REBA şablonu yer almaktadır.



Şekil 6. Köpükleme işlemi için REBA analizi (REBA analysis for foaming process)

Köpükleme işlemi için yapılan JSI analizine göre çalışanlar 8 saat boyunca iş yerinde bulunmaktadır. Buna göre köpükleme işlemi için el, bilek ve dirsek pozisyonları JSI yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçta SI skoru 0,50 olarak bulunmuştur. Bu skor pozisyonların güvenli olduğunu göstermektedir. Köpükleme işlemine ilişkin JSI sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. 2 numaralı köpükleme işlemine ait görselde REBA ve JSI skoru değişmediğinden dolayı ayrı olarak hesaplanmamıştır.

Tablo 10. Köpükleme işlemi JSI sonuçları (Foaming process JSI results)

	MARUZ KALMA DEĞERLERİ	DERECE	ÇARPAN	SI SKORU
Efor Şiddeti	Hafif	1	1,0	0,5
Efor Süresi	%25	2	1,0	
Dakika Başına Çaba	<4	1	0,5	
El/ Bilek Duruşu	Çok İyi	1	1,0	
İşin Hızı	Uygun	3	1,0	
Görevin Günlük Süresi	6	4	1,0	

4.2. Fırçalama İçin REBA ve JSI Analizi (REBA and JSI Analysis for Brushing)

Fırçalama işleminde materyal olarak fırça kullanılmaktadır. Ayrıca araçların çamurluklarının, kapılarının, ön ve arka tamponlarının vb. fırçalanması için eğilme, aracın tavanını fırçalamak için de materyali omuz üzerinde tutma duruşları yapılmaktadır. Fırçalama işlemine ilişkin duruşlar Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7. Fırçalama işlemine ait çalışma duruşu (Working posture for brushing)

Fırçalama işleminde de ilk olarak A grubu hesaplanmıştır. Fırçalama işleminde çalışan 20^0-60^0 arası bükülme ve dönme hareketi olduğundan dolayı gövde puanı "4", boyun puanı 20^0 'den fazla bükülme ile dönme hareketi olduğundan dolayı "3" ve ağırlık iki bacak üzerinde olduğundan dolayı bacak puanı "1" alınmıştır. Yük/ kuvvet puanı ise fırça 5 kg'dan daha düşük olduğu için "0" olarak kabul edilmiştir. Böylece A skoru "6" olarak bulunmuştur.

B grubuna ilişkin fırçalama işleminde çalışanın üst kolu 45^0-90^0 arasında bükülmeye ve omuz yükseltilmiş durumda olduğundan dolayı "4", alt kolu 60^0-100^0 arasında bükülmeye sahip olduğundan dolayı "1" ve bilekleri ise dönmüş ve 0^0-15^0 arasında bir uzamaya sahip olduğundan dolayı "2" olarak alınmıştır. Kavrama puanı ise elle olan kavramanın iyi ve uzun vadede güçlü olmasından dolayı "0" olarak kabul edilmiştir. Böylece B skoru "5" olarak bulunmuştur.

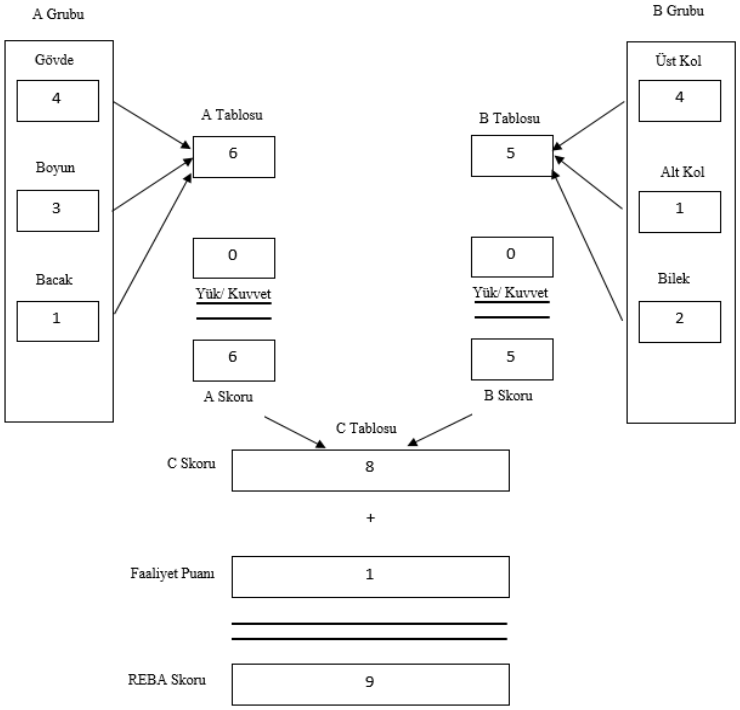
Elde edilen A ve B skorları ile C skoru hesaplanmış ve "8" olarak bulunmuştur. C skoruna eklenmek üzere faaliyet puanı "1" olarak değerlendirilmiş ve sonuçta köpükleme işlemi için REBA skoru "9" olarak bulunmuştur. Bu REBA skoru, risk düzeylerine göre değerlendirildiğinde risk seviyesinin "yüksek" ve önlem olarak "kısa zaman için gerekli" olduğu görülmüştür.

Fırçalama işlemi için yapılan JSI analizine göre çalışanlar 8 saat boyunca iş yerinde bulunmaktadır. Buna göre fırçalama işlemi için el, bilek ve dirsek pozisyonları JSI yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçta SI skoru 12 olarak bulunmuştur. Bu skor pozisyonların tehlikeli olduğunu göstermektedir. Burada çalışanların dönüşümlü olarak fırçalama yapmaları efor şiddetini düşüreceği için SI skorunu da düşüreceği hedeflenmektedir. Fırçalama işlemine ilişkin JSI sonuçları Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Fırçalama işlemi JSI sonuçları (Brushing process JSI results)

	MARUZ KALMA DEĞERLERİ	DERECE	ÇARPAN	SI SKORU
Efor Şiddeti	Biraz Zor	3	3,0	**12**
Efor Süresi	%25	2	1,0	
Dakika Başına Çaba	<4	1	2,0	
El/ Bilek Duruşu	Kötü	4	2,0	
İşin Hızı	Uygun	3	1,0	
Görevin Günlük Süresi	6	4	1,0	

Şekil 8'de fırçalama işlemine ilişkin REBA şablonu yer almaktadır.



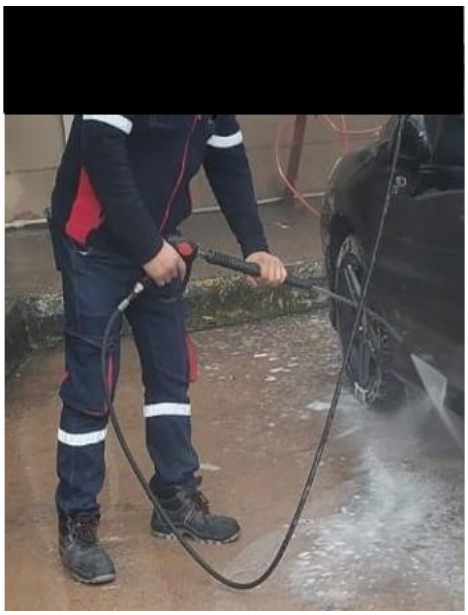
Şekil 8. Fırçalama işlemi için REBA analizi (REBA analysis for brushing process)

4.3. Yıkama İçin REBA ve JSI Analizi (REBA and JSI Analysis for Washing)

Bu aşamada ilgili oto yıkama istasyonunda yalnızca dış yıkama işlemi yapılmaktadır. Yıkama işleminde materyal olarak basınçlı su tabancası kullanılmaktadır. Fırçalama işleminde olduğu gibi yıkama işleminde de araçların çamurluk, ön ve arka tampon vb. bölümlerinin temizlenmesi için eğilme ve uzanma duruşları bulunmaktadır. Şekil 9 ve Şekil 10'da yıkama işlemine ilişkin görseller verilmiştir.

Yıkama işlemi için A grubunda gövde puanı 1 numaralı yıkama işlemine ait görsel de 20^0-60^0 arası bükülme ve dönme hareketi olduğundan dolayı "4", boyun puanı 20^0'den fazla bükülme ve dönme hareketinden dolayı "3" ve bacak puanı ise ağırlık iki bacak üzerinde olduğundan dolayı "1" olarak belirlenmiştir. Yük/ kuvvet puanı ise basınçlı su tabancası 5 kg'dan daha düşük olduğu için "0" olarak kabul edilmiştir. Böylece A skoru "6" olarak hesaplanmıştır.

B grubu için gözlemlenen üst kol puanı 20^0-45^0 arasında bükülme ve omuz yükseltilmiş durumda olduğundan "3", alt kol 60^0-100^0 bükülmeye sahip olduğundan dolayı "1" ve bilekler 15^0'den fazla bükülmeye sahip olup aynı zamanda dönmüş olduklarından dolayı "3" olarak hesaplanmıştır. Kavrama puanında ise elle olan kavramanın iyi ve uzun vadede güçlü olmasından dolayı "0" olarak kabul edilmiştir. Böylece B grubu puanı "5" olarak bulunmuştur.



Şekil 9. 1 numaralı yıkama işlemine ait çalışma duruşu (Working posture of washing process No. 1)

Elde edilen A ve B skorları ile C skoru hesaplanmış ve "8" olarak bulunmuştur. C skoruna eklenmek üzere faaliyet puanı "1" olarak değerlendirilmiş ve sonuçta köpükleme işlemi için REBA skoru "9" olarak bulunmuştur. Bu REBA skoru, risk düzeylerine göre değerlendirildiğinde risk seviyesinin "yüksek" ve önlem olarak "kısa zaman içerisinde gerekli" olduğu görülmüştür.

Şekil 10. 2 numaralı yıkama işlemine ait çalışma duruşu (Working posture of washing process No. 2)

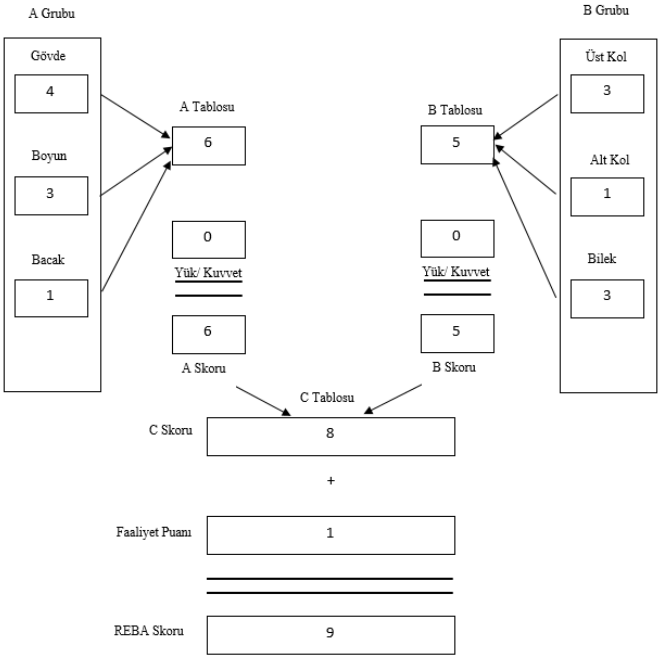
Yıkama işlemi için yapılan JSI analizine göre çalışanlar 8 saat boyunca iş yerinde bulunmaktadır. Buna göre yıkama işlemi için el, bilek ve dirsek pozisyonları JSI yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçta SI skoru 12 olarak bulunmuştur. Bu skor pozisyonların tehlikeli olduğunu göstermektedir. Yıkama işlemine ilişkin JSI sonuçları Tablo 12'de verilmiştir. 2 numaralı yıkama işlemine ait görsel de duruş pozisyonuna göre skorlarda herhangi bir farklılık olmadığından dolayı ayrı olarak hesaplanmamıştır.

Şekil 11'de yıkama işlemine ilişkin REBA şablonu yer almaktadır. Yıkama ve fırçalama işlemi için yapılan REBA analizinde özellikle eğilme ve bükülmelerden kaynaklı gövde ile boyun puanı, yükü omuz üzerinde tutmaktan kaynaklı ise üst kol puanını yüksek çıktığı görülmüştür. Bu duruş pozisyonlarının puanlarını düşürmek ve çalışanlara daha ergonomik bir duruş pozisyonu sağlamak için basınçlı su tabancasına ve fırçalara takılabilecek bir aparat FreeCAD programı ile tasarlanmıştır. Takılacak bu aparat sayesinde çalışanın araçları yıkarken ve fırçalarken eğilme ve bükülmeleri engellenebileceği gibi fırçalama ve basınçlı su tabancasını araçların tavanını

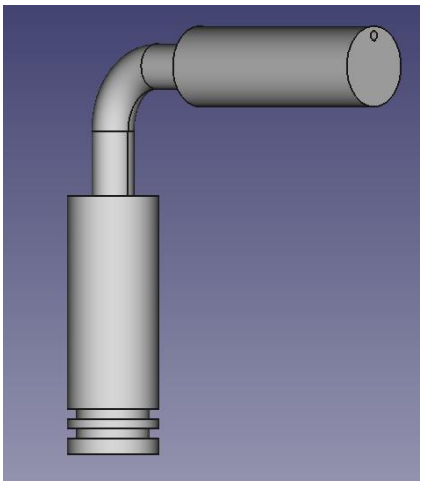
temizlemek için omuz yukarısında kaldırmasının da önüne geçilebilecektir. Şekil 12'de tasarlanan aparat yer almaktadır.

Tablo 12. Yıkama işlemi JSI sonuçları (Washing process JSI results)

	MARUZ KALMA DEĞERLERİ	DERECE	ÇARPAN	SI SKORU
Efor Şiddeti	Biraz Zor	2	3,0	**12**
Efor Süresi	%50,0	4	2,0	
Dakika Başına Çaba	4	2	1,0	
El/ Bilek Duruşu	Kötü	4	2,0	
İşin Hızı	Uygun	3	1,0	
Görevin Günlük Süresi	6	4	1,0	



Şekil 11. Yıkama işlemi için REBA analizi (REBA analysis for washing process)



Şekil 12. Önerilen aparat (Recommended apparatus)

Yıkama ve fırçalama işlemi için tasarlanan aparatın kullanılması ile öngörülen iyileştirme sonuçları analiz edilmiştir. Buna göre yıkama işlemi için çalışanın A skoru için gövde puanı dik duruştan dolayı "1", boyun puanı 0^0-20^0 arasında bükülme ile dönme hareketinden dolayı "2" ve bacak puanı ise ağırlık iki bacak üzerinde olduğundan dolayı "1" olarak alınmıştır.

B skorunda ise üst kol puanı 20^0-45^0 arasında bükülme olduğundan dolayı "2", alt kol 60^0-100^0 arasında bükülme olduğundan dolayı "1" ve bilekler 15^0'den fazla bükülmeye sahip olup aynı zamanda dönmüş olduklarından dolayı

"3" olarak hesaplanmıştır. Yük/ kuvvet puanı ile kavrama puanlarında bir değişiklik olmamıştır. Böylece C skoru 1 ve REBA skoru ise 2 olarak bulunmuştur. Elde edilen verilere göre REBA risk düzeyi "düşük" olarak sınıflandırılmıştır.

Fırçalama işlemi için çalışanın A skoru için gövde puanı dik duruştan dolayı "1", boyun puanı 0^0-20^0 arasında bükülme ile dönme hareketinden dolayı "2" ve bacak puanı ise ağırlık iki bacak üzerinde olduğundan dolayı "1" olarak alınmıştır. B skorunda ise üst kol puanı 20^0-45^0 arasında bükülme olduğundan dolayı "2", alt kol 60^0-100^0 arasında bükülme olduğundan dolayı "1" ve 0^0-15^0 arasında bir uzamaya sahip olduğundan "2" olarak hesaplanmıştır. Yük/ kuvvet puanı ile kavrama puanlarında bir değişiklik olmamıştır. Böylece C skoru 1 ve REBA skoru ise 2 olarak bulunmuştur. Elde edilen verilere göre REBA risk düzeyi "düşük" olarak sınıflandırılmıştır.

Yıkama işlemi için yapılan yeni JSI analizine göre çalışanlar 8 saat boyunca iş yerinde bulunmaktadır. Buna göre yıkama işlemi için el, bilek ve dirsek pozisyonları JSI yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçta SI skoru 2 olarak bulunmuştur. Bu skor pozisyonların güvenli olduğunu göstermektedir.

Fırçalama işlemi için yapılan yeni JSI analizine göre çalışanlar 8 saat boyunca iş yerinde bulunmaktadır. Buna göre yıkama işlemi için el, bilek ve dirsek pozisyonları JSI yöntemi ile değerlendirilmiş ve sonuçta SI skoru 2 olarak bulunmuştur. Bu skor pozisyonların güvenli olduğunu göstermektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstride insan gücüne olan talep azalmış olmasına rağmen halen daha işletmeler insan gücüne dayalı üretim yapmaktadır. Bu nedenle çalışanlara yeterli değerin verilmesi, uygun çalışma ortamlarının yaratılması vb. durumlar işletmeler açısından rekabet avantajı olarak sayılmaktadır. Çalışanlar için ergonomik ortamların tasarlanması kas- iskelet sisteminden doğan rahatsızların önüne geçebilirken aynı zamanda işletmelere de verimlilik artışı sağlamaktadır.

Bu çalışmada çalışanların duruş pozisyonlarını analiz etmek ve ergonomik risk yöntemleri açısından değerlendirmek amacıyla bir akaryakıt istasyonundaki oto yıkama ünitelerinde REBA ve JSI yöntemleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Oto yıkama esnasında çalışanın eğilme, dönme, kaldırma, titreme vb. hareketlerinin bulunması çalışanın kas- iskelet sistemi üzerinde yük oluşturmaktadır. Çalışmada referans alınan görevli sektörde deneyim sahibidir fakat 40-45 yaşlarında olması duruş pozisyonlarından kaynaklanan riskleri arttırmaktadır. Oto yıkama işlemi için ekipman olarak fırça, su tabancası ve köpük kullanılmıştır. Oto yıkama işlemi farklı duruş pozisyonları ve materyalleri içermesinden dolayı köpükleme, fırçalama ve yıkama olmak üzere üç farklı bölüme ayrılmıştır. Her bölüm için ayrı ayrı hesaplanan REBA ve JSI analizlerinde köpükleme işlemi için REBA skoru 2; JSI skoru 0,5, fırçalama işlemi için REBA skoru 9; JSI skoru 12 ve yıkama işlemi için ise REBA skoru 9; JSI skoru 12 olarak bulunmuştur. Bu üç bölüm arasından REBA risk düzeyi en yüksek olan yıkama ve fırçalama işlemleri olduğundan dolayı bu bölümler için iyileştirme önerilmiştir. Yıkama ve fırçalama işlemindeki duruş pozisyonları analiz edildiğinde çalışanın eğilme ile bükülmelerden kaynaklı gövde puanı ve basınçlı su tabancasını omuz üzerine kaldırmasından dolayı üst kol puanı yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunu düzeltmek ve çalışanın daha ergonomik olarak faaliyet göstermesini sağlamak amacıyla basınçlı su tabancasına ve fırçalara takılabilecek bir aparat tasarlanmıştır. Bu aparat sayesinde çalışanın eğilme ile bükülmelerinin önüne geçilebileceği gibi yükü omuz üzerinde kaldırmasına gerek kalmayacağı düşünülmüştür. Önerilen iyileştirmenin uygulanması halinde yıkama işlemi için hesaplanan yeni REBA skoru 2; JSI skoru 2 olarak bulunmuştur. Fırçalama işlemi için hesaplanan yeni REBA skoru 2; JSI skoru 2 olarak bulunmuştur.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalarda bu araştırma sonuçlarından yararlanılarak, akaryakıt istasyonlarındaki oto yıkama ünitelerinde ergonomik risk değerlendirme yapan ve çözüm önerilerini ortaya koyan bir ergonomik risk değerlendirme kılavuzu çalışmasının yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Buna bağlı olarak akaryakıt istasyonlarındaki oto yıkama ünitelerinde görev alan çalışanların örneklem düzeyi arttırılarak farklı yaş, cinsiyet, deneyim özelliklerine göre analizler yapılabilir. Ayrıca çalışanda kas iskelet sistemi üzerinde rahatsızlıklara sebebiyet veren sektörlerin belirlenerek, farklı sektörlerdeki ergonomik risk düzeylerinin de belirlenmesine ve önlenmesine ilişkin çözüm önerilerinin geliştirilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırma çalışmasında bana destek olan sayın Dr. Öğr. Üyesi Hatice Esen'e ve değerli aileme çok teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Akay, D., Toksari, M. D., 2009. Ant Colony Optimization Approach for Classification of Occupational Low Back Disorder Risks. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, 19 (1), 1–14.

Ansari, N. A., & Sheikh, M. J., 2014. Evaluation of work Posture by RULA and REBA: A Case Study. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 11(4), 18-23.

Aygün, İ., Çakmak, B. ve Alayunt, F.N., 2018. Narenciye Hasadının Ergonomik Açıdan İncelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(0), 312-318.

Ayvaz, Ö., Özyıldırım, B. A., İşsever, H., Öztan, G., Atak, M., & Özel, S., 2023. Ergonomic Risk Assessment of Working Postures of Nurses Working in a Medical Faculty Hospital with REBA and RULA Methods. Science Progress, 106(4), 00368504231216540.

Bera, D., Sarkar, S., Mallick, B., & Das, M. C., 2024. Assessment of Posture Related Risks among Goldsmiths Using Rapid Upper Limb Assessment (RULA) and Rapid Entire Body Assessment (REBA). Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 1-8.

Bilir, N., 2011. Meslek Hastalıkları Tanı, Tedavi ve Korunma İlkeleri. Hacettepe Tıp Dergisi, 42(4), 142-157.

Deros, B. M., Daruis, D. D. I., Rosly, A. L., Abd Aziz, I., Hishamuddin, N. S., Abd Hamid, N. H., & Roslin, S. M., 2017. Ergonomic Risk Assessment of Manual Material Handling at an Automotive Manufacturing Company. PressAcademia Procedia, 5(1), 317-324.

Kâhya, E., Çiçek, E., 2019. Seramik Sektöründe Taşıma İşlemlerinde Ergonomik Risk Değerlendirmesi- Bir Pilot Çalışma. Ergoterapi ve Rehabilitasyon Dergisi, 7 (1), 47-58.

Kara, Y., Atasagun, Y., Peker, A., 2014. Montaj Hatlarında Çalışma Duruşlarının REBA Yöntemi ile Analizi ve Ergonomik Risk Değerlendirmesi, 7. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı, 5 - 7 Mayıs, İstanbul.

Kee, D., 2021. Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders. International Journal of Industrial Ergonomics, 83, 103140.

Kibria, M. G., 2023. Ergonomic Analysis of Working Postures at a Construction Site Using RULA and REBA Method. Journal of Engineering Science, 43-52.

Kocabaş M., 2009. Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalışan İş Görenlerde Zorlanmaya Neden Olan Çalışma Duruşlarının Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi.

Kodle, N. R., Bhosle, S. P., & Pansare, V. B., 2023. Ergonomic Risk Assessment of Tasks Performed by Workers in Granite and Marble Units Using Ergonomics Tool's REBA. Materials Today: Proceedings, 72, 1903-1916.

Kurniaty, S., 2024. The Ergonomic Analysis and Work Efficiency of Mixue Operators Using Work Factor and REBA Methods. JIeTri: Journal of Industrial Engineering Tridinanti, 2(01), 31-37.

Meyers, A.R., Gerr, F. & Fethke, N. B., 2014. Evaluation of Alternate Category Structures for The Strain Index: An Empirical Analysis. Human Factors, 56(1), 131-142.

Moore, J.S., Garg, A., 1995. The Strain Index - A Proposed Method to Analyze Jobs for Risk of Distal Upper Extremity Disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56 (5), 443 -458.

Muhacir, D., Aktaş, M. İ., Özceylan, E., 2023. REBA and RULA Ergonomics Risk Assessments of Operators in a Maintenance and Repair Workshop of a Textile Factory. Acta Technica Napocensis – Series: Applied Mathematics Mechanics and Engineering, 65 (3S).

Özay, M.E., Doğanbatır, Ç.S., 2018. Parakende Sektöründe Bir Süpermarkette REBA, NIOSH ve SNOOK Tabloları Yöntemlerini Kullanarak Ergonomik Risk Analizi Vaka Çalışması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6(3), 448-459.

Paulsen, J.P., 2013. Reliability of Ergonomic Exporuse Assesment: Comparing The Strain Index and The OCRA Checklist. M S Thesi s, Colorado State Universty, Fort Collins, Colorado.

Polat, O., Mutlu, Ö., Çakanel, H., Doğan, O., Özçetin, E., Şen, E., 2017. Bir Mobilya Fabrikasında Çalışan İşçilerin Çalışma Duruşlarının REBA Yöntemi ile Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5, 263-268

Pundhir, K., Singh, D., 2024. Ergonomics Evaluation of Farm Workers: Correlation of RULA and REBA Score in the Vegetable Production System. Mysore J. Agric. Sci, 58(2), 154-159.

Restuputri, D. P., Masudin, I., Putri, A. R. C., 2020. The Comparison of Ergonomic Risk Assessment Results Using Job Strain Index and OCRA Methods. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 821, 012029

Sabancı, A., Sümer, S.K., 2015. Ergonomi. Nobel Akademik Yayıncılık Yayın No: 80. Ankara, 472 s. Sağıroğlu, H., Coşkun, M.B. ve Erginel, N. 2015. REBA İle Bir Üretim Hattındaki İş İstasyonlarının Ergonomik Risk Analizi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), 339-345

Sağıroğlu, H., Coşkun, M.B. ve Erginel, N., 2015. REBA ile Bir Üretim Hattındaki İş İstasyonlarının Ergonomik Risk Analizi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), 339-345.

Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., Hendrick, H. 2005. Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods, CRC Press, Florida

Stevens, E.M., Vos, G.A., Stephens, J.P., Moore, J.S., 2004. Inter -Rater Reliability of The Strain Index. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 1 (11), 745 -751.

Ulutaş. İ., Gündüz T., 2017. Otomotiv Kablo İmalatında Ergonomik Risk Analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22(2), 107-119.

Ünver, O. S., Kaya, A., 2015. Orman Fidanlıklarında Fidan Repikaj İşlerinde Çalışma Duruşlarının REBA Yöntemi ile Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 3(3), ÖS: Ergonomi2015, 157-163.

Widodo, L., Ariyanti, S., Jason, A., 2020. Ergonomic Intervention to Improve The Productivity of Brick Press Tool in Small and Medium Entreprise (SME) Akheng Kobar. In *IOP Conference Series:* Materials Science and Engineering 847, 012057

Yadi, Y. H., Kurniawidjaja, L. M., Susilowati, I. H., 2018. Ergonomics Intervention Study of the RULA/REBA Method in Chemical Industries for MSDs' Risk Assessment. KnE Life Sciences, 181-189.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 397-411, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1575971

Araştırma Makalesi

Research Article

VERİ GÜDÜMLÜ KONTROLDE VERİ KALİTESİNİN KRİTİK ROLÜ: BİR DA MOTOR UYGULAMASI

Güray SONUGÜR[1*]

[1] Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

Anahtar Kelimeler

DA Motor Kontrolü, Veri Güdümlü Kontrol, Yapay Sinir Ağları, PID, Sentetik Veri.

Öz

Bu çalışmada, veri güdümlü kontrol (VGK) kapsamında doğru akım (DA) motorlarının hız denetiminde giriş verisi türlerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, klasik PID ve öğrenme tabanlı olarak çalışan Yapay Sinir Ağları (YSA) denetleyicileri karşılaştırılmıştır. VGK, bir sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymadan giriş-çıkış verilerine dayalı olarak denetim parametrelerinin hesaplanabilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. Bu kapsamda, basamak, sinüs, testere dişi, rastgele ve karışık olmak üzere beş farklı türde sentetik veri seti üretilmiş, normalize edilerek DA motorlara giriş voltajı olarak uygulanmış ve motor milinin çıkış hızları ölçülmüştür. Toplanan veriler ile tasarlanan veri güdümlü PID ve YSA denetleyiciler en uygun veri seti/ denetleyici çiftini tespit etmek için gerçek zamanlı deneylere tabi tutulmuştur. Gerçek zamanlı deneylerden elde edilen sonuçlar, ortalama karesel hata, yükselme süresi, oturma süresi ve en yüksek yüzde aşma gibi performans ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca, DA motorun kontrol yanıtlarını optimize etmek amacıyla bulanık mantık tabanlı bir ölçekleme çarpanı tahmin sistemi geliştirilmiştir. Deneysel bulgular, öğrenme tabanlı stratejilerle eğitilen YSA denetleyicilerinin, özellikle yüksek çeşitlilik içeren veri setleri ile daha başarılı performans sergilediğini göstermiştir.

THE CRITICAL ROLE OF DATA QUALITY IN DATA-DRIVEN CONTROL: A DC MOTOR CASE STUDY

Keywords

DC Motor Control, Data-Driven Control, Artificial Neural Network, PID, Synthetic Data.

Abstract

This study looked into the effect of different forms of input data on the speed control of direct current (DC) motors under data-driven control (DDC). For this purpose, traditional PID and learning-based Artificial Neural Network (ANN) controllers were evaluated. DDC is a method for calculating control parameters based on input-output data without the requirement for a mathematical model of the system. In this context, five distinct types of synthetic data sets, namely step, sine, sawtooth, random, and mixed, were produced, normalized, and applied as input voltage to DC motors, with the output shaft speeds monitored. Real-time experiments were performed on the data-driven PID and ANN controllers developed with the obtained data to determine the best dataset/controller combination. The results of the real-time experiments were evaluated using performance criteria such as mean squared error, rising time, settling time, and maximum percentage overshoot. In addition, a fuzzy logic-based scaling factor prediction system was built to optimize the DC motor's control responses. The experimental results show that ANN controllers trained with learning-based strategies perform better, especially with high-diversity data sets.

Alıntı / Cite

Sonugür, G., (2025). Veri Güdümlü Kontrolde Veri Kalitesinin Kritik Rolü: Bir DA Motor Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 397-411.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

G. Sonugür, 0000-0003-1521-7010

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	30.10.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	17.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.03.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: gsonugur@aku.edu.tr, +90-272-218-2529

THE CRITICAL ROLE OF DATA QUALITY IN DATA-DRIVEN CONTROL: A DC MOTOR CASE STUDY

Güray SONUGÜR[1†]
[1]Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Mechatronic Engineering, Afyonkarahisar, Türkiye

Highlights

- The sensitivity of Data-Driven Control (DDC) to Input Data Forms was revealed.
- The importance of input data type and controller selection on controlling performance is emphasized.
- Real-time experiments were used to compare ANN and PID controllers.
- A fuzzy logic based scaling factor estimation system was developed.

Graphical Abstract

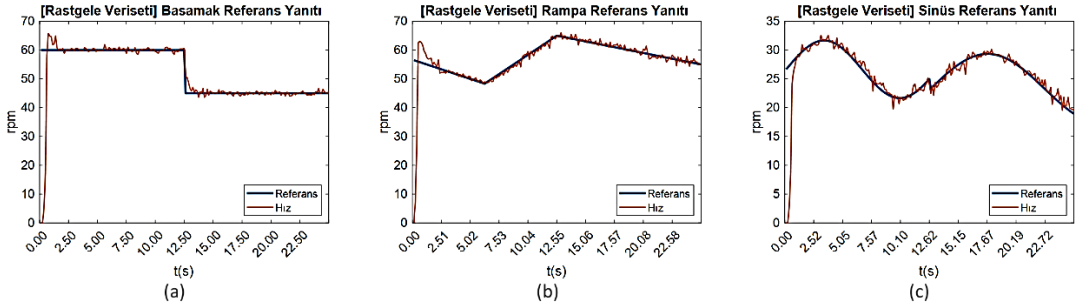


Figure. ANN controller responses (a) step reference, (b) ramp reference (c) sine reference

Purpose and Scope

The aim of this research is to examine the impact of dataset characteristics on the performance of data-driven control methods, with a focus on understanding how these characteristics influence control performance in DC motor speed control.

Design/methodology/approach

In this study, a DC motor's speed was controlled using data-driven PID and ANN techniques, and the outcomes were compared. The control algorithms were tested in real time on a DC motor using data sets of various characteristics in order to simulate the motor's realistic behavior. Specifically, the features of the dataset that influence the control algorithms' performance were examined.

Findings

ANN controllers trained with high uniqueness data sets outperform PID controllers, according to tests.

Originality

This work is unique in that it uses experimental analysis on real DC motors to investigate how dataset properties impact the efficiency of data-driven control approaches. The study conducts an in-depth examination of various dataset properties that affect data-driven control algorithm performance and proves their effect on motor control using real-time experiments.

† İlgili yazar / Corresponding author: gsonugur@aku.edu.tr, +90-272-218-2529

1. Giriş (Introduction)

Doğru akım (DA) motoru, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir tür elektrikli makinedir. Robotik, elektrikli araçlar, endüstriyel otomasyon ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer motorlara göre avantajları; daha iyi tork ve hız özellikleri, dinamik değişikliklere daha iyi tepki, yüksek güç/ağırlık oranı, akım uyartımına ihtiyaç duymaması, az gürültülü çalışması ve düşük maliyetidir (Kamal vd., 2014; Moussavi vd., 2012; Purnama vd., 2019). Bununla birlikte, bir DA motordan optimum performans ve verim elde etmek için direnç, endüktans, tork sabiti ve zıt elektro motor kuvvet (emk) sabiti gibi parametrelerini bilmek önemlidir. Bu parametreler yaşlanma, aşınma, yıpranma, çevresel koşullar, yük değişiklikleri ve zamana bağlı faktörler nedeniyle değişebilir. Bu nedenle motor parametrelerini doğru ve uyarlanabilir bir şekilde tanımlamak gerekir.

On yıllar boyunca kontrol teknikleri, Model Tabanlı Kontrolün (MTK, Model-based Control-MBC) çeşitli tiplerinden Veri Güdümlü Kontrole (VGK, Data Driven Control – DDC) doğru evrilmiştir (Khan vd., 2017). VGK, matematiksel bir modele dayanmadan, sistemden toplanan verilere dayalı denetleyiciler tasarlamayı amaçlayan bir kontrol teorisi dalıdır. Bunun tersi olarak MTK'de motor parametrelerinin fiziksel ilkeler ve matematiksel eşitlikler doğrultusunda hesaplanması ve/veya motor parametrelerinin üretici kataloglarından belirlenmesi veya deneysel olarak ölçülmesi gerekir. Örneğin armatür direncinin, armatür indüktansının veya eylemsizlik momentinin ölçülmesi vb. Bu şekilde sistemin transfer fonksiyonları veya durum uzay modelleri oluşturulabilir. VGK, robotik, havacılık ve akıllı şebekeler gibi karmaşık ve belirsiz sistemlere uygulanabilirliği nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Hou vd., 2017). Bununla birlikte, VGK yöntemlerinin performansı büyük ölçüde giriş verilerinin kalitesine, etkinliğine ve miktarına bağlıdır. Rastgele, periyodik veya optimal sinyaller gibi farklı türdeki giriş verileri, VGK yöntemlerinin doğruluğu ve sağlamlığı üzerinde farklı etkilere sahip olabilir. Bu nedenle, VGK çalışmalarında giriş verisi türlerinin denetleyici performansını nasıl etkilediğinin araştırılması önemlidir

Bir DA motorun veriye dayalı tanımlanması, motorun hiçbir fiziksel parametresine ihtiyaç duymadan ölçülen giriş-çıkış verilerinden parametrelerini tahmin etme sürecidir. Bu yaklaşım, belirsizliklere ve doğrusal olmayan durumlara karşı daha dayanıklı olması, daha az hesapsal maliyet gerektirmesi ve her tür DA motora uygulanabilir olması gibi geleneksel MTK yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Veri toplama esnasında DA motorların normal çalışmaları sırasında karşılaşmaları muhtemel senaryoların büyük bir kısmının motorlara uygulanması gerekir. Aksi takdirde özellikle öğrenme tabanlı denetleyiciler genelleştiremedikleri senaryolara karşı doğru tepkileri üretemezler. Motor parametrelerinin tanımlanmasının ardından ikinci adım uygun bir denetleyici tasarlamaktır.

Bu makalede DA motorların hız kontrol performansını değerlendirmek için gerçek zamanlı veri kullanımının önemi vurgulanmaktadır. VGK kapsamında giriş veri seti türlerinin kontrol performansı üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunulmuştur. Basamak, rampa, sinüs, rastgele gibi farklı formattaki sentetik veri setlerinin denetleme performansını kararlılık ve sağlamlık açısından nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Böylece VGK kontrol yöntemlerinin performansında veri seti formlarının oynadığı rol tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan analizlerde simülasyonlar kullanılmamış, gerçek motorlarla gerçek zamanlı 42 farklı tipte deney gerçekleştirilmiş ve dört farklı performans verisi ölçülmüştür. Çoğunlukla kontrol performansını belirlemek amacıyla simülasyonlar kullanılırken, bu çalışma ile gerçek motorlar üzerinde deneyler yapılarak elde edilen sonuçların güvenilirliği yükseltilmeye çalışılmıştır. Böylece sonuçların endüstriyel uygulamalarda daha doğru ve etkili kontrol stratejilerinin geliştirilmesi için kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, VGK algoritmalarının DA motorlarının hız kontrolü için etkili bir yöntem olduğu ve farklı veri modellerinin hız kontrolü performansına farklı etkileri olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca bu etkiler otomatik kontrol literatüründe başlıca iki yaklaşımı temsil eden PID (geleneksel) ve YSA (öğrenme tabanlı) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

VGK yönteminde toplanan veriler ile farklı tipte kontrol stratejileri uygulanabilmektedir. Örneğin giriş-çıkış verileri arasında bir ilişki kurulup matematiksel modele dayalı bir transfer fonksiyonu elde edilebilir ve ardından bir PID (Jeng ve Ge, 2016; Özbaltan ve Çaşka, 2024; Baciu ve Lazar, 2023), LQR (Lineer Quadratic Regulator/ Doğrusal Karesel Düzenleyici) (Suleimenov ve Do, 2019) veya Geri adımlama (Back stepping Control) (Weng ve Wang, 2020) gibi geleneksel denetleyiciler geliştirilebilir. Bunun yanı sıra bu veriler ile öğrenme tabanlı denetleyiciler de tasarlanabilir. Örneğin (Hamoodi vd., 2019)'da iki YSA ve PID temelli iki teknik ile DA motorlarının parametreleri tanınmaya çalışılmıştır. Sonuçta YSA tabanlı tekniğin daha başarılı sonuçlar ürettiği yazarlar tarafından vurgulanmıştır. (Chaudhary vd., 2017)'da Uyarlanabilir Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-ANFIS) kullanılarak modellenen bir DA motor kontrol çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, PID ve Bulanık Mantık kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve en başarılı sonuçların ANFIS yönteminde elde edildiği belirtilmiştir. Öğrenme tabanlı yöntemler içinde zaman serilerini dikkate alarak giriş-çıkış ilişkisi oluşturan sinir ağları da vardır. Bunlar, hafızalı öğrenme yöntemleri olarak da bilinmektedirler. Bu yöntemlerde belirli bir döngü içinde çıkışlar ve girişler belirli bir zaman

gecikmesi ile giriş veri setlerine dahil olurlar (Munagala ve Jatoth, 2022). En çok kullanılanları Dışsal Girdili Doğrusal Olmayan Otokorelasyon (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs - NARX) yöntemi (Mishra, 2009) ve Tekrarlayan sinir ağı (Recurrent Neural Network- RNN) (Ismeal vd., 2014) yöntemleridir.

VGK sürecindeki en önemli adımlardan birisi DA motorların giriş ve çıkış verilerinin toplanmasıdır. Eğer bu noktada hatalı veya gürültülü veriler toplanırsa tanınan parametreler hatalı ve dolayısıyla da denetleyici başarısız olacaktır. (Salah ve Abdelati, 2010) tarafından yapılan çalışmada bir fırçalı DA motorunun giriş voltajı, çıkış devir hızı armatür akımı verileri bir DAQ cihazı vasıtasıyla toplanmıştır. (Carlet vd., 2020)'de ise bir DA senkron motorun hız denetimi için rastgele belirlenen voltaj girdilerine karşılık elde edilen akım verileri ile bir model oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, giriş veri setlerine göre denetleyici performanslarının değişimini tespit etmek amacıyla bir adet öğrenme tabanlı bir adet de klasik denetleyici seçilmiştir. Öğrenme tabanlı olarak YSA denetleyici, geleneksel denetleme yöntemi olarak PID kullanılmış ve performansları karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

VGK, sistem dinamiklerinin matematiksel modellerine dayanmadan karmaşık sistemler için denetleyiciler tasarlamayı amaçlayan bir denetleme stratejisidir. Bu tip denetleyiciler sistemi nasıl kontrol edeceklerini öğrenmek için denetlenecek sistemden elde edilen giriş-çıkış verilerini kullanır.

2.1. Veri Güdümlü Kontrol (Data-Driven Control)

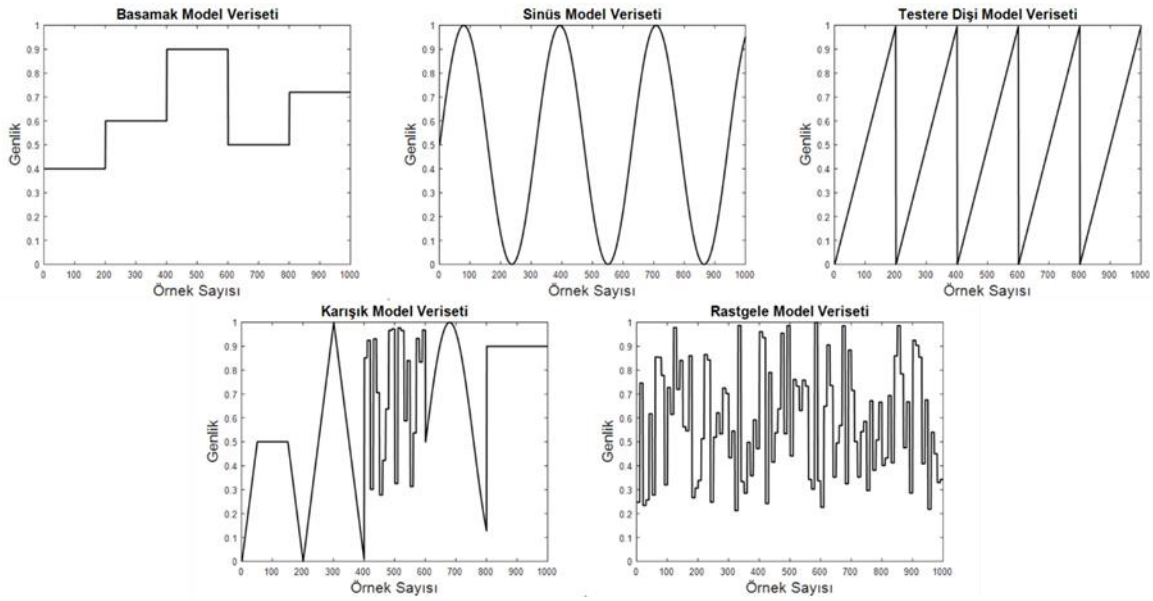
Bu çalışmada, iki farklı stratejideki iki farklı yöntem kullanılmıştır. Öğrenme tabanlı VGK (ÖT-VGK) denetleyiciler ve Model tabanlı VGK (MT-VGK) denetleyiciler. ÖT-VGK denetleyiciler, sistem dinamiklerini açıkça modellemeden doğrudan verilerden bir kontrol stratejisi öğrenir. Bu stratejiye kara kutu modelleme ismi de verilmektedir. MT-VGK denetleyicilerde ise verilerden sistemin giriş-çıkış ilişkisi transfer fonksiyonu veya durum uzay modeli vb. olarak çıkartılarak sistem parametreleri hesaplanır. Bu tür stratejilere de gri kutu modelleme ismi verilmektedir. Her iki denetleyici türü de kullanılan giriş verilerinin niteliğine ve niceliğine bağlıdır.

Öğrenme tabanlı denetleyiciler iki kategoride sınıflandırılabilir: takviyeli öğrenme (Reinforcement Learning) ve eğiticili öğrenme (Supervised Learning). Takviyeli öğrenmeyi kullanan denetleyiciler sistemle etkileşime girerek ve eylemlerine bağlı olarak ödüller veya cezalar alarak bir kontrol politikası öğrenir. Eğiticili öğrenmeyi kullanan denetleyiciler ise bir dizi girdi ve doğru çıktı etiketleri kullanarak bir modelin öğrenmesi işlemidir. Her iki öğrenme tipini kullanan denetleyicilerden yüksek performans elde etmek için büyük miktarda girdi verisi gerekir. Bu verilerin, kullanılan sistemin farklı durumlarını ve eylemlerini kapsaması ve arka plandaki dinamiklerini ortaya çıkarması için çeşitli ve bilgilendirici olması gerekir. Giriş verileri eksik, gürültülü, dengesiz dağılımlı, tekrarlı veya bozuksa, öğrenme tabanlı denetleyici ilk defa karşılaştığı durumlar için genelleme yapamayabilir ve optimal veya güvenli olmayan yanıtlar oluşturabilir.

VGK stratejisini kullanmayan model tabanlı denetleyicilerde sistem parametreleri üretici kataloglarından veya sistem üzerinden ayrıntılı ölçümlerin yapılmasıyla elde edilir. DA motorlar özelinde motorun armatür direnci, armatür indüktansı veya eylemsizlik momentleri ölçüm cihazlarıyla ölçülebilir. Ardından fiziksel ilkelere göre matematiksel eşitliklerin oluşturulup gerekli hesaplamaların yapılması gerekir. Ancak, bu tip modellemede sistemi oldukça basitleştirecek bir kısım varsayımların yapılarak sistem karmaşıklığının azaltılması gereklidir. Bu durumda hesaplanan modeller sistemi tam olarak yansıtmayacaktır. MT-VGK denetleyiciler tipik olarak öğrenme tabanlı denetleyicilerden daha az girdi verisi gerektirir, çünkü sistem yapısı veya özellikleri hakkında önceki bilgi veya varsayımlardan faydalanılabilir. Ya da sadece üretici kataloglarından veya ölçme yoluyla elde edilemeyen parametreler için kestirimlerde bulunulabilir. Ancak yine de giriş verilerinin doğru olması ve sistem dinamiklerini yüksek oranda temsil etmesi gerekir. Giriş verileri çok gürültülü, tutarsız veya eksikse, model tabanlı denetleyici, performansını veya kararlılığını düşüren model hatalarından veya belirsizliklerden kötü yönde etkilenebilir. Sonuç olarak, girdi verileri veri güdümlü denetleyicilerin performansında çok önemli bir rol oynamaktadır (Chi vd., 2018; Umlauft ve Hirche, 2020; Yu vd., 2021). Öğrenme tabanlı denetleyiciler ve model tabanlı denetleyicilerin giriş verilerine ilişkin farklı gereksinimleri ve zorlukları vardır. ÖT-VGK denetleyiciler yüksek doğrulukta bir kontrol politikası öğrenerek giriş-çıkış arasındaki ilişkiyi genelleştirebilmeleri için için büyük miktarda, çeşitli ve bilgilendirici giriş verisine ihtiyaç duyar. MT-VGK denetleyiciler ise sistem parametrelerinin gerçeğe yakın bir modelini çıkartmak için gerçek sistem ile model arasında yüksek eşleşme oranını sağlayacak verilere ihtiyaç duyar. Bu nedenle, uygun giriş verilerinin seçilmesi, etkili ve sağlam VGK denetleyicilerin tasarlanması için çok önemlidir.

2.2. Giriş Veri setleri (Input Datasets)

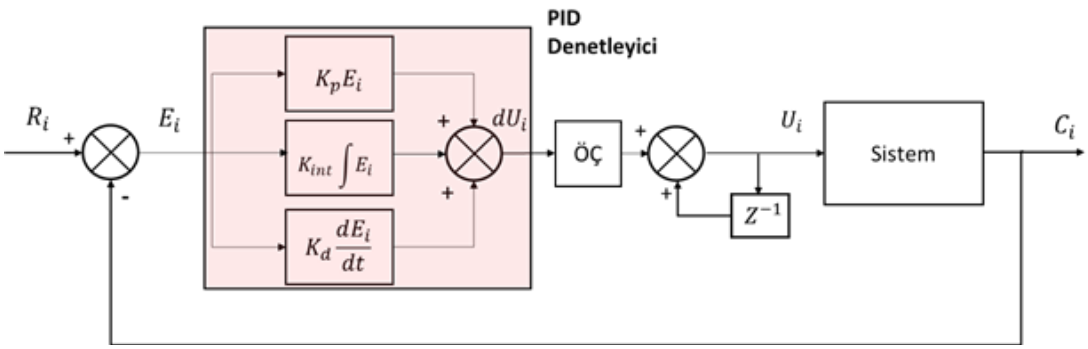
Bu çalışmada, MT-VGK yöntemi olarak PID, ÖT-VGK yöntemi olarak YSA seçilmiştir. MT-VGK tasarımında öncelikle, denetlenecek sistemin s-alanındaki transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bunun için Matlab R2020 yazılımının "System Identification (SI)" araç kutusu kullanılmıştır. Sonrasında P, I ve D katsayılarının ince ayarı için yine aynı yazılımın "PID Tunning" araç kutusu kullanılmıştır. Öğrenme tabanlı denetlemede YSA mimarisini geliştirmek için yine Matlab R2020 yazılımı kullanılmıştır. Her iki denetleme yönteminde de ortak olarak kullanılan girdi veri setleri Şekil 1'de verilmiştir. Her iki tip denetleme stratejisinde de girdi verileri DA motorların besleme gerilimlerinde kullanılan darbe genişlik modülasyonu (DGM - PWM) görev-oranıdır (duty cycle). Görev oranları genelde yüzde oran olarak verilir ve 0-1 aralığındaki sayılarla ifade edilir. Girdi veri setlerinde kullanılan sinyal tipleri basamak, sinüs, testere dişi, rastgele ve karışık olarak seçilmiştir. Girdi veri setinin boyutları tüm veri setlerinde eşit olarak belirlenmiştir. Ortalama 0.18s örnekleme periyodunda her bir veri seti tipi için gerçek zamanlı olarak 1000'er adet veri girdi-çıktı çifti toplanmıştır.



Şekil 1. Giriş olarak kullanılan veri seti karakteristikleri (Data set characteristics used as input)

2.3. PID Denetleyiciler (PID Controllers)

PID denetleyicileri, basit yapıları sayesinde pek çok farklı tipte sistemin denetleme süreçlerinde pratik çözümler sunabilir. Ayrıca geçici durum yanıtını hızlandırarak sistemin istenen değere daha çabuk ulaşmasını sağlar ve kararlı durum hatasını azaltarak sistemin ayar noktasından sapmasını önler. PID denetleyicilerinin bu avantajlarından tam olarak faydalanabilmek için, kontrolör parametrelerinin sisteme uygun bir şekilde seçilmesi gerekmektedir (Vural ve Bayindir, 2010). Çalışmada kullanılan PID denetleyicinin blok şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan PID denetleyici yapısı (PID controller structure used in the study)

Burada, i: iterasyon numarası, R_i: Önceden belirlenmiş olan referans değer, C_i: sistem çıkışı, E_i: hata, dU_i: denetleyici çıkışı, U_i: sistem girişi, ÖÇ: ölçekleme çarpanı ve Z^{-1}: birim gecikme olmak üzere, R_i ve C_i arasındaki fark olan E_i'nin olabildiğince azaltılması için oransal (K_p), integral (K_{int}) ve türev (K_d) katsayıları düzenlenir. PID denetleyicilerde çıkış değeri Eşitlik 1-2'de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$dU_i = K_p E_i + K_{int} \int E_i dt + K_d \frac{dE_i}{dt} \quad (1)$$

$$U_i = \text{ÖÇ} * dU_i + U_{i-1} \quad (2)$$

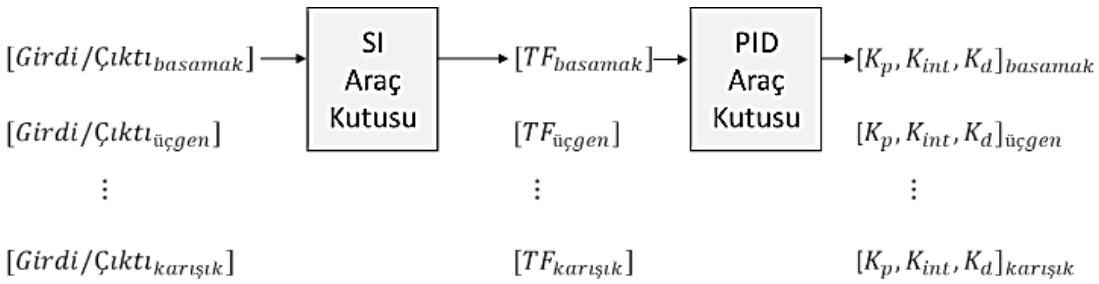
PID denetleyici için basamak, sinüs eğrisi, testere dişi, rastgele ve karışık olarak adlandırılan ve örnekleri Şekil 1'de verilen altı farklı tipte elde edilen model giriş/çıkış verileri kullanılarak altı farklı transfer fonksiyonu ve altı $[K_p, K_{int}, K_d]$ katsayı üçlüleri hesaplanmıştır. Transfer fonksiyonlarının hesaplanabilmesi için giriş değerleri ve bu değerlerin sistem yanıtları kullanılarak bir sistem tanımlama (System Identification-SI) işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için Matlab R2020 SI araç kutusu kullanılmıştır. Bu araç kutusu, sistem tanımlama yöntemlerini kullanarak matematiksel modeller oluşturmaya ve sistemlerin davranışını analiz etmeye yarayan bir araç kutusudur. Bu işlem ile deneysel olarak elde edilen sistem giriş-çıkış verilerinin analiz edilmesi sonucu giriş ile çıkış arasındaki ilişki tanınmaya çalışılır. Yani sistemlerin matematiksel modellerinin çıkarılmasına olanak tanır. Matlab R2020'de PID tasarımı için başka araçlar ve fonksiyonlar da mevcuttur, örneğin "pidtune" ve "pidtool". Bu araçlar, otomatik PID katsayı optimizasyonu için kullanışlı grafik ara yüzleri sağlar. Matlab araç kutuları; P, PI, PD ve PID katsayılarını çeşitli yöntemler kullanarak ayarlar:

1. Ziegler-Nichols Ayar Metodu: Bu yöntem, sistemin tepkisini analiz ederek PID katsayılarını belirler. İlk olarak, P katsayısı sıfır alınır ve D katsayısı kapatılır. Sisteme bir adım girişi uygulanır ve çıkış tepkisi gözlenir. Tepkideki salınım periyodu ve salınım dönemi ölçülür. Ziegler-Nichols formüllerini kullanarak P, I ve D katsayıları hesaplanır.

2. Frekans Tepki Yöntemi: Bu yöntemde, sistem frekans tepkisi kullanılarak PID katsayıları belirlenir. İlk olarak, sistem frekans tepkisi alınır ve belirli bir frekans aralığında analiz edilir. Elde edilen frekans tepkisi kullanılarak PID katsayıları tahmin edilir veya optimize edilir.

3. Optimizasyon tabanlı ayarlama: Bu yöntem, istenen bir performans ölçütünü optimize eden PID katsayılarını bulmak için optimizasyon tekniklerini kullanır. Optimizasyon tabanlı ayarlama çok yüksek performans elde etmek için kullanılabilir, ancak hesapsal maliyeti yüksek olabilir.

Bu yöntemler Matlab yazılımında PID türevi yöntemlerin katsayılarını belirlemek için kullanılan yaygın yöntemlerdir (Mohamed vd., 2010). Çalışmada PID katsayılarının elde edilmesi için gerçekleştirilen işlem adımları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Matlab R2020 araç kutularının kullanımı (Using Matlab R2020 toolboxes)

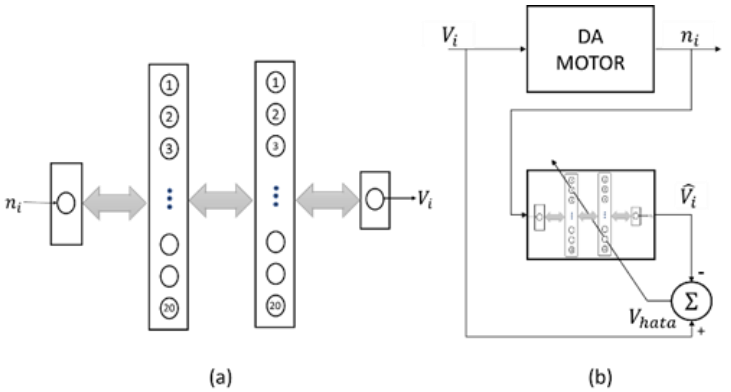
Burada, $[Girdi, Çıktı]_j$ model verisetine göre DA motordan elde edilen görev-oranı ile dönüş hızı verilerini, $[TF_j]$ modele göre SI araç kutusu tarafından elde edilen transfer fonksiyonlarını ve $[K_p, K_{int}, K_d]_j$ üçlüleri de PID katsayılarını temsil etmektedir.

2.4. YSA Denetleyiciler (ANN Controllers)

YSA, insan sinir sistemini basit bir şekilde matematiksel olarak temsil eden bir modeldir. Bir sinir ağı, eğitim verilerini öğrenme ve genelleme yeteneğine sahip bir bilgi işleme sistemidir. Birbirine bağlı çok sayıda işlem elemanlarından (nöron) oluşan katmanlardan kurulu bir mimariye sahiptir (Keles vd., 2023). Bu kapsamda pek çok sinir ağı mimarisi geliştirilmiştir. YSA tabanlı denetleyiciler otomatik kontrol süreçlerinde yaygın olarak kullanılan öğrenme tabanlı denetleyicilerdir. Genellikle doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için kullanılırlar. Bu denetleyiciler, geri besleme döngüsü kullanarak bir hedef referans değere ulaşmak amacıyla gerekli olan çıkışları üretmek için önceden eğitilirler. YSA mimarisinde nöronların eşik değerleri ve nöronlar arası bağlantıların sayısal ağırlık değerleri vardır. YSA'nın eğitim süreci, söz konusu ağırlık ve eşik değerlerinin optimize edilmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bir YSA'nın eğitilmesi için giriş ve bu girişlere karşılık oluşan çıkış verilerinin mevcut olması gerekir. YSA'lar giriş ve çıkış verileri arasında doğrusal olmayan bir haritalama yapmak suretiyle daha önceden hiç karşılaşmadıkları girişlere karşı doğruya en yakın çıkışı üretmeyi amaçlarlar. Doğruya en yakın

sonuçların alınması için eğitimde kullanılan giriş ve çıkış değerlerinin yeterli nicelik ve nitelikte olması gerekir. Yapay sinir ağı temelli denetleyicilerin avantajı, hedefi belirleyen ve hedefe ulaşmak için gerekli olan çıkışları üreten öğrenme yeteneğidir (Timurkutluk vd., 2023). Bu yetenek sayesinde YSA denetleyiciler bozucu etkiler ile değişen dış koşullara ve değişen referans değerlere uyum sağlayabilirler. Bu çalışmada çevrim dışı eğitimli bir YSA kullanılmıştır. Bu yöntemde, motora uygulanan voltaj değerlerine karşılık gelen motor dönüş hızlarını eşleştiren bir dizi giriş/çıkış verisi kullanarak bir sinir ağı çevrimdışı olarak eğitilir.

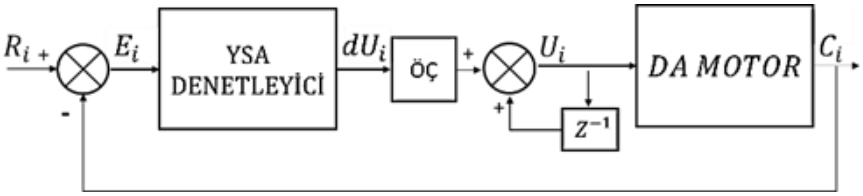
Eğitim giriş verisi olarak basamak, sinüs eğrisi, testere dişi, rastgele ve karışık olarak adlandırılan ve örnekleri Şekil 1'de verilen altı farklı tipte sentetik veri kullanılmıştır. Eğitim sürecinden sonra elde edilen sinir ağı yapısı motorun hızını düzenlemek için kapalı döngü bir kontrol sisteminde kullanılmıştır. Tasarlanan sinir ağı 20'şer nörondan oluşan 2 gizli katman ile giriş ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. YSA modelinin mimarisi ve süreçleri Şekil 4'te blok şema olarak açıklanmıştır.



Şekil 4. (a) YSA mimarisi, (b) YSA modelinin yapısı ((a) ANN architecture, (b) ANN model structure)

Şekilde; V_i, DA motorlara uygulanan görev-oranını, n_i, devir/dakika cinsinden açısal hız çıkışını, $\widehat{V}_i$, Tahmin edilen görev-oranı çıkışını ve V_{hata}:,YSA modelinde geriye yayılan gerçek çıkışla tahmin edilen çıkış arasındaki farkı temsil etmektedir.

Kontrol sistemi, giriş kontrol sinyallerine dayalı olarak motor hızını tahmin etmek için sinir ağını kullanır ve istenen motor performansını elde etmek için kontrol sinyallerini buna göre ayarlar. Bu şekilde DA motorlarda tanımlanması zor olabilen belirsizliklerin olumsuz etkileri azaltılarak YSA'nın motorun tepkilerini doğrudan verilerden öğrenmesi sağlanmıştır. Yapay sinir ağı tasarımı, problemin bağlamına, verisetinin özelliklerine ve performans hedeflerine bağlı olarak değişir. Tasarımda kullanılacak en uygun parametrelerin belirlenmesi için deneme yanılma süreçleri gerçekleştirilmiş ve modellerin performansı izlenmiştir. Bir DA motorunda görev-oranı ve dönüş hızı arasındaki ilişkinin öğrenilmesi zor bir süreçtir. Çünkü DA motorların zamana bağlı olarak değişen iç dinamikleri vardır. Bu nedenle, tek gizli katmanlı tasarımlar yerine iki gizli katmanlı bir tasarım seçilmiştir. Gizli katman sayısının arttırılması ise hesapsal maliyetin artması ve ezberleme (aşırı öğrenme) gibi sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Gizli katmanda 20'şer nöron kullanarak DA motorlardaki görev-oranı ile dönüş hızı ilişkisi arasındaki zamana bağlı örüntülerin daha yüksek doğrulukta ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Daha düşük nöron sayılarıyla yapılan denemelerde test verilerindeki ortalama karesel hata performansının yeterli olmadığı gözlenmiştir. Her bir model için oluşturulan 1000'er verilik verisetlerinden 900'ü eğitim ve doğrulama süreçlerinde 100'ü de bağımsız test işlemlerinde kullanılmıştır. Yani ayrılan 100 adet veri, eğitim sürecine katılmamıştır. Bu şekilde eğitilmiş ağ, ilk defa karşılaştığı veriler ile test edilebilmiştir. Bu testler sayesinde YSA'nın genelleme yeteneği ölçülmüş ve aşırı öğrenme gibi istenmeyen durumların önüne geçilmiştir. Bu süreç ile ilgili ayrıntılı açıklamalar bölüm 3.2'de verilmiştir. Tasarlanan denetleyici mimarisi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Denetleyici mimarisi (Controller architecture)

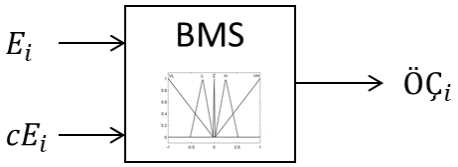
Burada; R_i: Önceden belirlenmiş olan referans değerler, C_i: Sistem Çıkışı, dU_i: Denetleyici Çıkışıdır. Diğer bileşenler Eşitlik 3-4'te verilmiştir.

$$E_i = R_i - C_i \quad (3)$$

$$U_i = \text{ÖÇ} * dU_i + U_{i-1} \quad (4)$$

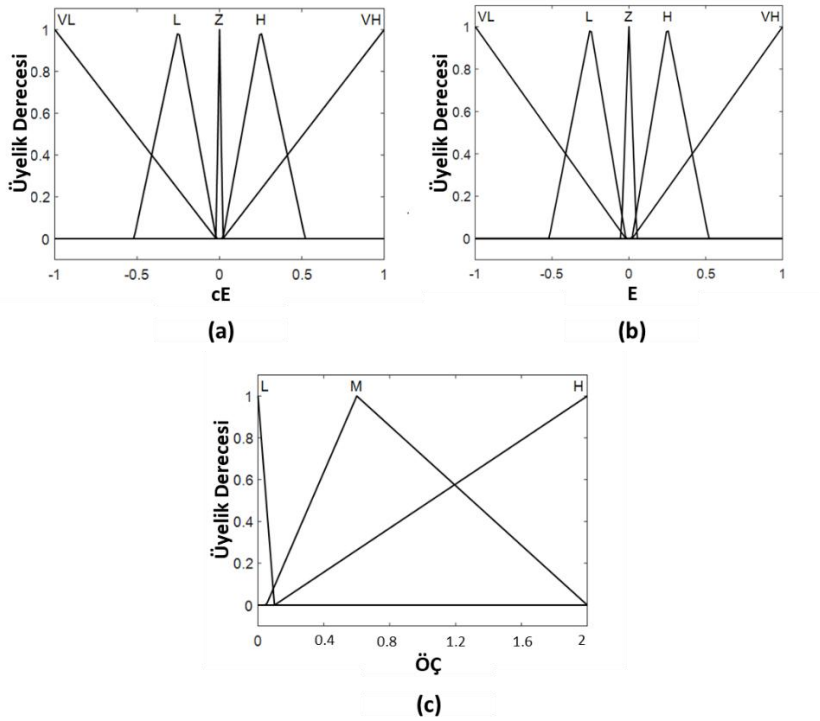
2.5. Ölçekleme Çarpanları (Scaling Factors)

Ölçekleme çarpanları (ÖÇ) zamana bağlı performans ölçütlerinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin yazılımlarında her çevrimde elde edilen sistem çıkışları belirlenen ÖÇ değerleri ile ölçeklenerek referans değerlere daha hızlı yaklaşması amaçlanmıştır. ÖÇ kullanımı, giriş ve çıkış verilerinin büyüklük ve birimlerindeki farklılıkların denetleyici sistemlerin performansı üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Kullanılan denetleyici tasarımında girdiler görev-oranıdır. Denetleyici çıkışları ise motorun dönüş hızıdır. Özellikle daha hassas kontrol süreçlerinde denetleyici çıkışlarının söz konusu seviyelere kısa sürelerde erişimi için bir ölçekleme yapılması çoğu zaman kaçınılmazdır. Yapılan çalışmada, kullanılan yöntem ve veri modeli bazında farklı ÖÇ değerleri elde edilmiştir. ÖÇ hesaplamasında bulanık mantık sistemi (BMS) (Uysal vd., 2019)tabanlı bir yöntem kullanılarak sonuca en hızlı ulaşmayı sağlayacak bir optimizasyon yazılımı geliştirilmiştir. Kullanılan BMS iki giriş ve bir çıkışlı olup Şekil 6'da gösterildiği gibi tasarlanmıştır.



Şekil 6. BMS tabanlı ÖÇ hesaplama sisteminin yapısı (Structure of the BMS based ÖÇ calculation system)

Burada E_i i anındaki Hata ve cE_i hatanın değişimidir. Girişler (-1,1) aralığında çıkış ise (0,2) aralığında değişmektedir. Giriş değişkenleri için 5'er bulanık küme ve üçgen üyelik fonksiyonları, çıkış için ise 3 bulanık küme ve üçgen üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Grafiklerde yatay eksenler evrensel kümeleri yani değer aralıklarını temsil etmektedir. Seçilen bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları Şekil 7'de verilmiştir.

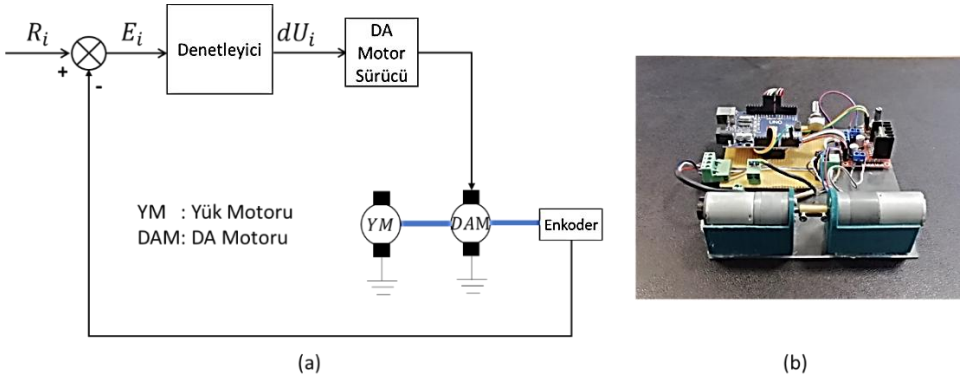


Şekil 7. BMS 'de kullanılan (a) hatanın değişimi, (b) hata ve (c) ölçekleme çarpanı üyelik fonksiyonları ((a) Change in error, (b) error, and (c) scaling factor membership functions used in BMS)

Bulanık küme etiketleri olarak VL: Çok Düşük, L: Düşük, Z: Sıfır, H:Yüksek, VH: Çok Yüksek ve M: Orta ifadeleri kullanılmıştır. Böylece, ÖÇ kullanımı ile sistem çıkışlarının yakınsama oranını iyileştirilmeye, aşırı şekilde büyük ve küçük çıkışlar engellenmeye çalışılmıştır.

2.6. Deney Platformu Kurulumu (Experiment Platform Setup)

Gerçek zamanlı deneysel çalışmaları gerçekleştirmek üzere, biri 100 d/dk'lık, diğeri 500 d/dk'lık iki adet DA motor içeren, 500 d/dk'lık motorun yük motoru olarak kullanıldığı, bir Arduino mega ve bir DA motor sürücü devresi ile oluşturulan bir deney platformu tasarımı yapılmıştır. Hız kontrolü uygulanan DA motoru, mil vasıtasıyla yük motoruna mekanik olarak bağlanmıştır. Kurulan deneysel donanımın şematik gösterimi Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Kurulan deney platformunun (a) şematik, (b) gerçek gösterimi ((a) Schematic, (b) actual representation of the experimental platform)

Deney platformu DA motorların hız ve yön kontrolünü sağlamak için Arduino mega mikro denetleyicisi ile L298N motor sürücü modülünü kullanmaktadır. L298N motor sürücü modülü iki adet DA motorun hızını DGM sinyali ile kontrol etmek ve yönünü değiştirmek için kullanılan bir entegredir. Deney platformunda, 100 d/dk'lık motor, kontrol motoru olarak kullanılmıştır. Bu motorun hızı, çeşitli dalga şekillerinde (basamak, rampa ve sinüs) referans hızlar kullanılarak denetlenmiştir. Arduino mega, Matlab yazılımı ile hazırlanan program tarafından gönderilen yanıt değerlerine göre DGM sinyali üretmiş ve bu sinyali L298N modülüne göndermiştir. 500 d/dk'lık motora ise herhangi bir şekilde DGM uygulanmamış, sadece kontrol motoruna sabit torka sahip bir yük oluşturacak şekilde kullanılmıştır. Yük motoru herhangi bir şekilde tahrik edilmediği için sadece kendi eylemsizliği, sürtünme kuvveti, sönümleme katsayısı, ters elektromotor kuvveti ve şaft hizasızlığı gibi parametreleri ile bir yük oluşturmuştur. Arduino mega, kontrol motorunun hızını optik enkoder (48 CPR) ile ölçerek bu değeri yazılıma geri besleme olarak göndermektedir.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Model tabanlı ve öğrenme tabanlı VGK denetleyicilerde beş farklı modelde girdi veriseti kullanıldığı belirtilmişti. Bu girdiler kullanılarak tasarlanan denetleyicilerin performanslarını gerçek zamanlı olarak ölçebilmek amacıyla üç farklı tipte referans sinyal oluşturulmuştur. Bu sinyaller basamak, rampa ve sinüs sinyalleri şeklinde ve tamamen aynı boyutlarda üretilmiştir. Ölçme işlemlerinde kullanılan performans ölçütleri; ortalama karesel hata (E_{rms}): her çevrimde tepki ile referans arasındaki fark değerlerinin rms değeri, yükselme zamanı (t_r): tepkinin referans değerin %90'ına ulaşması için geçen süre, oturma zamanı (t_s): tepki eğrisinin anlık değerinin referansın ±%5'i ile belirtilen aralığa ulaşması ve bu aralıkta kalması için geçen süre ve en yüksek yüzde aşma (M_p): tepki eğrisinin en yüksek tepe değerinin mevcut referans noktasına oranıdır. Bulgular bölümünde yüzde oran (%) olarak verilebilmesi için sonuçlar x100 şeklinde verilmiştir. Denetleyicilerin referansı takip performanslarını daha iyi ölçebilmek amacıyla her üç farklı tipte referans sinyallerin sabit kalmayıp farklı karakterlerde değişimi sağlanmıştır. Basamak tipi referans süreç boyunca iki farklı değer alırken, rampa tipi referans üç farklı eğimde ve sinüs tipi referans ise iki farklı frekanstan oluşmaktadır. t_s hesaplaması sırasında bir kısım varsayımlar yapılmıştır. Tepki sinyali analizinde %5 'lik hata dilimi içerisinde kalan ilk ardışık 10 değer yakalandığı anda t_s oluştuğu varsayılmıştır. t_s oluştuktan sonra %5'lik hata diliminde meydana gelen değişiklikler dikkate alınmamıştır.

3.1. Veri Güdümlü PID Denetleyici (Data-Driven PID Controllers)

Bu stratejide, kullanılan farklı model girdi verilerine karşılık elde edilen çıktı değerleri arasında Matlab R2020 SI araç kutusu kullanılarak her bir model için s-alanında birer transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu transfer fonksiyonları geri beslemeli ve seri kompanzasyonlu denetim mimarisi içinde DA motorunun (plant) temsil etmektedir. Genel olarak gerçek çıkışlar ile tahmin edilen transfer fonksiyonu tepkileri arasındaki en yüksek uyumlar ikinci dereceden transfer fonksiyonlarında elde edilmiştir. Daha yüksek dereceden transfer fonksiyonlarında sonuçları etkileyecek değerde eşleşme çıkmadığı için transfer fonksiyonlarının tamamı ikinci dereceden tercih edilmiştir. DA motorun hız denetimini sağlamak üzere tasarlanan PID denetleyicinin

katsayılarını hesaplamak amacıyla Matlab PID optimizasyonu araçları kullanılmıştır. Bu şekilde, en hızlı yanıt süresine sahip ve en sağlam denetimi gerçekleştiren $[K_p, K_{int}, K_d]$ katsayıları hesaplanmıştır. Bazı veriseti modellerinde K_d katsayıları oluşmamıştır. Ayrıca yanıt süresini kısaltmak ve DA motorlara gönderilen kontrol sinyallerini ölçeklemek amacıyla denetleyici çıkışları BMS'den elde edilen ÖÇ katsayılarıyla çarpılmıştır. ÖÇ katsayıları her işlem adımında E_i ve cE_i değerlerine göre optimize edildiği için sabit bir değer değildir. Bu süreçte her model veriseti için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PID yöntemi için hesaplanan transfer fonksiyonları ve katsayılar
(Transfer functions and coefficients calculated for PID method)

MODEL VERİSETİ	TRANSFER FONKSİYONU	K_p	K_{int}	K_d
Basamak	$\frac{120,2}{s^2 + 10,58s + 131,1}$	2,35	15,62	0,085
Sinüs	$\frac{0,039}{s^2 + 4,22e - 13s + 0,046}$	13,85	1,24	38,55
Testere	$\frac{1143}{s^2 + 1257s + 12270}$	1,76	22,1	0
Rastgele	$\frac{115,5}{s^2 + 10,17s + 131,1}$	2,3	15,08	0,085
Karışık	$\frac{874,9}{s^2 + 609,8s + 946,5}$	1,89	3,21	0

Doğrusal ve zamanla değişmeyen sistemlerin tek bir transfer fonksiyonlarının bulunması gerekir. Bu çalışmada aynı DA motoru için ikinci dereceden birden fazla transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bunun nedeni, DA motorların tam anlamıyla doğrusal ve zamanda değişmeyen bir sistem olmamasıdır. Her bir girdi türü motorun elektriksel ve mekanik özellikleriyle farklı şekilde etkileşime girerek farklı transfer fonksiyonlarına yol açabilir. DA motorlarının ısınma ve manyetik alan doygunluğu gibi sebeplerden yanıtlarının farklılaşabilmesi ya da farklı frekanstaki girdilere karşı frekans yanıtlarının farklı olabilmesi gibi nedenlerden dolayı farklı transfer fonksiyonlarının oluştuğu değerlendirilmiştir. Bu farklılaşma, çeşitli çalışma koşulları altında motor performansının anlaşılmasına ve optimize edilmesine yardımcı olabilecek bilgiler içermektedir.

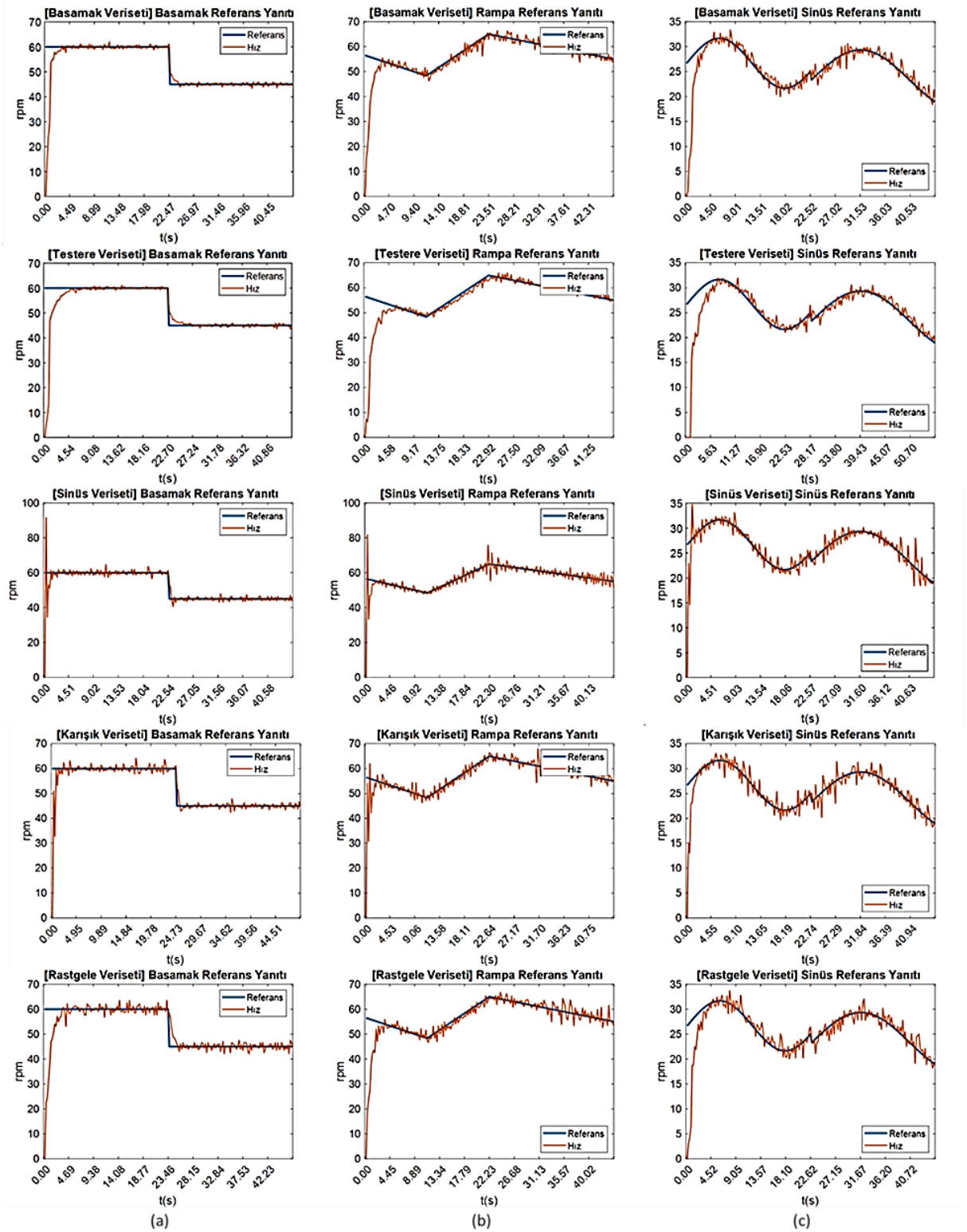
3.2. Veri Güdümlü YSA Denetleyici (Data-Driven ANN Controller)

Her bir model veri seti için 1000'er adet girdi-çıktı örneğinin toplandığı Bölüm 2.2'de belirtilmişti. Bu verilerden 900'ü eğitim ve doğrulama süreçlerinde 100'ü bağımsız test işlemlerinde kullanılmıştır. Yani ayrılan 100 adet veri eğitime sürecine katılmamıştır. Bu şekilde eğitilmiş ağ, ilk defa karşılaştığı veriler ile test edilebilmiştir. Hazırlanan bir program ile her bir model 50 defa eğitim sürecinden geçirilerek 100 adet test verisi ile test edilmiş ve en düşük ortalama karesel hataya sahip eğitilmiş ağ seçilmiştir. Eğitim fonksiyonu olarak Bayesian Regularization, eğitim oranı 0.01, giriş ve gizli katmanların transfer fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant, çıkış katmanı transfer fonksiyonu olarak doğrusal fonksiyon ve kayıp fonksiyonu olarak da ortalama karesel hata fonksiyonu kullanılmıştır. PID ve YSA için belirlenen parametreler ile özellikleri belirtilen DA motoru kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen performans sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

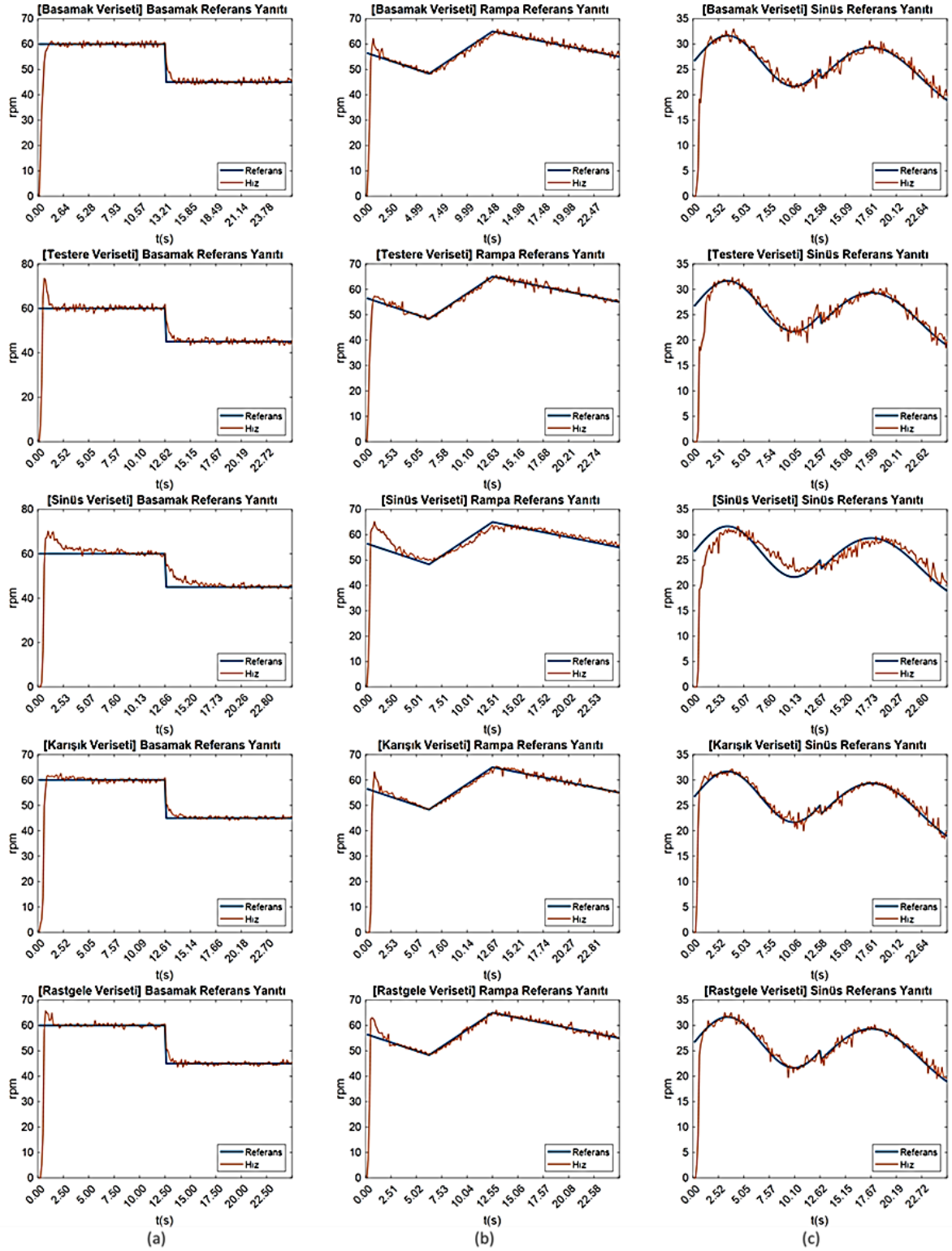
Tablo 2. Gerçek zamanlı deneylerden elde edilen performans sonuçları (Performance results from real-time experiments)

MODEL VERİSETİ	REFERANS TİPİ	E_{rms}		$t_r(s)$		$t_s(s)$		$M_p(\%)$	
		PID	YSA	PID	YSA	PID	YSA	PID	YSA
Basamak	Basamak	6,38	8,65	2,22	1,4	2,15	1,95	7,2	3,5
Sinüs	Basamak	7,12	7,25	0,4	0,68	1,62	4,98	42,8	17,2
Testere	Basamak	6,83	6,1	3,67	0,45	4,4	1,13	5,9	19,1
Rastgele	Basamak	7,75	4,25	3,32	0,56	3,96	1,35	6,8	13,3
Karışık	Basamak	7,52	4	0,89	0,8	2,44	1,82	6,6	6,2
Basamak	Sinüs	8,4	16,8	2,02	1,01	2,83	1,4	8,9	17,1
Sinüs	Sinüs	8,55	15,7	0,81	1,5	2,85	Yok	25,5	20,5
Testere	Sinüs	8,85	7,1	4,05	1,3	6,1	2,61	23,8	11,4
Rastgele	Sinüs	11,25	6,75	2,03	0,57	3,46	1,69	5,6	9,5
Karışık	Sinüs	11	6,4	1,22	0,8	1,22	1,48	20,2	5,3
Basamak	Rampa	7,85	9,6	2,53	0,45	1,9	1,57	5,4	15,5
Sinüs	Rampa	8,05	6,9	0,4	0,45	1,2	7,2	32,6	12,5
Testere	Rampa	8,25	5,4	3,1	0,68	4,1	0,68	3,9	10,9
Rastgele	Rampa	9,4	4,75	1,8	0,45	2,2	1,78	6,8	11,1
Karışık	Rampa	9,1	4,35	0,4	0,68	1,63	1,22	10,7	11,4

Verilen performans sonuçlarının grafik olarak gösterimleri ise Şekil 9-10'da verilmiştir. Grafiklerde DA motor hızları d/dk cinsinden verilmiş ve dikey eksende "rpm" etiketi ile temsil edilmiştir. Yatay eksen ise saniye (s) cinsinden verilmiş ve "t" etiketi ile temsil edilmiştir.



Şekil 9. PID denetleyici yanıtları (a) basamak referans, (b) rampa referans (c) sinüs referans (PID controller responses (a) step reference, (b) ramp reference (c) sine reference)



Şekil 10. YSA denetleyici yanıtları (a) basamak referans, (b) rampa referans (c) sinüs referans (ANN controller responses (a) step reference, (b) ramp reference (c) sine reference)

3.3. t-Testleri Sonuçları (t-Scores)

t-Testleri, iki grup veri arasında anlamlı farkların olup olmadığını ortaya çıkaran istatistikleridir. Teknik olarak iki grup veri arasındaki ortalama farkın standart hataya oranı olarak tanımlanabilirler. Eşitlik 5-6'da verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$\frac{\overline{PID} - \overline{YSA}}{\sqrt{var_b^2(\frac{1}{n_{PID}} + \frac{1}{n_{YSA}})}} \quad (5)$$

$$var_b^2 = \frac{(n_{PID} - 1)var_{PID}^2 + (n_{YSA} - 1)var_{YSA}^2}{n_{PID} + n_{YSA} - 2} \quad (6)$$

Eşitliklerde, $\overline{PID}, \overline{YSA}$: birinci ve ikinci grup verilerin ortalamalarını, var_b^2: birleştirilmiş varyansı, n_{PID}, n_{YSA}: sırasıyla birinci ve ikinci gruptaki veri sayılarını, var_{PID}^2, var_{YSA}^2: sırasıyla birinci ve ikinci grup verilerin varyanslarını temsil etmektedir. Bu yöntemde, grup veriler arasında farkı analiz ederken p-değeri adı verilen başka bir istatistiksel büyüklük hesaplanır. p-değeri, t-Testlerinin tesadüfen oluşma olasılığını hesaplamaktadır. Dolayısıyla küçük olmaları beklenmektedir. Genel olarak p-değeri<0.05, gruplar arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, denetleyici sistemlerin performansları açısından en önemli analizin model verisetleri temelinde E_{rms} değerleri olacağı değerlendirilmiştir. Bu nedenle t-değeri istatistikleri bu kapsamda hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo-3'de verilmiştir.

Tablo 3. Model veri setleri temelinde değeri için t-Testi Sonuçları (t-Test Results for based on model data sets)

MODEL VERİSETİ	p-DEĞERİ	SONUÇ
Basamak	0.192	Anlamlı fark yok
Sinüs	0.511	Anlamlı fark yok
Testere	0.101	Anlamlı fark yok
Rastgele	0.007	Anlamlı fark var (p < 0.05)
Karışık	0.008	Anlamlı fark var (p < 0.05)

4. Sonuç (Conlusion)

Bu çalışmada DA motorların giriş-çıkış verilerine göre tasarlanan model tabanlı ve öğrenme tabanlı denetleyicilerin farklı giriş verisi tiplerine göre performansları test edilmiştir. Model tabanlı denetleyiciler için sistemin transfer fonksiyonları elde edilmiş, öğrenme tabanlı denetleyiciler için giriş ve çıkış verileri arasında bir sinir ağı tasarlanmıştır. Model tabanlı denetleyici olarak PID, öğrenme tabanlı denetleyici olarak YSA kullanılmıştır. Sistem çıkışlarına filtre uygulandığı takdirde sinyaldeki dalgalanma ve gürültüler belirli ölçülerde bastırılabilmektedir. Ancak, deneysel çalışmalarda sonuçları etkilememesi için sistem çıkışlarına herhangi bir filtre uygulanmamıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde rms hata (E_{rms}) ölçütü temel olarak alınmıştır. Çünkü bu ölçüt diğer tüm performans ölçütlerini de doğrudan etkilemektedir. Sonuçlar, model veri seti tipine göre ve referans sinyal tipine göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Veri seti tipine göre E_{rms} değerlendirildiğinde en iyi sonuçlar basamak referansında rastgele ve karışık model veri setleriyle eğitilen YSA denetleyiciden elde edilmiştir. Bu sonucu destekleyecek şekilde, gerçekleştirilen t-testi çalışmaları neticesinde model veri setleri temelinde PID ve YSA yöntemleri arasındaki en anlamlı farkların rastgele ve karışık veri setlerinde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu durum, öğrenme tabanlı kontrol stratejilerinde veri setlerinin rastgele ve karışık modelllerde seçilebileceğini işaret etmektedir. YSA denetleyiciler basamak veri seti tipi dışındaki diğer tüm veri setlerinde PID'den daha iyi performans göstermiştir. DA motorun zamanla değişen karakteristikleri (örneğin aşınma, sıcaklık değişiklikleri) PID denetleyicinin başlangıçta ayarlanan parametreleriyle uyumsuz hale gelebileceği için başarısız sonuçların alındığı kanaatine varılmıştır. Rastgele ve karışık girdi veri setlerinde girdi uzayının her bölümünden verilerin olması ve verilerin hızlı değişimleri veri çeşitliliği olarak bir avantaja dönüşmüş ve giriş-çıkış ilişkisinin daha başarılı öğrenilmesine olanak tanımıştır. Ayrıca DA motorların doğrusal olmayan dinamiklerinin YSA'nın uyarlanabilirlik ve hata toleransı gibi özellikleri ile çözülmesi bu sonucun ortaya çıkmasını kolaylaştırmıştır. Bu şekilde öğrenme tabanlı denetleme stratejilerde girdi verilerinin benzersizliğinin önemi ortaya çıkmıştır. Kendini tekrar eden periyodik yapıdaki girdilerden elde edilen eğitim veri setlerinin ise karmaşık ve zamana bağlı iç dinamikleri olan DA motorların giriş-çıkış ilişkisini yeterince çözemedikleri kanaatine varılmıştır. Öğrenme tabanlı denetleme stratejisinde en başarısız sonuçlar sinüs referansında basamak veri setlerinde ortaya çıkmıştır. Sinyal değişiminin oldukça az olduğu sabit değerlerden oluşan basamak veri setlerinde öğrenmenin tam olarak gerçekleşmemesi sonucu DA motorun çalışma karakteristiği tam olarak genelleştirilemediği için sinüs gibi değişken bir referansa uyum sağlayamamıştır. Bu sonuç, öğrenme tabanlı kontrol sistemlerinde eğitim veri setinin kalitesinin önemini vurgulamaktadır.

PID yönteminde en başarılı performanslar basamak referansında basamak ve testere model veri setlerinden alınmıştır. Bu yöntemde rastgele ve karışık model veri setlerinde ise en başarısız sonuçlar elde edilmiştir. Başarısızlığın nedeni olarak, sistem tanımlama adımında transfer fonksiyonları elde ederken yaşanan fonksiyon uydurma sorunları olduğu değerlendirilmiştir. Çünkü basamak, testere ve sinüs gibi dinamik değişimlerin

olmadığı ya da değişimlerin de periyodik olduğu süreçlerde fonksiyon uydurma aşamasındaki eşleşme daha yüksek oranlarda gerçekleşmekte ve transfer fonksiyonları gerçeğe daha yakın oluşmaktadır. Rastgele ve karışık model veri setlerinde veriler arası hızlı değişim bulunmaktadır. Özellikle transfer fonksiyonlarına dayalı model tabanlı denetleyicilerde giriş sinyallerin değişim hızları önemlidir. Örneğin PID tip denetleyicilerde türevsel bileşen (Derivative -D) değişime duyarlı olan ve denetleyicinin hızlı ayar noktası değişikliklerine uyum sağlamasını sağlayan bileşendir. Ancak, yapılan ölçümlerde, PID denetleyicinin basamak, sinüs ve testere veri setlerindeki ortalama rms hatası 7,8 iken rastgele ve karışık veri setlerindeki ortalama rms hatası 9,4 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, PID kontrol stratejisinin hızlı değişkenlik gösteren veri setlerinde etkisiz kaldığını, buna karşın durağan veya periyodik değişim gösteren veri setlerinde nispeten daha yüksek bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

En yüksek yüzde aşmalar (M_p), denetim sürecinde yön değişimleri ve başlangıç anları için hesaplanmıştır. Genel olarak E_{rms}'in yüksek olduğu deneylerde yüksek aşma değerleri tespit edilmiştir. En yüksek aşmaların sinüs modelinde olması dikkat çekicidir. Deneysel çalışmalarda, YSA denetleyicilerde ortalama %11,73, PID denetleyicilerde ise ortalama %14,78 aşma değeri elde edilmiştir.

Model veri setlerinde sinüs ve testere gibi benzersizliği az ve kendini tekrar eden sinyallerde farklı frekanslara sahip bileşenler kullanılarak benzersizliğin arttırılmasıyla daha başarılı YSA performansları elde edileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, daha fazla girdi-çıktı verisi kullanıldığında öğrenme tabanlı denetleyicilerde performansın artacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

Baciu, A., Lazar, C., 2023. Iterative feedback tuning of model-free intelligent PID controllers. Actuators, 12(2), 56. https://doi.org/10.3390/act12020056

Carlet, P.G., Favato, A., Bolognani, S., Dorfler, F., 2020. Data-driven predictive current control for synchronous motor drives. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 5148-5154. https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235958

Chaudhary, H., Khatoon, S., Singh, R., 2017. ANFIS based speed control of DC motor. IEEE International Conference on Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with Their Impact on Humanity (CIPECH), 63-67. https://doi.org/10.1109/CIPECH.2016.7918738

Chi, R., Hou, Z., Jin, S., Huang, B., 2018. Computationally efficient data-driven higher order optimal iterative learning control. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 29(12), 5971-5980. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2814628

Hamoodi, S.A., Sheet, I.I., Mohammed, R.A., 2019. A comparison between PID controller and ANN controller for speed control of DC motor. International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering (ICECCPCE), 221-224. https://doi.org/10.1109/ICECCPCE46549.2019.203777

Hou, Z., Chi, R., Gao, H., 2017. An overview of dynamic-linearization-based data-driven control and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(5), 4076-4090. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2636126

Ismeal, G.A., Kyslan, K., Fedák, V., 2014. DC motor identification based on recurrent neural networks. 16th International Conference on Mechatronics (Mechatronika), 701-705. https://doi.org/10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018347

Jeng, J.C., Ge, G.P., 2016. Disturbance-rejection-based tuning of proportional-integral-derivative controllers by exploiting closed-loop plant data. ISA Transactions, 62, 312-324. https://doi.org/10.1016/J.ISATRA.2016.02.011

Kamal, M.M., Mathew, L., Chatterji, S., 2014. Speed control of brushless DC motor using intelligent controllers. IEEE Conference on Engineering and Systems for Global Sustainability (SCES), 1-5. https://doi.org/10.1109/SCES.2014.6880121

Keles, Z., Sonugur, G., Alcın, M., 2023. The modeling of the Rucklidge chaotic system with artificial neural networks. Chaos Theory and Applications, 5(2), 59-64. https://doi.org/10.51537/CHAOS.1213070

Khan, S., Paul, A., Sil, T., Basu, A., Tiwari, R., Mukherjee, S., Mondal, U., Sengupta, A., 2017. Position control of a DC motor system for tracking periodic reference inputs in a data driven paradigm. International Conference on Intelligent Control, Power and Instrumentation (ICICPI), 17-21. https://doi.org/10.1109/ICICPI.2016.7859665

Mishra, M., 2009. Speed control of DC motor using novel neural network configuration. National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India. http://ethesis.nitrkl.ac.in/245/1/10502014.pdf

Mohamed, T.L.T., Mohamed, R.H.A., Mohamed, Z., 2010. Development of auto tuning PID controller using graphical user interface (GUI). 2nd International Conference on Computer Engineering and Applications (ICCEA), 491-495. https://doi.org/10.1109/ICCEA.2010.101

Moussavi, S.Z., Alasvandi, M., Javadi, S., 2012. Speed control of permanent magnet DC motor by using combination of adaptive controller and fuzzy controller. International Journal of Computer Applications, 52(20), 11-15. https://doi.org/10.5120/8316-1774

Munagala, V.K., Jatoth, R.K., 2022. A novel approach for controlling DC motor speed using NARXnet based FOPID controller.

Evolving Systems, 14, 101-116. https://doi.org/10.1007/s12530-022-09437-1
Özbaltan, M., Çaşka, S., 2024. Altitude control of quadcopter with symbolic limited optimal discrete control. International Journal of Dynamics and Control, 12(5), 1533-1540. https://doi.org/10.1007/s40435-023-01278-3
Purnama, H.S., Sutikno, T., Alavandar, S., Subrata, A.C., 2019. Intelligent control strategies for tuning PID of speed control of DC motor - A review. IEEE Conference on Energy Conversion, 24-30. https://doi.org/10.1109/CENCON47160.2019.8974782
Salah, M., Abdelati, M., 2010. Parameters identification of a permanent magnet DC motor. IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, 177-182. https://doi.org/10.2316/P.2010.675-085
Suleimenov, K., Do, T.D., 2019. Data-driven LQR for permanent magnet synchronous machines. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 1-5. https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952466
Timurkutluk, B., Ciflik, Y., Sonugur, G., Altan, T., Genc, O., Colak, A.B., 2023. Microstructural design of solid oxide fuel cell electrodes by micro-modeling coupled with artificial neural network. Powder Technology, 425, 118551. https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2023.118551
Umlauft, J., Hirche, S., 2020. Feedback linearization based on Gaussian processes with event-triggered online learning. IEEE Transactions on Automatic Control, 65(10), 4154-4169. https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2958840
Uysal, A., Gokay, S., Soylu, E., Soylu, T., Çaşka, S., 2019. Fuzzy proportional-integral speed control of switched reluctance motor with MATLAB/Simulink and programmable logic controller communication. Measurement and Control, 52(7-8), 1137-1144. https://doi.org/10.1177/0020294019858188
Vural, A.M., Bayindir, K.C., 2010. Optimization of parameter set for STATCOM control system. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World. https://doi.org/10.1109/TDC.2010.5484230
Weng, Y., Wang, N., 2020. Data-driven robust backstepping control of unmanned surface vehicles. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 30(9), 3624-3638. https://doi.org/10.1002/RNC.4956
Yu, X., Hou, Z., Polycarpou, M.M., Duan, L., 2021. Data-driven iterative learning control for nonlinear discrete-time MIMO systems. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 32(3), 1136-1148. https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2980588

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 412-425, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1590064

Araştırma Makalesi Research Article

DÜŞÜK GÜÇLÜ ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN AKI TERSLEYEN MOTOR (ATM) TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Harun Serhat GERÇEKCİOĞLU[1*]

[1] Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Akı Tersleyen Motor, Sabit Mıknatıslı Motorlar, Optimizasyon, Elektrikli Araçlar.

Öz

Son zamanlarda elektrikli araçlarda (EA) tahrik motoru olarak kullanılacak elektrik makineleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. EA'larda yaygın olarak Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM), Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) gibi motorlar kullanılmaya başlanmıştır. FDAM motorlar kolay kontrolü ve yüksek güç yoğunluğu sağlamasına rağmen, rotorunda bulunan mıknatıs sayısının fazla olması sebebiyle yüksek maliyetlidir. Belirli bir gücün üzerinde üretilmemeleri, sürücü ve konum sensörü gerektirmeleri ayrıca yüksek frekanslı osilasyonlara sahip olmaları gibi dezavantajlara sahiptir. ARM'lerde ise basit yapıda ve sağlam olmasına rağmen kontrolünün karışık olması, düşük verim ve gürültü-titreşim gibi unsurlar dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tip motorların avantaj ve dezavantajlarını düşündüğümüzde bu iki motorun geliştirilmiş veya hibritleştirilmiş hali olan Akı Tersleyen Motor (ATM) bulunmaktadır. ATM'de mıknatıslar azaltılmış olarak stator dişlerinin üstüne yerleştirilmiştir. Motor kontrolünde ise akı çevrimleri kullanılmaktadır. Bu makalede 350 W güç ve 500 d/d hız ile çalışan Akı Tersleyen Motor (ATM) tasarımı yapılmıştır. Parametrik ve optimizasyon analizleri ile tork, tork dalgalanması, verim, vuruntu torku gibi parametrelerde iyileştirmeler yapılmıştır. Manyetik sınırlamaların içinde kalındığı gösterilerek tasarım çalışması sonlandırılmıştır.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF FLUX REVERSAL MOTOR (FRM) FOR LOW POWER ELECTRIC VEHICLES

Keywords

Flux Reversal Motor, Permanent Magnet Motors, Optimization, Electric Vehicles.

Abstract

Recently, studies on electric machines to be used as drive motors in electric vehicles (EVs) have been ongoing. Motors such as Brushless Direct Current Motors (BLDC) and Switched Reluctance Motors (SRM) have begun to be widely used in EVs. Although BLDC motors provide easy control and high power density, they are costly due to the large number of magnets in their rotors. They have disadvantages such as not being produced above a certain power, requiring a driver and position sensor, and having high-frequency oscillations. In SRMs, although they are simple and robust, their control is complicated, low efficiency, and noise-vibration are disadvantages. When we consider the advantages and disadvantages of these types of motors, there is a developed or hybridized version of these two motors, the Flux Reversal Motor (FRM). In FRM, the magnets are placed on the stator teeth in a reduced manner. Flux loops are used in motor control. In this article, a Flux Reversal Motor (FRM) operating with 350 W power and 500 rpm speed has been designed. Parametric and optimization analyses have improved parameters such as torque, torque ripple, efficiency, cogging torque, etc. The design study was concluded by demonstrating that the magnetic limitations were met.

Alıntı / Cite

Gerçekcioğlu, H. S., (2025). Düşük Güçlü Elektrikli Araçlar için Akı Tersleyen Motor (ATM) Tasarımı ve Optimizasyonu, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 412-425.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H.S. Gerçekcioğlu, 0000-0003-0058-7529

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	23.11.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	20.02.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	18.03.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: harun.gercekcioglu@gop.edu.tr, +90-356-252-1616

DESIGN AND OPTIMIZATION OF FLUX REVERSAL MOTOR (FRM) FOR LOW POWER ELECTRIC VEHICLES

Harun Serhat GERÇEKCİOĞLU[1†]
1 Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Tokat, Türkiye

Highlights

- Flux Reversal Motor design for low power electric vehicles
- Torque, torque ripple, efficiency, and cogging torque values were improved
- Stayed within magnetic limitations
- Original motor sizing and rotor design

Graphical Abstract

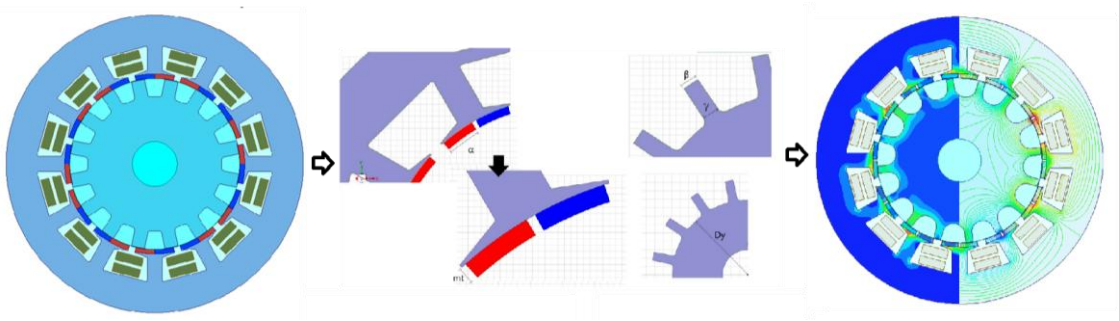


Figure. FRM design and optimization

Purpose and Scope
In this article, the aim and target of FRM design that can be used for electric vehicles has been made. The first model created with the help of theoretical expressions has been optimized and the rotor and permanent magnet geometries have been changed. Electrical and magnetic parameters have been made suitable and finalized.

Design/methodology/approach
The flow chart specified in the article content was followed in the FRM design. A model suitable for the initial parameters was created with the help of analytical calculations. Then, parametric and genetic algorithm-based optimization analyzes were applied to improve the performance parameters and the target values were reached.

Findings
In this study, FRM design was made for use as a drive motor in electric scooters or bicycles. Analytical calculations of FRM, which is designed to operate at 350 W power and 500 rpm speed, were included and its design was made in the simulation program. The flow chart for FRM design was followed and the result was reached. Dimensioning of the first state of FRM model was made by using analytical calculations. By examining the performance results of the first model, it was observed that torque ripple and cogging torque were high and efficiency was low. For this reason, an optimization study was made for the permanent magnets in the rotor and stator of FRM. As a result, an increase of 3.45% in output power, 3.27% in output torque and 23.35% in efficiency was achieved. Especially, torque ripple value decreased by 14.3 times and was observed as 10.5507%. It was observed that cogging torque decreased by 18.49 times. It was also shown that the finalized FRM design was within magnetic limitations.

Originality
Although there are studies on FRM in the international literature, there are none in the national literature. The dimensions and rotor part of the motor designed with certain powers and dimensions are a new design and are original.

† Corresponding author: harun.gercekcioglu@gop.edu.tr, +90-356-252-1616

1. Giriş (Introduction)

Teknolojik ilerleme, verimlilik iyileştirmeleri ve küresel ekonominin yapısındaki değişiklikler küresel ekonominin enerji yoğunluğunda düşüşü sağlamıştır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'nın 2024 yılı raporuna göre yenilenebilir enerjideki büyüme ve son kullanıcıların elektrik tüketimindeki artışı ile enerji sistemlerinin verimliliğini artırma konusu dikkat çekici konuma gelmektedir (Anonim, 2024a). Yeşil enerji olarak tanımlanan yenilenebilir enerji tüketimi kapsamında elektrikli araçlar önemli rol oynamaktadır. Özellikle sera gazının azaltılmasına yönelik Avrupa Ulaştırma ve Çevre Federasyonu'nun yaptığı çalışmalarda elektrikli araçların kullanımının önemine vurgular yapılmaktadır (Anonim, 2024b, Anonim, 2024c).

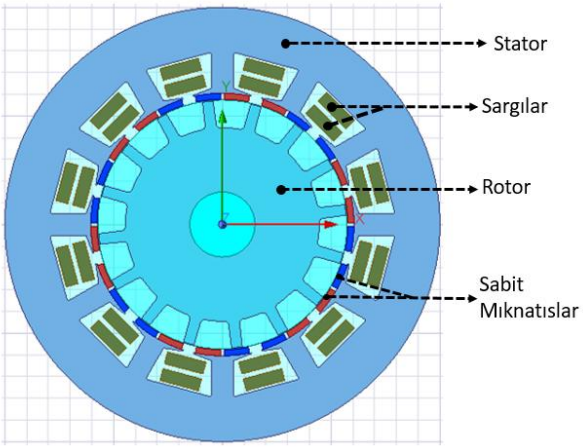
Elektrikli araçlarda yakıt olarak fosil yakıt kullanılmamaktadır. Ayrıca içten yanmalı motorlu araçlarda bulunan dişliler, şanzıman gibi onlarca malzeme de elektrikli araçlarda bulunmamaktadır. Son zamanlarda yoğun trafik problemi yaşanan şehirlerde kurumsal ve ticari ulaştırma araçlarının yanı sıra bireysel elektrikli araçların kullanımı artmaktadır. Özellikle elektrikli bisiklet ve e-scooterlar pratik kullanımları itibariyle öne çıkmıştır.

Son zamanlarda elektrikli araçlarda (EA) tahrik motoru olarak kullanılacak elektrik makineleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. EA'lar için kullanılan motorlar arasında DC motorlar bulunmaktadır. DC motorların yüksek çalışma gürültüsü (high operating noise), düşük verim ve periyodik muayene gereklilikleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. AC motorlar arasında yaygın kullanılan Asenkron Motorların ise karışık kontrolü, düşük başlangıç torku ve düşük güç yoğunluğu gibi dezavantajları karşımıza çıkmaktadır. Bu dezavantajlar düşünülerek farklı motor tasarımları yapılmaya devam edilmiş ve Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM), Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) gibi motorlar kullanılmaya başlanmıştır. FDAM motorlar kolay kontrolü ve yüksek güç yoğunluğu sağlamasına rağmen, rotorunda bulunan mıknatıs sayısının fazla olması sebebiyle yüksek maliyetlidir. Belirli bir gücün üzerinde üretilmemeleri, sürücü ve konum sensörü gerektirmeleri ayrıca yüksek frekanslı osilasyonlara sahip olmaları gibi dezavantajlara sahiptir. ARM'ler ise basit yapıda ve sağlam olmasına rağmen kontrolünün karışık olması, düşük verim ve gürültü-titreşim gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Bu iki motorun geliştirilmiş veya hibritleştirilmiş hali olan Akı Tersleyen Motor (ATM) bulunmaktadır. Statorunda azaltılmış mıknatıslar ve kontrolünde ise akı çevrimleri kullanılmaktadır (Kim ve Lee, 2004; Deodhart vd., 1996; Gao vd., 2017; Bharathi vd., 2019; Gao vd., 2021).

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ATM ve çalışma prensibi ile ilgili bilgilere kaynak araştırmasından faydalanılarak yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ATM tasarımı süreci ile ilgili matematiksel hesaplamalar, tasarımın akış şeması, parametrik ve optimizasyon çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördündü bölümde, yapılan çalışmanın tasarım ve optimizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde ise bu çalışma ile elde edilmiş sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

ATM ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde tasarım çalışmalarına 1995 yılında başlandığı ve günümüzde de aktif olarak devam ettiği görülmektedir. Üç fazlı ATM'nin kesiti ve elemanları Şekil 1'de gösterilmiştir. (Liao vd., 1995; Boldea vd., 1999).

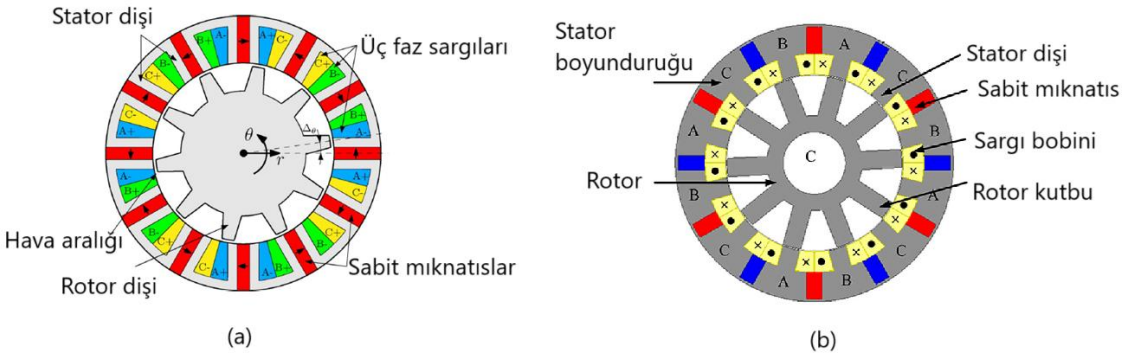


Şekil 1. ATM kesiti (FRM cross-section)

Rotorunda herhangi bir sargı veya sabit mıknatıs (SM) bulunmayan bir yapıdadır. Motor uyartımı asenkron motorlardaki sincap kafesli yapı veya fırçalı DC motorlarda bulunan uyarma sargıları yerine, stator dişleri üzerindeki SM'ler tarafından sağlanmaktadır. Bundan dolayı rotor bakır kayıpları bulunmamaktadır. Ayrıca

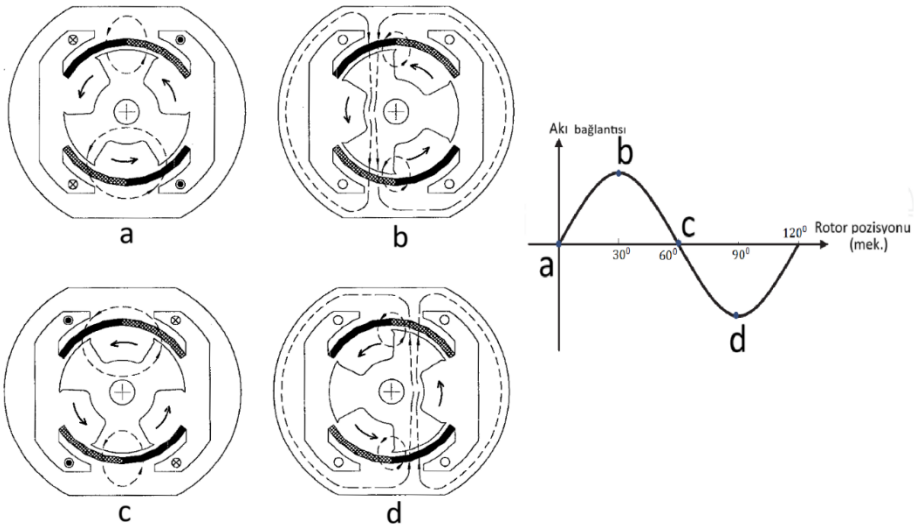
rotorunda SM bulunmaması yüksek hızlı ve yüksek sıcaklıkta çalışmasına olanak sağlamaktadır. Rotorun hafif ve düşük dönme ataletine sahip olması sebebiyle de hızlanma-yavaşlama tepkileri hızlıdır. Rotordaki bu olgular verimlilik konusunda ATM'lere pozitif yönde etki etmektedir (Sheth ve Rajagopal, 2007; More ve Fernandes, 2007). Statorunda ise armatür sargıları ve sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Dağıtılmış veya üretimi kolay konsantre sargılar ile kullanılabilmektedir (Ahn vd., 2008).

ATM'ler statorunda SM bulunan diğer motor türleri ile karşılaşıldığında ise daha basit bir yapıdadır. Akı anahtarlamalı SM makinelerinin ve çift-çıkıntılı SM makinelerinin SM'leri, kurulum için uygun olmayan stator çekirdeği bölgelerine yerleştirilmektedir. Akı anahtarlamalı SM makinesinde, dişlerin ortasına SM yerleştirmek (Şekil 2a), oluk alanını azaltmaktadır ve çıkış torkunu etkilemektedir. Çift-çıkıntılı SM makinesinde, SM'leri stator boyunduruğuna yerleştirmenin motorun hacmini artıracak ve tork yoğunluğunu azaltma yönünde bir etkisi olmaktadır (Şekil 2b). ATM'lerde SM'ler stator dişlerinin iç yüzeyine yerleştirilerek, Akı anahtarlamalı SM makineler ve çift çıkıntılı SM makinelerdeki sorunlar ortadan kaldırılmış olmaktadır (Wang vd., 1999, Gysen vd., 2010, Sriwannarat vd., 2021).



Şekil 2. (a) Akı anahtarlamalı SM makine, (b) çift çıkıntılı SM makine

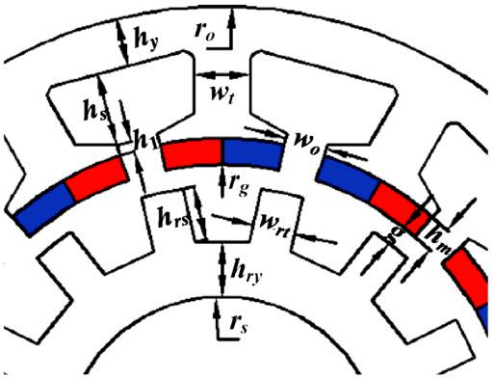
ATM'lerin çalışma prensibi, 2 kutuplu bir stator ve 3 kutuplu rotor modeli üzerinden Şekil 3'teki gibi açıklanmıştır (Deodhart vd., 1997).



Şekil 3. ATM çalışma prensibi (akı ve rotor mekanik pozisyonları arasındaki ilişki) (FRM working principle (relationship between flux and rotor mechanical positions))

Şekil 3'te, (a) mıknatıslar tarafından oluşturulan akının tamamen her bir stator kutbu içinde dolaştığı ve stator boyunduruğunda akı olmadığı denge konumundadır. Rotor (b) konumunda, saat yönünün tersine 30^0 yer değiştirmektedir, böylece rotor kutupları mıknatıslardan biri veya diğeri ile örtüşmektedir. Akı bu durumda sargılardan ve stator boyunduruğundan geçmektedir. Faz akısı bu konumda maksimumdur. Rotor (c) konumunda olduğunda ikinci bir denge konumundadır ve (a) konumundan 60^0 yer değiştirmiştir. Bu konumda yine stator boyunduruğunda ve sargıları birbirine bağlayan akı yoktur. Saat yönünün tersine 30^0 daha fazla yer değiştirildiğinde ise (b) konumunun tersi yönde maksimum olduğu (negatif yönde maksimum) (d)'de gösterilen konuma gelmektedir (Bharathi vd., 2019).

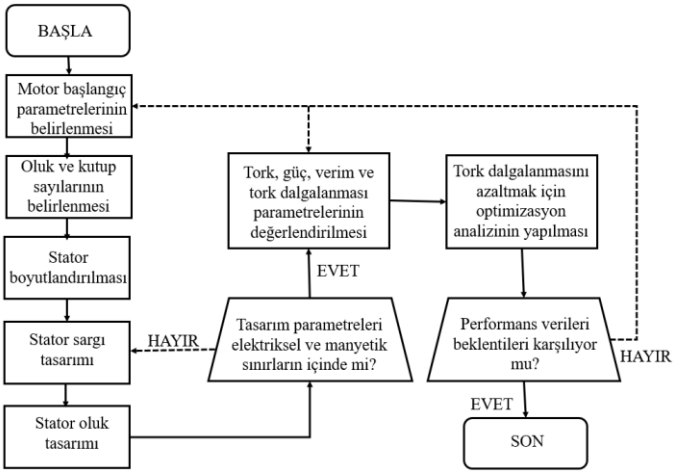
Literatürde ATM ile ilgili tasarım çalışmaları yapılmıştır. Stator, rotor ve SM'ler ile ilgili boyutlandırma eşitlikleri ve hesapları yapılmıştır. Örnek olarak Şekil 4'te ATM kesiti verilerek hesaplanabilecek uzunluklar gösterilmiştir (Boldea vd., 1999;Gao ve Liu, 2021).



Şekil 4. ATM stator, rotor ve SM geometrisi (FRM stator, rotor and PM geometry)

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada yapılan işlemler bir akış diyagramı olarak Şekil 5'te gösterilmektedir. Maksimum torkun elde edildiği akım açısını bulmak için parametrik analiz yapılmıştır. Ayrıca tork dalgalanmasını azaltmak için rotor ve SM'lerin boyutlandırma değişimlerini içeren optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. ATM tasarımı için akış şeması (Flow chart for FRM design)

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Çok fazlı ATM için stator ve rotor kutup sayısı seçimleri için Eşitlik 1'de gösterilen oran seçilmektedir. Burada N_s stator kutup sayısı, N_r rotor kutup sayısı ve m faz sayısını ifade etmektedir.

$$\frac{N_s}{N_r} = \frac{m}{m+1} \tag{1}$$

Tasarımı yapılacak ATM için, $N_s/N_r = 3/4, 6/8, 12/16$ modelleri seçilmektedir. Tasarlamak istenilen motorun amacına uygun başlangıç değerleri belirlendikten sonra, rotor çapı D_r hesaplanmaktadır. Motor verimi n_b ile ilişkili Elektromanyetik güç P_{eb}, D_r'yi bulmak için gereklidir. Ayrıca f_x olarak tanımlanan teğetsel kuvvet yoğunluk değeri $1.8 - 2.5\ N/cm^2$ aralığında seçilerek P_{eb} eşitliğinde kullanılmaktadır (Boldea vd., 1999; Gao ve Liu, 2021).

$$P_{eb} = \frac{P_b}{n_b} \tag{2}$$

$$P_{eb} = f_x(\pi D_r l)\frac{D_r}{2}\Omega_r = \frac{\pi}{2} f_x \alpha D_r^3 \Omega_r \tag{3}$$

Eşitlik 3'te α rotor çapı ile paket boyu l arasındaki bağıntı olup $\alpha = l/D_r = 1.1 - 1.8$ aralığında seçilebilir. Sonuç olarak D_r şu şekilde ifade edilmektedir;

$$D_r = \left(\frac{2P_{eb}}{\pi f_x \alpha \Omega_r}\right)^{1/3} \quad (4)$$

Elektromanyetik tork ifadesi Eşitlik 5'te gösterilmiştir.

$$T_{eb} = \frac{P_{eb}}{\Omega_{rb}} \quad (5)$$

Şekil 3'te ATM'nin stator ve rotor geometrisi verilmiştir. Eşitlik 6-16 arasında geometride gösterilen boyutların hesaplama eşitlikleri verilmektedir. Bunlar;

$$\phi_m = 2r_g l_{stk} B_m / P \quad (6)$$

Burada, r_g hava aralığı yarıçapı, P stator sargı kutup çifti sayısı, B_m akı yoğunluğu ve l_{stk} aktif paket boyunu ifade etmektedir (Boldea vd., 1999;Gao ve Liu, 2021).

Stator boyunduruğundaki ortalama akı yoğunluğunu B_y olarak tanımlanırsa, h_y stator boyunduruğu kalınlığı şu şekilde çıkarılabilir;

$$h_y = \frac{\phi_m}{2B_y k_{stk} l_{stk}} = \frac{r_g B_m}{P B_y k_{stk}} \quad (7)$$

Benzer şekilde, stator dişinin ortasındaki ortalama akı yoğunluğunu B_t olarak tanımlanırsa, stator dişi genişliği şu şekilde hesaplanabilir;

$$w_t = \frac{\phi_m}{3(SPP) B_t k_{stk} l_{stk}} = \frac{4r_g B_m}{Z_s B_t k_{stk}} \quad (8)$$

Burada SPP Kutup-faz başına oluk sayısını ve Z_s stator diş sayısını ifade etmektedir.
Büyük bir tork yoğunluğunu aynı anda korumak ve SM manyetikliğinin kaybolma riskini azaltmak için SM kalınlığının Eşitlik 9'da verilen ifadeyi sağlaması önerilmelidir.

$$h_m = 4g \sim 6g \quad (9)$$

Burada g hava aralığı uzunluğudur. Stator oluk açıklığı genişliği ise Eşitlik 10 da verilmiştir.

$$w_o = \pi(r_g + h_m)/2Z_s \quad (10)$$

Stator dış yarıçapı D_o'ın hesaplanabilmesi için önce toplam oluk alanı A_{slot} hesaplanması gerekmektedir. A_{slot} hesabında elektriksel sargı yükü A_e, akım yoğunluğu j_e ve oluk dolgu faktörü S_{fg} kullanılmaktadır (Gao ve Liu, 2021).

$$A_{slot} = 2\pi\left(r_g + h_m\right)A_e / J_e S_{fg} \quad (11)$$

$$A_{slot} = \pi\left(r_g + h_m + h_1 + h_s\right)^2 - \pi\left(r_g + h_m + h_1\right)^2 - Z_s w_t h_s \quad (12)$$

Eşitlik 11 ve Eşitlik 12 nin birleşimiyle slot derinliği h_s hesaplanabilmektedir. Sonuç olarak stator dış yarıçapı Eşitlik 13 te verilmiştir. (Gao ve Liu, 2021).

$$r_o = r_g + h_m + h_1 + h_s + h_y \quad (13)$$

Her rotor boyunduruğunun ve rotor dişinin ortasının ortalama akı yoğunluğunu sırasıyla B_{ry} ve B_{rt} olarak tanımlanmıştır. Rotor boyunduruk kalınlığı h_{ry} ve rotor diş genişliği w_{rt} , Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 ile benzer türetme prosedürü kullanılarak elde edilmektedir. Son olarak h_{ry} ve w_{rt} Eşitlik 14 ve 15'te gösterilmiştir;

$$h_{ry} = r_g B_m / Z_r B_{ry} k_{stk} \quad (14)$$

$$w_{rt} = 4r_g B_m / Z_r B_{rt} k_{stk} \quad (15)$$

Rotor oluk derinliği h_{rs} ise;

$$h_{rs} = r_s + h_{ry} \quad (16)$$

Faraday indüksiyon yasasına göre, sargı geriliminde indüklenen hava aralığı akısı bağlantısı;

$$\Psi_m = N_s k_w \omega \Phi_m \quad (17)$$

Burada N bir fazdaki sarım sayısı, k_w ise sargı faktörüdür.

İndüklenen gerilimin RMS değeri ve faz sargılarındaki maksimum akı yoğunluğu Eşitlik 18 ve 19'da verilmiştir;

$$\mathrm{E}_m = \frac{1}{\sqrt{2}} e_m = \frac{1}{\sqrt{2}} N k_w \omega \Phi_m \quad (18)$$

$$\Phi_m = l' \tau_p \alpha_i B_\delta \quad (19)$$

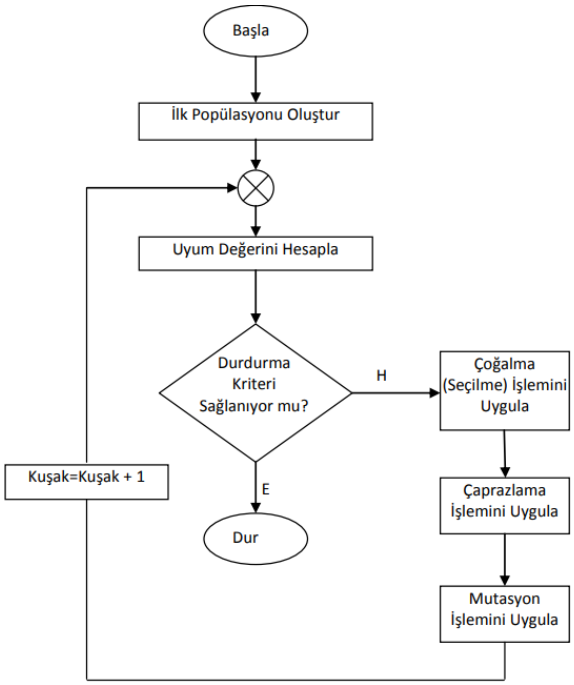
$\alpha_i B_\delta$, hava aralığı akı yoğunluğunun ortalama değerini temsil etmektedir. l' ise paket boyudur.

Bir fazdaki sarım sayısı Eşitlik 17,18 ve 19 yardımıyla bulunmaktadır (Pyrhönen vd., 2021).

$$N_s = \frac{\sqrt{2} E_m}{k_w \omega \Phi_m} = \frac{\sqrt{2} E_m}{k_w \omega l' \alpha_i B_\delta} \quad (20)$$

3.2. Optimizasyon Tekniği (Optimization Technic)

Bu çalışmada tasarlanan başlangıç modelinin performans değerlerinin iyileştirilmesi için bir optimizasyon çalışması yapılması gerekmektedir. Optimizasyon tekniği olarak Genetik Algoritma (GA) seçilmiştir. Yapılan çalışmada bütün çözüm varyasyonlarının geleneksel yöntemlerle çözümlenmesi hesaplama süresini uzatmaktadır. Genetik algoritma, doğruluğu güvenilir olan performans sonuçlarına ulaşım süresini azaltmaktadır. Genetik algoritmalar özellikle çözüm varyasyonlarının karmaşık, geniş aralıkta ve süreksiz olduğu durumlarda başarılı sonuçlar vermektedir.



Şekil 6. Genetik Algoritma (GA) akış şeması (Genetic Algorithm (GA) flowchart) (Anonim, 2024d)

Genetik algoritma hedef amaçlarına ulaşılabilen bir optimizasyon tekniğidir. Genetik algoritma tek bir veriden değil veri havuzundan yani geniş bir alandan seçim yapmaktadır. Olası sonuçlar içeren kural dizileri kullanmaktadır. Türev ve benzeri yardımcı bilgileri kullanmamaktadır ve sadece amaç fonksiyonu bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Genel anlamda genetik algoritma çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin dizilerden oluşan bir popülasyona (nesil) uygulanmasını içermektedir. Bu operatörlerin uygulanmasından sonra yeni bir popülasyon (yavru nesil) oluşmaktadır. Yeni nesil eski ebeveyn nesil ile yer değiştirmektedir. Her dizinin

(kromozomun) bir uyum değeri bulunmaktadır. Yeni nesiller (yeni diziler) bu uyum değerlerine göre seçilmektedir. Her yeni üretilen nesilde hedef değerlere yakınlaşılarak, iyi nesiller üretilmeye çalışılmaktadır (Burke vd., 1994). Şekil 6'da GA akış şeması gösterilmiştir (Anonim, 2024d).

ATM için GA uygulanırken rotor ve SM lerin boyutlandırmalarında verilen parametreler (mıknatıs boyu, mıknatıs genişliği, rotor dişi uzunluğu, boyunduruk uzunluğu vb.) için bir başlangıç ve sonuç aralığı (alt değer-üst değer) belirlenmiştir. Ayrıca istenilen bir hedef belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda bu algoritma sayesinde istenilen hedef için uygun parametre uzunlukları elde edilmiştir. Bu çalışma için Ansys Electronics-Maxwell paket programı içerisinde bulunan optimizasyon modülü kullanılmıştır.

Elektrikli scooterlar veya bisikletler için tahrik motoru kullanım amacı taşıyan motor tasarımları çalışmaları incelenmiş ve Tablo 1'de gösterilen başlangıç değerleri seçilmiştir (Ravi vd., 2006; Song vd., 2010; Gruber vd., 2011; Shenoy ve Kumar, 2016; Lee vd., 2017; Omaç, 2022; Gör ve Dalçalı, 2024; Sinaga vd., 2024). Yapılan optimizasyon çalışmasında kullanılacak parametreler ve değişim yapılacak boyutlandırma aralıkları optimizasyon analizi bölümünde belirtilmiştir.

Tablo 1. ATM başlangıç performans parametreleri (Initial performance parameters of FRM)

PARAMETRELER	TANIM	DEĞER
P_o	Güç	350 Watt
V	Gerilim	33.8 V
ω	Hız	500 d/d
g	Hava aralığı	0.5 mm
N_s	Stator oluk sayısı	12
N_r	Rotor dişi sayısı	16
η	Verim	% 70
h_m	Sabit mıknatıs genişliği	3 mm

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Seçilen başlangıç değerlerine göre ANSYS Electronics-Maxwell 2D benzetim programında çalışmalar başlatılmış ve başlangıç için ATM modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan motor için stator, rotor boyutlandırma ve performans parametre değerleri Tablo 2 ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2. ATM başlangıç boyutlandırma parametreleri (Initial sizing parameters of FRM)

ATM ELEMANLARI	PARAMETRELER	TANIM	DEĞER
Stator	D_o	Stator dış çapı	200 mm
	h_y	Stator boyunduruk uzunluğu	21 mm
	h_1	Stator diş genişliği	1.5 mm
	h_s	Stator oluk derinliği	15 mm
	w_o	Stator oluk açıklığı	5 mm
	w_t	Stator oluklar arası mesafe	10 mm
	Bs_1	Stator oluk üst genişliği	22.84 mm
	Bs_2	Stator oluk alt genişliği	30.88 mm
	h_m	Sabit mıknatıs genişliği	3 mm
Rotor	D_r	Rotor dış çapı	140 mm
	h_{rs}	Rotor diş derinliği	11.5 mm
	h_{ry}	Rotor boyunduruk uzunluğu	30 mm
	w_{rt}	Rotor diş genişliği	8.9443 mm
	L	Paket boyu	100 mm
Stator sargıları	W_1	Oluk başına sarım sayısı	36
	a_1	Paralel kol sayısı	1
	d_{co}	Sargı çapı	2.906 mm
	R_s	Stator sargı direnci	0.122 ohm
	K_{fill}	Stator oluk dolgu faktörü	% 77.375

Tablo 3. ATM başlangıç performans parametreleri (Initial performance parameters of FRM)

PERFORMANS	P_o	Güç	383.6942 Watt
	T_o	Tork	7.3280 Nm
	T_{ripple}	Tork dalgalanması	% 150,8992
	I_{rms}	Stator akım değeri	7.7731 A
	η	Verim	% 64.3499

4.1.Parametrik Analiz (Parametric Analysis)

ATM modelinde sargı uyartımlarda, analiz süresini hızlandırmak ve maksimum tork açısını akım eşitliğinde kullanmak için akım kaynağı kullanılmıştır. Uygulanacak üç fazlı akımlar sinüs dalga formunda olup aşağıdaki eşitliklerle gösterilmiştir.

Rotor açısal hızı Ω_r;

$$\Omega_r = 2\pi\omega/60 \quad (17)$$

$$\Omega_e = \Omega_r \mathrm{N}_r \quad (18)$$

Burada N_r rotor dişlerinin sayısıdır.

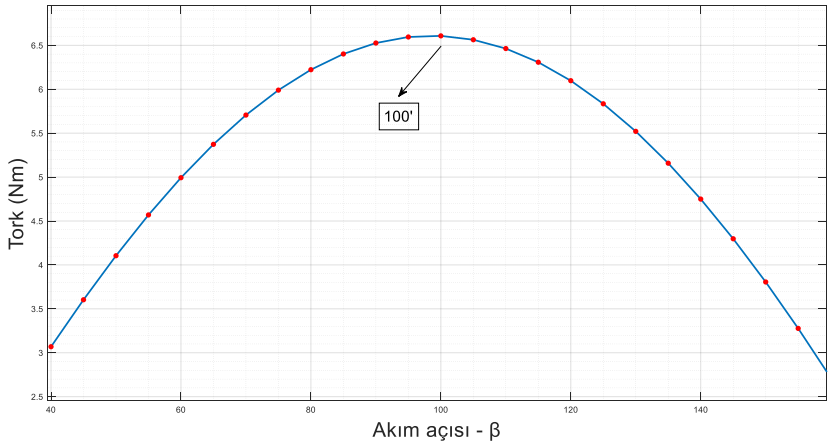
Uygulanacak üç fazlı akımlar;

$$\mathrm{I}_A = \mathrm{I}_{max}\sin(\Omega_e t + \beta) \quad (19)$$

$$\mathrm{I}_B = \mathrm{I}_{max}\sin(\Omega_e t + \beta + 120^0) \quad (20)$$

$$\mathrm{I}_C = \mathrm{I}_{max}\sin(\Omega_e t + \beta - 120^0) \quad (21)$$

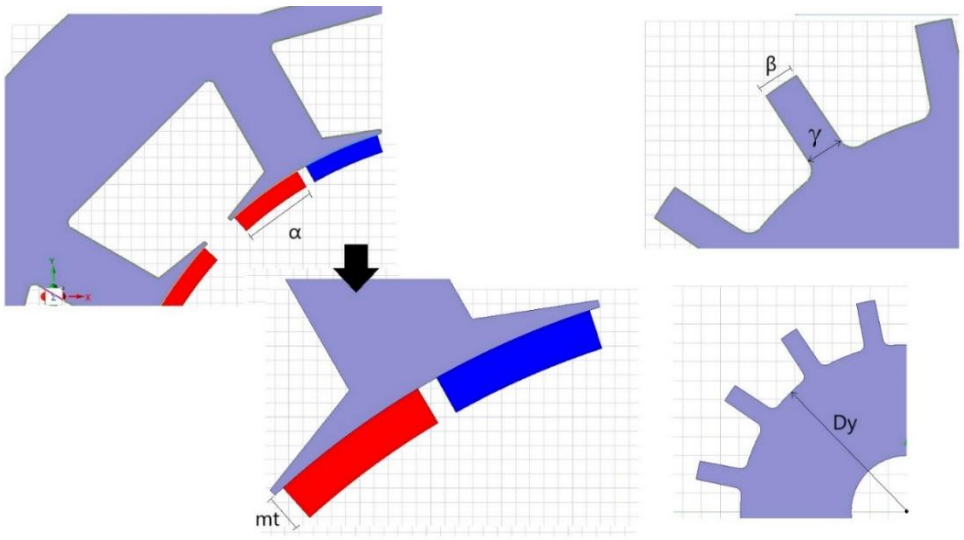
Burada β bir açı değeri olup uygulanan akım değerinde maksimum tork elde etmemiz için önemli bir parametredir. β değerinin bulunması için ATM de belirli aralıklarla açı değişimi yapılmıştır ve maksimum tork elde ettiğimiz açı bulunmuştur. Parametrik analizde akım açısı 5^0 aralıklarla değiştirilerek tork değeri gözlenmiştir. Bu analiz sonucunda Şekil 6'da gösterildiği üzere maksimum tork değerinin 100^0 de olduğu görülmüştür. Bundan sonraki analizlerde akım açısı 100^0 olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 7. Maksimum tork açısı (MTPA) (Maximum torque angle (MTPA))

4.2. Optimizasyon Analizi (Optimization Analysis)

Tasarlanan ATM'nin başlangıç modelinde, tork dalgalanması parametresinin azaltılması için rotor tarafında ve sabit mıknatıslarda optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyon tekniği olarak literatürde çok sayıda kullanıldığı bilinen Genetik Algoritma yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyonda kullanılacak parametreler Şekil 8'de gösterilmiştir. Tablo 4'te ise optimizasyon yapılacak aralıklar belirtilmiştir.



Şekil 8. ATM rotor ve SM optimizasyon parametreleri (Rotor and PM optimization parameters of FRM)

Tablo 4. ATM rotor ve SM optimizasyonunda uygulanacak boyutlandırma aralıkları
(Sizing ranges to be applied in FRM rotor and PM optimization

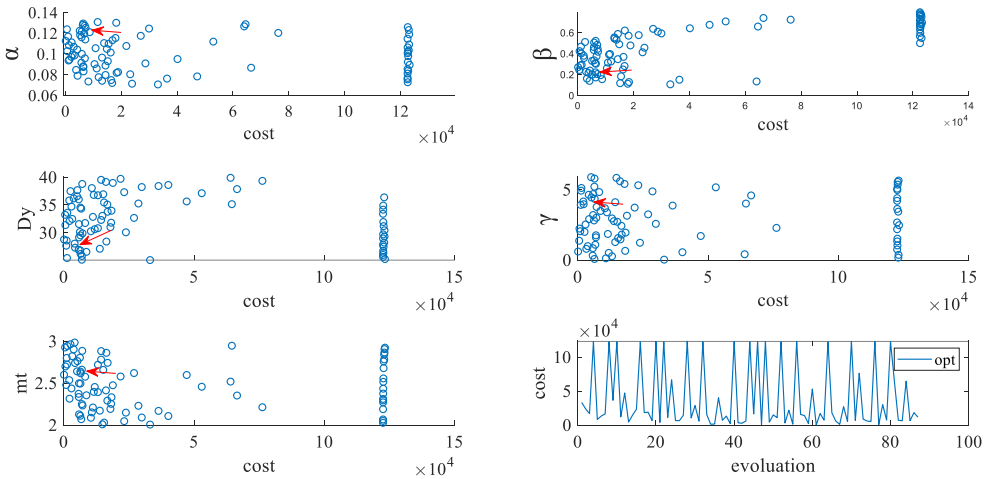
PARAMETRELER	TANIM	ALT DEĞER	ÜST DEĞER
$\boldsymbol{\alpha}$	Sabit mıknatıs genişliği	0.1 *	0.14 *
$\boldsymbol{mt}$	Sabit mıknatıs uzunluğu	2.5 mm	3 mm
$\boldsymbol{\beta}$	Rotor diş üst genişliği	0.1 *	0.6 *
$\boldsymbol{\gamma}$	Rotor diş alt genişliği	0^0	6^0
$\boldsymbol{D_y}$	Rotor boyunduruk yarıçapı	26 mm	40 mm

* Benzetim programında genişlik birimi olarak kullanılan aralıklar.

Tablo 5. ATM optimizasyonu için hedef performans değerleri (Target performance values for FRM optimization)

PARAMETRELER	TANIM	HEDEF DEĞER
$\boldsymbol{P_o}$	Çıkış gücü	>= 350 Watt
$\boldsymbol{T_{ripple}}$	Tork dalgalanması	<= % 15

Optimizasyon aralıkları belirlendikten sonra hedef seçimi yapılmıştır. Hedef olarak ATM çıkış gücü alt sınır olarak 350 Watt olarak belirlenmiştir. Ayrıca tork dalgalanması değerinin %15'in altına indirilmesi hedeflenmiştir (Tablo 5).



Şekil 9. Optimizasyon analizinde parametre değişimlerinin gelişimi
(Evolution of parameter changes in optimization analysis)

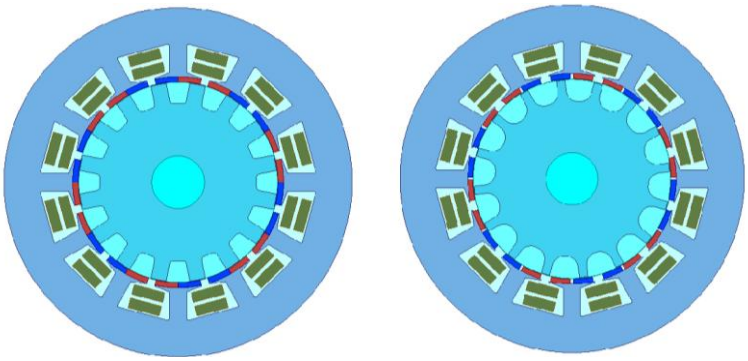
Yapılan optimizasyon sonucu rotor ve sabit mıknatısların geometrisi değişmiştir. Verilen hedeflere göre tork dalgalanması değeri en düşük değerdeki model seçilmiştir. Analizin gelişimi sonucu, parametrelerin değişimleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Optimizasyon grafiklerinde, analiz boyunca seçilen parametrelerin değişimleri gösterilmiştir. Bu grafikte görüldüğü üzere bazı değerlerde sonuçların yoğunlaştığı görülmektedir. Burada uygun

çözümlerin yoğunlaşmış bölgelerde olduğu anlamına gelmektedir. Özellikle α ve β parametrelerinin amaçlanan hedefteki etkisi diğer değişkenlere göre fazla görülmektedir. Şekil 10'da optimizasyon öncesi ve sonrası, rotor ve sabit mıknatısların görünümündeki değişim gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi/sonrası değişen parametrelerin ve performans değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon sonucu ATM rotor ve mıknatısların boyutları ve performans sonuçları (Optimization result FRM rotor and magnets dimensions and performance results)

PARAMETRELER	TANIM	BAŞLANGIÇ	OPTİMİZASYON SONRASI
α	Sabit mıknatıs genişliği	0.1 *	0.1242 *
mt	Sabit mıknatıs uzunluğu	2.5 mm	2.7998 mm
β	Rotor diş üst genişliği	0.1 *	0.2196 *
γ	Rotor diş alt genişliği	0^0	0.606^0
D_y	Rotor boyunduruk yarıçapı	26 mm	29.5267 mm
P_o	Çıkış gücü	383.6942 Watt	396.9113 Watt
T_{ripple}	Tork dalgalanması	%150.8992	% 10.5507
T_o	Çıkış torku	7.3280 Nm	7.5675 Nm
η	Verim	%64.3499	%79.3728

* Benzetim programında genişlik birimi olarak kullanılan aralıklar.

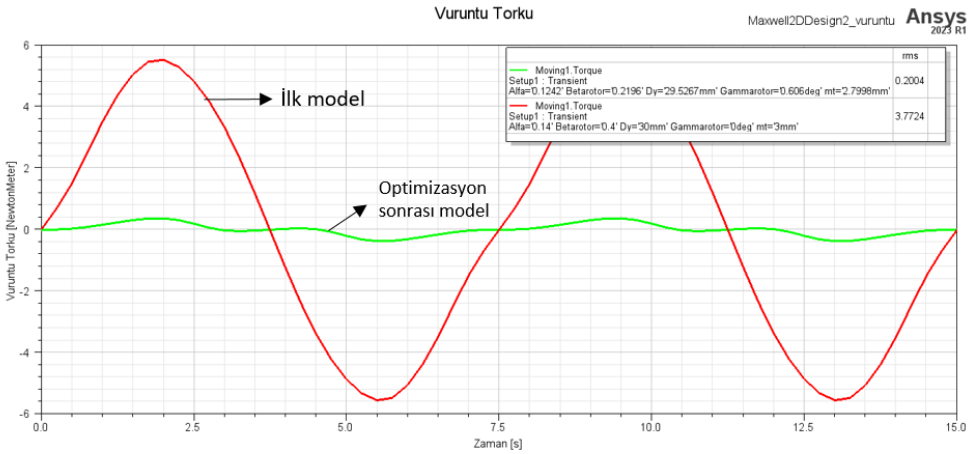


(a) (b)

Şekil 10. (a) ATM başlangıç modeli, (b) ATM optimizasyon sonrası modeli ((a) FRM initial model, (b) FRM post-optimization model)

4.3. Vuruntu Torku (Cogging Torque)

Motor performansının artırılması ile ilgili diğer bir konu da vuruntu torkudur. Kalıcı mıknatıslı motorlarda önemli bir konu olan vuruntu torku, kalıcı mıknatıslar ile laminasyonların çelik dişleri arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanır. Vuruntu torku ortalama motor tork değerinin azalmasına neden olmasa da motor gürültüsü ve titreşiminin en önemli faktörlerinden biridir. Bu kuvvet tork dalgalanması değerini etkilemektedir (Kim vd., 2005; Gao vd., 2017).

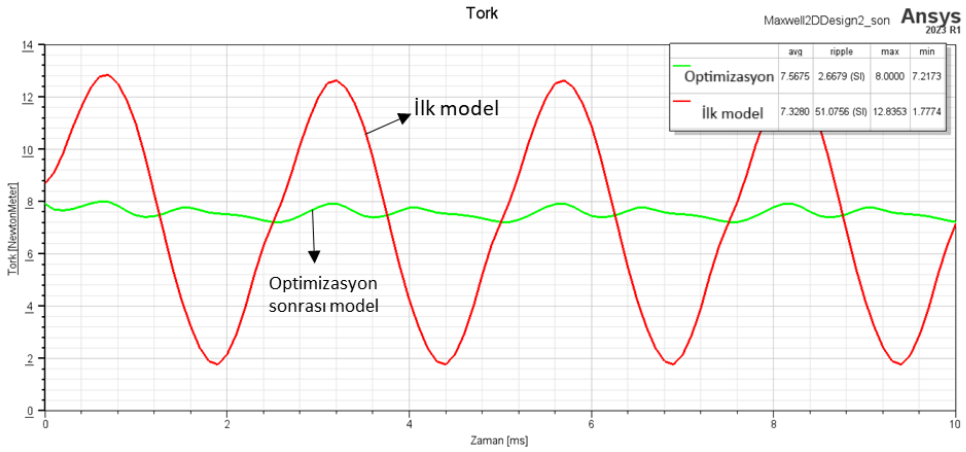


Şekil 11. ATM Vuruntu torku grafiği (Cogging torque graphic of FRM)

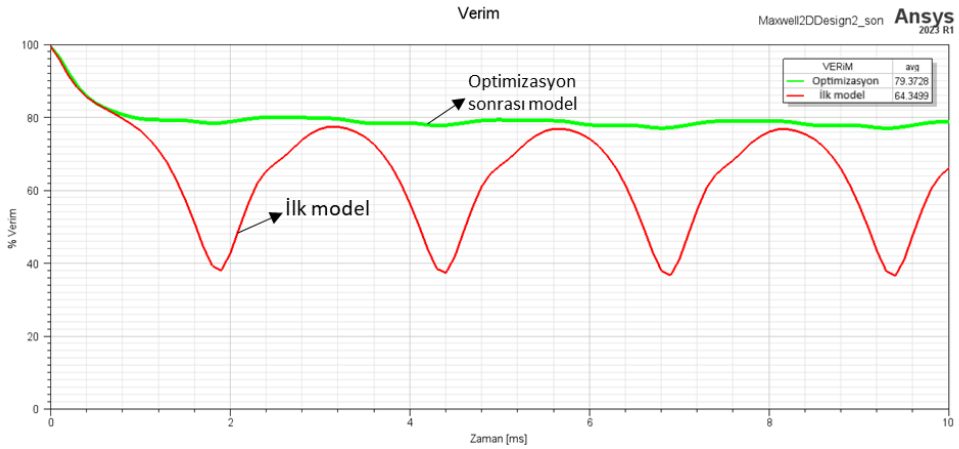
Bu çalışmada yapılan optimizasyon analizi ile vuruntu torkunda da iyileştirme yapılmıştır. Şekil 11'de vuruntu torkunun optimizasyon öncesi ve sonrası performans grafiği gösterilmiştir.

4.4. Performans Grafikleri (Performance Graphics)

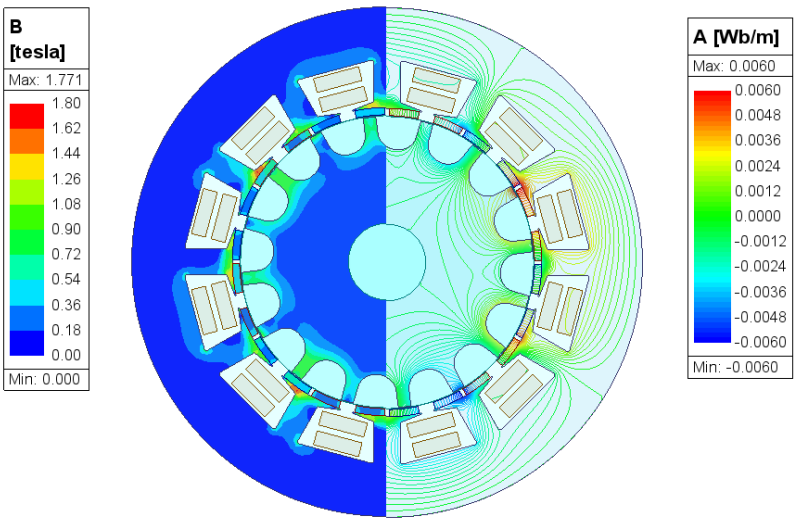
Bu bölümde ATM'nin optimizasyon sonrası oluşan model ve başlangıç modellerinin karşılaştırmalı grafiklerine yer verilmiştir. Şekil 12'de tork, Şekil 13'te verim grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 12. ATM tork grafiği (Torque graphic of FRM)



Şekil 13. ATM verim grafiği (Efficiency graphic of FRM)



Şekil 14. (*B*)ATM manyetik akı yoğunluğu, (*A*) manyetik alan şiddeti
((*B*) magnetic flux density, (*A*) magnetic field strength of FRM)

Yapılan optimizasyon sonrasında performans değerlerinin başarı ile iyileştirildiği görülmüştür. Son olarak tasarımı yapılan ATM'nin manyetik sınırlar içinde kalındığı Şekil 14'te gösterilmiştir. ATM'de manyetik akı yoğunluğunun: Stator boyunduruğunda 1-1,5 T aralığında, stator dişlerinde ise 1,6-2 T aralığında olması gerekmektedir (Pyrhönen vd., 2014). Manyetik akı yoğunluğu (*B*) ve manyetik alan şiddeti (*A*) grafikleri ile manyetik sınırlar içinde kalındığı gösterilmiştir. Manyetik akı yoğunluğunun en fazla olduğu yerler, stator dişlerinin ince olduğu bölgelerde görülmüştür.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada elektrikli scooter veya bisikletlerde tahrik motoru olarak kullanılması amaçlanan ATM tasarımı yapılmıştır. 350W gücünde ve 500 d/d hızla çalışması tasarlanan ATM'nin analitik hesaplarına yer verilmiş ve benzetim programında tasarımı yapılmıştır. ATM tasarımı için akış şeması takip edilerek sonuca ulaşılmıştır. ATM modelinin ilk hali için analitik hesaplardan faydalanarak boyutlandırılması yapılmıştır. İlk modelin performans sonuçları incelenerek tork dalgalanması ve vuruntu torkunun yüksek olduğu, veriminin ise düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple ATM'nin rotoru ve statorunda bulunan sabit mıknatısları için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Sonuç olarak çıkış gücünde % 3.45, çıkış torkunda % 3.27 ve verimde % 23.35 oranında artış sağlanmıştır. Özellikle tork dalgalanması değeri 14.3 kat düşerek % 10.5507 olarak gözlenmiştir. Vuruntu torkunun ise 18.49 kat düştüğü gözlenmiştir. Sonuçlandırılmış ATM tasarımının, manyetik sınırlamaların içinde olduğu da ayrıca gösterilmiştir.

Yapılan tasarım ve analizler, 2D olarak yapılmıştır. İlgili motorun prototip üretimi yapılması planlanacak ise 3D tasarımları ile analizlerinin yapılması analiz sonuçların doğruluğunu arttıracaktır. İlerleyen çalışmalarda ise ATM'nin eksenel akılı modelleri tasarlanıp analizleri yapılarak, prototip üretimi ile elektrikli araçlarda kullanılabileceği tahmin edilmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

Ahn, J., Choi, J.H., Kim, S., 2008. Parametric variance consideration in speed control of single-phase flux reversal machine. IET Electric Power Applications. 2008;2(4):266-274.

Anonim, 2024a. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024. Erişim tarihi: 07.10.2024

Anonim, 2024b. European Federation for Transport and Environment AISBL. Erişim tarihi: 07.10.2024

Anonim, 2024c. https://www.transportenvironment.org/topics/cars. Erişim tarihi: 15.10.2024

Anonim, 2024d. https://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/OptimizasyonTeknikleri/OptimizasyonTeknikleri-5.Hafta-Genetik_Algoritma.pdf. Erişim tarihi: 01.11.2024

Bharathi, M., Kumar, M.K., Sekhar, O.C., Ramamoorty, M., 2019. A Review of Recent Advancements in Flux Reversal Permanent Magnet Machine (FRPMM), International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-7, Issue-6, March 2019.

Boldea, I., Wang, C., Nasar, S.A., 1999. Design of a Three- Phase Flux Reversal Machine. Electric Machines &Power Systems, 27:8, 849-863, DOI: 10.1080/073135699268885.

Burke, E.K., Elliman, D.G., Weare, R.F., 1994. A genetic algorithm based university timetabling system. International Conference on Computer Technologies in Education, Crimea, Ukraine, 1, 35–40.

Deodhart, R.P., Andemon, S., Boldeag, I., Miller, T.J., 1996. The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 2, 786-793 vol.2.

Deodhart, R.P., Andersson, S., Boldea, I., Miller, T.J., 1997. The flux-reversal machine: A new brushless doubly-salient permanent-magnet machine. IEEE Transactions on Industry Applications. 1997;33(4):925-934.

Gao, Y., Qu, R., Li, D., Li, J., 2017. Torque Performance Analysis of Three-Phase Flux Reversal Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2110-2119, May-June 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2677356.

Gao, Y., Li, D., Qu, R., Li, J., 2017. Design Procedure of Flux Reversal Permanent Magnet Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 5, pp. 4232-4241, Sept.-Oct. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2695980.

Gao, Y., Liu, Y., 2021. Flux Reversal Machine Design. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.92428.

Gruber, W., Bäck, W., Amrhein, W., 2011. Design and implementation of a wheel hub motor for an electric scooter. 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (pp. 1-6), IEEE.

Gör, H., Dalcalı, A., 2024. Design and optimization of a high-performance multi-barrier IPMS motor for an electric scooter and bicycle. Royal Society open science, 11(3), 231650.

Gysen, B. L. J., Ilhan, E., Meessen, K. J., Paulides, J. J. H., Lomonova, E. A., 2010. Modeling of Flux Switching Permanent Magnet Machines With Fourier Analysis. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 1499-1502, June 2010, doi: 10.1109/TMAG.2009.2039921.

Kim, T.H., Lee, J., 2004. A study of the design for the flux reversal machine. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, no. 4, pp. 2053-2055, July 2004, doi: 10.1109/TMAG.2004.832488

Kim, T.H., Won, S.H., Bong K., Lee, J., 2005. Reduction of cogging torque in flux-reversal machine by rotor teeth pairing. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 10, pp. 3964-3966, Oct. 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.855182.

Liao, Y., Liang, F., Lipo, T.A., 1995. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 5, pp. 1069-1078, Sept.-Oct. 1995, doi: 10.1109/28.464521.

Lee, J.Y., Woo, B.C., Kim, J.M., Oh, H.S., 2017. In-wheel motor design for an electric scooter. Journal of Electrical Engineering and Technology, 12(6), 2307-2316.

More, D.S., Fernandes, B.G., 2007. Novel three phase flux reversal machine with full pitch winding. International Conference on Power Electronics. 2007. pp. 1007-1012.

Omaç, Z., 2022. Investigation of an Outer Rotor In-Wheel Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles by Finite Element Method. Turkish Journal of Science and Technology, 17(1), 55-64. https://doi.org/10.55525/tjst.1057940.

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V., 2014. Design of rotating electrical machines. ISBN 978-1-118-58157-5.

Ravi, N., Ekram, S., Mahajan, D., 2006. Design and development of a in-wheel brushless DC motor drive for an electric scooter. 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems (pp. 1-4), IEEE.

Shenoy, K.L., Kumar, M.S., 2016. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor for electric scooter application. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) (pp. 1541-1545), IEEE.

Sheth, N.K., Rajagopal, K.R., 2007. Performance of flux reversal motor at various rotor pole arcs. International Conference on Electrical Machines and Systems. 2007. pp. 1517-1522.

Sinaga, D., Sembiring, M.A.R., Salman, R., Sinuraya, A., Hernando, B., Aulia, M.A., 2024. Performance Analysis of Lithium-Ion Batteries on Electric Bike With 350 W BLDC Motor. Proceedings of the 5th International Conference on Innovation in Education, Science, and Culture, ICIESC 2023, 24 October 2023, Medan, Indonesia.

Song, B.M., Chang, K.C., Choi, J.Y., 2010. Design of an outer-rotor-type permanent magnet motor for electric scooter propulsion systems. The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA- (pp. 2763-2742), IEEE.

Sriwannarat, W., Seangwong, P., Siritaratiwat, A., Fernando, N., Dechgummarn, Y., Khunkitti, P., 2021. Electromagnetic Torque Improvement of Doubly Salient Permanent Magnet Machine Using Pole Ratio Adjustment Technique. Front. Energy Res. 9:726164. doi: 10.3389/fenrg.2021.72616.

Wang, C., Nasar, S.A, Boldea, I., 1999. High speed control scheme of flux reversal machine. International Conference on Electric Machines and Drives. 1999. pp. 779-781.

Yuefeng, L., Feng, L., Lipo, T. A., 1995. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 5, pp. 1069-1078, Sept.-Oct. 1995, doi: 10.1109/28.464521.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 426-439, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1576818

Araştırma Makalesi

Research Article

YALAKDERE FAYI'NIN AKTİF TEKTONİK VE PALEOSİSMOLOJİK ÖZELLİKLERİ, KOCAELİ, TÜRKİYE

Ercan SANĞU[1*]

[1] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Paleosimoloji, Yalakdere Fayı, Aktif Tektonik.

Öz

Paleosismoloji, tarih öncesi depremlerle ilgili veri elde ederek gelecekteki deprem riskini değerlendirmeye yardımcı olur. Bu bilim dalı, özellikle sismojenik fayların yerini ve jeolojik etkilerini inceleyerek geçmiş depremlerin büyüklüğü ve aralıklarını belirler. Yalakdere Fayı'nda yapılan paleosismolojik çalışmalar kapsamında, Armutlu Yarımadası'nın kuzeyindeki KD-GB yönelimli fay üzerinde altı farklı lokasyonda hendekler açılmıştır. Hendeklerde yapılan gözlemlerde, farklı deformasyon bölgeleri ve faylanma izleri tespit edilmiştir. Fay, Türkiye Diri Fay Haritası Bursa paftasında sağ yanal atımlı Holosen yaşlı bir fayı olarak tanımlanmıştır. Ancak, bu çalışmada paleosismolojik amaçla açılan hendeklerde ve mostralarda yapılan gözlemlerde normal fay karakterini yansıtan bulgular elde edilmiştir. Çalışmada, beş hendekte sismik aktiviteyle ilişkili faylanma izleri tespit edilirken, yalnızca Yalakdere-2 hendeğinde herhangi bir deformasyon verisine rastlanmamıştır. Hendekler, yüzeydeki faylanma özelliklerini açığa çıkararak fayın geometrik yapısını ve hareket yönünü incelemeye katkı sağlamıştır. Elde edilen veriler, Yalakdere Fayı'nın doğrultu atımlı değil, normal faylanma özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür paleosismolojik çalışmalar, bölgenin deprem riskini anlamak için kritik öneme sahiptir.

ACTIVE TECTONIC AND PALEOSEISMOLOGICAL FEATURES OF YALAKDERE FAULT, KOCAELI, TURKEY

Keywords

Paleoseismology, Yalakdere Fault, Active Tectonics.

Abstract

Paleoseismology helps assess future earthquake risk by obtaining data on prehistoric earthquakes. This branch of science determines the magnitude and ranges of past earthquakes, especially by examining the location and geologic effects of seismogenic faults. Within the scope of paleoseismological studies on the Yalakdere Fault, trenches were opened at six different locations on the NE-SW trending fault north of the Armutlu Peninsula. Observations made in the trenches revealed different deformation zones and traces of faulting. The fault is identified as a right-lateral strike-slip Holocene age fault on the Bursa map of Turkey. However, observations made in the trenches and outcrops opened for paleoseismological purposes in this study yielded findings reflecting the normal fault character. In the study, faulting traces associated with seismic activity were detected in five trenches, while no deformation data were found only in Yalakdere-2 trench. The trenches revealed the faulting features on the surface and contributed to the study of the geometrical structure and direction of movement of the fault. The data obtained show that the Yalakdere Fault has normal faulting characteristics, not strike-slip. Such paleoseismological studies are critical for understanding the earthquake risk of the region.

Alıntı / Cite

Sanğu, E., (2025). Yalakdere Fayı'nın Aktif Tektonik ve Paleosismolojik Özellikleri, Kocaeli, Türkiye, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 426-439.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
E. Sanğu, 0000-0002-3529-8316	Başvuru Tarihi / Submission Date	31.10.2024
	Revizyon Tarihi / Revision Date	06.03.2025
	Kabul Tarihi / Accepted Date	20.03.2025
	Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: esangu@kocaeli.edu.tr, +90-262-303-3132

ACTIVE TECTONIC AND PALEOSEISMOLOGICAL FEATURES OF YALAKDERE FAULT, KOCAELI, TURKEY

Ercan SANĞU[1†],
[1] Kocaeli University, Faculty of Engineering, Department of Geology Engineering, Kocaeli, Türkiye

Highlights

- Turkey Active Fault Map Bursa Sheet Yalakdere Fault
- Palaeoseismological studies on the Yalakdere Fault
- Study of the components of the Yalakdere Fault

Purpose and Scope

Determination of the characteristics and past earthquake activities of the Yalakdere fault, which is defined as a Holocene active fault in the Turkey Active Fault Map

Design/methodology/approach

In this study, data were collected to determine the surface faulting traces of past earthquakes along the Yalakdere Fault. For this purpose, trenching was carried out on the western segment of the four segments of the NW-SE trending Yalakdere Fault. Trenches were dug at six different locations in the 3.5 km section west of Avcıköy on the west segment, which has a total length of approximately 11 km. Trench locations were selected taking into account the geological and morphotectonic features of the region.

Findings

Data indicating normal faulting were detected in 5 of the 6 trenches. In addition, in the observations made in the outcrop in the area where the Yalakdere-6 trench is located, the fault lines belonging to the faulting detected within the shear zone were measured and the angle of the fault lines was determined between 80^{o}-90^{o}. This supports the normal faulting data detected in the trenches.

Originality

Both the field observations and the data obtained from the trenches show that the Yalakdere Fault in the part of the study area is a normal fault, not a strike-slip fault as indicated in the Active Fault Map of Turkey.

† Corresponding author: esangu@kocaeli.edu.tr, +90-262-303-3132

1. Giriş (Introduction)

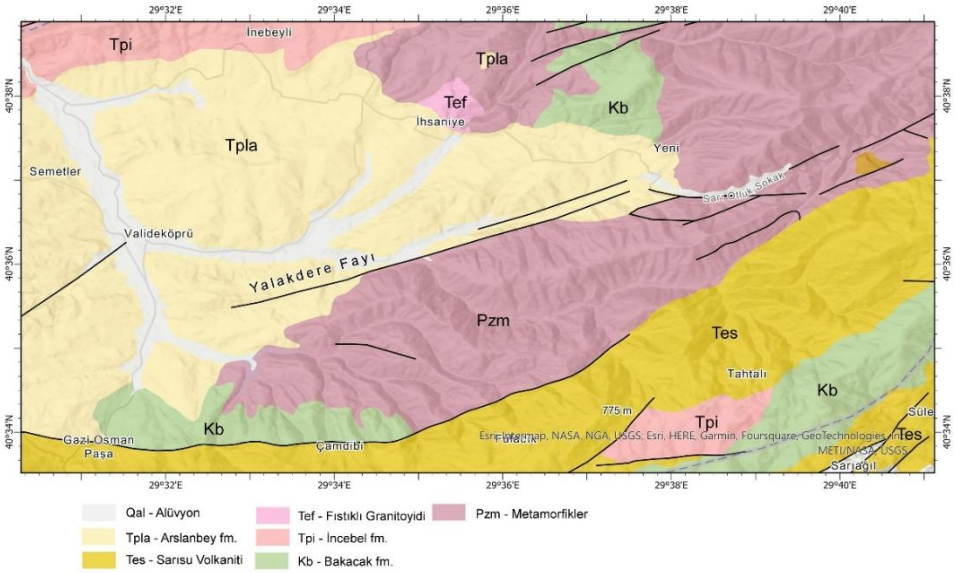
Paleosismoloji, jeolojik kayıtlardan, geçmiş depremlerin büyüklük, yinelenme aralığı ve zamanlaması gibi verileri belirlemeyi amaçlar. Bu, uzun vadeli deformasyondan ziyade bir fay boyunca oluşmuş paleo-depremle ilişkilendirilen özelliklerin tanımlanmasıyla yapılır. Böylece paleosismoloji, geçmiş depremlerin yeri, büyüklüğü ve jeolojik etkilerini inceleyerek sismisite modellerine katkı sağlar ve gelecekteki deprem riskini değerlendirmede önemli bilgiler sunar. İlk aşamada, sismojenik fayların tanımlanması gerekir; bu süreçte faylanmanın türü, fayın uzunluğu, tektonik aktivite oranı ve bölgenin reolojisi gibi unsurlar önemlidir. Farklı fay türleri, arazi yüzeylerinde kendine özgü jeomorfik şekiller oluşturur. Normal faylar horst ve graben gibi yapılar oluştururken, doğrultu atımlı faylar basınç sırtları ve ötelenmiş akarsularla karakterizedir. Bu özellikler, saha çalışmaları, uydu görüntüleri ve sayısal yükseklik modellerinin incelenmesiyle tespit edilebilir (Boulton, 2015).

Fay izleri üzerinde hendek açmak, bir fay segmentinin Holosen dönemindeki evrimini anlamanın en doğrudan yollarından biridir. Hendekler, gömülü genç çökellerin stratigrafik ve yapısal ilişkilerini ortaya çıkararak paleo-olayların izlerini tespit etmeye yardımcı olur. Paleosismolojik çalışmaların temel hedefi, bir paleosismik olayı tanımlamak, tarihlendirmek ve bunu tarihsel bir depremle ilişkilendirmektir. Uygun bir alan seçimi hem ana fay hattında hem de uygun sedimantasyonun bulunduğu bölgelerde hendek kazma çalışmalarının başarısı için kritiktir. Güncel çökelme ve aşınma süreçleri, hendek stratigrafisinin yorumlanmasına katkı sağlar. Paleosismologlar, yavaş sedimantasyon oranlarına sahip ince taneli tortuları tercih eder; flüviyal ve alüviyal nehirler, bataklıklar, deltalar ve çöl gibi ortamlar ideal çalışma alanlarıdır. Fay sarplığının önündeki kolüviyal yığılmalar, yükselen fay bloğundan dökülen malzemeyi kaydetmesi nedeniyle önemli depolama alanlarıdır (Akyüz vd. 2015).

Bu makalede, Armutlu Yarımadası'nın kuzey kısmında yer alan ve Türkiye Diri Fay Haritası Bursa paftasında (Emre vd. 2011) Yalakdere Fayı olarak adlandırılan KD-GB yönelimli sağ yanal atımlı fay üzerinde yapılan paleosismolojik hendek çalışmaları açıklanmıştır.

2. Çalışma Sahası ve Çevresinin Jeolojisi (Geology of the Study Area and Surroundings)

Armutlu Yarımadası'nın kuzeyindeki inceleme alanı ve çevresinde, Paleozoyik'ten Holosen'e kadar çeşitli dönemlere ait farklı tür ve kökende kaya toplulukları yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Yalakdere ve çevresinin jeoloji haritası (Geological map of Yalakdere and its surroundings) (Göncüoğlu vd. 1986)

2.1. Temel Birimleri (Basement Units)

İnceleme alanındaki temel birimler önceki araştırmacılar tarafından İznik metamorfik topluluğu (Yılmaz vd. 1995) veya Pamukova metamorfitleri (Göncüoğlu vd. 1992) olarak isimlendirmiştir. İnceleme alanında görülür temelde yeşil şist fasiyesinde metamorfizmaya uğramış kalın bir dizi ile temsil edilmektedir (Yılmaz vd. 1995). Bunun üzerinde ise Maastrihtiyen yaşlı (Bakacak fm.) bir akarsu çakıltaşı ile başlayan ve üste doğru resifal kireçtaşı, fliş, olistostromal çakıltaşı ile devam eden bir çökel istif altındaki tüm birimleri açısal diskordansla örtmektedir. Orta Eosen yaşlı, yer yer volkanik kayalarla (Sarısu volkaniti) yanal/düşey geçişli bir çakıltaşı, kumtaşı, neritik kireçtaşı istifi ise bu toplulukları ortak olarak üzerlemektedir.

2.2. Örtü Birimleri (Cover Units)

İnceleme alanı içinde, iki örtü birimi ayırtlanmış olup, bunlar; Pliyo-Kuvaterner yaşlı az tutturulmuş çakıltaşı, kumtaşı ve kiltaşından oluşan Arslanbey formasyonu ile Kuvaterner yaşlı alüviyal çökellerdir (Şekil 1).

2.3. Arslanbey Formasyonu (Arslanbey Formation)

Çalışma alanının kuzeyini kaplayan örtü çökelleri Göncüoğlu vd. (1986) tarafından Arslanbey formasyonu olarak adlandırılmıştır. Birim inceleme alanı içerisinde genel olarak sarımsı kahve renkli olan az tutturulmuş çakıl, kum, silt, kil, çamurtaşı ve marn ardalanmasından oluşur. Tabanda kırmızımsı kahve renkli çakıltaşı ve kumtaşı ardalanması ile başlar. Taneler, temeldeki şist, mermer, kuvarsit ve volkanitlerden derlenmiştir. Çakıltaşında, taneler zayıf tutturulmuş ve boylanmıştır. Kumtaşları bej, sarı ve pembe renkli, litik grovak, litik arenit bileşimli, orta-zayıf boylanmalı ve taneleri gevşek tutturulmuştur. İstif üste doğru bej-kahverengi, ince-orta katmanlı ve yer yer kömür bantlı çamurtaşı düzeyleri içerir.

Formasyon, Armutlu Yarımadası genelinde tüm paleotektonik dönem birimlerinin üzerinde açısal diskordan olarak yer almaktadır. Akartuna (1968), Armutlu Yarımadası'nın batısındaki Sarmasiyen çökelleri üzerinde uyumsuz olarak yer alan bu birimlerin Ponsiyen-Pliyosen çökelleri olduğunu belirtir. Üstte alüvyon ile uyumsuz olarak örtülen birimden elde edilen rodent fosillerine göre yaşı Geç Villanyian (Geç Pliyosen) ve Biharian (Erken Pleyistosen) kabul edilmiştir (Ünay vd. 2001). Arslanbey formasyonu'nun kaya türü özellikleri akarsu ve alüviyal yelpaze ortamını karakterize eder.

2.4. Alüvyon (Alluvium)

Armutlu yarımadasının kuzey kısımlarında geniş alanlar kaplayan alüvyon birikimleri, morfolojik eğimin düştüğü alanlarda düşük kotlar boyunca gözlenir. Ana akarsular genellikle K-G, yan kolları ise D-B gidişlidir ve Marmara Denizi'ne dike yakın yüksek açılarla kavuşurlar.

3. Tektonik (Tectonics)

Türkiye, jeolojik olarak birbirinden farklı kıtasal ve okyanusal zonlardan oluşmuştur (Şengör ve Yılmaz, 1981). Tetis Okyanusu'nun aktif ve pasif kıta kenarlarında yer almış olan bu zonlar, Türkiye'nin ana tektonik birimlerini oluşturur. Bölgenin paleotektonik dönemi, Geç Kretase-Paleosen döneminde, İstanbul ve Sakarya kıtalarının İç Pontid Okyanusu'nun kapanmasıyla Kocaeli-Sapanca koridorunda birleşmesiyle şekillenmiştir.

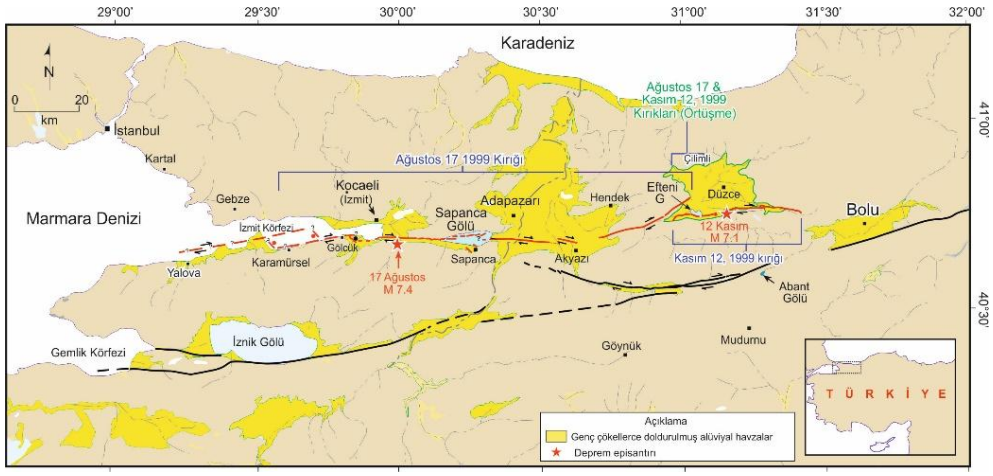
Tüm bu morfotektonik ünitelerin ortak özelliği Üst Miyosen- Alt Pliyosen yaşlı ortak bir çökel istif içermeleridir. Bu istif tüm doğu Marmara'da olgun bir peneplen topografyası üzerinde gelişmiş başlıca karasal-akarsu-göl çökellerinden oluşmaktadır. Bu istif, bölgenin neotektonik dönem öncesi kritik bir birimidir ve ilk neotektonik ipuçları bu istifin üst seviyelerinde görülmeye başlanır. Bu dönemde, kompresif stresin etkisiyle KB-KD doğrultulu eşlenik fay sistemi gelişmiş ve peneplen topografyasını parçalayan bu faylar, KAFS tarafından yeniden şekillendirilerek bugünkü morfotektonik yapılar oluşmuştur (Emre vd. 1998).

Bölgedeki Neotektonik dönem, Pliyo-Kuvaterner'de başlamış ve devam etmektedir. Bölgenin neotektonizması, Geç Pliyosen'den itibaren Ege Bölgesi'nde etkili olan K-G yönlü gerilme rejimi ve KAFS'ye bağlı doğrultu atımlı rejimle şekillenmiştir (Gürer vd. 2003, 2006). Sapanca Gölü, Geç Pliyosen'de asimetrik bir çek-ayır havza olarak gelişen İzmit-Sapanca koridorunun üzerinde bu havzayı biçen fay kolları arasında Orta-Geç Pleyistosen'de ayrı bir çek-ayır havza olarak gelişmiştir (Gürbüz ve Gürer, 2009).

Geç Pliyosen'de KAFS'nin ortaya çıkışıyla, Karadeniz'den Samanlı Dağları'na doğru yükselen morfolojik yapı bozulmuş ve Samanlı Dağları basınç sırtı olarak yükselip çevre morfolojisinden soyutlanmıştır. KAFS'nin kuzeyinde yer alan Kocaeli Yarımadası ise kuzeye doğru eğimlenmiştir (Emre vd. 1998).

Karlıova'dan doğu Marmara'ya kadar dar bir zon boyunca uzanan Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS), Türkiye'nin en büyük ve aktif doğrultu atımlı fay hatlarından biridir. Bolu civarında iki kola ayrılan fay, Marmara Denizi'nin kuzey ve güney kesimlerinden geçip Ege Denizi'ne ulaşır. 1939'dan bu yana KAFS üzerinde doğudan batıya ilerleyen depremler, can kayıplarına, hasara ve yüzey kırıklarına yol açmıştır. Bu depremlerden sonuncusu 1999'daki İzmit ve Düzce depremleridir. İzmit depremi ile Yalova'dan Düzce'ye kadar yaklaşık 145 km uzunluğunda bir yüzey kırığı oluşmuştur (Şekil 2). Bu kırıklar çeşitli araştırmacılar tarafından haritalanmış (Örn: Barka vd. 2002; Langridge vd. 2002; Hartleb vd. 2002; Lettis vd. 2002; Herece ve Akay, 2003) ve Hersek, Karamürsel-Gölcük, İzmit-Sapanca, Sapanca-Akyazı ve Karadere segmentleri olarak adlandırılmıştır (Barka vd.

2002). Segmentler arasında sağa sıçramalar nedeniyle farklı ölçeklerde çek-ayır havzaları gelişmiştir (Dikbaş 2009).

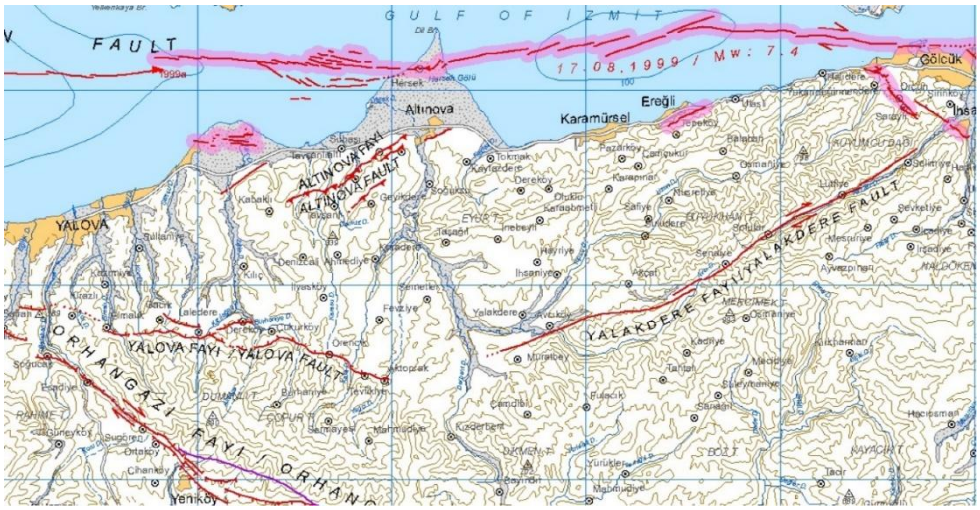


Şekil 2. 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999 depremlerinin merkez üsleri ile fayları gösterir harita (Map showing the epicenters and fault lines of the earthquakes of August 17 and November 12, 1999) (Hithcock vd. 2003)

Çalışmaya konu olan Yalakdere Fayı, Türkiye Diri Fay Haritası Serisi Bursa (NK 35-12) paftası (Emre vd. 2011) içerisinde toplam uzunluğu yaklaşık 26 km olan sağ yanal atımlı bir Holosen fayı olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.). Bargu ve Sakınç (1989), İzmit Körfezi ile İznik Gölü arasındaki bölgenin jeolojisi ve yapısal özelliklerine yönelik yapmış oldukları çalışmada tanımladıkları Merdigöz Fayı konum olarak Yalakdere Fayı ile örtüşmektedir. Bargu ve Sakınç (1989), Merdigöz Fayı'nı K60^{o}D ve K70^{o}B doğrultulu, 80^{o}-85^{o} kuzeye eğimli bir normal fay olarak tanımlamışlardır. Fayın, İznik metamorfikleriyle (Paleozoyik) Arslanbey formasyonu (Geç Pliyosen-Erken Pleistosen) arasındaki dokanakta gözlendiğini, batıya doğru Arslanbey formasyonunun altında devam ettiğini ve bölgenin asimetrik yapısını oluşturduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, fayın, Geç Pliyosen sonrasında tekrar aktif hale geldiğini ve Arslanbey formasyonunu keserek ilerlediğini, başlangıç yaşının da Paleosen veya Erken Eosen dönemlerine ait olabileceğini ifade etmişlerdir.

4. Hendek Çalışmaları (Trench Works)

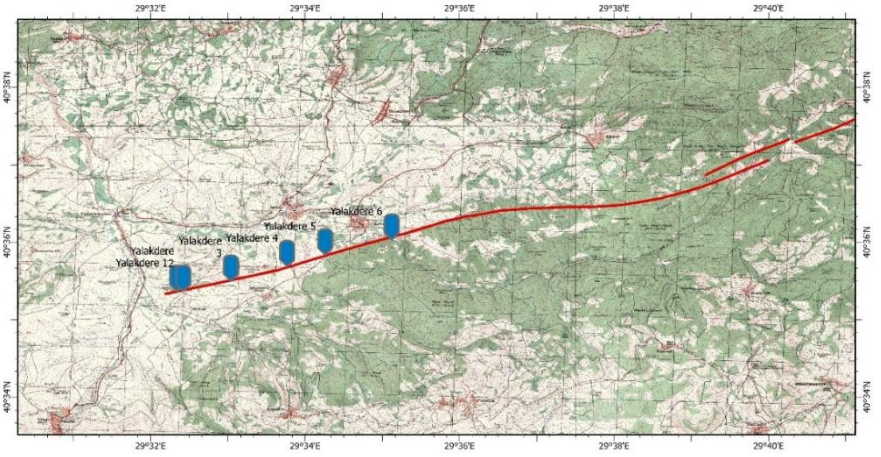
Paleosimolojik hendek çalışmaları dört segmentten oluşan KB-GD yönelimli Yalakdere Fayı'nın batı segmenti üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3. ve 4.). Yaklaşık uzunluğu 11 km olan batı segmentinin Avcıköy batısında kalan 3,5 km lik kısımda 6 farklı lokasyonda (Şekil 4, Tablo 1) hendekler açılmıştır. Hendek yerleri, çalışma alanının jeolojik ve morfotektonik özellikleri ile arazi kullanım ve ulaşım koşulları göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Fayın doğrultusuna yaklaşık dik olarak açılan hendekler, yaklaşık 2 metre genişliğinde, 8-33 metre uzunluğunda ve 2-3 metre derinliğinde kazılmıştır.



Şekil 3. Türkiye Diri Fay Haritası Bursa paftasında Yalakdere Fayı'nın konumu (Location of the Yalakdere Fault on the Bursa sheet of the Active Fault Map of Turkey) (Emre vd. 2011)

Açılan hendeklerde, geçmiş depremlerin yüzeydeki faylanma izlerine ilişkin veriler incelenmiştir. Yüzey faylanması, fay hattındaki hareketin yer yüzeyine yansıması olarak tanımlanır. Yüzey faylanmasının gerçekleşme

olasılığı ve yüzeydeki atım miktarı; depremin büyüklüğü, odak derinliği, fayın geometrisi, kırılma süreci ve yüzeye yakın zeminin özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.



Şekil 4. Açılan hendeklerin topoğrafik harita üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (The location of the trenches on the topographic map (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Tablo 1. Açılan hendeklere ait bilgiler (Information about the trenches that were excavated)

HENDEK ADI	YERİ	KOORDİNAT	UZUNLUK (M)	DERİNLİK (M)	FAY
Yalakdere-1	Karamürsel	40° 35.374'K 29° 32.348'D	20	2.2	Var
Yalakdere-2	Karamürsel	40° 35.373'K 29° 32.425'D	15	3.3	Yok
Yalakdere-3	Karamürsel	40° 35.503'K 29° 33.043'D	18	2	Var
Yalakdere-4	Karamürsel	40° 35.691'K 29° 33.771'D	31	2	Var
Yalakdere-5	Karamürsel	40° 35.843'K 29° 34.262'D	33	2.5	Var
Yalakdere-6	Karamürsel	40° 36.035'K 29° 35.126'D	8	3	Var

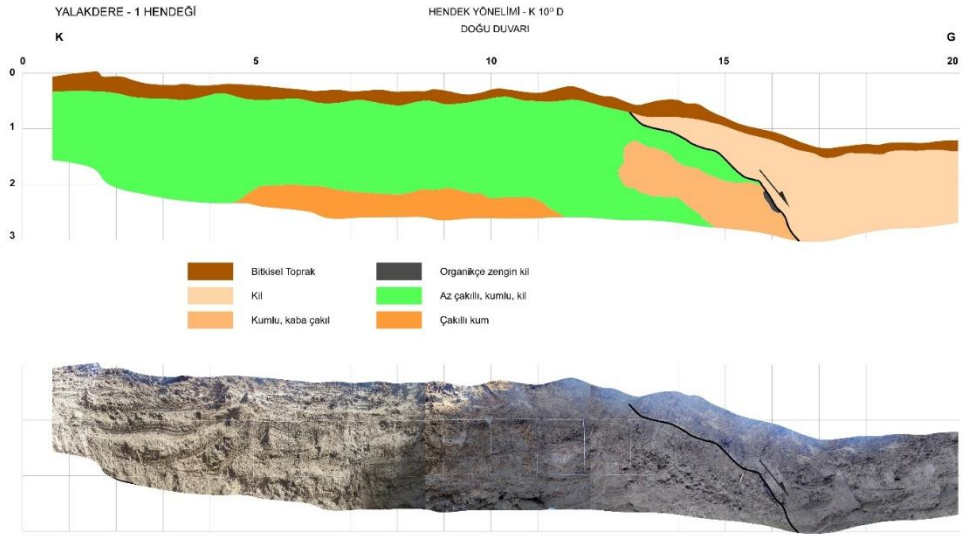
4.1. Yalakdere-1 Hendeği (Yalakdere-1 Trench)

Yalakdere-1 olarak adlandırılan hendek kazısı, K10°D yönelimli ve 20 m uzunluğundadır (Şekil 5a). Hendek, morfolojik belirtilere bakılarak Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki hattın 12 m kuzeyinde açılmıştır (Şekil 5b.).

a) b)

Şekil 5. a) Yalakdere-1 hendeğinden bir görünüm, b) Yalakdere-1 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-1 trench, b) Location of Yalakdere-1 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 6. da hendeğin doğu duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek kuzey kısmında tabanda görünür kalınlığı 40-60 cm arasında değişen çakıllı kum seviyesi ile başlar. Bu birimin üzerinde kalınlığı 150-190 cm arasında değişen az çakıllı, kumlu bir kil seviyesi gözlenmektedir. Bu litolojinin içerisinde mercek şeklinde kumlu, kaba çakıllı bir seviye bulunmaktadır. Hendeğin güney kısmında ise 120-160 cm arasında değişen bir kalınlığa sahip kil görülmektedir. Bütün bu seviyelerin üzerinde de 20-40 cm arasında değişen kalınlıkta bitkisel toprak seviyesi örtü olarak gözlemlenir. Hendeğin kuzeyden itibaren 13-16,5 metreleri arasındaki bölgede faylanmaya ait bulgulara rastlanılmıştır (Şekil 6.). Az çakıllı kumlu kil ile kumlu kaba çakıl seviyelerini, kil seviyesi ile yan yana getiren bu fay zonu içerisinde faylanmaya paralel uzanan organik malzemece zengin killi bir seviyede bulunmaktadır. Hendek içerisinde tespit edilen faylanma yaklaşık KD-GB uzanımlı olup güneye doğru 40° eğimlidir.



Şekil 6. Yalakdere-1 hendeği doğu duvarının logu ve fotomozayiği (Yalakdere-1 trench, log and photomosaic of the eastern wall)

4.2. Yalakdere-2 Hendeği (Yalakdere-2 Trench)

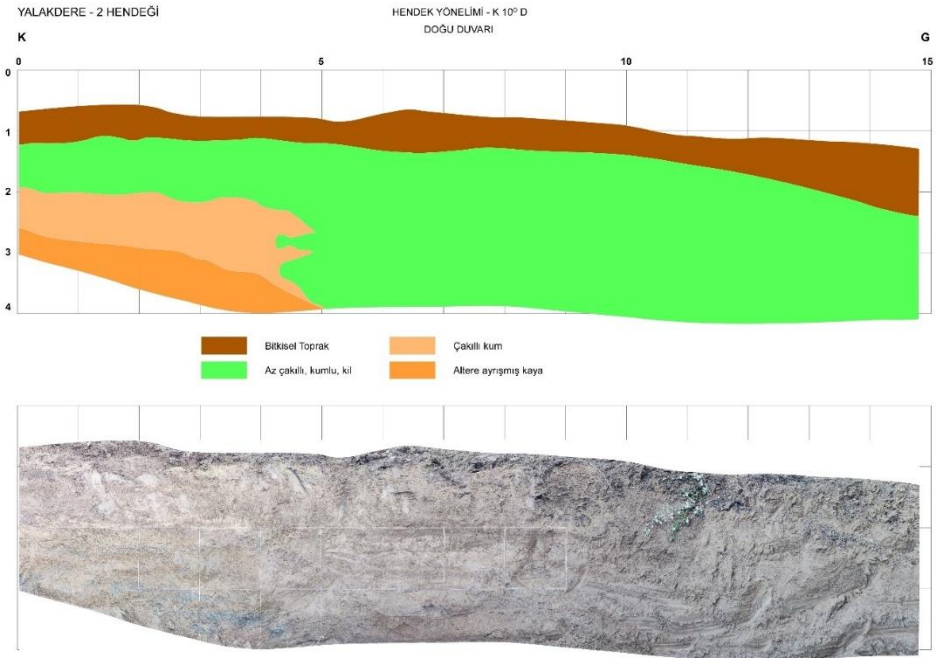
Yalakdere-2 olarak adlandırılan hendek kazısı, K10°D yönelimli ve 15 m uzunluğundadır (Şekil 7a). Hendek, morfolojik belirtilere bakılarak Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki hattın 17 m güneyinde açılmıştır (Şekil 7b.).

a) b)

Şekil 7. a) Yalakdere-2 hendeğinden bir görünüm, b) Yalakdere-2 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-2 trench, b) Location of Yalakdere-2 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 8'de hendeğin doğu duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek kuzey kısmında tabanda görünür kalınlığı 40-80 cm arasında değişen kalınlığa sahip altere

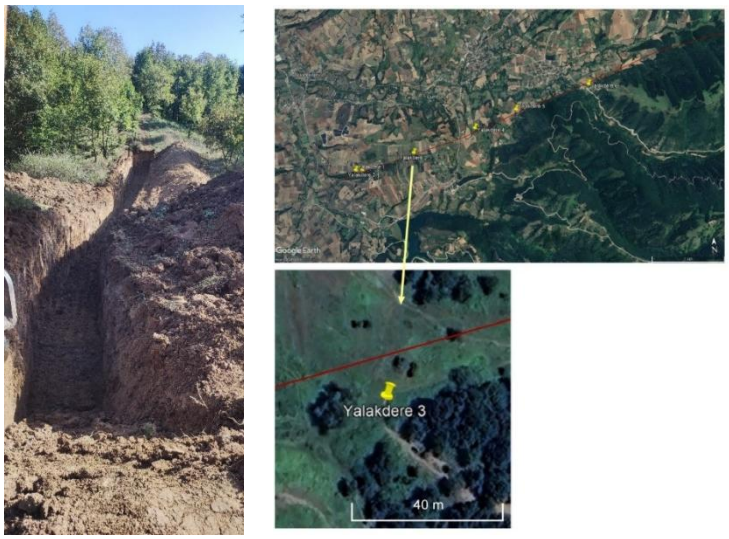
birim ile başlar. Bunun üzerine 80-120 cm arasında değişen kalınlıkta çakıllı kum bulunur. Bu çakıllı kum seviyesi hendek içerisinde görünür kalınlığı 220 cm kadar ulaşan az çakıllı kumlu kil seviyesi ile yatayda ve düşeyde geçişlidir. Bütün bu seviyelerin üzerinde de 40-70 cm arasında değişen kalınlıkta bitkisel toprak seviyesi örtü olarak gözlemlenir. Açılan hendekte sismik aktiviteyi belli edecek herhangi bir veri bulunamamıştır. Farklı düzeylerin, stratigrafik yanal ve düşey devamlılığını kontrol eden veya kesen herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır (Şekil 8.).



Şekil 8. Yalakdere-2 hendeği doğu duvarının logu ve fotomozayiği (Yalakdere-2 trench, log and photomosaic of the eastern wall)

4.3. Yalakdere-3 Hendeği (Yalakdere-3 Trench)

Yalakdere-3 olarak adlandırılan hendek kazısı, K40°B yönelimli ve 18 m uzunluğundadır (Şekil 9a). Hendek, morfolojik belirtilere bakılarak Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki hattın 14 m güneyinde açılmıştır (Şekil 9b).

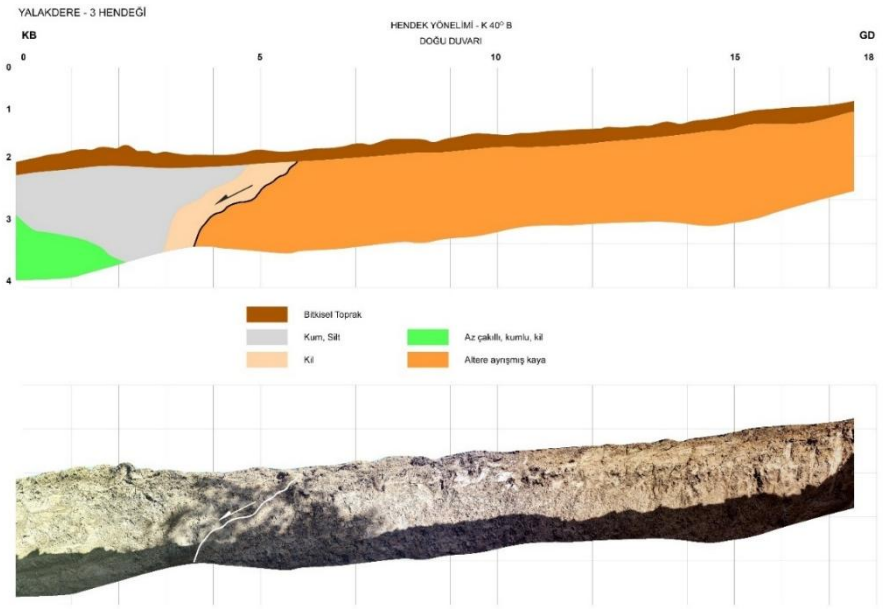


a) b)

Şekil 9. a) Yalakdere-3 hendeğinden görünümler, b) Yalakdere-3 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-3 trench, b) Location of Yalakdere-3 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 10'da hendeğin doğu duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek kuzey batı kısmında tabanda görünür kalınlığı 20-110 cm arasında değişen az çakıllı,

kumlu, kil ile bulunmaktadır. Bu seviyenin üzerine 20-210 cm arasında değişen kalınlığa sahip kumlu siltten oluşan alüvyon gelir. Hendeğin güneydoğu kısmında ise tabanda görünür kalınlığı 180-200 cm arasında değişen kalınlığa sahip altere ayrışmış kayaç bulunmaktadır. Bütün bu seviyelerin üzerinde de 20-60 cm arasında değişen kalınlıkta bitkisel toprak seviyesi örtü olarak gözlemlenir. Hendeğin kuzey batı kısmından itibaren 3-6 metreleri arasında bir deformasyon zonu bulunmaktadır. Yaklaşık 60 cm kalınlığında bir kilde oluşan bu deformasyon zonu altere ayrışmış kaya ile kum ve siltten oluşan seviyeler arasındadır. Hendek içerisinde tespit edilen faylanma yaklaşık kuzey doğu-güney batı uzanımlı olup kuzey batıya doğru 40° eğimlidir.



Şekil 10. Yalakdere-3 hendeği doğu duvarının logu ve fotomozayiği (Yalakdere-3 trench, log and photomosaic of the eastern wall)

4.4. Yalakdere-4 Hendeği (Yalakdere-4 Trench)

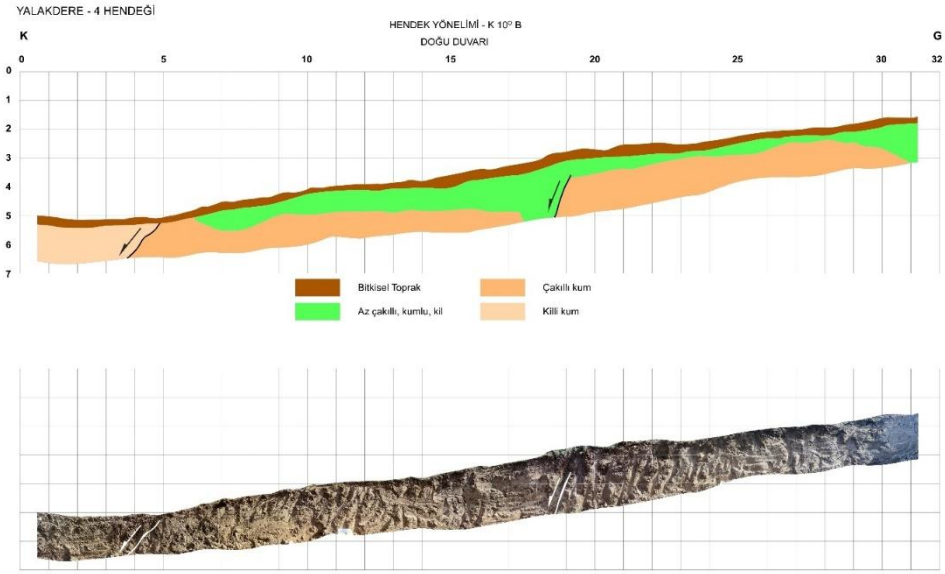
Yalakdere-4 olarak adlandırılan hendek kazısı, K10°B yönelimli ve 31 m uzunluğundadır (Şekil 11a). Hendek, morfolojik belirtilere bakılarak Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki hattın 20 m kuzeyinde açılmıştır (Şekil 11b.).

a) b)

Şekil 11. a) Yalakdere-4 hendeğinden görünümler, b) Yalakdere-4 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-4 trench, b) Location of Yalakdere-4 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 12'de hendeğin doğu duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek kuzey kısmından itibaren hendeğin 4-31 metreleri arasında tabandaki görünür kalınlığı 50-130 cm arasında değişen çakıllı kum seviyesi ile başlar. Bu seviyenin üzerinde kalınlığı 20-160 cm arasında

değişen az çakıllı kumlu kil seviyesi bulunmaktadır. Hendeğin kuzey kısmından itibaren ilk 4 metrelik bölümünde ise killi kum seviyesi bulunur. Bu killi kum seviyesi 3,5-5 metreler arasındaki bölgede faylı bir dokanakla çakıllı kum seviyesi ile yan yana gelmektedir. Ayrıca hendeğin 19-20 metreleri arasındaki bölgede çakıllı kum seviyesi ile az çakıllı kumlu kil seviyeleri arasında da bir faylanma tespit edilmiştir. Hendek içerisinde tespit edilen faylanmalar yaklaşık KD-GB uzanımlı olup kuzeye doğru 45° ve 70° eğimlidirler.



Şekil 12. Yalakdere-4 hendeği doğu duvarının logu ve fotomozayiği (Yalakdere-4 trench, log and photomosaic of the eastern wall)

4.5. Yalakdere-5 Hendeği (Yalakdere-5 Trench)

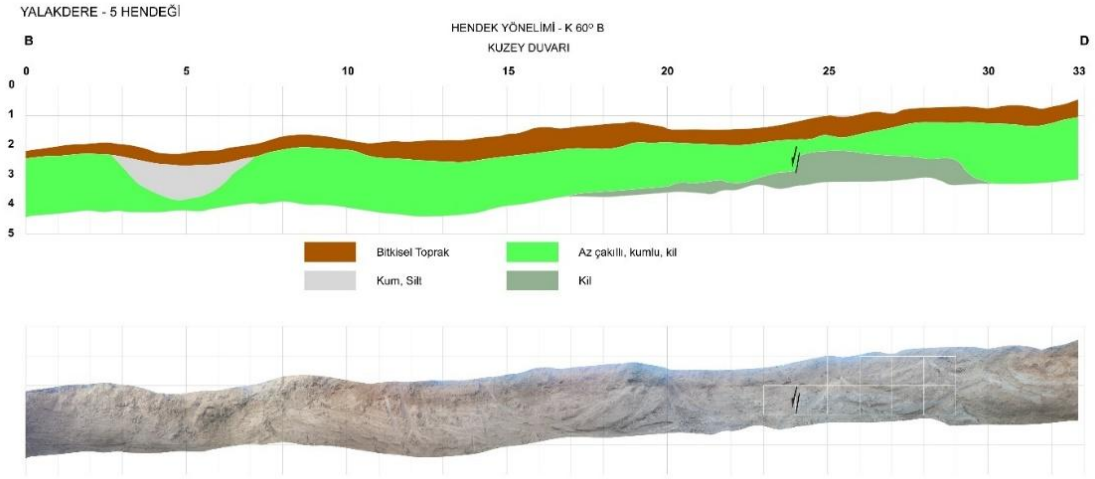
Yalakdere-5 olarak adlandırılan hendek kazısı, K60°B yönelimli ve 33 m uzunluğundadır (Şekil 13a). Hendek, morfolojik belirtilere bakılarak Türkiye Diri Fay Haritası'nda belirtilen hattın 25 m kuzeyinde açılmıştır (Şekil 13b.).

a) b)

Şekil 13. a) Yalakdere-5 hendeğinden bir görünüm, b) Yalakdere-5 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-5 trench, b) Location of Yalakdere-5 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 14'te hendeğin kuzey duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek tabanda istif görünür kalınlığı 10-110 cm arasında değişen gri renkli bir kil seviyesi ile başlar. Bu seviyenin üzerinde 40-190 cm arasında değişen kalınlığa sahip az çakıllı kumlu kil seviyesi bulunmaktadır. Hendeğin batı kısmından itibaren 2,5-7 metreleri arasında kalan kısmında eski dere yatağına ait

kum ve silt den oluşan alüvyon birimi görülür. Tüm bu seviyelerin üzerinde kalınlığı 40-80 cm arasında değişen bitkisel toprak seviyesi örtü olarak gelir. Hendeğin batı kısmından itibaren 24 metresinde gri renkli kil seviyesinde faylanma sonucu yaklaşık 50 cm lik bir düşüm mevcuttur. Hendek içerisinde tespit edilen bu faylanma yaklaşık kuzey doğu-güney batı uzanımlı olup kuzey batıya doğru 75° eğimlidir.



Şekil 14. Yalakdere-5 hendeği kuzey duvarının logu ve fotomozayiği (Yalakdere-5 trench north wall log and photomosaic)

4.6. Yalakdere-6 Hendeği (Yalakdere-6 Trench)

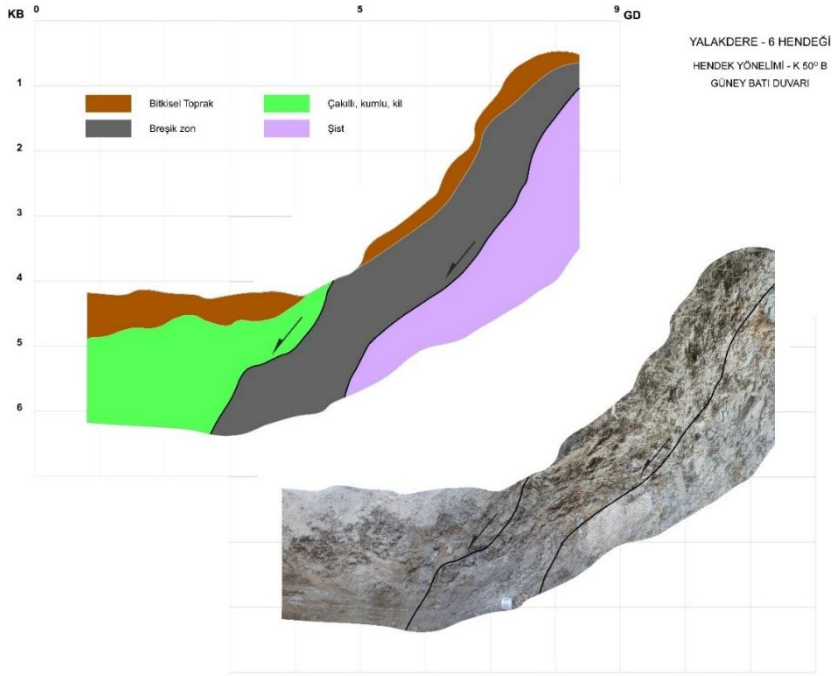
Yalakdere-6 olarak adlandırılan hendek kazısı, K50°B yönelimli ve 8 m uzunluğundadır (Şekil 15 a-b). Bu hendek yerinin seçimi sırasında yol kenarında bulunan daha önceden malzeme almak için yapılan kazı sahası incelenmiş. Bu mostrada iki farklı birim arasındaki faylı kontak gözlemlenmiş ve bu faylanmanın derinlerdeki devamını görmek amacıyla kazı yapılmıştır. Hendek, Türkiye Diri Fay Haritası'nda belirtilen hattın 55 m güneyinde açılmıştır (Şekil 17c).

a) b)

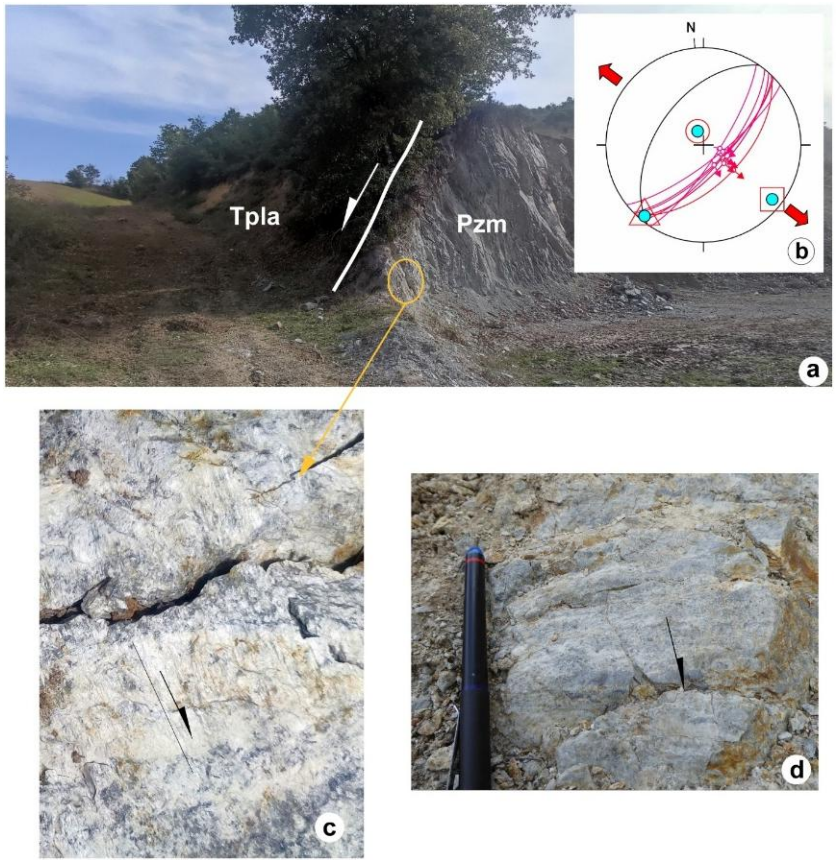
Şekil 15. a) Yalakdere-6 hendeğinden bir görünüm, b) Yalakdere-6 hendeğinin Google Earth görüntüsü üzerindeki konumu (Kırmızı çizgi Türkiye Diri Fay Haritası'ndaki Yalakdere Fayı'nın konumunu göstermektedir) (a) View of Yalakdere-6 trench, b) Location of Yalakdere-6 trench on Google Earth image (The red line indicates the location of the Yalakdere Fault on the Turkey Active Fault Map))

Şekil 16'da hendeğin güney batı duvarının çizimleri ve fotomozayiği görülmektedir. Hendek içindeki birimler incelendiğinde, hendek tabandaki görünür kalınlığı 60-240 cm arasında değişen beyaz-gri renkli bir şist seviyesi ile (İznik metamorfitleri) başlar. Bu seviyenin üzerinde 40-130 cm arasında değişen kalınlığa sahip breşik bir zon bulunmaktadır. Tüm bu seviyelerin üzerinde de kalınlığı 30-70 cm arasında değişen bitkisel toprak seviyesi örtü olarak görülür. Hendeğin güneybatı kenarından itibaren ilk 6 metrelik kısmında bir deformasyon alanı tespit edilmiş olup, bu alandaki şistler faylanma sonucunda breşik bir yapı kazanmıştır. Faylanma sonucunda temele ait

Paleozoyik yaşlı birimler ile Pliyosen yaşlı genç birim (Arslanbey fm) yan yana gelmiştir. Hendek içerisinde tespit edilen bu faylanma yaklaşık KD-GB uzanımlı olup kuzey batıya doğru 50° eğimlidir.



Şekil 16. Yalakdere-6 hendeğinin güney batı duvarının logu ve fotomozayiği (The log and photomosaic of the southwestern wall of the Yalakdere-6 trench)



Şekil 17. a) Avcıköy güney doğusundaki yol yarmasında İznik metamorfikleri ile Arslanbey formasyonu arasındaki normal faylanma, b) fay çiziği verilerinden oluşturulan paleostress analizinin tensör konfigürasyonu, c) Lambert alt yarı küre (eşit alan) projeksiyonu ,d) İznik metamorfiklerine ait şistler üzerinde gelişen fay çizikleri (a) Normal faulting between the Iznik metamorphics and the Arslanbey Formation in the road cutting southeast of Avcıköy b) Tensor configuration of the paleostress analysis created from fault slip data, c) Lambert lower hemisphere (equal area) projection, d) Fault slip lines developing on schists belonging to the Iznik metamorphics)

5. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

➢ MTA tarafından hazırlanan 1/250.000 ölçekli diri fay haritasında inceleme alanı içinden geçen Yalakdere Fayı, Holosen fayı (Holosen'de (11.000 yıl) yüzey faylanması oluşturan fay) olarak tanımlanmıştır. Yalakdere Fayı'nın batı kısmındaki yaklaşık 3,5 km kısmında yapılan hendek çalışmalarında geçmişte yüzey faylanması oluşturan deprem izleri tespit edilmiştir.

➢ Yalakdere Fayı'na yaklaşık dik doğrultuda açılan 6 hendekten 1,3,4,5,6 nolu hendeklerde sismik aktiviteyi yansıtacak faylanma verileri elde edilirken 2 numaralı hendekte herhangi bir veriye rastlanmamıştır.

➢ Yalakdere-1 olarak adlandırılan hendeğin kuzeyden itibaren 13-16,5 metreleri arasındaki bölgede faylanmaya ait bulgulara rastlanılmıştır. Hendek içerisinde tespit edilen faylanma yaklaşık KD-GB uzanımlı olup güneye doğru 40^o eğimlidir.

➢ Yalakdere-2 olarak adlandırılan hendekte sismik aktiviteyi belli edecek herhangi bir veri bulunamamıştır. Farklı düzeylerin, stratigrafik yanal ve düşey devamlılığını kontrol eden veya kesen herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

➢ Yalakdere-3 olarak adlandırılan hendeğin kuzey batı kısmından itibaren 3-6 metreleri arasında bir deformasyon zonu bulunmaktadır. Yaklaşık 60 cm kalınlığında bir kilde oluşan bu deformasyon zonunu oluşturan faylanma yaklaşık KD-GB uzanımlı olup fay düzlemi 40^o KB'ya eğimlidir.

➢ Yalakdere-4 olarak adlandırılan hendek içerisinde killi kum seviyesi 3,5-5 metreler arasındaki bölgede faylı bir dokanakla çakıllı kum seviyesi ile yan yana gelmektedir. Ayrıca hendeğin 19-20 metreleri arasındaki bölgede çakıllı kum seviyesi ile az çakıllı kumlu kil seviyeleri arasında da faylanma tespit edilmiştir. Hendek içerisinde tespit edilen faylanmalar yaklaşık KD-GB uzanımlı olup kuzey doğru 45^o ve 70^o eğimlidirler.

➢ Yalakdere-5 olarak adlandırılan hendeğin batı kısmından itibaren 24 metresinde gri renkli kil seviyesinde faylanma sonucu yaklaşık 50 cm lik bir düşüm mevcuttur. Hendek içerisinde tespit edilen bu faylanma yaklaşık KB-GD uzanımlı olup 75^o KB'ya eğimlidir.

➢ Yalakdere-6 olarak adlandırılan hendeğin güneybatı kenarından itibaren ilk 6 metrelik kısmında bir deformasyon alanı tespit edilmiş olup, bu alandaki şistler faylanma sonucunda breşik bir yapı kazanmıştır. Faylanma sonucunda temele ait Paleozoyik yaşlı metamorfikler ile Pliyosen yaşlı genç birim (Arslanbey fm) yan yana gelmiştir. Hendek içerisinde tespit edilen bu faylanma yaklaşık KD-GB uzanımlı olup 50^o KB'ya eğimlidir. Sismik aktiviteye işaret eden verilerin elde edildiği bu 5 hendeğin tamamında normal faylanmayı gösteren kanıtlar söz konusudur.

➢ Sismik aktiviteye işaret eden verilerin elde edildiği bu 5 hendeğin tamamında normal faylanmayı gösteren kanıtlar söz konusudur. Ayrıca Yalakdere-6 hendeğinin bulunduğu alandaki mostrada yapılan gözlemlerde makasalanma zonu içerisinde tespit edilen faylanmaya ait çizikler de yapılan ölçümlerde fay yatım açısı 80^o-90^o arasında tespit edilmiştir. Elden edilen fay çiziği verileri yapılan paleostres analizide KB-GD yönlü genişlemeyi işaret etmektedir (Şekil 17 a-b-c.). Bu da hendeklerde tespit edilen normal faylanma verilerini desteklemektedir. Hem arazi gözlemleri hem de hendeklerden elde edilen veriler inceleme alanı içerisinde Yalakdere Fayı'nın doğrultu atımlı değil normal fay olduğunu göstermiştir.

➢ Çalışılan hendeklerde faylanmanın olduğu alanların üzerinde Holosen yaşlı örtü çökelleri yer alır. Fay izlerinin bu çökelleri kesmemiş olması ve fayın kestiği en genç çökelin (Arslanbey formasyonu) Geç Pliyosen-Erken Pleyistosen yaşlı olması fayın olası bir Kuvaterner fayı olduğunu düşündürmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Kocaeli İli, Karmürsel İlçesi sınırları içerisinde İmar Planı çalışmalarına esas olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda saha ve ofis çalışmalarındaki katkılardan dolayı Prof. Dr. Ö. Feyzi GÜRER'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışmayı yapma imkanını sunan Jeofizik Müh. Ergün HANE'ye de teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

Akyüz, H.S., Karabacak, V., Zabcı, C., (2015). Paleoseismic Trenching. In: Beer, M., Kougioumtzoglou, I.A., Patelli, E., Au, SK. (eds) Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg.

Akartuna, M., (1968). Armutlu yarımadasının jeolojisi. İstanbul Üniv. Fen. Fak. Monog. 20, 1 – 105.

Bargu, S. Sakınç, M., (1989), İznik körfezi-İznik gölü arasında kalan bölgenin jeolojisi ve yapısal özellikleri, İÜ Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi, 6, 45-76.

Barka, A.A.; Kadinsky-Cade, K. (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthqauake activity. Tectonis, 7 (3), 663-684.

Barka, A., Akyüz, H. S., Altunel, E., Sunal, G., Çakır, Z., Dikbas, A., Yerli, B., Armijo, R., Meyer, B., Bernard de Chabalier, J. B., Rockwell, T., Dolan, J. R., Hartleb, R., Dawson, T., Christofferson, S., Tucker, A., Fumal, T., Langridge, R., Stenner, H., Lettis, W., Bachhuber, J., and Page, W., (2002). The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999 Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault, Bulletin of the Seismological Society of America, 92, 1, 43-60

Boulton, S.J., (2015). 'Paleoseismology' Encyclopedia of Earthquake Engineering Springer Berlin Heidelberg 1792-1799

Dikbaş A., (2009). Kuzey Anadolu Fay Zonunun İzmit-Gölyaka (Düzce) arasındaki segmentlerinin paleosismolojisi ve morfolojik özellikleri, doktora tezi, İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, 287 sf.

Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M. & Ünay, E. (1998). Neogene–Quaternary evolution of the eastern Marmara region, northwest Turkey. Mineral Research and Exploration (MTA) Bulletin 120, 119–145.

Emre, Ö., N. Kazancı, Erkal, T., (1998). Güney Marmara Bölgesi Kuvaterner olayları ve muhtemel tarihçesi, TÜBİTAK-Üniversite-MTA Ulusal Deniz Araştırmaları Programı WORKSHOP IV (14-15 Mayıs 1998), Bildiri Özleri Kitabı, s. 4, İstanbul

Emre, Ö., Doğan, A., Duman, T. Y, , Özalp, (2011) 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Bursa (NK 35-12) Paftası, Seri No:9, Maden Tetkik veArama Genel Müdürlüğü, Ankara- Türkiye

Göncüoğlu, M.C.; Erendil, M.; Tekeli, O.; Ürgün, B.M.; Aksay, A. ve Kuşçu, İ., (1986), Armutlu Yarımadasının doğu kesiminin jeolojisi : MTA Rap. 7786 (yayımlanmamış), Ankara. .

Göncüoğlu, M.C., Erendil, M., Tekeli, O., Aksay, A., Kuşçu, and A., Ürgün, B., (1992). Introduction to the geology of the Armutlu Peninsula. ISGB-92, Guide Book, pp. 26–36.

Gürbüz, A. ve Gürer, Ö.F., (2009) Middle Pleistocene extinction process of pull-apart basins along the North Anatolian Fault Zone, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 173, 177-180.

Gürer, Ö. F., Kaymakcı, N., Çakır, Ş., & Özburan, M., (2003). Neotectonics of the southeast Marmara region, NW Anatolia, Turkey. Journal of Asian Earth Sciences , vol.21, 1041-1051.

Gurer, O. F., Sangu, E., & ÖZBURAN, M., (2006). Neotectonics of the SW Marmara region, NW Anatolia, Turkey. GEOLOGICAL MAGAZINE , vol.143, no.2, 229-241.

Hartleb, R.D., Dolan, J.F., Akyüz, H.S., Dawson, T.E., Tucker, A.Z., Yerlİ, B., Rockwell, T.K., Toraman, E., Çakir, Z., Dİkbaş, A. & Altunel, E. (2002). Surface rupture and slip distribution along the Karadere segment of the 17 August 1999 İzmit and the western section of the 12 November 1999 Düzce, Turkey, earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America 92, 67–78

Herece, A., & Akay, E. (2003). Atlas of North Anatolian Fault (NAF). Mineral Research and Exploration (MTA) Special Publications

Hitchcock, C., Altunel, E., Barka, A.A., Bachhuber, J., Lettis, W., Kozacı, Ö., Helms, J. & Lindvall, S. (2003). Timing of Late Holocene earthquakes on the eastern Düzce fault and implications for slip transfer between the southern and northern strands of the North Anatolian Fault system, Bolu, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences 12, 119–136.

Langridge, R.M., Stenner, H.D., Fumal, T.E., Christofferson, S.A., Rockwell, T.K., Hartleb, R.D., Bachhuber, J. & Barka, A.A. (2002). Geometry, slip distribution and kinematics of the surface rupture on the Sakarya fault segment during the 17 August 1999 İzmit, Turkey, Earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America 92, 107–125

Lettis, W., Bachhuber, J., Witter, R., Brankman, C., Randolph, C. E., Barka, A., Page, W. D., and Kaya, A., (2002). Influence of releasing step-overs on surface fault rupture and fault segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey, Bulletin of the Seismological Society of America, 92, 1, 19-42

Şengör, A.M.C. ve Yılmaz, Y., (1981). Tethyan evolution of Turkey : A plate tectonic approach: Tectonophysics, 75,181 - 241.

Ünay, E., Emre, Ö., Erkal, T., and Keçer, M., (2001). The rodent fauna from the Adapazari pull-apart basin (NW Anatolia): Its bearings on the age of the North Anatolian Fault, Geodinamica Acta, 14, 169-175

Yılmaz, Y., Genç, Ş. C., Yiğitbaş, E., Bozcu, M. and Yılmaz, K., (1995). Geological evolution of the Late Mesozoic continental margin of nortwestern Anatolia, Tectonophysics, 243, 155-172

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 440-453, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1643282

Araştırma Makalesi Research Article

BİYOMİMİKRİ YÖNTEMİYLE TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMASI

Şenay BALBAY[1,2*]

[1] Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri, Bilecik, Türkiye
[2] Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Endüstriyel Sürdürülebilirlik ABD, Bilecik, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Faz Değişim Malzemesi, Biyomimikri, Şişe Soğutucu, Ticari Grafit, Grafit Oksit .

Öz

Çalışmada karbon esaslı malzemeler (KEM)(Grafit(GR) ve Grafit Oksit(GO)) kullanılarak etkili ısı enerjisi depolaması için uygun maliyetli çok işlevli faz değişim malzemelerin (FDM) tasarlanması, geliştirilmesi ve biyomimikri bilimine bağlı olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Çalışmada ilk olarak FDM üretilmiş, daha sonra üretilen FDM'nin analizi yapılmış ve son olarak biyomimikri bilimine göre prototip soğutucu şişe torbası tasarlanarak suyu soğuk tutma performans çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Grafit ve grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı enerji depolama kapasiteleri, fonksiyonel yapıları, termal özellikleri incelenmiştir. Aynı zamanda termal döngü sonrası (100-300-500 döngü) FDM'nin ısı depolama kapasiteleri ve termal-kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Grafit kullanılarak üretilen FDM, GO kullanılarak üretilen FDM'den daha fazla ısı enerjisi depoladığı gözlenmiştir. Biyomimikri bilimine bağlı olarak tasarlanan prototip soğutucu şişe torbasının piyasada satışı yapılan soğutucu şişe torbalarından hem en az 2 kat daha fazla performansa sahip olduğu hem de ürün başına 38,91TL – 216,44TL daha ucuz maliyetle üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATION WITH BIOMIMICRY METHOD

Keywords

Phase Change Material, Biomimicry, Bottle Cooler, Commercial Graphite, Graphite Oxide.

Abstract

The study aims to use biomimicry science to design and develop cost-effective multifunctional phase change materials (PCM) for effective thermal energy storage using carbon-based materials (CBM) (Graphite (GR) and Graphite Oxide (GO)). PCMs were first produced, then the produced PCMs were analyzed. Finally, a prototype cooler bottle bag according to biomimicry science was designed, and performance studies were carried out to keep the water cold. The temperature differences, functional structures and thermal properties of PCMs produced using graphite and graphite oxide were investigated. At the same time, heat storage capacities and thermal-chemical properties of PCM after thermal cycling (100-300-500 cycles) were determined. It was observed that PCM produced using graphite stored more heat energy than PCM produced using GO. The prototype bottle cooler bag (BCB) was designed based on biomimicry science and performed 2 times more than the cooler bottle bags sold on the market. Also, it was concluded that it can be produced at a lower cost of 38,91 – 216,44 TL (Turkish Lira) per product.

Alıntı / Cite

Balbay, Ş., (2025). Biyomimikri Yöntemiyle Termal Enerji Depolama Uygulaması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 440-453.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Balbay / S. Balbay, 0000-0002-0016-7973

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	19.02.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	14.04.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: senay.balbay@bilecik.edu.tr, +90-228-214-1627

THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATION WITH BIOMIMICRY METHOD

Şenay BALBAY [1†,2]
[1] Bilecik Seyh Edebali University, Vocational School, Environmental Protection Technologies, Bilecik, Türkiye
[2] Bilecik Seyh Edebali University, Graduate Education Institute, Industrial Sustainability Department, Bilecik, Türkiye

Highlights

1. According to biomimicry science, a prototype bottle cooler bag (PBCB) was designed.
2. PBCB has both cheaper and higher performance than the BCBs sold in the market.
3. Phase change material (PCM) with high heat storage capacity was produced.
4. The amount of heat storage increased as the thermal cycle increased.

Graphical Abstract

Figure. Prototype Bottle Cooler Bag

Purpose and Scope

This study aims to be used by biomimicry science, designing and developing cost-effective multifunctional phase change materials (PCMs) for effective heat energy storage using carbon-based materials (CBMs).

Design/methodology/approach

PCMs were first produced, then the produced PCMs were analyzed. Finally, a prototype cooler bottle bag according to biomimicry science was designed, and performance studies were carried out to keep the water cold. The temperature differences, functional structures and thermal properties of PCMs produced using graphite and graphite oxide were investigated. At the same time, temperature differences and thermal-chemical properties of PCMs were determined after the thermal cycle (100-300-500 cycles).

Findings

It was observed that PCMs produced using graphite stored more heat energy than PCMs produced using GO. The prototype bottle cooler bag (BCB) was designed based on biomimicry science and performed twice the cooler bottle bags sold on the market. Also, it was concluded that it can be produced at a lower cost of 38,91 – 216,44 TL (Turkish Lira) per product.

Originality

Very few studies use biomimicry, a new field of science, in thermal energy storage. At the same time, no study has been conducted on using PCM more efficiently by biomimicry. Therefore, the design, development and use of cost-effective multifunctional PCMs for effective thermal energy storage using CBMs (graphite and graphite oxide) has been examined in the study and will contribute to the literature in this respect. As a result, it has been determined that the designed bottle cooler bag is cheaper and at least 2 times more efficient than the products available.

† Corresponding author: senay.balbay@bilecik.edu.tr, +90-228-214-1627

1. Giriş (Introduction)

2025-2030 yılları arasında küresel termal enerji depolama pazarının Yıllık Bileşik Büyüme Oranının (CAGR) %6.25'den daha fazla büyümesi beklenmektedir (Mordor Intelligence, 2025). Yenilenebilir enerji üretiminde büyüyen ihtiyaçlar, malzeme biliminde yaşanan gelişmeler ve devlet teşvikleri gibi faktörler termal enerji depolama pazarına olan talebi artıran önemli faktörlerdendir (Aslfattahia vd. 2020). Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının dönüştürülmesine yönelik teknolojilerin artan gelişimi termal enerjiyi verimli bir şekilde depolama ve yönetme gerekliliğini de artırmaktadır (Ribezzo vd., 2023).
Enerji depolama sistemleri, arz ve talebi dengelemede, dalgalanmaları düzeltmede ve yenilenebilir enerji kaynaklarını şebekeye entegre etmede temel bir rol oynar. Bu bağlamda, faz değişim malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve faz geçişleri sırasında termal enerjiyi depolama ve serbest bırakma yetenekleri nedeniyle Gizli Isı Termal Enerji Depolama (LHTES) için umut verici bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Muiruri vd., 2024).

FDM'lerin performansı büyük ölçüde üretimlerinde kullanılan matrise bağlıdır ve gözenekli karbon bazlı malzemeler umut verici matris destekleri olarak ortaya konmuştur (Singh vd., 2022). Grafen, grafen oksit (GO) ve karbon nanotüpler (CNT'ler) gibi FDM üretiminde yaygın kullanılan karbonlu malzemeler, sergiledikleri yüksek termal iletkenlik ve yüksek ısı transferi özelliklerine rağmen olumsuz çevresel ve sağlık etkileri ve yüksek maliyetli olmalarından dolayı uygulama alanlarını kısıtlamaktadır (Muiruri vd., 2024).

Geleneksel FDM'ler sızıntı oluşturması, faz ayrılması ve düşük termal iletkenlikten muzdariptir ve bu da pratikliklerini ve verimliliklerini sınırlamaktadır. Sızıntı oluşumu, çevresel riskler meydana getirdikleri için FDM tabanlı sistemlerin ömrünü tehlikeye düşürmektedir (Odoi-Yorke vd., 2023). Bu zorlukların üstesinden gelmek için FDM'yi takviyelere dahil ederek yapısal bütünlüğü ve termal özellikleri artırırken sızıntıyı en aza indirecek form-stabil FDM'ler (FSFDM'ler) geliştirilmiştir (Yu ve Song, 2023). FSFDM'lerin üretiminde kullanılan karbonlu malzemeler (aktif karbon, karbon siyahı, CNT, grafen, GO, vb.), kılcal kuvvet ve hidrojen bağı etkisiyle FDM'nin sızdırmalarına engel olduğu gözlenmiştir (Wang vd., 2018). Liu ve arkadaşları, FDM moleküllerinin PEG ile uygulanmasına bağlı olarak hidrojen bağlarını güçlendirdiği ve FDM'nin genel mukavemetinin daha güçlü olmasına yol açtığını belirlemişlerdir (Liu vd., 2024).

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Grafit bazlı faz değişim malzemeleri, sistemin termal iletkenliğini artırarak gizli ısı depolama sistemlerindeki termal iletimi iyileştirmektedir (Kumar vd., 2025). Yüksek sıcaklık sinterlemesi yoluyla genişletilmiş grafit ve zift bazlı yüksek ısı iletkenliğine sahip faz değişimli enerji depolama malzemesi geliştirilmiştir. Geliştirilen malzemenin gizli ısısı 228,5 J/g olarak belirlenmiştir (Dong vd., 2025). Genleştirilmiş grafit basınç altında sıkıştırıldıktan sonra erimiş parafin emdirilerek sıkıştırılmış genleştirilmiş grafit (SGG) elde edilmiştir. SGG sıkıştırma oranına bağlı olarak kompozitin etkin termal iletkenliğinde saf parafine kıyasla 3 ila 10 kat artış olduğu tespit edilmiştir (Kumar vd., 2025). Parafin (PAR), genleştirilmiş grafit ve düşük erime noktalı metal bazlı alaşımdan oluşan FDM'nin 2,31 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ termal iletkenlik göstermiştir (Zhao vd., 2025). Bir olefin blok(OB) kopolimeri, termal esneklik sağlayan eriyik sızıntısını etkili bir şekilde önleyen 1-hekzadekanolü (HD) kapsüllemek için destekleyici malzeme olarak kullanılmış ve FDM içinde birbirine bağlı ısı transfer kanalları oluşturmak için grafit eklenmiştir. %7,5 ağırlık oranında genleşmiş grafit (EG) ve 12:8 HD/OBC kütle oranına sahip FDM, 0,537 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ termal iletkenliğe, 152 $J \cdot g^{-1}$ faz geçiş entalpisine ve 200 termal çevrimden sonra yalnızca %0,846 sızıntı oranına ulaşarak optimum performans göstermiştir (Zhong vd., 2025). Karbonize buğday samanı (CWS) ve EG'in parafin içinde karıştırılarak elde edilen CWS-EG/PAR FSFDM'nin ısıl iletkenliği 2,01 W/m·K'ye kadar çıkmış olup % 615,1 oranında artmıştır (Liu vd., 2025). Yüzey aktif madde Triton X-100 (TX-100) kullanılarak EG termal iletkenlik dolgusunu değiştirmek için kovalent olmayan bir fonksiyonelleştirme yöntemi kullanılmıştır. TX-100'deki hidrofilik gruplar, modifiye edilmiş genişletilmiş grafit(MGG) ve glisin su esaslı FDM arasında hidrojen bağlarının oluşumunu kolaylaştırarak malzemelerin entalpi kaybını engellemiştir. %2 ila %8 ağırlık oranında MGG içeren hazırlanmış FDM'lerin %46,47 ~ %113,35'lik bir artışı temsil eden 0,88 ila 1,28 W/m·K aralığında termal iletkenlik sergilemiştir. Eş zamanlı olarak, erime sıcaklığı -5,35 ila -5,65 °C arasında değişmiş ve 284,6 ila 264,5 J/g'lık yüksek bir erime gizli ısısı meydana gelmiştir. 100 termal çevrimden sonra erime sıcaklığında (% -1,62 ~ % +2,20) ve gizli ısıda (% -2,18 ~ % -4,66) yalnızca küçük dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Liu vd., 2024). Ağırlıkça %1, %4, %7 ve %10 Nano-grafit (NG)/parafin kompozit faz değişim malzemeleri hazırlanmıştır. Nano-grafit (NG)/parafin kompozit FDM'sinin oranı %1'den %10'a arttıkça termal iletkenlik de 0.3650 W/mK'den 0.9362 W/mK yükselmiştir. Saf parafinin gizli ısısı 209.33 J/g'dır. Nano-grafit (NG)/parafin kompozit FDM'sinin oranı %1'den %10'a arttıkça gizli ısı 202.6 J/g'den ve 181.81 J/g'a azalmıştır (Magendran vd., 2019). Farklı sıcaklık (20-25-30-35-40 °C) ve farklı kütle oranlarında(% ağ.) (0.1, 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.5) grafit tozu, genleşmiş perlit, MCNT, multi-layer graphene nanoplateletler parafin tozuna karıştırılarak faz değişim malzemelerinin termal enerji depolama verimliliği incelenmiştir. Artan grafit/parafin oranına bağlı olarak

sıcaklık arttıkça termal iletkenlik azalmıştır. En yüksek termal iletkenlik değeri 20 °C'de % 2.5 oranında yaklaşık 0.44 W/m.K'dir. FDM'nin 50 ve 100 termal döngü sonrası gizli ısıları sırasıyla 0.81% ve 1.78% oranında azalmıştır (Li vd., 2013).

Araştırmacılar doğadan ilham alarak mevcut şartlarda kullanılan ürünlerden daha fazla verim elde etmek ve enerjiyi daha verimli kullanabilmek amacıyla araştırmalarına devam etmektedirler. Biyomimikri yaklaşımı (doğadan ilham alma) kavramsal olarak yeni çözümler sağlayabilen insan sorunlarını çözmek için doğada bulunan süreçleri taklit eder. Enerji alanında yapılan biyomimikri uygulamaları; kambur balinadan rüzgar gülü tasarımı ve kuzey memeliden FDM üretimidir. Kuzey memelilerde yağ dokusu vücudun termal yalıtkanıdır ve lipitlerin faz değişim özellikleri de ısıyı depolamak ve serbest bırakmak için kullanılır (Wang vd., 2018; Kant vd., 2017).

Buraya kadar edinilen bilgilere göre yeni bir bilim alanı olan biyomimikrinin termal enerji depolama alanında kullanıldığı çalışma yok denecek kadar azdır. Aynı zamanda biyomimikriden faydalanarak FDM'nin daha verimli kullanıldığı herhangi bir çalışmaya da rastlanılmamıştır. Bundan dolayı çalışmada KEM'ler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak etkili ısı enerjisi depolaması için uygun maliyetli çok işlevli FDM'lerin tasarlanması, geliştirilmesi ve biyomimikri bilimine bağlı olarak kullanılması incelenmiştir ve bu yönüyle literatüre katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak tasarlanan şişe soğutucu torbasının piyasada mevcut ürünlerden daha ucuz ve en az 2 kat daha fazla verimli olduğu belirlenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Materyal (Material)

Grafit(GR) SKC Karbon firmasından temin edilmiştir. Grafit ~%96 C içermektedir. BET yüzey alanı 1.64 m2/g'dır. Parafin(PAR) Başak Kimya, heksametil amonyum bromür(SUR) Alfa Aesar, 600 molekül ağırlıklı Poli Etilen Glikol (PEG 600), Potasyum Permanganat ($KMnO_4$), hidrojen Peroksit (H_2O_2), Sodyum Nitrat ($NaNO_3$) ve Sülfürik Asit (H_2SO_4) kimyasalları Merck firmasından satın alınmıştır. Şişe soğutucu torbası tasarımında kullanılan alüminyum paketler epoşet.com'dan tedarik edilmiştir.

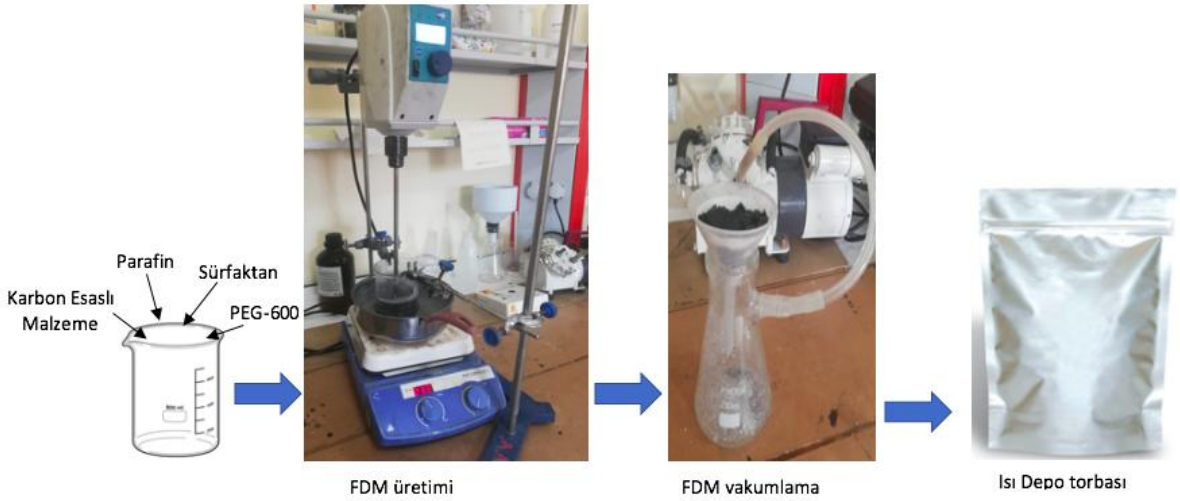
3.2. Metod (Method)

3.2.1. Grafit Oksit Üretimi (Graphite Oxide Production)

Hummers metoduna göre grafit kullanılarak grafit oksit üretilmiştir (Yazıcı vd., 2016). İlk olarak, 5 g toz grafit, 2,5 g sodyum nitrat ($NaNO_3$), 115 mL %96'lık sülfürik asit (H_2SO_4) beher içinde karıştırıldı ve buz banyosu içerisinde 1 saat süreyle karıştırılmaya devam edilmiştir. Banyo sıcaklığı 5 °C'nin altında tutularak karışıma 15 g potasyum permanganat ($KMnO_4$) yavaşça eklenmiştir. Homojen karışım sağlandıktan sonra 35-40 °C sıcaklık aralığında 2 saat karıştırılmıştır. İkinci olarak karışıma yavaşça 500 mL deiyonize su eklenerek 1 saat karıştırılmıştır. Sıcaklık <40 °C olacak şekilde karışıma 8,4 mL hidrojen peroksit (%35,7) eklenerek 2 saat daha karıştırılmıştır. Üçüncü olarak üretilen GO filtre edilmiş ve saf su ile pH 7 olana kadar yıkanmıştır.

3.2.2. Faz Değişim Malzemesi Üretimi (Phase Change Material Production)

Sıcaklığı 80 ºC'ye ayarlanmış sıcak su banyosunda ilk olarak parafin eritilmiş ve daha sonra PEG 600 eklenmiştir. Homojen karışım elde edildikten sonra sırasıyla sürfaktan ve GR veya GO eklenmiştir. 4 saat boyunca homojen karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Vakum sistemi yardımıyla GR veya GO'in PEG 600 ve PAR'ı absorplaması sağlanmıştır(Şekil 2.1). Üretilen FDM'ler kilitli numune poşetlerine konarak saklanmıştır.



Şekil 1. FDM Üretimi (Phase Change Material Production)

GR veya GO kullanılarak Tablo 2.1'de verilen oranlara göre FDM'ler üretilmiştir. İlk olarak en uygun % GR veya % GO oranları ve daha sonra % PEG600/PAR oranları belirlenmiştir. FDM kodlamalarında GR kullanıldığı durumda X yerine GR veya GO kullanıldığında X yerine GO yapılarak numuneler adlandırılmıştır. Örneğin X-6 örneğinde GR ile hazırlanan FDM'nin kodlaması GR-6 olarak belirtilmiştir. Her bir deney üç defa tekrarlanmıştır ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

Tablo 1. GR Ve GO Kullanılarak Hazırlanan FDM Reçeteleri (FDM Recipes Prepared Using GR Or GO)

	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5	X-6	X-7	X-8	X-9
PEG 600(%)	45	40	35	60	50	40	30	20	10
PAR(%)	45	40	35	10	20	30	40	50	60
X(%)	5	15	25	25	25	25	25	25	25
SUR(%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5

X: Grafit veya Grafit oksit

3.2.3. FDM Analizi (PCM Analysis)

Tablo 2.1'de verilen reçetelere göre üretilen FDM'lere ısı depolama kapasitesi(İsıker and Yesilata, 2017) testleri yapılmıştır. En yüksek oranda ısı depolayan FDM'lere (GO-9 ve GR-8) sızdırmazlık (Kee vd., 2017), fonskiyonel grup analizi (FT-IR), termal özellik (DSC-TG), termal döngü(Liu and Chung, 2001) testleri yapılmıştır. Termal döngü testleri 100-300-500 döngü olarak gerçekleştirilmiştir ve daha sonra bu numunelere tekrar ısı depolama kapasitesi(İsıker and Yesilata, 2017), sızdırmazlık (Kee vd., 2017), fonskiyonel grup analizi (FT-IR) uygulanmıştır. Her bir FDM(GO-9 ve GR-8)'den üç tekrar üretilerek tüm tekrar numunlere aynı test ve analizler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların ortalamarı alınmıştır. FT-IR (Perkin Elmer Spectrum 100 model FTIR spektrometre) analizleri 400 – 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. DSC-TG (Perkin Elmer STA 8000) analizleri azot gazı ortamında ısıtma oranı 1°C/dk, akış oranı 60 ml/dk ve 0-90 °C sıcaklık aralığında yapılmıştır.

3.2.4. Şişe Soğutucu Torbası Tasarımı (Bottle Cooler Bag Design)

300 ml su şişesini soğuk tutmak amacıyla çan çiçeği ve rüzgar gülü çiçeğinin(Şekil 2.2) görünümleri referans alınarak ŞST tasarlanmıştır. Rüzgar gülünün şekli çan çiçeği içine yerleştirilerek yapılan tasarım görünümü ve hazırlanan prototip Şekil 2.3'de verilmiştir.

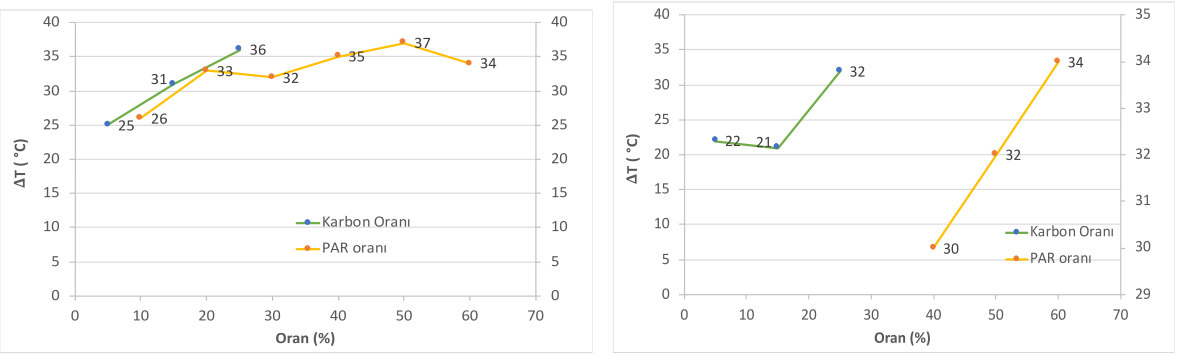
Şekil 2. Tasarımda Referans Alınan Rüzgar Gülü Ve Çan Çiçekleri (Sol: Rüzgar Gülü Çiçeği (Galeri.Netfotograf.Com), Sağ: Çan Çiçeği (Steemit.Com) (Windmills And Bellflowers Referenced İn The Design)

Şekil 3. Şişe Soğutucu Torbası Prototipi (Bottle Cooler Bag Prototype)

Deep-frezerda buz tutmuş ve buzdolabında soğutulmuş 300 ml su şişesi içinde bulunan suların sıcaklıklarını koruma performans testleri hazırlanan şişe soğutucu torbasının içine konularak gerçekleştirilmiştir. En az 12 saat boyunca ve her saat şişelerde bulunan buz ve suyun sıcaklıkları ölçülmüştür. Hazırlanan alüminyum kapak ile torba sürekli kapalı tutulmuştur, sadece sıcaklık ölçümleri için açılmıştır.

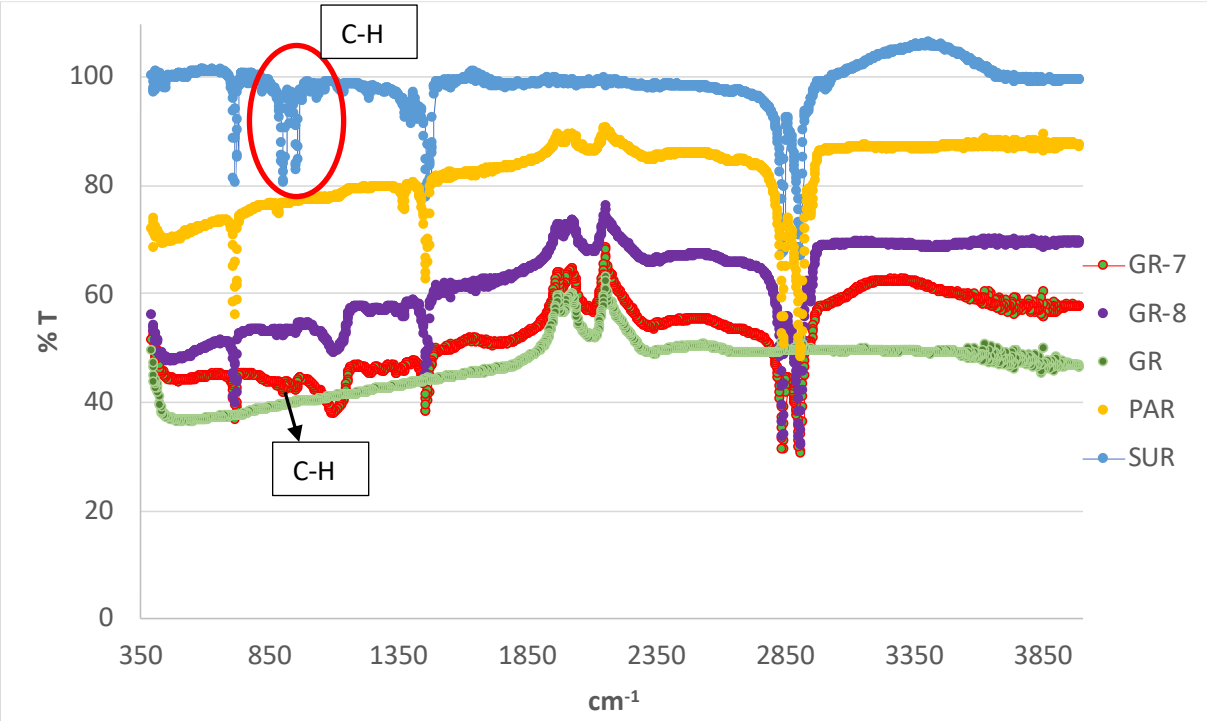
4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Isı, iki sistem arasında (veya sistemle çevresi arasında) sıcaklık farkından dolayı gerçekleşen enerji geçişidir (Çengel ve Boles, 2002). Bu enerji geçişi aynı zamanda sistem tarafından depolanan veya salınan enerji miktarını da göstermektedir. Karbon esaslı malzemeler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak hazırlanmış FDM'lerin % PAR ve % karbon oranlarına göre ısı enerji depolama miktarları Şekil 3.1'de verilmiştir. Karbon oranı arttıkça her iki KEM için ısı enerji depolama miktarları artmıştır. Ancak grafit kullanılarak hazırlanan FDM'nin parafin oranının % 50 olduğu orana kadar ısı enerji depolama miktarı artmış ve daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Grafit kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı depolama kapasiteleri grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerden daha yüksek olduğundan dolayı grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerde düşük parafin oranları (%10-20-30) çalışılmamıştır.

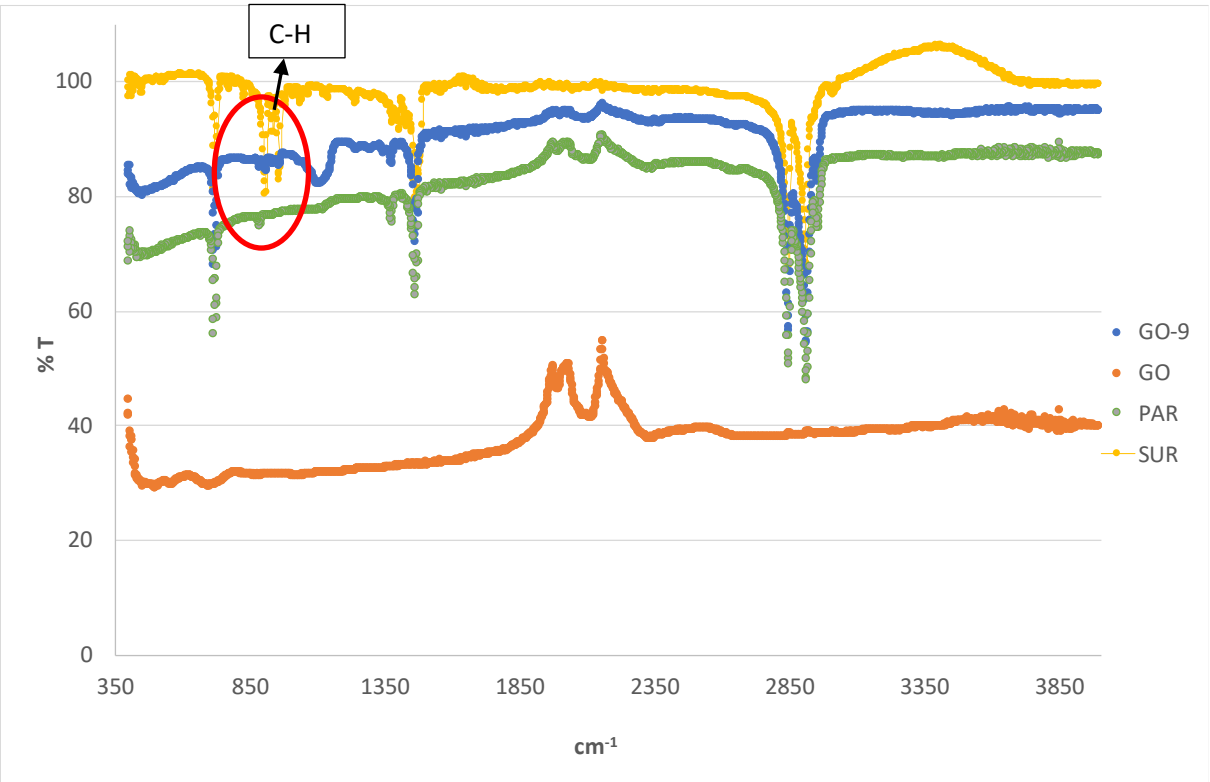


Şekil 4. Grafit Ve Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM'lerin Isı Enerji Depolama Miktarları (Sol:Grafit, Sağ:Grafit Oksit)(PAR:Parafin) (Heat Energy Storage Amounts Of Pcms Produced Using Graphite And Graphite Oxide)

Grafit ve grafit oksit kullanılarak hazırlanmış FDM'lerin FT-IR spektrumları Şekil 3.2'de verilmiştir. FT-IR spektrumları incelendiğinde alifatik yapıda bulunan alkana ait 3000-2800 cm^{-1} C-H (Ţucureanu vd., 2016), alkine ait ~2100 cm^{-1} C≡C (Ţucureanu vd., 2016), aromatik yapıya ait ~1900 cm-1 C=C (Cetinkaya, 2015), metil yapısında bulunan alkana ait 1500-1300 cm^{-1} C-H (Tiryaki, 2013), aromatik ester yapısına ait 1300-1000 cm^{-1} C-O (Ţucureanu vd., 2016), aromatik yapıya ait 900-700 cm^{-1} C-H (Ţucureanu vd., 2016) pikleri gözlenmiştir. GR-7 ve GO-9 kodlu FDM numunelerinde sürfaktanın yapısında da bulunan ~900 cm^{-1} C-H piki gözlenmiştir. Ancak sürfaktanın FDM'de kullanılan diğer organik yapılarla bağ kurmasından dolayı GR-8 kodlu FDM numunesinde bu pik tespit edilmemiştir.

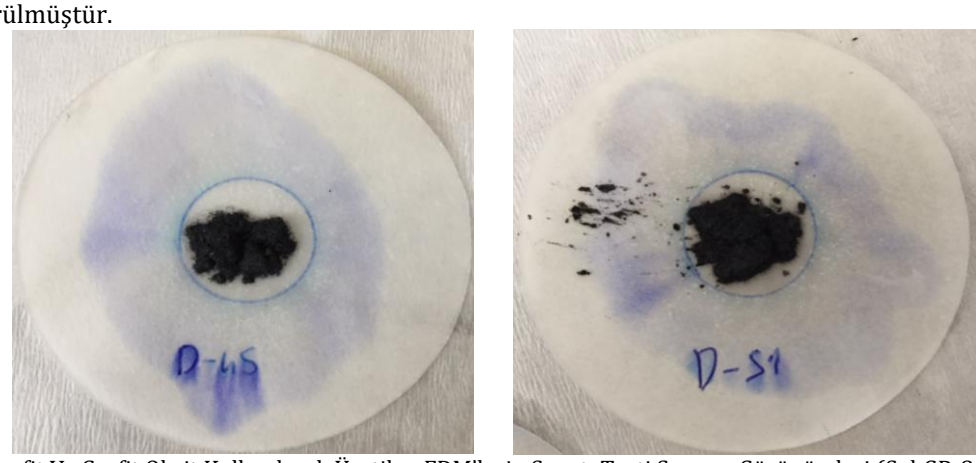


Şekil 5. Grafit Kullanılarak Üretilen FDM'ler, Parafin (PAR) Ve Sürfaktanın (SUR) FT-IR Spektrumları (FT-IR Spectra Of Pcms Produced Using Graphite, Paraffin (PAR) And Surfactant (SUR))



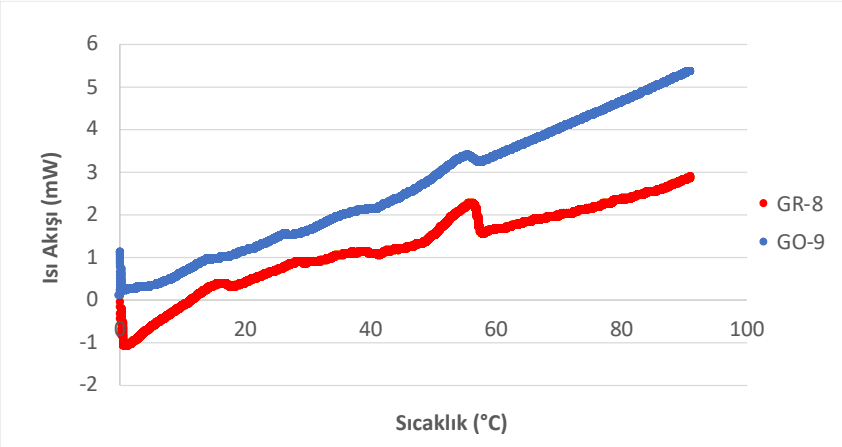
Şekil 6. Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM, Parafin (PAR) Ve Sürfaktanın (SUR) FT-IR Spektrumları (FT-IR Spectra Of PCM, Paraffin (PAR) And Surfactant (SUR) Produced Using Graphite Oxide)

Grafit ve grafit oksit kullanılarak hazırlanmış GR-8 ve GO-9 FDM'lerin sızıntı testi sonrası görünümleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Hazırlananan FDM'lerin sızıntı testi sonrası görünümleri incelendiğinde ise üretilen FDM'lerin sızdırdığı görülmüştür.



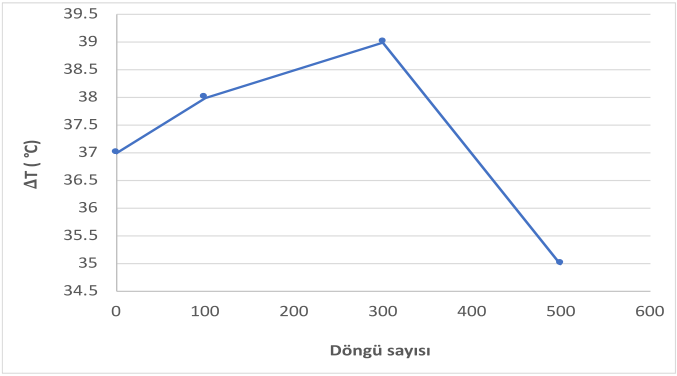
Şekil 7. Grafit Ve Grafit Oksit Kullanılarak Üretilen FDM'lerin Sızıntı Testi Sonrası Görünümleri (Sol:GR-8, Sağ:GO-9) (Appearance Of Pcms Produced Using Graphite And Graphite Oxide After Leakage Test)

Grafit ve Grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerin DSC analiz spektrumu Şekil 3.5'de verilmiştir. GR-8'in erime hal değişimi 48,87 °C – 58,06 °C arasında 9,19 °C sıcaklık değişimi boyunca depoladığı gizli ısı enerji miktarı 154,5 j/g ölçülmüştür. GO-9'un erime hal değişimi 51,6 °C – 58,5 °C arasında 6.7 °C sıcaklık değişimi boyunca depoladığı gizli ısı enerji miktarı 173,5 j/g ölçülmesine rağmen erime hal değişimi sıcaklık aralığının dar olmasından dolayı depoladığı ısıyı yeteri kadar bünyesinde tutamadığı gözlenmiştir ve Şekil 3.1-3.2-3.3'de verilen bilgiler de bu sonucu desteklemektedir. GR-8'in katı-katı faz geçiş sıcaklığında (0-17 °C arasında) depoladığı gizli ısı enerji miktarı 144,9 j/g ölçülmüştür. GO-9'un katı-katı faz geçiş sıcaklığında (0-14 °C arasında) depoladığı gizli ısı enerji miktarı 24,3 j/g ölçülmüştür. GR-8 ve GO-9 FDM'lerinin toplam gizli ısı enerji miktarları sırasıyla 299,4 j/g ve 197,8 j/g'dır. Araştırmacıların sadece parafin ve grafit kullanarak ürettikleri FDM'de XRD analizine göre parafin ve grafit arasında bağ oluşmadığını belirtmişlerdir. Bu kompozit karışımın gizli ısı enerji değerinin saf parafinin gizli ısı enerji değerinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. %25 grafit katkılı PCM kompozit karışımın toplam gizli ısı enerji değeri 127,82 j/g olarak belirlemişlerdir (Liu vd., 2017). Sonuç olarak PEG 600 ve sürfaktan kullanılarak üretilen GR-8 FDM'de, FDM yapısında oluşan fonksiyonel bağlardan dolayı (Şekil 3.2) araştırmacıların ürettiği kompozit FDM'den yaklaşık 2 kat daha fazla gizli ısı enerjisinin depolanması sağlanmıştır.



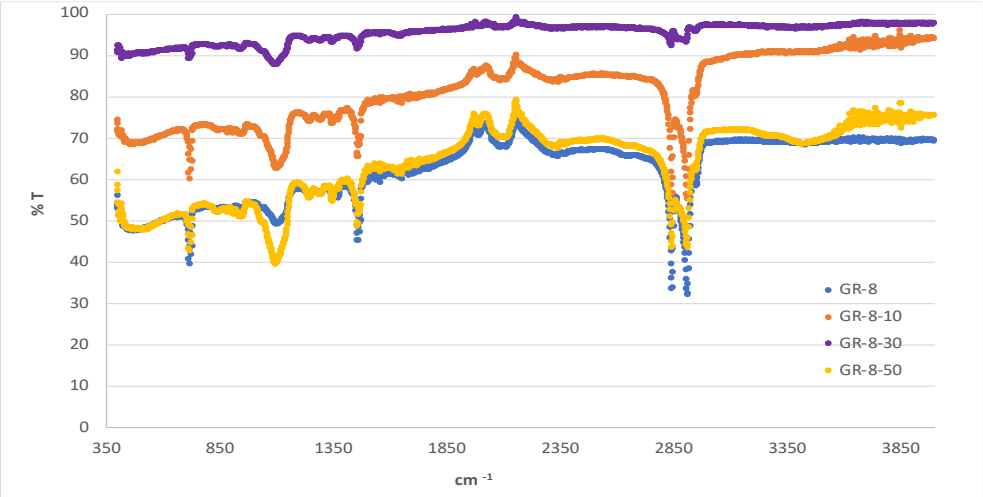
Şekil 8. GR-8 Ve GO-9 DSC Analiz Spektrumu (GR-8 And GO-9 DSC Analysis Spectrum)

En yüksek enerji depolama kapasitesinin gözlendiği grafit malzemesi kullanılarak üretilen FDM'nin(GR-8) 100-300-500 termal döngü testleri sonrası enerji depolama miktarları Şekil 3.6'de verilmiştir. 300 termal döngüye kadar FDM'nin depoladığı enerji miktarı artmıştır. Ancak FDM'nin yapısında bulunan rotasyonel geçişler (Şekil 3.7) 500 döngü sayısına ulaşıldığında FDM'nin depoladığı enerji miktarının azaldığı gözlenmiştir.



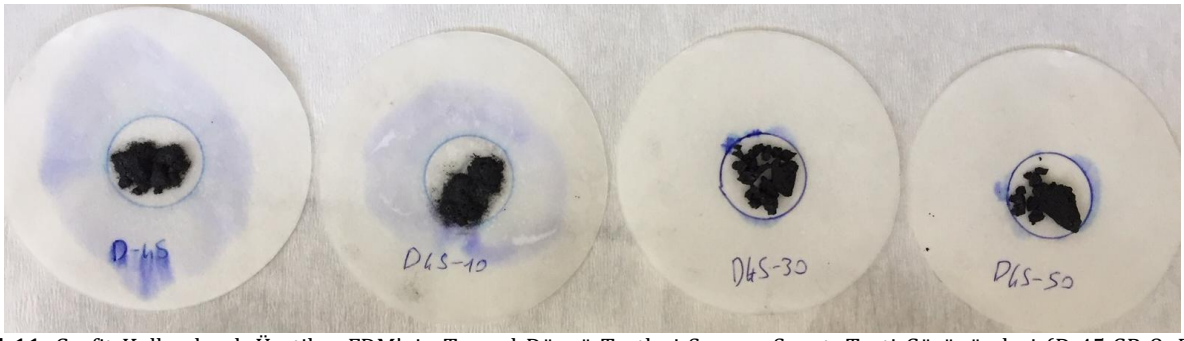
Şekil 9. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası Enerji Depolama Miktarları (Energy Storage Amounts Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası FT-IR spektrumları Şekil 3.7'de verilmiştir. Termal döngü testleri sonrası FDM'nin FT-IR spektrumları incelendiğinde Şekil 3.2'de verilen FDM'lerinin yapılarına benzer yapılar gözlenmiştir. Rotasyonal geçişlerin titreşimsel geçişlere eklenmesinden dolayı 300 döngü testi sonucunda FDM'nin piklerinin daha kısa olduğu belirlenmiştir. Bu durum FDM'nin daha fazla enerji depolamasına neden olmuştur (Şekil 3.6 ve 3.9).



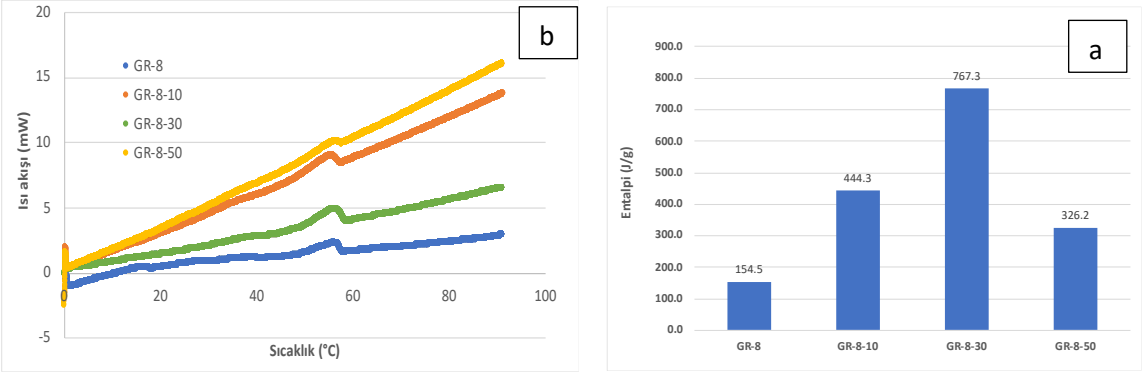
Şekil 10. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası FT-IR Spektrumları (GR-8-10:100 Döngü, GR-8-30: 300 Döngü, GR-8-500: 500 Döngü) (FT-IR Spectra Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası sızıntı testi görünümleri Şekil 3.8'de verilmiştir. Sızdırmazlık testi görünümlerine göre döngü sayısı arttıkça FDM'nin sızdırmazlıkları azalmıştır (Şekil 3.8).



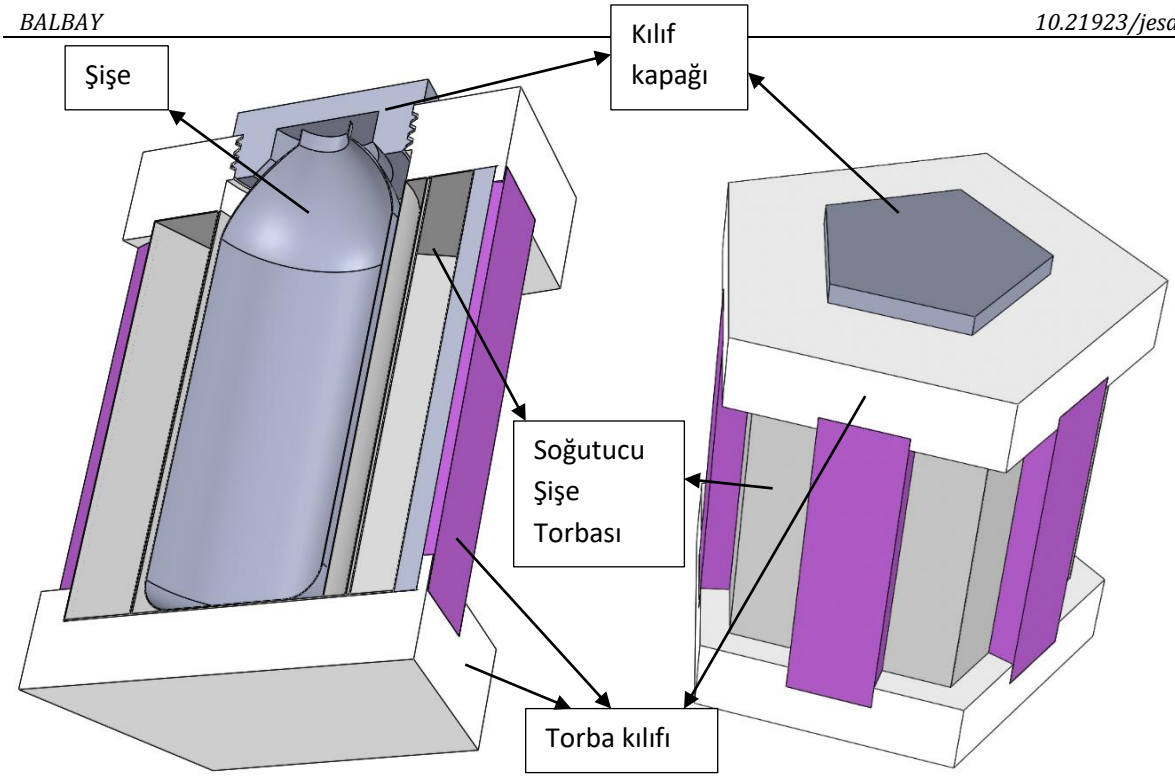
Şekil 11. Grafit Kullanılarak Üretilen FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası Sızıntı Testi Görünümleri (D-45:GR-8; D-45-10:GR-8-10; D-45-30:GR-8-30; D-45-50:GR-8-50) (Leaching Test Views Of FDM Produced Using Graphite After Thermal Cycling Tests)

GR-8 FDM'nin termal döngü testleri sonrası DSC spektrumları Şekil 3.9b'de verilmiştir. DSC spektrumlarına göre erime hal değişimi sıcaklıkları ve depolanan ısı enerjisi miktarları 100 döngü için 50 °C – 58 °C ve 444.3 j/g, 300 döngü için 51 °C – 58 °C ve 767.3 j/g, 500 döngü için 54 °C – 58 °C ve 326.2 j/g olarak belirlenmiştir, ancak 300 döngüden sonra FDM'nin ısı depolama kapasitesi (Şekil 3.9a) azalmıştır.



Şekil 12. GR-8 FDM'nin Termal Döngü Testleri Sonrası DSC Spektrumları (Sol) Ve Entalpi Değerleri (Sağ) (DSC Spectra (Left) And Enthalpy Values (Right) Of GR-8 FDM After Thermal Cycling Tests)

Tasarlanan şişe soğutucu torbası boyutları, SolidWorks 2017 programının dizayn tablosuna aktarılarak prototipin 3D modeli oluşturulmuştur.

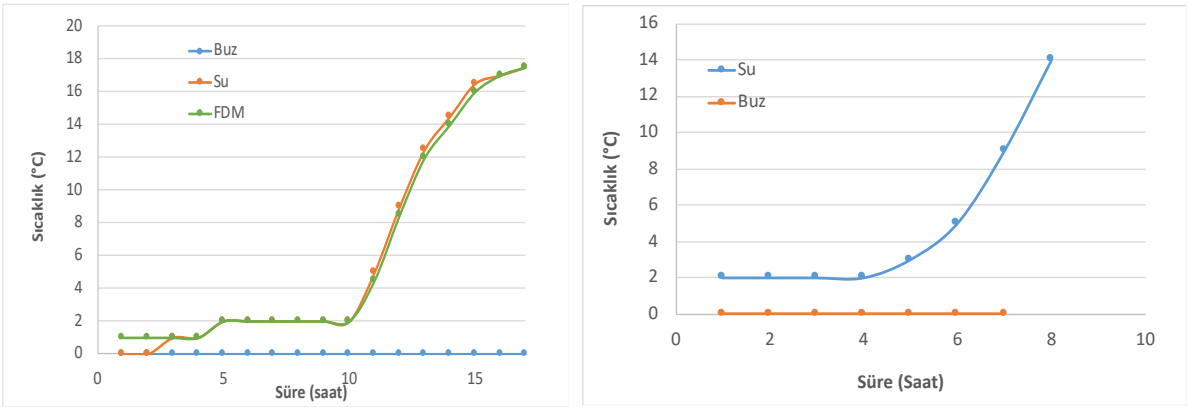


Şekil 13. Şişe Soğutucu Torbası Prototipinin 3D Modellenmiş Görünümü (3D Modeled View Of Bottle Cooler Bag Prototype)

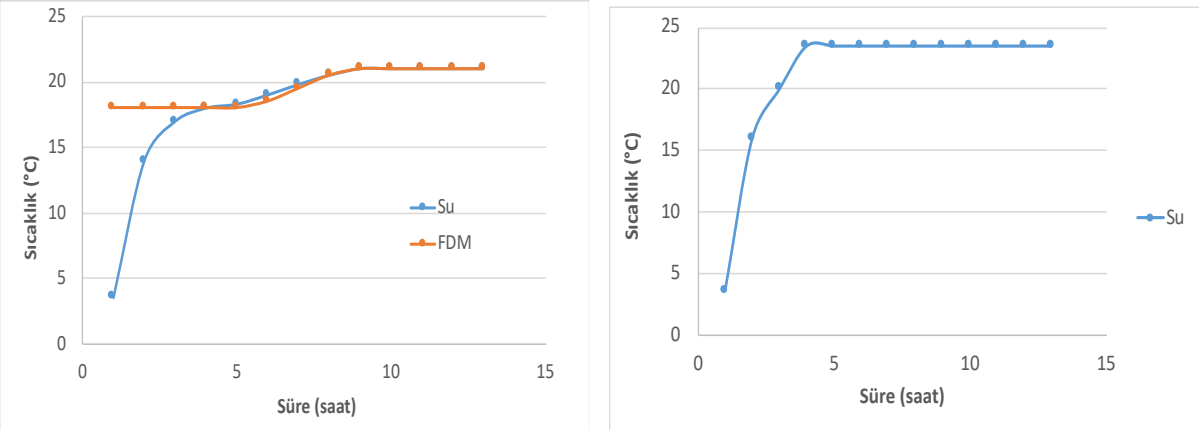
Deep-frezerda buz tutmuş ve buzdolabında soğutulmuş suların sıcaklıklarını koruma performans testleri soğutucu şişe torbası prototipi içinde gerçekleştirilmiştir. En az 12 saat boyunca ve her saat şişelerde bulunan buz ve suyun sıcaklıkları ölçülmüştür.

Soğutucu şişe torbasının soğuk tutma performansını belirlemek üzere torbanın içine konulan deep-frezerda buz tutmuş suyun erime sıcaklıkları, erime sırasında oluşan hem buz hemde suyun sıcaklığı ölçülerek belirlenmiştir. Soğutucu şişe torbası teste başlamadan önce 1 saat buzdolabında soğutulmuştur. 10. Saat sonunda eriyen suyun sıcaklığı 2 °C ve 17. saat sonunda ise eriyen suyun sıcaklığı ~ 18 °C olarak belirlenmiştir. Aynı buzun dış ortamda(soğutucu şişe torbasına koymadan) bulunması durumunda ise buzun 8. saatte tamamen suya dönüştüğü gözlenmiştir(Şekil 3.11).

Buzdolabında soğutulmuş suyun soğutucu şişe torbası içinde ve dış ortamda bulunmaları durumunda suların sıcaklıklarında gözlenen değişim performansı incelendiğinde 4. – 5. saatin sonunda suyun sıcaklığı FDM'nin sıcaklığına ulaşmıştır (Şekil 3.12). Soğutucu şişe torbası hem buzdolabında soğutularak hemde soğutulmadan bu çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Soğutucu şişe torbasının buzdolabında soğutulmasının suyu soğuk tutma performansı üzerinde fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 14. Deep-Frezerda Buz Tutmuş Suyun Sıcaklıklarının Değişim Performansı Grafikleri (Sol: ŞST İçinde Bulunan Buz Ve Sağ: Dış Ortamda Bulunan Buz)(Ortam Sıcaklığı: 24 °C) (Performance Graphs Of The Change İn Temperature Of Frozen Water İn Deep Freezers)



Şekil 15. Buzdolabında Soğutulmuş Suyun Sıcaklıklarının Değişim Performansı Grafikleri (Sol:ŞTT İçinde Bulunan Su Ve Sağ: Dış Ortamda Bulunan Su) (Ortam Sıcaklığı: 24 °C) (Performance Graphs Of Changes İn The Temperature Of Chilled Water İn The Refrigerator)

GR-8 FDM kullanılarak hazırlanan şişe soğutucu torbasının hammadde maliyet analizi Tablo 3.1'de verilmiştir. 1 adet ŞST'de 11 adet kilitli Al poşet ve 275 g FDM kullanılmıştır. Üretilen 1 adet SŞT'nin birim hammadde maliyeti 121,80TL/1 adt olarak hesaplanmıştır. Ayrıca işçilik, enerji ve diğer giderler için 44TL/1 adt düşünülmüş ve 1 adet SŞT'nin toplam maliyeti 165,8 TL/1 adt olarak hesaplanmıştır.
Piyasada satılmakta olan PVC malzemeden yapılmış SŞT'lerin fiyatı 204,71 – 382,24 TL/1 adt'dir. Ayrıca bu ürünlerin dezavantajları; i) ikinci veya üçüncü kullanımlarda yırtılmalar ve bozulmalar oluşması, ii) soğuk tutma özelliklerinin oldukça düşük olmasıdır. Bu olumsuzluklar müşteriler tarafından özellikle vurgulanmaktadır.
Üretilen SŞT'nin maliyeti, ticari SŞT'lerden yaklaşık ürün başına 38,91TL – 216,44TL daha ucuz olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Şişe Soğutucu Torbası Hammadde Maliyet Analizi (Bottle Cooler Bag Raw Material Cost Analysis)

Ürünler	FDM(g)	ŞST(adt)	Birim fiyat(TL/1000g)*	Top. Fiyat(TL)
PEG 600	55		690,48 TL	37,98
Parafin	137,5		82,09 TL	11,29
Grafit	68,75		430,64 TL	29,61
Sürfaktan	13,75		1174,00 TL	16,14
Al paket		11	2,43 TL	26,78
			Toplam maliyet (TL)	121,80 TL/ 1 adt SŞT

*Verilen fiyatlara KDV dahildir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışmada KEM'ler (grafit ve grafit oksit) kullanılarak etkili ısı enerjisi depolanması için uygun maliyetli çok işlevli FDM'lerin tasarlanması, geliştirilmesi ve kullanılması amaçlanmıştır. Grafit ve grafit oksit kullanılarak üretilen FDM'lerin ısı enerji depolama kapasiteleri, fonksiyonel yapıları, termal özellikleri, termal döngü sonrası (100-300-500 döngü) ısı depolama kapasiteleri ve termal-kimyasal özellikleri incelenmiştir.
Grafit kullanılarak üretilen FDM, GO kullanılarak üretilen FDM'den daha fazla ısı enerjisi depoladığı belirlenmiştir. Ayrıca GO kullanılarak üretilen FDM'nin depoladığı ısıyı bünyesinde tutamadığı gözlenmiştir. FDM üretiminde kullanılan sürfaktan ve diğer malzemeler arasında bağ oluşmasından dolayı GR-8'in daha fazla ısı enerjisi depoladığı tespit edilmiştir. 100-300-500 termal döngü testleri sonrası GR-8'in 300 termal döngüye kadar depoladığı ısı enerjisi artmış ve daha sonra azalma eğilimi göstermiştir. Döngü sayısı arttıkça GR-8'in sızdırmazlıkları azalmıştır. Aynı zamanda rotasyonal geçişlerin titreşimsel geçişlere eklenmesinden dolayı 300 döngü testi sonucunda GR-8'in FT-IR piklerinin daha kısa olması nedeniyle FDM'nin daha fazla enerji depoladığı belirlenmiştir.
Sonuç olarak piyasada satışı yapılan soğutucu şişe torbalarının buzdolabında soğutulduktan sonra soğuk tutma sürelerinin genellikle 2 saat olduğu belirtilmektedir. Ancak GR-8 kullanılarak tasarlanan soğutucu şişe torbasının buzdolabından çıkan suyu soğuk tutma süresi en az 4 saat olduğu gözlenmiştir. Ayrıca buzdolabında soğutulmuş soğutucu şişe torbasının buzu soğuk tutma performansı ise en az 4 saattir. Bu sonuçlar geliştirilen prototip soğutucu şişe torbasının piyasada satışı yapılan soğutucu şişe torbalarından hem daha ucuz hemde daha yüksek performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar deneysel çalışmalarda verdiği destekleri için öğrencisi Cemal Tuğrul Bilgiç'e teşekkür eder. The authors would like to acknowledge author's student Cemal Tugrul Bilgic for their kind help and assistance.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Aslfattahia, N., Saidur, R., Arifutzzaman, A., Sadri, R., Bimbo, N., Sabri, M. F. M., Maughan, P. A., Bouscarrat, L., Dawson, R. J., Said, S. M., Goh, B. T., Sidik, N. A. C. 2020. Experimental investigation of energy storage properties and thermal conductivity of a novel organic phase change material/MXene as A new class of nanocomposites, J. of Ener. Stor.27, 101115. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101115

Çengel, Y., Boles, M., 2002, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Mc Graw Hill, 4. Baskı, Çeviren: Derbentli T.

Dong, Q., Wu, J., Su, Y., Zhang, H., Wang, J. 2025. Preparation and study of high-thermal conductivity phase-change energy-storage materials based on expanded graphite and pitch through high-temperature sintering, Journal of Energy Storage,114, Part A, https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115748.

http://galeri.netfotograf.com/fotograf.asp?foto_id=398331 (Erişim Tarihi: 19.02.2025)

https://steemit.com/ay/@arabi01/en-guezel-cicekler-ve-mutlu-bir-son (Erişim Tarihi: 19.02.2025)

İşıker, Y., Yeşilata, B., 2017, Development of a Novel Method for Determination of Heat Conduction Coefficients of Building Materials, Harran University Journal of Engineering, 01 (2017) p.14-21.

Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., He. Biwole, P. 2017. Heat transfer study of phase change materials with graphene nano particle for thermal energy storage, Solar Energy. 146, 453–463. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.013

Kee, S.Y., Munusamy, Y., Ong, K.S., Metselaar, H.S.C., Chee, S.Y., Lai, K.C., 2017, Thermal Performance Study of Composite Phase Change Material with Polyacrylicand Conformal Coating, Materials, 10, 873; doi:10.3390/ma10080873

Kumar, N., Pandey, C., Chakraborty, P.R. 2025. Influence of compression ratio in compressed extended graphite on thermo-physical properties of composite phase change material: An experimental investigation, Thermal Science and Engineering Progress, 57, https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103104.

Li, M. 2013. A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal conductivity, Appl. Ener. 106, 25-30. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.031

Liu, C., Zhang, X., Lv, P., Li, Y., Rao. Z. 2017. Experimental study on the phase change and thermal properties of paraffin/carbon materials based thermal energy storage materials, Phase Trans. 90:7, 717-731. DOI: 10.1080/01411594.2016.1277219

Liu, P., Tan, Z., Cui, X., Zhang, Z., Fang, H., Li, H., Bian, L., Gu, X. 2025. Comparative study of different typical organic form-stable phase change materials packaged by carbonized wheat straw-expanded graphite binary supporting material, Journal of Energy Storage, 108, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115088.

Liu, Y., Li, M., Ma, X., Zhang, Y., Wang, Y., Li, G., Tang, R., Zhang, S., Zhao, H., Zhu, Y. 2024. Surfactant hydrophilic modification of expanded graphite to fabricate water-based composite phase change material with high latent heat for cold energy storage, Chemical Engineering Journal, 498, https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155235.

Liu, Y., Lv, Z., Zhou, J., Cui, Z., Li, W., Yu, J., Chen, L., Wang, X., Wang, M., Liu, K., Wang, H., Ji, X., Hu, S., Li, J., Loh, X.J., Yang, H., Chen, X., Wang C. 2024. Muscle-inspired formable wood-based phase change materials, Adv. Mater., 36, 2406915, 10.1002/adma.202406915

Liu, Z., Chung, D.D.L. 2001. Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials, Thermochimica Acta. 366, 135-147.

Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N.M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Abdullah, E.C., Nizamuddin, S., Karri, R. R. 2019. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review, Nano-Struc. & Nano-Obj. 20, 100399. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399

Mordor Intelligence, Thermal Energy Storage Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030), https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-thermal-energy-storage-market-industry (Erişim Tarihi: 19.02.2025)

Muiruri, J.K., Bonillo, A.C., Zhang, M., Wang, P., Tomczak, N., Wu, W., Zhang, X., Wang, S., Thitsartarn, W., Ong, P.J., Yeo, J.C.C., Xu, J., Li, Z., Loh, X.J., Zhu, Q. 2024. Sustainable carbonized biomass-stabilized phase change materials for thermal energy storage, Journal of Energy Storage, 103, Part B, 114423, https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114423.

Odoi-Yorke, F., Opoku, R., Davis, F., Obeng, G.Y. 2023. Optimisation of thermal energy storage systems incorporated with phase change materials for sustainable energy supply: A systematic review, Energy Rep., 10, 2496–2512.

Ribezzo, A., Bergamasco, L., Morciano, M., Fasano, M., Mongibello, L., Chiavazzo, E. 2023. Experimental analysis of carbon-based Phase Change Materials composites for a fast numerical design of cold energy storage systems, Applied Thermal Engineering, 231, 120907, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120907

Singh, P., Sharma, R., Khalid, M., Goyal, R., Sarı, A., Tyagi, V. 2022. Evaluation of carbon based-supporting materials for developing form-stable organic phase change materials for thermal energy storage: A review, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 246, 111896.

Ţucureanu V, Matei A, Avram AM., 2016, FTIR spectroscopy for carbon family study. Crit Rev Anal Chem 46(6):502–520. https:// doi.org/10.1080/10408347.2016.1157013

Wang, J., Andriamitantso, R.S., Atinafu, D.G., Gao, H., Dong, W., Wang, G. 2018. A one-step in-situ assembly strategy to construct PEG@MOG-100-Fe shape-stabilized composite phase change material with enhanced storage capacity for thermal energy storage, Chem. Phy. Lett., 695, 99-106. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.12.004

Wang, J., Andriamitantso, R.S., Atinafu, D.G., Gao, H., Dong, W., Wang, G. 2018. A one-step in-situ assembly strategy to construct PEG@MOG-100-Fe shape-stabilized composite phase change material with enhanced storage capacity for thermal energy storage, Chem. Phy. Lett. 695, 99-106. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.12.004

Yazıcı, M., Tiyek, İ., Ersoy, M., Alma, S., Dönmez, M.H., Yıldırım, U., Salan, U., Karataş, T., Uruş, Ş., Karteri, İ., Yıldız, K. 2016. Modifiye Hummers Yöntemiyle Grafen Oksit (GO) Sentezi ve Karakterizasyonu, Gazi Univ. J.l of Sci. GU J Sci Part C. 4(2), 41-48.

Yu, C., Song, Y.S. 2023. Form stable phase change material supported by sensible and thermal controllable thermistor, Composites Communications, 40, 101600.

Zhao, J., Chen, Y., Chen, M. 2025. Battery thermal management with a modified metal alloy/expanded graphite/paraffin composite phase change material, Journal of Energy Storage, 113, https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115652.

Zhong, Y., He, X., Wang, W., Xu, Y., Wang, Y., Shuai,Y. 2025. Performance enhancement of graphite-based flexible composite phase change materials and heat dissipation characteristics of electronic devices, Applied Thermal Engineering, 263, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125393.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 454-465, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1625760

Araştırma Makalesi

Research Article

GELECEKTE KURAKLIK SONUCU ETKİLENEBİLECEK ENDÜSTRİYEL SEKTÖRLERİN HAVZA BAZLI DEĞERLENDİRİLMESİ

Alperen Kır[1*], Mehmet Kitiş[2]

[1]Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye
[2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kuraklık,
Su Verimliliği,
Su Yoğun Sektörler,
Sürdürülebilir Kalkınma,
Yenilikçi Teknolojiler.

Öz

İklim değişikliği, artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimleri nedeniyle su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini giderek daha karmaşık hale getirmektedir. Özellikle suya bağımlı sektörlerde ciddi ekonomik ve çevresel etkiler doğurabilecek bu durum, Türkiye'deki hidrolojik havzaların gelecekteki su potansiyellerinin değerlendirilmesini ve buna yönelik stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün Kuraklık Eylem Planları ve RCP 4.5 senaryosu temel alınarak, 2050 yılı itibarıyla çeşitli havzalarda öngörülen su potansiyeli değişimlerini analiz etmektedir. Özellikle Kuzey Ege (%60), Konya (%56), Seyhan (%49), Sakarya (%49), Akarçay (%43) ve Batı Karadeniz (%40) havzalarında önemli su kayıplarının yaşanabileceği öngörülmekte olup, bu azalmaların gıda, enerji ve tekstil gibi su yoğun sektörler üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Mevcut ve gelecekteki su potansiyelleri ile sektörel su kullanım ihtiyaçları detaylı bir şekilde incelenirken, sanayi ve tarım sektörlerinde su kaynaklarındaki azalmalara bağlı riskleri azaltmak amacıyla yenilikçi su yönetim politikalarının benimsenmesi, alternatif su kaynaklarının entegrasyonu ve su verimliliğini artırmaya yönelik teknolojilerin uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu kapsamda, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmek adına Türkiye'nin su yönetimi politikalarının iklim değişikliği etkileriyle uyumlu hale getirilmesi gerektiği ve hem bölgesel hem de sektörel düzeyde entegre bir yaklaşım benimsenmesinin kritik olduğu ortaya konmuştur.

BASIN-BASED ASSESSMENT OF INDUSTRIAL SECTORS POTENTIALLY AFFECTED BY FUTURE DROUGHT

Keywords

Drought,
Innovative Technologies,
Sustainable Development,
Water Efficiency,
Water-Intensive Sectors.

Abstract

Climate change, rising temperatures, and shifting precipitation patterns are making the sustainable management of water resources increasingly challenging. This issue, which poses significant economic and environmental risks for water-dependent sectors, necessitates assessing future water availability in Turkey's hydrological basins and developing adaptive strategies. Based on the Drought Action Plans of the Ministry of Agriculture and Forestry's Water Management General Directorate and the RCP 4.5 scenario, this study examines projected changes in water potential by 2050. Notable reductions are expected in the Northern Aegean (60%), Konya (56%), Seyhan (49%), Sakarya (49%), Akarçay (43%), and Western Black Sea (40%) basins, which may have substantial implications for agriculture, energy, and textile industries. A comprehensive evaluation of current and future water potential alongside sectoral water demands underscores the need for innovative water management policies, the integration of alternative water sources, and the implementation of water-saving technologies to mitigate risks in industrial and agricultural sectors. In this context, aligning Turkey's water policies with climate change impacts and adopting an integrated approach at both regional and sectoral levels are crucial for achieving sustainable development goals.

Alıntı / Cite

Kır, A. ve Kitiş, M. (2025). Gelecekte Kuraklık Sonucu Etkilenebilecek Endüstriyel Sektörlerin Havza Bazlı Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 454-465.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Kır, 0000-0002-3304-0047
M. Kitiş, 0000-0002-6836-3129

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	23.01.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	15.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	26.04.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar: alperenkr07@gmail.com, +90-554-940-4245

BASIN-BASED ASSESSMENT OF INDUSTRIAL SECTORS POTENTIALLY AFFECTED BY FUTURE DROUGHT

Alperen KIR[1†], Mehmet KİTİŞ[2],
Süleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Environmental Engineering, Isparta, Turkey
Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Environmental Engineering, Isparta, Turkey

Highlights

- Evaluation of Future Water Potential in Turkey's Hydrological Basins Under Climate Change Scenarios
- Importance of Adopting Innovative Water Management Policies and Integrating Alternative Water Sources
- Sustainable Water Management for Environmental and Economic Benefits
- Impact of Declining Water Resources on Water-Intensive Industrial Sectors

Purpose and Scope

This research aims to evaluate the future water potential of Turkey's hydrological basins under climate change and assess the risks for water-intensive industrial sectors. It focuses on projected water losses by 2050 based on the RCP 4.5 scenario and proposes strategies for sustainable water management.

Design/methodology/approach

This study analyzes the projected water potential of Turkey's hydrological basins under the RCP 4.5 scenario, utilizing the Drought Action Plans of the Ministry of Agriculture and Forestry's Water Management General Directorate. Future water availability trends are assessed to identify potential risks for water-intensive industrial sectors. To address these risks, innovative water management strategies and efficiency-enhancing technologies are explored, emphasizing sustainable adaptation to climate change.

Research Limitations/Implications

This study is limited by the resolution and accuracy of climate and hydrological data, particularly in projecting future water availability under the RCP 4.5 scenario. It relies on model-based estimates rather than real-world observations, and the proposed water management strategies have not been field-validated. Additionally, sectoral risks are assessed unevenly, affecting the generalizability of findings. Future research should incorporate higher-resolution climate projections, empirical validation, and broader sectoral assessments to enhance applicability.

Findings

In the course of this work, it was found that Turkey's hydrological basins are projected to experience significant reductions in water availability by 2050 under the RCP 4.5 scenario. Specifically, the Northern Aegean Basin is expected to face a 60% reduction, the Konya Basin a 56% reduction, and the Seyhan Basin a 49% reduction in water potential. These findings highlight the critical need for adaptive water management strategies to mitigate the risks associated with declining water resources.

Originality

This paper provides a basin-based assessment of future water availability under climate change, highlighting its impact on water-intensive industrial sectors. Unlike general water scarcity studies, it offers a sector-specific perspective by analyzing projected water losses and their implications. It also proposes strategic water management solutions to enhance climate resilience and sustainability at regional and sectoral levels.

† Corresponding author: alperenkir@sdu.edu.tr, +90-554-940-4245

1. Giriş (Introduction)

İklim değişikliği, çevresel, ekonomik ve toplumsal sistemlerde köklü değişimlere yol açarak doğal kaynaklara dayalı ekonomik faaliyetlerde ciddi zorluklar yaratmaktadır (IPCC, 2023). Su kaynaklarının azalması, sıcaklık artışları ve yağış rejimlerindeki belirsizlikler, endüstriyel sektörleri doğrudan etkileyerek üretim süreçlerinden enerji talebine kadar geniş bir yelpazede sorunlara neden olmaktadır (Rockström vd., 2009). Bu durum, sürdürülebilir üretim ve çevresel yönetim stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılarken, küresel ekonomik büyüme hedeflerini tehdit etmektedir (Stern, 2007). Özellikle su yoğun sektörlerde faaliyet gösteren işletmeler, bu değişimlere karşı daha savunmasız hale gelmekte ve yenilikçi uyum stratejileri gerektirmektedir (Bozkurt vd., 2019; UN Water, 2020).

Türkiye, endüstriyel çeşitliliği ve stratejik konumuyla iklim değişikliğinin etkilerini yoğun bir şekilde hisseden ülkelerden biridir (Ertürk vd., 2018). Tarım, enerji ve içme suyu gibi sektörlerle su için yarışan endüstriyel sektörler, artan su kıtlığı ve belirsizliklerle karşı karşıyadır (Kibaroglu vd., 2021). Bu durum, üretim maliyetlerini artırmanın ötesinde, işletmelerin rekabet gücü ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Özellikle tekstil, gıda, enerji ve kimya gibi su yoğun sektörler, su kaynaklarındaki azalmadan en fazla etkilenen alanlar olarak öne çıkmaktadır (Hoekstra ve Mekonnen, 2012). Su kaynaklarının azalması, üretim süreçlerinde aksamalara neden olmakta ve ekonomik büyüme hedeflerini zorlaştırmaktadır (OECD, 2015; Kızılkaya ve Mike., 2023). Bu bağlamda, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından geliştirilen Kuraklık Eylem Planları ve Sektörel Su Tahsis Planları, Türkiye'deki su yönetimi stratejilerinin temel taşları olarak öne çıkmaktadır (SYGM, 2022). Kuraklık Eylem Planları, havza bazlı analizlere dayanarak mevcut ve gelecekteki su kaynaklı riskleri belirlemeyi ve su kaynaklarını etkin bir şekilde yönetmeyi hedeflerken; Sektörel Su Tahsis Planları, tarım, enerji, içme suyu ve endüstri gibi sektörlerin ihtiyaçlarını uzun vadeli bir perspektifle dengelemeyi amaçlamaktadır (SYGM,2018). Bu iki plan, özellikle endüstriyel tesislerin su kıtlığı risklerine karşı dayanıklılığını artırmada ve üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini sağlamada kritik bir rol üstlenmektedir (SYGM, 2022).

Kuraklık Eylem Planları, Türkiye'nin hidrolojik havzalarındaki özgün su kaynakları ve sektörel ihtiyaçları dikkate alınarak hazırlanmaktadır (SYGM, 2022). Bu planlar, uzun dönem meteorolojik veriler, hidrolojik modelleme çalışmaları ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) analizleriyle desteklenmekte; IPCC'nin RCP 4.5 ve 8.5 senaryolarına dayalı projeksiyonlar doğrultusunda 2050 ve 2100 yıllarına yönelik su potansiyelindeki değişimler öngörülmektedir (IPCC, 2014; Gürkan vd., 2016). Havza bazlı analizlerde, mevcut ve gelecekteki su kaynaklarının taşıma kapasiteleri değerlendirilmiş, kritik su sıkıntısı riski taşıyan bölgeler tespit edilmiştir. Bu değerlendirmelerde, SWAT ve HEC-HMS gibi modelleme araçlarıyla gerçekleştirilen yağış-akış ilişkileri, buharlaşma oranları ve yüzey suyu miktarlarına dair analizlerin çıktıları kullanılmıştır. Ayrıca, CBS tabanlı haritalandırma çalışmalarıyla sıcaklık artışı ve değişen yağış rejimlerinin etkileri öngörülmüş ve bu öngörüler analiz sürecine entegre edilmiştir (USACE, 2017; SYGM, 2018). Bu çerçevede, kuraklık eylem planlarının etkinliğini artırmak amacıyla, iklim değişikliğine en fazla katkı sağlayan ve aynı zamanda bu değişimden en çok etkilenecek sektörlerin su talepleri özelinde değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Tarım sektörü küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %17'sinden sorumluyken; çimento (%8), demir-çelik (%7), kimya (%5) ve bina sektörü (%37) gibi alanlar da önemli emisyon kaynakları arasında yer almaktadır. Sanayi sektörünün su kullanım profili incelendiğinde ise, en yüksek tüketimin sırasıyla gıda ürünleri imalatı (%22), tekstil ürünleri imalatı (%18) ve kimyasallar ile kimyasal ürünlerin imalatı (%16) sektörlerinde gerçekleştiği görülmektedir (SYGM, 2023). Suya yüksek bağımlılığı olan bu sektörlerin, havza ölçeğinde yapılacak planlamalarda öncelikli olarak değerlendirilmesi, proaktif ve bütüncül su yönetimi yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda, iklim değişikliğinin olası etkilerini azaltmaya yönelik geliştirilebilecek mühendislik çözümleri sırasıyla; Akıllı su izleme ve erken uyarı sistemleri (Chowdhury ve Al-Zahrani, 2015), Sektörel su verimliliği uygulamaları (UN-Water, 2020; OECD, 2012), Hidrolojik modelleme ve altyapı planlaması (Arnold vd., 1998; USACE, 2017) ve Karar destek sistemleri (Loucks ve van Beek, 2017) şeklinde sıralanabilir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin endüstriyel sektörlerinin kuraklık koşullarına dayanıklılığını artırmak amacıyla, Kuraklık Eylem Planları ve Sektörel Su Tahsis Planları'nda yer alan sanayi su ihtiyaçları kapsamlı bir şekilde ele alınarak, bu planlar arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Riskli havzaların belirlenmesi, kaynakların etkin tahsisi ve uyum stratejilerinin geliştirilmesi bu çalışmanın temel odak noktaları arasında yer almakta olup, havzaların ekonomik değerleri ihracat ve üretim kapasitesi bağlamında analiz edilmiştir. Havza bazında mevcut su kaynaklarının kapasitesi ve potansiyel azalma oranları dikkate alınarak sektörlerin su tüketimleri önceliklendirilmiş, kuraklık riski yüksek havzalarda su tüketimi fazla olan sektörlere yönelik uygulanabilecek politikalar önerilmiştir. Çalışma, bu analizler doğrultusunda karar vericilere ve politika yapıcılara, su kaynaklarının verimli kullanımını sağlayacak, sektörler arası dengeyi gözeten stratejiler geliştirilmesi için rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada, SYGM tarafından geliştirilen Kuraklık Eylem Planları ve Sektörel Su Tahsis Planları temel alınarak, Türkiye genelinde 19 hidrolojik havzanın mevcut ve gelecekteki su potansiyelleri analiz edilmiştir. Bu analizlerde, IPCC'nin RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryoları uygulanmış; ancak yalnızca RCP 4.5 senaryosu bu çalışmanın ana odak noktası olarak seçilmiştir. RCP 4.5 senaryosu, sera gazı emisyonlarının azaltılması için uygulanabilecek önlemleri yansıtarak, uzun vadeli iklim değişikliği projeksiyonlarında daha dengeli ve uygulanabilir bir çerçeve sunmaktadır. Daha yüksek emisyon senaryosu olan RCP 8.5 ise daha ekstrem bir durum olarak değerlendirildiğinden, RCP 4.5 senaryosu, politika yapıcıların tercih ettiği ve gerçekçi çözümlere odaklanan bir yaklaşım olarak ele alınmıştır. RCP 4.5 senaryosuna göre yapılan analizlerde, havzalardaki olası su potansiyeli azalmaları hesaplanmıştır (Gharib vd., 2023; Kır vd., 2024).

2.1. Su Potansiyeli Azalma Oranının Hesaplanması (Calculation of Water Potential Reduction Rate)

Bu hesaplamalar, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından sağlanan mevcut ve tahmini su potansiyeli değerlerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Su potansiyelindeki azalma oranları, her bir havza için 2050 yılına kadar öngörülen değişimleri kapsamakta ve iklim değişikliği senaryoları çerçevesinde değerlendirilmiştir. Hesaplama sürecinde, mevcut su potansiyeli ile tahmini su potansiyeli değerleri arasındaki fark dikkate alınarak, azalma oranı aşağıdaki Denklem 1 ile belirlenmiştir (Kır vd., 2024).

$$Azalma\ Oranı\ (\%) = \frac{Mevcut\ Su\ Potnsiyeli - 2050\ Yılı\ Tahmini\ Su\ Potansiyeli}{Mevcut\ Su\ Potansiyeli}\ x\ 100 \quad (1)$$

- **Azalma Oranı (%):** Havzalardaki su potansiyelindeki azalmayı yüzdesel olarak ifade eder.
- **Mevcut Su Potansiyeli:** SYGM tarafından belirlenen ve havzanın şu anki su kaynaklarını temsil eden değerdir.
- **2050 Yılı Tahmini Su Potansiyeli:** RCP 4.5 senaryosu kullanılarak 2050 yılı için öngörülen su potansiyelidir.

Elde edilen yüzdesel azalma oranları, en riskli havzaların belirlenmesine ve daha az risk taşıyan havzalarla karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu bölgelerde, sanayi sektörünün artan su talebinin mevcut kaynaklarla nasıl karşılanabileceği ve bu havzalara verilmesi gereken detaylı önem kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır.

2.2. Havzadaki Sanayi Sektör Yoğunluğunun Belirlenmesi (Determination of Industrial Sector Density in the Basin)

Sanayi sektörünün mevcut ve gelecekteki su taleplerini değerlendirmek amacıyla WEAP (Water Evaluation and Planning System) modeli kullanılmıştır (Sieber, J. 2006). Modelleme sürecinde, iklim değişikliği kaynaklı sıcaklık artışları, yağış rejimlerindeki değişimler ve kuraklık riski gibi faktörler dikkate alınmıştır. 2029, 2034 ve 2040 yıllarına ait şiddetli, hafif ve çok şiddetli kuraklık senaryoları incelenmiş; bu senaryolar çerçevesinde su yoğun sektörlerdeki talep artışları ve potansiyel su azalma oranları değerlendirilmiştir. Havzalar arasındaki sektörel dağılımlar, her bir sektördeki tesis sayısının toplam tesis sayısına oranlanmasıyla yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, sanayi sektörünün havza bazındaki yoğunluğunu analiz etmek ve sektörel su taleplerinin etkilerini değerlendirmek için temel bir araç olarak kullanılmıştır. Tüm hesaplamalar Denklem 2 temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

$$Sanayi\ Sektörü\ Yüzdesi\ (\%) = \frac{Her\ Bir\ Sektördeki\ Tesis\ Sayısı}{Toplam\ Tesis\ Sayısı}\ x\ 100 \quad (2)$$

- **Sanayi Sektörü Yüzdesi (%):** Belirli bir havzada, her bir sektöre ait tesislerin toplam tesis sayısına oranını yüzdesel olarak ifade eder. Bu oran, sektörel yoğunluğu anlamak için önemli bir göstergedir.
- **Her Bir Sektördeki Tesis Sayısı:** Analiz edilen havzada, ilgili sektörde faaliyet gösteren tesislerin toplam sayısını ifade eder.
- **Toplam Tesis Sayısı:** Havzadaki tüm sektörlerde faaliyet gösteren tesislerin toplam sayısını temsil eder.

Bu yüzdesel dağılımlar, sektörel önceliklerin belirlenmesine rehberlik etmiş ve özellikle su kaynaklarının sınırlı olduğu havzalarda stratejik planlamanın önemini vurgulamıştır. Kritik bölgelerde yapılan bu analizler, su yönetim stratejilerinin çevresel ve sektörel sürdürülebilirliği destekleyecek şekilde geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

2.3. Havzaların Ekonomik Katkısının Belirlenmesi (Determination of the Economic Contribution of Basins)

Havzaların ekonomik katkıları, sanayi sektörlerinin toplam ekonomik çıktıları, sektörel üretim kapasiteleri, istihdam oranları ve bölgesel ekonomik göstergeler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (STB), OECD ve Dünya Bankası gibi ulusal ve uluslararası kuruluşlardan elde edilen verilere dayanmaktadır (TÜİK, 2023; STB, 2022; OECD, 2023; World Bank, 2023). Ayrıca, bölgesel kalkınma ajanslarının yayınladığı raporlar ve sektörel analizler, ekonomik göstergelerin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde belirlenmesine katkı sağlamıştır (BKA, 2023). Ekonomik katkının hesaplanmasında kullanılan metodoloji, havzalardaki sanayi tesislerinin yüzdesel dağılımını ve sektörel katma değer oranlarını temel almaktadır. Bu yaklaşım, sektörel temsil ile çarpan temelli ekonomik değerlendirme yöntemlerine dayanmaktadır (OECD, 2006; UNIDO, 2011; TÜİK, 2021) ve Denklem 3'te detaylandırılmaktadır.

$$EK = \sum_{i=1}^{n}(SC_i x\ SKO_i) \qquad (3)$$

Burada:

- **EK:** Havzanın toplam ekonomik katkısı (TL),
- **SC:** İlgili sektördeki tesis sayısının oranı (%),
- **SKO:** Sektörün katma değer oranı (TL/tesisin ekonomik etkisi),
- **n:** Havzadaki toplam sektör sayısıdır.

Bu yöntem, havzaların ekonomik önemini nesnel bir şekilde değerlendirmeyi ve sürdürülebilir kalkınma politikalarına rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. Ancak, ekonomik katkı hesaplamalarının, havzalar arasındaki karşılıklı etkileşimleri tam olarak kapsamaması, daha geniş kapsamlı analizlere ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Havzalarda Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Water Potential Change, Industrial Distribution, and Economic Contribution in Basins)

Türkiye'nin farklı nehir havzaları, iklim değişikliğinin etkileri altında su kaynakları ve ekonomik potansiyelleri açısından önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Tablo 1'de, Türkiye'nin farklı nehir havzalarına yönelik 2050 yılı için öngörülen su potansiyeli azalma oranları, mevcut sanayi sektörlerinin yüzdesel dağılımı ve havzaların ekonomik katkıları birlikte değerlendirilmekte olup, ilgili veriler bu makale kapsamında hesaplanmıştır. Tabloda yer alan veriler, havzaların hem iklim değişikliği etkisi altındaki kırılganlıklarını hem de ekonomik açıdan sahip oldukları önemi net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, her bir havza için beklenen su azalma oranı, ilgili bölgedeki sanayi faaliyetlerinin sektörel çeşitliliği ve ekonomiye sağladığı katkı dikkate alınarak analiz edilmiştir.

Bu analizler, özellikle su kaynaklarının azalması ile ekonomik ve çevresel etkilerinin belirlenmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır (Wang vd.,2023). Örneğin, Kuzey Ege Havzası, su potansiyelinin %60 oranında azalmasının beklendiği en kırılgan bölgelerden biri olarak öne çıkmaktadır (SYGM, 2022). Bu durum, havzanın mevcut su kaynaklarının, sanayi sektörleri ve diğer kullanım alanlarındaki talebi karşılamakta zorlanabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, Konya Havzası ve Seyhan Havzası gibi yüksek ekonomik katkıya sahip havzalarda da su azalma oranlarının ciddi düzeylere ulaşması beklenmektedir. Bu veriler, havza bazlı su yönetimi politikalarının geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Havzalara ilişkin yapılan analizlerin sonuçları Tablo 1'de detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Havzalara yönelik detaylı analizler, Sektörel Su Tahsis Planları ve Kuraklık Eylem Planı gibi mevcut planlama dokümanlarının entegre bir şekilde değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmiştir (SYGM, 2018; SYGM, 2022). Tablodan elde edilen bilgilere göre, Seyhan Havzası'ndaki tekstil sektörünün yüksek oranı (%41), su kaynaklarının azalmasının bu sektöre olan etkisini daha önemli hale getirmektedir. Aynı şekilde, Sakarya Havzası'nda ağır sanayinin (%37) baskınlığı, bu sektörün su kıtlığı koşullarında karşılaşabileceği zorluklara işaret etmektedir. Tablodaki havzalardan sadece Kızılırmak havzasında potansiyel azalma oranı eksi (-) değer çıkması, havzanın 2050 yılı ve sonrasında potansiyel su miktarında azalma olmayacağı ve bu sayede havzadaki endüstriyel faaliyetlerin olumsuz etkilenmeyebileceği anlaşılmaktadır.

Sonuç olarak, Tablo 1'de sunulan veriler, havzaların ekonomik ve çevresel kırılganlıklarının sistematik bir şekilde ele alınmasını sağlamaktadır. Gelecekte su kaynakları üzerindeki baskının havzalar arasındaki dengesizlikleri nasıl etkileyebileceği ve mevcut yatırımların sürdürülebilirliğine yönelik risklerin nasıl minimize edilebileceği konusunda önemli bilgiler sunmaktadır. Bu bulgular, havza bazlı yönetim politikalarının ve bölgesel kalkınma stratejilerinin geliştirilmesinde rehber niteliğindedir. Ayrıca, Tablo 1'de yer alan veriler doğrultusunda, riskli havza gruplarındaki sektörel dağılımlar Şekil 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'da sunulan pasta grafikler aracılığıyla

detaylandırılmıştır.

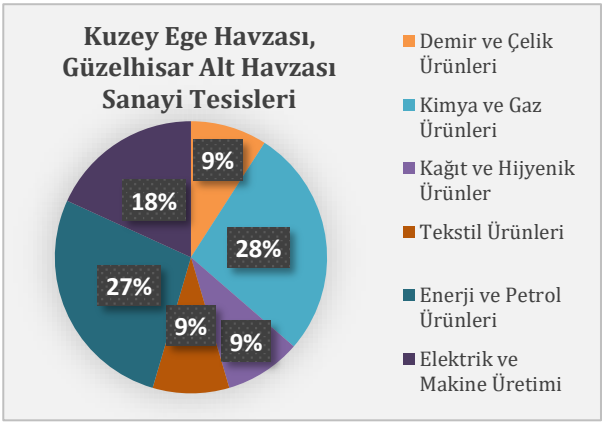
Tablo 1. Havzaların Su Azalma Oranları, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkıları

Havza Adı	2050 Yılı Potansiyel Su Azalma Oranı (%)	Mevcut Sanayi Sektörlerinin Dağılımı (% Tesis Sayısı)	Havzanın Ekonomik Katkısı
Kuzey Ege Havzası	60	❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 18 ❖ Enerji ve Petrokimya: 55 ❖ Ağır Sanayi: 27	251 milyar TL
Konya Havzası	56	❖ Enerji ve Petrokimya: 60 ❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 40	257,5 milyar TL
Seyhan Havzası	49	❖ Gıda Ürünleri: 25 ❖ Tekstil: 41 ❖ Ağır Sanayi: 16 ❖ Kimya ve İlaç: 11 ❖ Diğer: 7	175 milyar TL
Sakarya Havzası	49	❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 18 ❖ Enerji ve Petrokimya: 27 ❖ Ağır Sanayi: 37 ❖ Teknoloji: 18	220 milyar TL
Akarçay Havzası	43	❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 57 ❖ Ağır Sanayi: 43	82 milyar TL
Batı Karadeniz Havzası	40	❖ Gıda Ürünleri: 40 ❖ Petrokimya: 10 ❖ Tekstil: 10 ❖ İnşaat: 40	100 milyar TL
Doğu Akdeniz Havzası	36	❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 50 ❖ Ağır Sanayi: 33 ❖ Enerji ve Petrokimya: 16	128 milyar TL
Van Gölü Havzası	33	❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 69 ❖ Enerji ve Petrokimya: 28 ❖ Ağır Sanayi: 3	57milyar TL
Antalya Havzası	32	❖ Gıda Ürünleri: 68 ❖ Tekstil: 16 ❖ Ağır Sanayi: 16	193 milyar TL
Susurluk Havzası	32	❖ Gıda Ürünleri: 22 ❖ Tekstil: 27 ❖ Petrokimya: 26 ❖ Ağır Sanayi: 24	135 milyar TL
Gediz Havzası	32	❖ Gıda Ürünleri: 56 ❖ Petrokimya: 11 ❖ Teknoloji: 11 ❖ Ağır Sanayi: 22	168 milyar TL
Küçük Menderes Havzası	29	❖ Petrokimya: 37 ❖ Basım ve Kağıt: 25 ❖ Ağır Sanayi: 37	99 milyar TL
Batı Akdeniz Havzası	23	❖ Petrokimya: 25 ❖ Gıda Ürünleri: 24 ❖ Maden ve İnşaat: 37 ❖ Ağır Sanayi: 13	120 milyar TL
Ceyhan Havzası	24	❖ Tekstil ve Moda Sanayi:88 ❖ Kağıt ve Karton Ürünler:13	152 milyar TL
Yeşilırmak Havzası	24	❖ Gıda Ürünleri: 38 ❖ Ahşap ve Orman: 19 ❖ Tekstil:10	130 milyar TL
Doğu Karadeniz Havzası	22	❖ Gıda Ürünleri: 60 ❖ Maden ve İnşaat: 20 ❖ Ağır Sanayi: 20	100 milyar TL
Büyük Menderes Havzası	20	❖ Tekstil ve Moda Sanayi:88 ❖ Giyim ve Tekstil Aksesuarları:13	127 milyar TL
Kızılırmak Havzası	-17%	❖ Madencilik ve Metal Üretimi:29 ❖ Gıda ve Tüketim Ürünleri: 29 ❖ Tekstil ve Giyim: 11 ❖ Enerji ve İklimlendirme: 11 ❖ Makine ve Ulaşım: 17	145 milyar TL

Bu sektörel dağılımlar, havza bazlı analizler sonucunda yüzdesel olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, kuraklık riski taşıyan havzalardaki alt havzalarda, kuraklıktan en çok etkilenebilecek sanayi sektörünün sektörel yoğunlukları değerlendirilmiştir. Bu analiz, su kaynakları üzerindeki sektörel baskıyı anlamak ve kaynakların

sürdürülebilir yönetimi için öncelikli olarak ele alınması gereken sektörleri belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır.

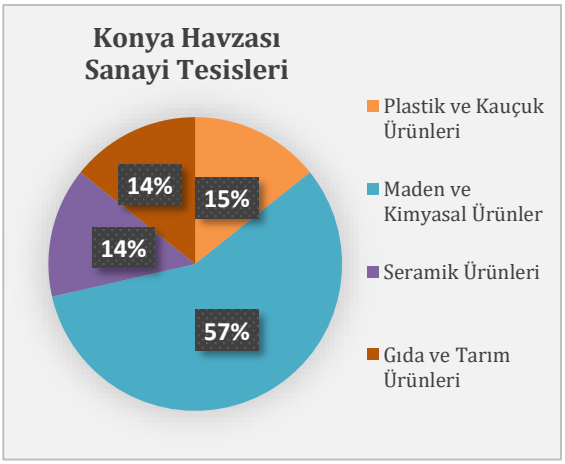
3.1.1. Kuzey Ege Havzası, Güzelhisar Alt Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (North Aegean Basin, Güzelhisar Sub-Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 1. Kuzey Ege Havzası, Güzelhisar Alt Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Güzelhisar Sub-Basin, North

Kuzey Ege Havzası, SYGM tarafından yayınlanan Kuraklık Eylem Planları kapsamında, su potansiyelinde en fazla azalma riski taşıyan havzalardan biri olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin tarım, sanayi, enerji ve turizm sektörleri açısından stratejik bir öneme sahip olan havzanın yıllık ekonomik katkısı yaklaşık 251 milyar TL olarak hesaplanmıştır (KTB, 2023). Bu katkının büyük bir kısmı tarım ve sanayi sektörlerinden sağlanmaktadır. 2050 yılı itibarıyla havzanın su potansiyelinde %60 oranında bir azalma beklenmektedir. Güzelhisar Alt Havzası, havzada sanayi tesislerinin yoğun olarak faaliyet gösterdiği bir bölgedir. Sanayi sektörü dağılımında, enerji ve petrokimya sektörü %55 ile en yüksek paya sahiptir. Bunu, %27 ile ağır sanayi ve %18 ile gıda ve tüketim ürünleri sektörü takip etmektedir. Enerji ve petrokimya sektörü, bölgedeki su kaynaklarının en büyük tüketicilerindendir ve bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlayacak politikaların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Havzanın ekonomik faaliyetleri ve su kaynakları üzerindeki artan baskı, bölgesel kalkınma stratejilerinin sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda planlanmasını ve uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir. Su kaynaklarının azalmasıyla birlikte, ekonomik dengelerin korunması ve havzanın uzun vadeli sürdürülebilirliğinin sağlanması için entegre su yönetimi politikalarına öncelik verilmelidir.

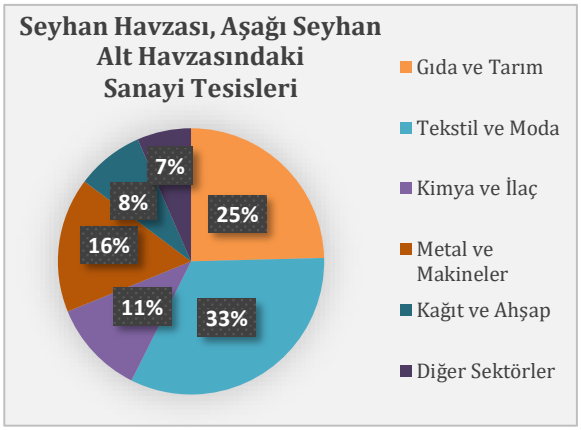
3.1.2. Konya Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Konya Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 2. Konya Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Konya Basin)

Konya Havzası, Türkiye'nin tarım, sanayi ve enerji sektörlerindeki stratejik önemi ile öne çıkan bir bölgedir. Alt havza bazında sanayi yoğunluğu verilerine ulaşılamadığı için analizler, havzanın genel durumu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Havzanın yıllık toplam ekonomik katkısı yaklaşık 257,5 milyar TL olarak hesaplanmıştır ve bu katkının büyük bir bölümü tarımsal üretim ve sanayi sektörlerinden kaynaklanmaktadır. Geniş tarım alanları, güçlü sanayi altyapısı ve yenilenebilir enerji potansiyeli, havzanın ekonomik faaliyetlerinde belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Havzada, 2050 yılı itibarıyla su potansiyelinde %56 oranında bir azalma beklenmekte olup, bu durum Kuzey Ege Havzası'ndan sonra en yüksek azalma oranıdır. Sanayi sektörü dağılımında enerji ve petrokimya sektörü %60 ile en yüksek paya sahiptir. Bunu, %40 ile gıda ve tüketim ürünleri sektörü takip etmektedir. Enerji ve petrokimya sektöründeki su yoğun üretim süreçleri, havzadaki su kaynaklarının kullanımında önemli bir yere sahiptir. Tarım sektöründe ise su kaynaklarının verimli kullanımı, Türkiye'nin tarımsal üretim değerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Ancak, su kaynaklarındaki potansiyel azalma, bölgedeki ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda yeniden ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle, tarım, sanayi ve enerji sektörlerinin su tüketimini azaltmaya yönelik politikaların geliştirilmesi, bölgenin ekonomik geleceği ve ulusal ekonomi için uzun vadeli faydalar sağlayacaktır.

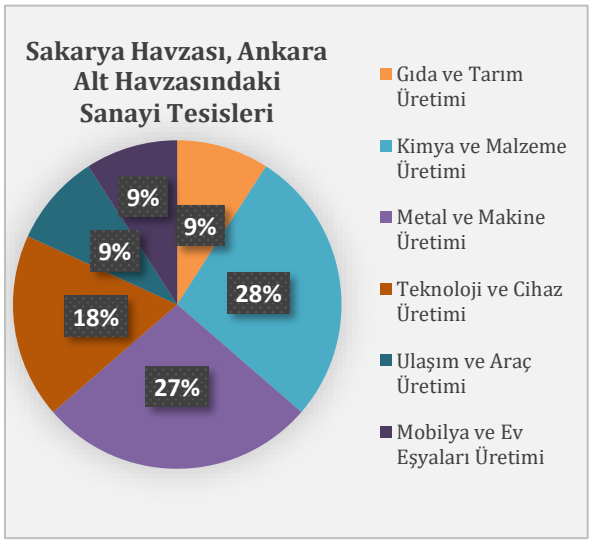
3.1.3. Seyhan Havzası, Aşağı Seyhan Alt Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Seyhan Basin, Lower Seyhan Sub-Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 3. Seyhan Havzası, Aşağı Seyhan Alt Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Seyhan Basin, Lower Seyhan

Seyhan Havzası, Türkiye'nin tarım, sanayi ve enerji sektörlerinde stratejik bir öneme sahip havzalardan biridir. Havzanın yıllık ekonomik katkısı yaklaşık 175 milyar TL olarak hesaplanmış olup, bu katkının büyük bir kısmı tarım ve sanayi sektörlerinden sağlanmaktadır. 2050 yılı itibarıyla, havzanın su potansiyelinde %49 oranında bir azalma beklenmektedir. Havzanın Aşağı Seyhan Alt Havzası, sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu ve kuraklık endeksi kapsamında en fazla etkilenebilecek alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Sanayi sektörü dağılımında, tekstil sektörü %41 ile en yüksek paya sahiptir. Bunu, %25 ile gıda ürünleri, %16 ile ağır sanayi, %11 ile kimya ve ilaç sektörü, %7 ile diğer sektörler takip etmektedir. Tekstil ve gıda ürünleri sektörleri, havzanın ekonomik faaliyetlerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Bölgedeki hidroelektrik santralleri ve lojistik merkezleri gibi altyapılar, ekonomik sürdürülebilirliği desteklemektedir. Ancak, su kaynaklarındaki azalma, tarım ve sanayi faaliyetlerini tehdit eden kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, havzadaki ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda yeniden ele alınması ve su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi, bölgesel ve ulusal ekonomi açısından öncelikli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

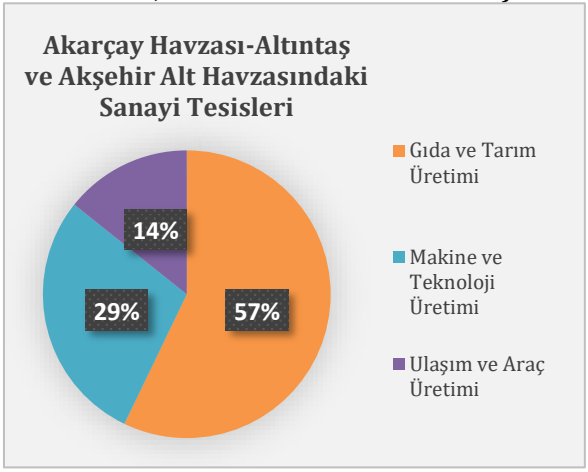
3.1.4. Sakarya Havzası, Ankara Alt Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Sakarya Basin, Ankara Sub-Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 4. Sakarya Havzası, Ankara Alt Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Sakarya Basin, Ankara Sub-

Sakarya Havzası, SYGM tarafından Türkiye'nin stratejik öneme sahip havzalarından biri olarak belirlenmiştir. Tarım, sanayi, enerji ve lojistik sektörleri açısından kritik bir rol üstlenen havzanın, ülke ekonomisine yıllık katkısı yaklaşık 200-220 milyar TL düzeyindedir. Bu katkının büyük bir kısmı tarım, sanayi ve enerji sektörlerinden kaynaklanmaktadır. Ancak, 2050 yılı itibarıyla su potansiyelinde %49 oranında bir azalma beklenmesi, havzanın ekonomik sürdürülebilirliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Havzanın Ankara Alt Havzası, kuraklıktan en fazla etkilenebilecek bölgelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu alt havzadaki sanayi tesislerinde sektörel dağılım, ağır sanayi %37, enerji ve petrokimya %27, gıda ve tüketim ürünleri %18, teknoloji sektörü %18 şeklindedir. Özellikle enerji ve petrokimya sektörlerinin yüksek su tüketimi, havzanın su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı için kapsamlı politikaların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sakarya Havzası, tarımsal üretim açısından da Türkiye'nin önde gelen bölgelerindendir. Bereketli toprakları ve uygun iklim koşulları sayesinde tahıllar, sebzeler ve meyve üretimi gibi geniş bir ürün yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca, kara yolu ve demir yolu ağlarıyla havza, lojistik ve ticaret açısından stratejik bir öneme sahiptir. Havzanın ekonomik faaliyetleri ve su kaynakları üzerindeki artan baskı, bölgesel kalkınma stratejilerinin sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda planlanmasını zorunlu kılmaktadır. Su kaynaklarındaki azalmanın yaratacağı ekonomik dengesizliklerin önlenmesi için entegre su yönetimi politikalarına öncelik verilmelidir. Sakarya Havzası'nın gelecekteki ekonomik katkısının sürdürülebilmesi, etkili sürdürülebilir kalkınma projelerinin uygulanmasına bağlıdır.

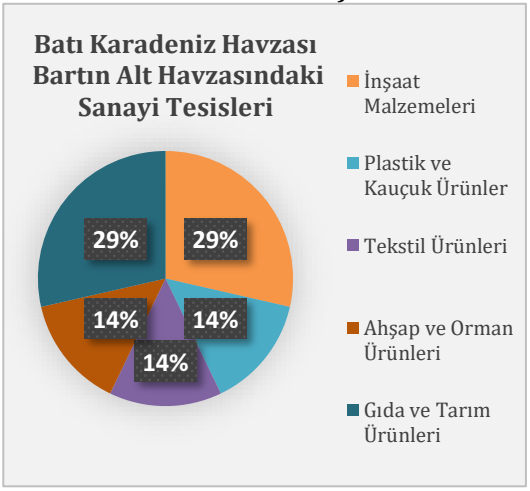
3.1.5. Akarçay Havzası, Altıntaş ve Akşehir Alt Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Akarçay Basin, Altıntaş and Akşehir Sub-Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 5. Akarçay Havzası, Altıntaş ve Akşehir Alt Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Akarçay Basin, Altıntaş and Akşehir Sub-Basin)

Akarçay Havzası, tarım, sanayi ve enerji sektörlerinde sağladığı ekonomik değerle Türkiye'nin stratejik öneme sahip havzalarından biridir. Havzanın Türkiye ekonomisine yıllık katkısı, yapılan tahminlere göre yaklaşık 80-90 milyar TL düzeyindedir. Bu katkının büyük bir bölümü tarımsal üretim, sanayi faaliyetleri ve enerji üretiminden kaynaklanmaktadır. Ancak, 2050 yılı itibarıyla su potansiyelinde %43 oranında bir azalma beklenmesi, havzanın ekonomik sürdürülebilirliğini ciddi şekilde tehdit etmektedir. Akarçay Havzası, tarım sektöründe öne çıkan bir bölgedir. Tahıl, yem bitkileri, sebze ve meyve üretimi gibi alanlarda önemli bir yere sahip olan havza, hayvancılık ve süt üretimiyle de bölgesel tarımsal ekonomiye büyük katkı sağlamaktadır. Bereketli topraklar ve sulama imkanları, tarımsal verimliliği artırarak havzanın ekonomik gücünü desteklemektedir. Ancak, su kaynaklarındaki öngörülen azalma, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Sanayi sektörü, Altıntaş ve Akşehir alt havzalarında yoğunlaşmıştır. Modelleme sonuçlarına göre, bu alt havzalar kuraklıktan en fazla etkilenecek bölgeler arasında yer almaktadır. Havzanın sanayi altyapısında önemli bir yer tutan gıda ve tüketim ürünleri sektörü %57, ağır sanayi ise %43 oranında paya sahiptir. Gıda işleme, makine ve ekipman üretimi gibi sektörler, bölgedeki sanayi faaliyetlerinin temelini oluşturarak önemli bir istihdam kaynağı yaratmaktadır. Enerji üretimi, havzanın bir diğer kritik ekonomik kaynağıdır. Hidroelektrik ve yenilenebilir enerji projeleri, havzanın enerji üretiminde sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemekte ve bölgesel ekonomiye katkı sağlamaktadır. Ancak, su kaynaklarının azalması, enerji üretiminde karşılaşılacak zorlukları artırabilir ve bu sektörün sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilir. Sonuç olarak, Akarçay Havzası, tarımsal üretim kapasitesi, sanayi altyapısı ve enerji potansiyeliyle Türkiye'nin ekonomik kalkınmasında önemli bir yer tutmaktadır. Ancak, sınırlı su kaynaklarının verimli kullanılmasına yönelik politikaların geliştirilmesi ve mevcut kaynak yönetiminin optimize edilmesi, havzanın uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak için kritik bir gerekliliktir. Etkin kaynak yönetimi, Akarçay Havzası'nın ekonomik katkısını artırırken çevresel ve sosyal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasını destekleyecektir.

3.1.6. Batı Karadeniz Havzası, Bartın Alt Havzası: Su Potansiyeli Değişimi, Sanayi Dağılımı ve Ekonomik Katkısı (Western Black Sea Basin, Bartın Sub-Basin: Changes in Water Potential, Industrial Distribution, and Economic Contribution)



Şekil 6. Batı Karadeniz Havzası, Bartın Alt Havzasındaki Sanayi Tesislerinin Sektörel Dağılımı (Sectoral Distribution of Industrial Facilities in the Western Black Sea Basin, Bartın Sub-Basin)

Batı Karadeniz Havzası, Türkiye'nin tarım, sanayi, enerji ve ormancılık sektörlerine yaptığı katkılarla ülkenin önemli ekonomik merkezlerinden biridir. Havzanın Türkiye ekonomisine yıllık katkısı yaklaşık 90-100 milyar TL olarak tahmin edilmektedir. Bu katkının büyük bir kısmı tarımsal üretim, sanayi faaliyetleri, enerji üretimi ve doğal kaynaklardan elde edilen ekonomik değerlerden kaynaklanmaktadır. Ancak, 2050 yılı itibarıyla su potansiyelinde %40 oranında bir azalma beklenmesi, havzanın ekonomik sürdürülebilirliği için önemli bir risk oluşturmaktadır. Havza, tarım sektöründe mısır, çeltik, tahıl, sebze ve meyve üretimi gibi alanlarda öne çıkmaktadır. Hayvancılık ve süt üretimiyle de bölgesel tarımsal ekonomiye önemli katkılar sağlayan Batı Karadeniz Havzası, verimli tarım arazileri ve gelişmiş sulama altyapısı sayesinde hem iç piyasaya hem de ihracata yönelik ekonomik potansiyelini artırmaktadır. Ancak, su kaynaklarındaki azalma, tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Ormancılık sektörü, Batı Karadeniz Havzası'nın ekonomik yapısında önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye'nin en büyük orman varlıklarına sahip olan havza, kereste, mobilya ve ahşap işleme sektörleriyle bölgesel istihdam ve ülke ekonomisine katkı

sağlamaktadır. Sanayi sektörü, Bartın Alt Havzası'nda yoğunlaşmıştır ve bu bölge kuraklıktan en fazla etkilenebilecek alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Sanayi sektörleri şu şekilde dağılmaktadır: İnşaat Malzemeleri (%29), Plastik ve Kauçuk Ürünler (%29), Tekstil Ürünleri (%14), Ahşap ve Orman Ürünleri (%14) ve Gıda ve Tarım Ürünleri (%14). Görselde de gösterildiği gibi en büyük payı inşaat malzemeleri ve plastik-kauçuk ürünleri sektörü almaktadır (%29). Gıda, tekstil ve ahşap-orman ürünleri ise %14'lük eşit oranlarla sanayi faaliyetlerinde yer almaktadır. Enerji üretimi, havzanın ekonomik katkısında sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Hidroelektrik santraller ve yenilenebilir enerji projeleri, bölgenin enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, Batı Karadeniz Havzası, Türkiye'nin tarım, ormancılık ve sanayi sektörlerinde stratejik bir öneme sahiptir. Su kaynaklarındaki azalmanın yaratabileceği ekonomik dengesizliklerin önlenmesi için etkin kaynak yönetimi politikalarının geliştirilmesi gerekmektedir.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

2050 yılı itibarıyla Kuzey Ege, Konya ve Seyhan Havzaları, su potansiyelindeki azalma oranlarının sırasıyla %60, %56 ve %49 olarak öngörülmesiyle, Türkiye'nin kuraklıktan en fazla etkilenecek havzaları arasında yer almaktadır. Bu durum, havzalarda faaliyet gösteren gıda, enerji, tekstil ve ağır sanayi sektörleri üzerinde ciddi etkiler yaratma potansiyeline sahiptir. Söz konusu havzalardaki sanayi sektörlerinin toplam Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYH) katkısının yaklaşık 683 milyar TL olması, ekonomik sürdürülebilirliğin su kaynaklarındaki azalmaya doğrudan bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Buna karşın, 19 hidrolojik havzadan yalnızca Kızılırmak Havzası'nda su potansiyelinde artış beklenmekte olup, bu havzanın 2050 yılında ve sonrasında su potansiyelinde %17 oranında bir artış öngörülmektedir.

Kuzey Ege Havzası, yıllık 251 milyar TL'lik ekonomik katkısıyla tarım, sanayi ve enerji sektörleri açısından stratejik bir öneme sahiptir. Ancak, su potansiyelindeki %60'lık azalma, özellikle enerji ve petrokimya sektörlerinde ciddi sürdürülebilirlik sorunlarına yol açabilir. Güzelhisar Alt Havzası gibi sanayi faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde, su kaynakları üzerindeki baskının daha da artması beklenmektedir. Konya Havzası, Türkiye'nin tahıl üretim merkezi olarak tarım sektörü açısından kritik bir role sahiptir. Ancak, su kaynaklarındaki %56'lık azalma, tarımsal üretimde ciddi kayıplara yol açabilecek ve bu durum yalnızca bölgesel ekonomiyi değil, ülke genelindeki gıda güvenliğini de tehlikeye atacaktır. Ayrıca, enerji ve tekstil sektörlerinin yüksek su tüketimi, havzanın kuraklıktan doğrudan etkilenme riskini artırmaktadır. Seyhan Havzası ise yıllık 175 milyar TL'lik ekonomik katkısıyla Türkiye'nin en önemli tarımsal üretim ve sanayi merkezlerinden biridir. Ancak, su kaynaklarındaki %49 oranındaki azalma, pamuk, mısır ve turunçgil üretiminde düşüşlere neden olabilir. Enerji ve tekstil sektörlerinin suya olan yüksek bağımlılığı, bu sektörlerin kuraklıktan ciddi şekilde etkilenme potansiyelini artırmaktadır.

Bu bağlamda, 2050 yılına kadar su kaynaklarındaki azalmanın ekonomik faaliyetler üzerinde yaratacağı olumsuz etkileri en aza indirmek ve sürdürülebilirliği sağlamak adına kapsamlı bir strateji uygulanması gerekmektedir. Öncelikle, tarımsal sulamada verimliliği artıran teknolojilerin benimsenmesi, sanayi tesislerinde ileri arıtma ve su geri kazanım sistemlerinin yaygınlaştırılması ve enerji sektöründe su tüketimini azaltacak yenilikçi yöntemlerin teşvik edilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra, alternatif su kaynaklarının değerlendirilmesi, yağmur suyu hasadı projelerinin artırılması, arıtılmış atık suların yeniden kullanılması ve yeraltı sularının sürdürülebilir yönetimi için gerekli altyapı yatırımlarının yapılması hayati önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, su kullanım verimliliğini artıracak politikaların uygulanması sürdürülebilir su yönetimi açısından kritik bir gerekliliktir. Sektörlere özgü su kullanım standartlarının oluşturulması, dijital izleme ve ölçüm sistemlerinin yaygınlaştırılması ve su tasarrufuna yönelik teşviklerin artırılması, hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği destekleyecektir. Kuzey Ege, Konya, Seyhan ve Sakarya Havzaları gibi kuraklık riski yüksek bölgelerde mevcut su kaynaklarının daha fazla zorlanmasının sürdürülebilir olmadığı açıktır. Bu nedenle, su yönetimi ve iklim değişikliğine uyum stratejilerinin hem bölgesel hem de sektörel düzeyde entegre edilmesi, uzun vadeli kalkınma hedefleri için bir zorunluluktur.

Bu entegrasyon, suyun verimli kullanımını izlemek ve optimize etmek için dijitalleşme ve akıllı sistemlerin kullanımını da kapsamalıdır. Havzalarda su tüketimini, su kaynaklarının durumunu ve iklim değişkenlerini bütünleşik bir şekilde izleyen dijital platformların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu platformlar, tarım, sanayi ve enerji sektörlerinde su kullanımını gerçek zamanlı olarak izleyerek, havza bazlı karar alma süreçlerini destekleyebilir. Ayrıca, IoT destekli sensör ağları ve yapay zeka destekli tahmin modelleri, su seviyeleri, sıcaklık, yağış ve buharlaşma gibi parametreleri sürekli izleyerek gelecekteki su talebi ve kuraklık senaryolarını daha doğru bir şekilde öngörmeyi sağlayabilir. Tarımda akıllı sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması, sanayi tesislerinde su geri kazanım teknolojilerinin kullanılması ve enerji sektöründe su tüketimini azaltacak yöntemlerin teşvik edilmesi, bu çabaları destekleyecektir. Bu stratejilerin hayata geçirilmesi, yalnızca su kaynaklarının korunmasını değil, aynı zamanda havzalardaki ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliğini de sağlayacaktır. Dijitalleşme ve akıllı sistemlerle desteklenen bir su yönetim politikası, su kaynaklarının verimli kullanımını garanti altına alarak

çevresel ve ekonomik hedeflere ulaşmayı mümkün kılacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., & Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Journal of the American Water Resources Association, 34(1), 73–89.

Bozkurt, D., Sen, O. L., Kurnaz, M. L., 2019. Climate Change Impacts in Turkey: Sectoral Analyses and Adaptation Strategies. Regional Environmental Change, 19(6), 1565–1577. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01535-x

Bölgesel Kalkınma Ajansları-BKA., 2023. Havza Bazlı Ekonomik Analiz Raporları. Türkiye Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü Yayınları.

Chowdhury, S., Al-Zahrani, M. 2015. Implications of climate change on water resources in Saudi Arabia. Arabian Journal for Science and Engineering, 40(2), 469–481.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü-DSİ, 2021. 2021 Yılı Faaliyet Raporu. Erişim Adresi: https://strateji.dsi.gov.tr/Duyuru/Detay/891

Gharib A.A., Blumberg, J., Manning, D.T., Goemans, C., Arabi, M. 2023. Assessment of vulnerability to water shortage in semi-arid river basins: The value of demand reduction and storage capacity. Science of the Total Environment, 871, 161964. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161964

Gürkan, H., Arabaci, H., Demircan, M., Eskioğlu, O., Şensoy, S., Yazici, B., 2016. GFDL-ESM2M Modeli Temelinde RCP4.5 ve RCP8.5 Senaryolarına Projeksiyonları Göre Türkiye için Sıcaklık ve Yağış Projeksiyonları. Coğrafi Bilimler Dergisi, 14(2), 77-88. DOI: 10.1501/Cogbil_0000000174

Ertürk, A., Ünal, D., Atış, E., 2018. Water Management Challenges in Turkey Under Climate Change Impacts. Water Policy, 20(1), 138–151. https://doi.org/10.2166/wp.2018.134

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., 2012. The Water Footprint of Humanity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(9), 3232–3237. https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109

Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds. A. P. vd.,). IPCC https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Kır, A., Ozturk, E., Yetis, U., Kitis, M. 2024. Resource utilization in the sub-sectors of the textile industry: opportunities for sustainability. Environmental Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32768-2

Kızılkaya, O., Mike, F., 2023. İklim Değişikliğinin Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisi: Türkiye Üzerine Ampirik Bir Değerlendirme. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi(57), 403-411. https://doi.org/10.30794/pausbed.1169890

Kibaroglu, A., Ertug, E., Avci, V., 2021. Transboundary Water Governance in the Euphrates-Tigris River Basin. Water Resources Management, 35(1), 245–258. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02726-3

Kültür ve Turizm Bakanlığı-KTB, 2023. Bölgesel Turizm Istatistikleri ve Gelir Raporları. Erişim Adresi. https://www.ktb.gov.tr

Loucks, D.P., van Beek, E. 2017. Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Springer. https://doi.org/978-3-319-44234-1

OECD, 2006. Input-Output Analysis in the Context of Environmental Accounting. OECD Statistics Working Paper.

OECD, 2012. Water Quality and Agriculture: Meeting the Policy Challenge. OECD Studies on Water.

OECD, 2015. Water Resources Allocation: Sharing Risks and Opportunities. Organisation for Economic Co-operation and Development.

OECD, 2023. Regional economic indicators and industrial value-added analysis. Paris: OECD Publishing. Erişim Adresi: https://www.oecd.org

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E., Foley, J. A. 2009. A Safe Operating Space for Humanity. Nature, 461(7263), 472–475. https://doi.org/10.1038/461472a

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı-STB, 2023. Kuzey Ege Bölgesindeki Organize Sanayi Bölgeleri ve Sanayi Tesisleri Üzerine Raporlar. Erişim Adresi: https://www.sanayi.gov.tr

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı-STB, 2023. Kalkınma Ajansları Bölgesel Ekonomik Analiz Raporları. Erişim Adresi: https://www.sanayi.gov.tr

Sieber, J. 2006. WEAP Water Evaluation and Planning System. International Congress on Environmental Modelling and Software. 3rd International Congress on Environmental Modelling and Software - Burlington, Vermont, USA.

Stern, N., 2007. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge University Press.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü-SYGM, 2018. Sektörel Su Tahsis Planları. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları, Ankara.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü-SYGM, 2022. Kuraklık Yönetim Planları. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Yayınları, Ankara.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü-SYGM, 2023. Su Verimliliği Rehber Dokümanları Serisi. Ankara.

Turan, E., Bayrakdar E., 2022. Türkiye'nin Su Yönetim Politikaları: Ulusal Güvenlik Açısından Bir Değerlendirme. Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi, 6 (2), 1-19. DOI: 10.25272/j.2149-8539.2020.6.2.01

Türkiye İstatistik Kurumu-TÜİK, 2021. Sanayi ve Hizmet Sektörlerinde Katma Değer İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu. Erişim Adresi: https://www.tuik.gov.tr

Türkiye İstatistik Kurumu-TÜİK, 2023. Tarımsal Üretim ve Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYH) İstatistikleri. Erişim Adresi: https://www.tuik.gov.tr

Türkiye İstatistik Kurumu-TÜİK, 2023. Bölgesel ve Sektörel Ekonomik Göstergeler Raporları. Erişim Adresi: https://www.tuik.gov.tr

U.S. Army Corps of Engineers-USACE, 2017. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual. Hydrologic Engineering Center. Retrieved from https://www.hec.usace.army.mil/confluence/display/CWEYR/HEC-HMS

UN Water. 2020. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. UNESCO World Water Assessment Programme. Erişim Adresi: https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2020

UNIDO, 2011. Industrial Value Chain Diagnostics. United Nations Industrial Development Organization.

Wang, L., Li, W., Zheng, Y., Zhang, X., Yuan, F., & Wu, X. 2023. Water Deficit Caused by Land Use Changes and Its Implications on the Ecological Protection of the Endorheic Dalinor Lake Watershed in Inner Mongolia, China. Water, 15(16), 2882. https://doi.org/10.3390/w15162882

World Bank, 2023. The Relationship Between Water Management and Economic Contribution: A Regional Analysis. Washington, DC: World Bank. Retrieved from https://www.worldbank.org

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 466-479, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1669626

Araştırma Makalesi

Research Article

CLASSIFICATION OF COGNITIVE WORKLOAD FROM EEG SIGNALS USING MULTIDIMENSIONAL FEATURES WITH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING

Yavuz Bahadır KOCA[1*]

[1] Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Afyonkarahisar, Türkiye

Keywords

EEG, Cognitive Workload, Machine Learning, Deep Learning, Feature Extraction, Biomedical.

Abstract

This study aims to classify cognitive workload levels from EEG signals. EEG signals from 48 subjects under resting and task cognitive load conditions were analyzed. Noise and artifacts were removed by applying band-pass and notch filtering methods in the 1-50 Hz band on the EEG data. Then, the EEG data were segmented with the windowing technique in 256 and 512 sample sizes, and a total of 309 features based on time, frequency, and complexity were extracted. Using the extracted feature set, logistic regression (LR), support vector machines (SVM), k-nearest neighbor (k-NN), random forest (RF), XGBoost machine learning (ML) algorithms and deep neural networks (DNN), one-dimensional convolutional neural networks (1D-CNN) and long short-term memory (LSTM) deep learning (DL) methods were applied for multi-class classification. In the experimental results, the highest success was obtained in the XGBoost model with a 99.4% accuracy rate and 0.990 Cohen's kappa value, and in DL methods, a 98.75% accuracy rate and 0.981 Kappa value in the LSTM model. This study reveals that integrating multidimensional features obtained from EEG signals with both ML algorithms and DL models provides high accuracy in cognitive workload classification.

MAKİNE ÖĞRENMESİ VE DERİN ÖĞRENME İLE ÇOK BOYUTLU ÖZELLİKLER KULLANILARAK EEG SİNYALLERİNDEN KOGNİTİF İŞ YÜKÜNÜN SINIFLANDIRILMASI

Anahtar Kelimeler

EEG, Kognitif İş Yükü, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Özellik Çıkarımı, Biyomedikal.

Öz

Bu çalışmada EEG sinyallerinden kognitif iş yükü seviyelerinin sınıflandırılması amaçlanmıştır. 48 deneğe ait dinlenme ve görev kognitif yük koşullarındaki EEG sinyalleri analiz edilmiştir. EEG verileri üzerinde 1-50 Hz bandında bant geçiren ve çentik filtreleme yöntemleri uygulanarak gürültü ve artefaktlar temizlenmiştir. Daha sonra, EEG verileri 256 ve 512 örnek boyutlarında pencereleme tekniğiyle segmente edilerek zaman, frekans ve karmaşıklık temelli toplam 309 öznitelik çıkarılmıştır. Elde edilen öznitelik seti kullanılarak, çok sınıflı sınıflandırma işlemi için lojistik regresyon, destek vektör makineleri, k-en yakın komşu, rastgele orman, XGBoost makine öğrenmesi algoritmaları ile derin sinir ağları (DNN), tek boyutlu konvolüsyonel sinir ağları (1D-CNN) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) gibi derin öğrenme yöntemleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlarda en yüksek başarı, 99.4% doğruluk oranı ve 0,990 kohen kappa değeri ile XGBoost modelinde, derin öğrenme yöntemlerinde ise 98.75% doğruluk oranı ve 0,981 kappa değeri ile LSTM modelinde elde edilmiştir. Bu çalışma, EEG sinyallerinden elde edilen çok boyutlu özelliklerin hem makine öğrenmesi algoritmaları hem de derin öğrenme modelleriyle entegrasyonunun kognitif iş yükü sınıflandırmasında yüksek doğruluk sağladığını ortaya koymaktadır.

Alıntı / Cite

Koca, Y.B. (2025). Classification of Cognitive Workload from EEG Signals Using Multidimensional Features with Machine Learning and Deep Learning, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(2), 466-479.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Y.B. Koca, 0000-0002-0317-1417

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	03.04.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	18.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.04.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: ybkoca@gmail.com, ybkoca@aku.edu.tr +90-272-211-1267

CLASSIFICATION OF COGNITIVE WORKLOAD LEVELS FROM EEG SIGNALS USING MULTIDIMENSIONAL FEATURES WITH MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING

Yavuz Bahadır Koca[1†]

[1] Afyon Kocatepe University, Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Afyonkarahisar, Türkiye

Highlights

- Cognitive workload levels were classified by extracting features based on time, frequency, and complexity from EEG signals.
- Among the machine learning methods, the XGBoost algorithm, 99.4% showed the highest classification performance. In deep learning methods, the LSTM model, 98.75% accuracy modeled time-dependent relationships in EEG signals and exhibited high performance.
- Channel-based fractal analysis results revealed that EEG signal complexity increased significantly in the frontal and temporal regions as cognitive load increased.

Graphical Abstract

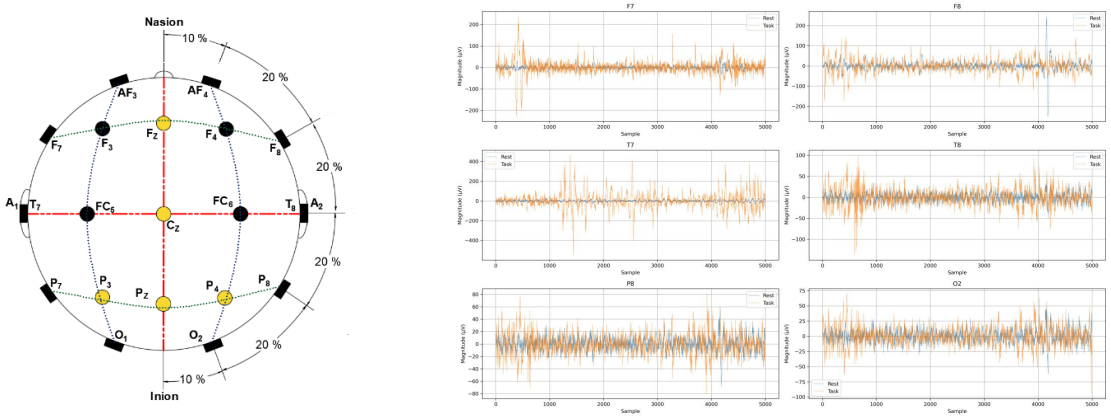


Figure. EEG electrode placement and multidimensional neural responses in rest and cognitive tasks

Purpose and Scope

The purpose of this study is to provide effective classification of cognitive workload levels from EEG signals. EEG-based analyses can provide significant benefits for improving performance, especially in occupations requiring attention and concentration, and in daily life by accurately determining people's cognitive load levels.

Design/methodology/approach

The research was conducted on EEG recordings obtained from the STEW dataset. EEG data were first cleaned with band-pass and notch filtering methods, then analyzed by dividing into small sections with the windowing method. Time, frequency and complexity features were extracted for each window. Machine learning methods and deep learning techniques were used for classification.

Findings

In the analyses performed, the best classification results were obtained with the XGBoost algorithm from machine learning methods with an accuracy rate of 99.4%. From deep learning methods, the LSTM model showed high performance with an accuracy rate of 98.75%. In addition, in channel-based analyses, it was determined that the complexity of EEG signals in the frontal and temporal regions increased significantly as cognitive load increased.

Originality

The originality of this study is that it classifies cognitive load levels with high accuracy using a multidimensional and comprehensive feature set from EEG data. Thanks to detailed channel-based examinations, it is shown which brain regions are more active under load. In this respect, a different analysis in the field of cognitive load assessment is presented with the combined evaluation of machine learning and deep learning methods.

† Corresponding author: ybkoca@gmail.com, ybkoca@aku.edu.tr, +90-272-211-1267

1. Introduction

Cognitive load refers to the balance between an individual's capacity to process information and the cognitive demands they encounter. It is very important in various fields such as education, health, and technology (Sweller, 1988; Sweller et al., 2019). When this balance is disrupted, an individual's decision-making ability, attentional process, and information processing skills can be negatively affected. Long-term intense cognitive load can manifest as cognitive fatigue, leading to decreased performance, increased probability of making errors, and loss of motivation (Taddeini et al., 2025).

Last decades, information exposure is increasing day by day, and this significantly affects people's mental activities (Wang, 2024). As the complexity of decision-making processes increases, how the human mind works under cognitive load and how mental fatigue occurs as a result of this becomes increasingly important (Mundlos et al., 2024). Especially, increasing technology use has a significant effect on cognitive load and mental fatigue. Long periods spent in front of a smartphone, tablet, or computer shorten the attention span of individuals and lead to the rapid depletion of mental resources. Increased screen exposure increases cognitive load due to constantly divided attention and digital multitasking habits, which can make mental fatigue chronic in the long term (Amalakanti et al., 2024; Sheng, 2025; Skowronek et al., 2023). In addition, excessive use of digital devices disrupts sleep patterns, disrupts brain resting processes, and prevents cognitive functions such as attention, memory, and arithmetic ability from working efficiently (Holding et al., 2021). In this context, correct and healthy screen use strategies are of great importance for human health in terms of managing cognitive load and mental fatigue.

Cognitive fatigue is a condition associated with physical and cognitive performance disorders that occur as a result of long-term cognitive strain (Weiler et al., 2025). It can lead to serious consequences in both individual and professional contexts. For example, long-term cognitive deterioration can reduce employee productivity, make learning processes difficult, and negatively affect daily decision-making processes (Chen et al., 2016; Kunasegaran et al., 2023; Mizuno et al., 2011). Moreover, when cognitive fatigue is examined at neurophysiological and psychological levels, it is also important with its energy consumption in the brain, decrease in cortical activity, and negative effects on working memory (Lorist et al., 2005).

This study aims to classify cognitive workload levels with high accuracy using comprehensive and diverse features obtained from EEG signals. In this context, unlike previous studies, time, frequency, and complexity-based multi-dimensional analyses (Shannon entropy, Higuchi fractal dimension, Hjorth parameters, Hurst coefficient) were performed on EEG data. In addition, the temporal changes of EEG signals and their differences according to brain regions were determined in detail. Thus, it shows which parts of the brain regions are more active under high cognitive load. This approach makes a significant contribution to the accurate and reliable measurement of cognitive workload.

2. Literature Survey

Electroencephalography (EEG), offers the opportunity to evaluate cognitive load by detecting brain activity associated with cognitive tasks and analyzing EEG signals according to frequency bands (Park and Chung, 2020; Zafar et al., 2017). EEG, is a non-invasive technique and is a physiological signal measurement method used to analyze significant changes in brain waves. EEG signals are divided into alpha, beta, gamma and theta frequency bands, each associated with different cognitive processes. Delta waves are generally associated with deep sleep and are less pronounced in awake states. However, increased delta activity can be seen depending on the individual's psychological state. This manifests itself as an inappropriate state of arousal and decreased attention (Howells et al., 2018). Alpha waves are associated with relaxed, awake states and are most pronounced in the occipital region of the brain (Ono et al., 2023). Beta waves are associated with active thinking, problem solving and motor control (Borra et al., 2023). They are unsuccessful in inhibiting the response under high cognitive demand tasks (Taddeini et al., 2025). Gamma waves are associated with higher-level cognitive functions, including perception and consciousness (Archila-Meléndez et al., 2020). For example, gamma band power is effective in distinguishing single-task and multi-task scenarios and achieves high classification accuracy in detecting cognitive workload (Korkmaz et al., 2024).

Studies show that cognitive fatigue negatively affects cognitive functions and impairs decision-making processes. In aviation, cognitive fatigue can cause deterioration of performance and reactions to unpredictable events. It can be evaluated that this situation weakens cognitive functions and affects decision-making mechanisms (Hamann and Carstengerdes, 2023). So, in recent years, machine learning (ML) algorithms with artificial intelligence-supported analyses have made a significant difference in measuring cognitive fatigue and cognitive load and have

offered innovative approaches. With technological developments, various methods have been developed in this context to detect cognitive fatigue. In studies, how ML and deep learning (DL) techniques are integrated with EEG data, methods for automatically estimating cognitive workload and cognitive fatigue are examined with different algorithms and analyses.

Using EEG signals, individuals' cognitive workload levels can be classified as low, medium, and high. Lim et al. (2018) performed cognitive load classification with EEG signals to measure the cognitive load of people during multitasking. Akman (2021) performed classification with Katz and Higuchi's fractal dimension algorithms, feature extraction, support vector machines (SVM), k-nearest neighbor (k-NN), and quadratic discriminant analysis (QDA) methods. In a study conducted using EEG signals and DL algorithms, cognitive fatigue of construction workers was determined with an accuracy rate of 88.85% (Wang et al., 2023). In addition, studies on cognitive fatigue detection with ML using fMRI data have achieved an accuracy rate of 73% (Zadeh et al., 2020). Kamrud et al. (2021) developed cross-participant EEG models to show that cognitive load can serve as a consistent physiological marker across different individuals and tasks. Zhou et al. (2022) discussed how EEG data are used in cognitive load estimation systems through preprocessing, feature extraction, and classification steps.

Examining studies on the relationship between EEG-based functional connectivity metrics and cognitive load, Safari et al. (2024) have investigated cognitive fatigue using hierarchical feature selection and support vector-based connectivity metrics. Gupta et al. (2021) have employed DL methods to classify cognitive load through brain connectivity analysis in EEG data. Li et al. (2023) developed EEG-based fatigue detection systems with a brain cognitive dynamic recognition network and showed how different brain regions are related to cognitive load. In studies on cognitive fatigue detection, Zeng et al. (2021) addressed the difficulties of estimating cognitive fatigue in different individuals using an EEG-based transfer learning method. Li et al. (2024) developed a new method for the assessment of cognitive overload using EEG signals. Karmakar et al. (2024) aimed to increase user experience by performing real-time cognitive load detection with EEG signals. Shafiei et al. (2024) combined EEG and eye-tracking data with the XGBoost model to estimate cognitive load in surgical tasks. Zhou et al. (2025) improved cognitive load detection in air traffic control operators by using an EEG-based hybrid DL model. Khan et al. (2024) performed cognitive load analysis using functional infrared spectroscopy data instead of EEG and stated that DL models showed superior performance. Among the studies examining EEG spectral analysis in cognitive load measurement, Chikhi et al. (2022) stated that frontal theta bands are a sensitive marker for cognitive load estimation. (Roy et al., 2019) examined the application of DL models in EEG and emphasized such as CNN and RNN provide successful results for EEG analysis. But they explained there are some problems, such as reproducibility. So, cognitive load and cognitive fatigue negatively affect both cognitive and physical performance.

3. Material and Method

In this study, the simultaneous task EEG workload (STEW) dataset containing EEG signals collected under cognitive workload was used. The dataset included EEG recordings of 48 participants at rest and under high cognitive load conditions. A study was carried out on 45 people due to the lack of data of three of the participants. The participants were conducted on university students who did not have a neurological or psychiatric disorder and had not participated in the EEG study before. The study was conducted with the approval of the Ethics Committee of Nanyang Technological University (IRB-2014-04-026). EEG signals were obtained with the Emotiv EPOC device consisting of 14 electrodes (AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4). The sampling frequency is 128 Hz, and the resolution is 16 bits. Participants were subjected to 2 separate EEG analyses: resting and multitasking test. It performed a multi-task test using the SIMKAP module of the Vienna Test System. In the study, EEG data were collected in a three-minute resting state and an eighteen-minute visual matching and auditory arithmetic test. In the resting state, the first and last 15 seconds were omitted, and a total of 2.5 minutes of clean EEG data was obtained for analysis. In the multitasking test, the first parts were not used due to slow-paced temporary processes, and the last 2.5 minutes of the EEG recording were recorded for evaluation. At the end of each segment, participants rated their cognitive load level on a scale of 1 to 9 (Lim et al., 2018). Accordingly, scores 1 to 3 were classified as "low load", scores 4 to 6 as "medium load", and scores 7 to 9 as "high load" categories. Figure 1 shows the layout of the Emotiv EPOC 14-electrode system.

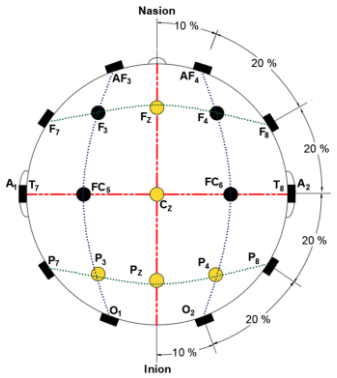


Figure 1. Emotiv EPOC 14 Electrode Placement

A flowchart for an overview of the analysis used in this study is given in Figure 2. The process started with the acquisition of the raw EEG signal. After filtering and segmentation, features were extracted from the time, frequency, and complexity domains. These features were then combined into a hybrid feature vector and used to train machine learning and deep learning models for multi-class classification. The classification results were finally evaluated using performance metrics such as accuracy, F1 score, and Cohen's Kappa.

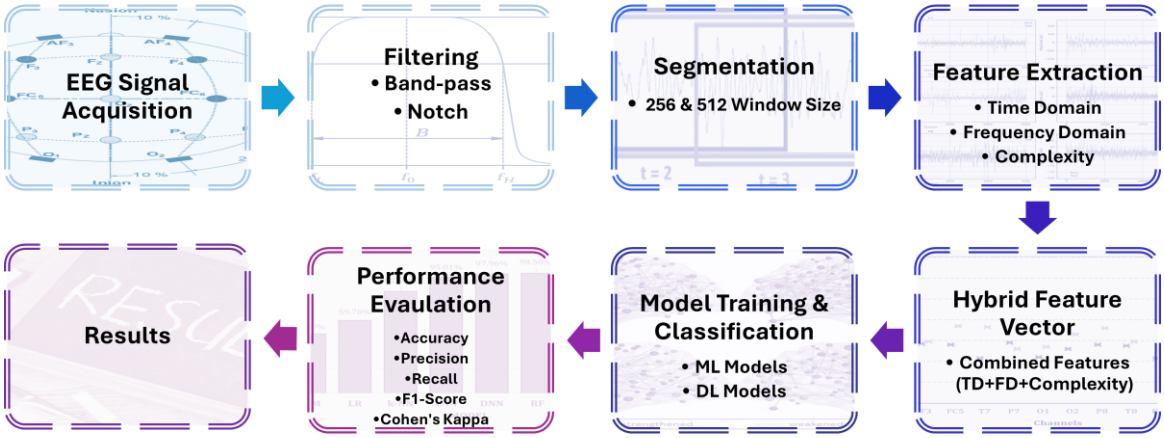


Figure 2. Workflow of the EEG-based cognitive workload classification

3.1. Data Preprocessing

In this study, first, filtration and artifact removal procedures were performed on EEG signals in the STEW data set, respectively. In order to select the relevant frequency, range from EEG signals, the Butterworth bandpass filtering method was used. The filtering process reduces noise and artifacts at undesirable low (<1 Hz) and high (>50 Hz) frequencies in the EEG signal, preserving the 1–50 Hz frequency band required for analysis. All neuro-physiologically significant EEG frequency bands were made available as delta (1-4 Hz), theta (4-8 Hz), alpha (8-13 Hz), beta (13-30 Hz), and gamma (30-50 Hz). Thus, the quality of EEG data and the accuracy of the analysis have been increased. In addition, the notch filtering method was used to eliminate 50 Hz network interference caused by the electrical network during EEG recordings. In the pre-processing phase of EEG signals, 512 and 256-dimensional windowing procedures were performed. Then, the feature extraction process was started for each window. In this way, the data set was enriched by combining the features obtained with different window sizes and it was ensured that the features in EEG signals at different time resolutions were included in the analysis. Thus, it is aimed to increase the model performance in the separation of EEG signals between states.

3.2. Feature Extraction

EEG signals reflect the temporal and frequency characteristics of electrical activity in the brain. The attributes extracted from these signals provide information about numerous parameters such as the individual's cognitive state, attention level, mental load, and relaxation level. In this context, after the pre-processing steps for the collected EEG signals, feature extraction processes were applied sequentially. After the signals were separated into

fixed-length windows for analysis, the attributes of each window were extracted. It is aimed to use these attributes as parameters with high distinctiveness in analyzing mental states. In this context, time domain properties, frequency domain properties, Shannon entropy, Hjorth parameters, Hurst exponential coefficients and Higuchi Fractal Dimension (HFD) analysis were applied respectively.

3.2.1. Time Domain Properties

Mean, variance, root mean square (RMS), and zero-crossing rate (ZCR) calculations were made in the study as time domain features. With the average, the calculation of the center value of the signal for each channel is made. Variance also shows the measure of variability in signal amplitude. With Equations (1) and (2), the mean and variance calculations are determined, respectively. Both of these calculations are considered basic identifiers for classification algorithms. Here, too, it was used to determine the basic statistical distribution of EEG signals. The root mean square (RMS) is calculated by taking the square root of the mean of the squares of the signal. It is obtained by Equation (3). It reflects the energy of the signal. It is especially effective in the analysis of active brain activities in EEG signals. High RMS values indicate that the amplitude of the signal is high and therefore more neural activity is present. A low RMS, on the other hand, indicates a more sluggish signal and is usually associated with a resting state. Therefore, while the RMS value is expected to increase during the task, this value may decrease at rest. Finally, the Zero-Crossing Rate (ZCR) was calculated. ZCR indicates the oscillation level of the signal. This is determined by calculating how many times the signal crosses the zero axis. It provides noise and frequency information. The ZCR value is determined by Equation (4). This value gives an idea of the density of the high-frequency components in the signal. The higher the ZCR, the faster, the more active signal; a lower ZCR reflects a slower and stationary state. This trait tends to increase during tasks that require particular attention. The expression 1 in the ZCR formula is 1 when there is a zero transition, and 0 in the opposite cases.(Stancin et al., 2021; Subasi, 2007).

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{1}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2 \tag{2}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \tag{3}$$

$$ZCR = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1} 1_{\{x_i \,.\, x_{i+1} < 0\}} \tag{4}$$

3.2.2. Frequency Domain Characteristics

EEG signals can be analyzed by separating them into different frequency bands. Each band represents a specific cognitive state. The delta band is associated with deep sleep and unconscious processes. The Theta band shows an increase in meditation and low attention states. The alpha band usually occurs during moments of rest with the eyes closed and represents a relaxed but alert state. On the other hand, the beta band rises during alertness, focus, and cognitive tasks. During the mission, an increase in beta power and a decrease in alpha and theta powers are expected. With Equation (5) the calculated power values for each band obtained by frequency analysis can be determined. Here, $X(f)$ is the Fourier transform of the signal, and is the lower and upper bounds of the respective frequency $f_1 f_2$.

$$P_{band} = \sum_{f=f_1}^{f_2} |X(f)|^2 \tag{5}$$

3.2.3. Entropy-Based and Complexity-Based Features

The basic Shannon entropy was used in the study. Shannon entropy is a parameter that measures the irregularity and randomness of the signal. It measures the amount of information contained in the signal. High entropy indicates a more chaotic and complex signal, while low entropy indicates a more orderly and predictable structure.

Entropy is expected to increase as the brain performs more intensive cognitive operations during mental tasks. On the other hand, entropy remains at lower levels during moments of rest. The equation is calculated by (6). Here p_i are the probabilities obtained from the amplitude histogram of the signal.

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log_2(p_i) \tag{6}$$

Hjorth parameters consist of three components: Activity, Mobility and Complexity, which measure the variability and complexity of the EEG signal over time. Activity represents the variance of the signal and reflects the signal strength, similar to RMS. Mobility shows how fast the signal is changing; This value corresponds to the frequency information and may increase in situations that require attention. Complexity, on the other hand, is the ratio of the second derivative of the signal to the first derivative; The higher this ratio, the more complex the structure of the signal. Complexity usually increases under cognitive load. The calculations for the Hjorth parameters are presented in Equation (7).

$$\begin{aligned} Activity &= Var\,(x(t)) \\ Mobility &= \sqrt{\frac{Var\,(x'(t))}{Var\,(x(t))}} \\ Complexity &= \frac{Mobility\,(x'(t))}{Mobility\,(x(t))} \end{aligned} \tag{7}$$

The Hurst exponential coefficient reveals long-term correlations by measuring the long-range dependency of the signal. The equation is calculated by (8). Here, the length of the time series is expressed by N, the interval of cumulative deviations is expressed by R, and the standard deviation of the time series is denoted by S. The HFD size is a criterion that determines the geometric complexity of the signal. A higher fractal size indicates that the signal has a more complex structure and contains more cognitive activity. The lower fractal dimension, on the other hand, reflects more static and regular brain activity. It usually takes values between 1.0 and 2.0 and is expected to increase during the task. Here, $L(k)$k is the length of the signal obtained by sampling in length. In Equations (8) and (9), the calculation of the hurst exponential coefficient and the calculation of the HFD are given, respectively.

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(N)} \tag{8}$$

$$HFD = \lim_{k \to 0} \frac{\log L\,(k)}{\log\left(\frac{1}{k}\right)} \tag{9}$$

3.3. Classification Analysis

This study constructs a hybrid feature structure by combining various features extracted from the EEG signals. Specifically, time-domain features (mean, variance, RMS, ZCR), frequency-domain features (delta, theta, alpha, beta, gamma), and complexity-related metrics (Shannon entropy, Hjorth parameters, Hurst exponent, and Higuchi fractal dimension) are combined to construct a comprehensive feature vector. Here, it is aimed to capture both the statistical features, spectral characteristics, and nonlinear dynamics of the EEG signals. The obtained hybrid feature vector contained 309 features. It was uniformly used as the input for all ML and DL models.

In this study, ML algorithms and DL models were applied to evaluate the performance of time, frequency and entropy-based hybrid features extracted from EEG data in classifying cognitive workload levels (Low, Medium, High). The models were tested on a multi-class structure and compared with various performance metrics. Logistic Regression (LR) was applied with a multinomial structure. The model evaluated cognitive workload levels with metrics such as ROC-AUC, accuracy and complexity matrix. Random Forest (RF), a community learning algorithm consisting of 100 trees, was used. The model has a strong structure against overfitting, and it also provides the opportunity to examine the importance levels of the features. XGBoost, this powerful algorithm based on Boosting, has been used to maximize the separation between classes. k-NN was applied with a value of k=5 and the classification of data points according to their close neighbors was carried out. SVM are operated on multi-class

structure with RBF core function. To reduce the effect of the class imbalance problem observed in the dataset, balancing strategies were applied to the models. In this context, the *class_weight='balanced'* parameter was enabled. This method automatically determined weights according to the frequency of the classes and ensured that minority classes were represented adequately in the training process. In this way, the weighting approach provided balance while also reducing the risk of overfitting. In addition, for the DL models, stratified sampling was used during data splitting to maintain the class ratios between the training and test sets.

The Deep Neural Network (DNN) uses a network structure that contains two hidden layers with 128 and 64 neurons following the input layer and arranged by Dropout (0.3). The output layer is configured with *softmax* activation for three classes. The model was trained over 50 epochs and validation accuracy was monitored. One-Dimensional Convolutional Neural Network (1D-CNN), was used to capture the temporal patterns of the EEG feature matrix. First, a Conv1D layer with 32 filters was applied, followed by MaxPooling1D. This was followed by a second Conv1D with 64 filters and a re-pooling layer. The network is flattened and connected to a fully connected layer with 64 neurons and finally to the *softmax* output layer. The model has been trained over 50 epochs. In Long Short-Term Memory (LSTM), EEG attributes were reshaped as one-time step sequences and a two-layer LSTM network was implemented. The first LSTM layer was configured with 64 units with the parameter *return_sequences=True*; followed by the addition of a second layer of LSTM with 32 units. Dropout (0.3) is applied between the two layers, and the last output layer is configured with *softmax* function. The model is trained over 50 epochs. The detailed architectures of the implemented DL models, including layer configurations, activation functions, epochs, and dropout rates, are summarized in Table 1.

Table 1. DL architectures used for EEG-based cognitive workload classification

MODEL	ARCHITECTURE	ACTIVATION	EPOCH	DROPOUT
DNN	Dense(128) → Dropout(0.3) → Dense(64) → Dropout(0.3) → Dense(3)	ReLU / Softmax	50	0.3
1D-CNN	Conv1D(32) → MaxPool → Conv1D(64) → Flatten → Dense(64) → Dense(3)	ReLU / Softmax	50	0.3
LSTM	LSTM(64) → Dropout(0.3) → LSTM(32) → Dense(3)	Tanh / Softmax	50	0.3

3.4. Performance Criteria

In this study, multiple performance measures were used to evaluate cognitive workload classification models. These criteria determine model success not only in terms of overall accuracy. At the same time, it was selected to take into account the power of discrimination, general disequilibrium situations and random prediction probabilities for each class.

Accuracy is the ratio of the number of samples that the model correctly guesses in all classes to the total number of samples. It is often used as a key performance indicator, but it can be misleading in an unbalanced class distribution. Precision is the ratio of true positive predictions for each class to the total sample estimated to belong to that class. It is especially preferred in cases where false positives are significant. Sensitivity is the ratio of true positive predictions for each class to all of the actual samples of that class. It stands out especially in cases where missed samples are important. The F1-Score is the harmonic mean of the Precision and Recall values. It offers a balanced assessment, especially in data sets where there is a class imbalance. In this study, macro mean (equal weighted average of all classes) was used. The ROC-AUC measures how well the model can discriminate between classes. Since there is more than one class, the macro average ROC-AUC value was calculated. With Cohen's Kappa, it is a coefficient of consistency that excludes random agreement between the actual labels and the model predictions. Improves reliability in data sets with class imbalance. As the coefficient κ approaches 1, it expresses high consistency, and as it approaches 0, it expresses luck-based results. All of these metrics were calculated using the Python programming language, through functions in the scikit-learn and TensorFlow/Keras libraries.

4. Experimental Results

In this section, the performance of multidimensional features obtained from EEG signals in the classification of cognitive workload levels is analyzed. In this context, performance comparisons were made by applying both ML algorithms and DL approaches in the study. For each model, evaluation was carried out with metrics such as accuracy, recall, specificity, F1-score and Cohen's Kappa, and the most successful methods were determined. In addition, temporal EEG signals were analyzed on a channel basis and the differences between task and rest states were visualized. These signal patterns obtained after filtration processes are important in terms of showing the effect of cognitive load especially in the frontal, temporal and occipital regions. In this context, the effect of

cognitive workload increase on EEG signals is presented with Figure 3 for a subject who was subjected to testing. Here, time series comparisons of task and rest conditions were made over filtered EEG data. For this purpose, F7, F8, T7, T8, P8 and O2 channels representing frontal, temporal, parietal and occipital regions were examined.

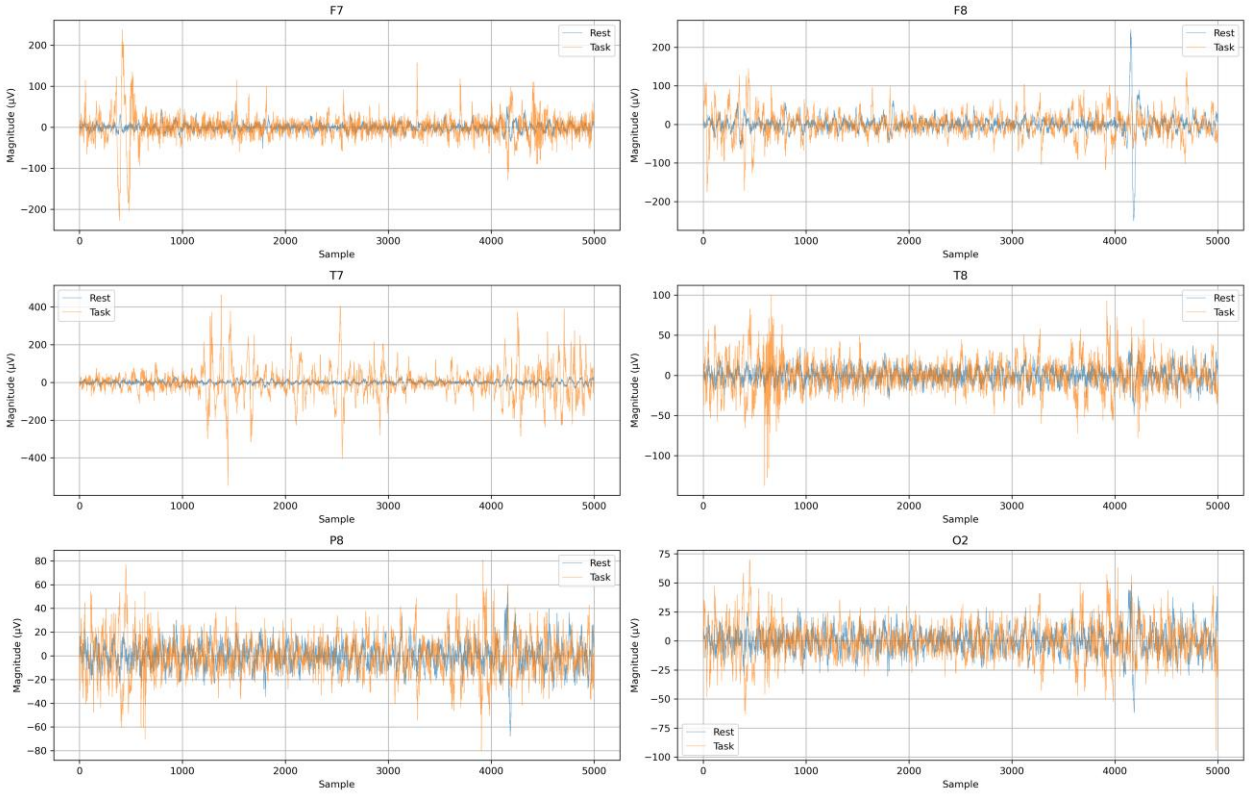


Figure 3. Effect of cognitive workload on EEG signals in channel-based on time analysis

In the time series graphs obtained after the filtering process, amplitude increases of around 300–400 μV ± were observed in the F7 and T7 channels under the duty condition. This indicates that increased cognitive effort and attention are concentrated in the frontal and left temporal regions. The O2 channel produced more erratic and high-amplitude signals during the task. This indicates an increase in visual information processing activity in the right occipital cortex. Increases in amplitude were also observed in the P8 and F8 channels, but these changes remained moderate. In the resting state, the signals in all channels exhibited a more regular, low-amplitude and stable structure. Then, Frequency analysis, HFD and Shannon Entropy were calculated for each channel. HFD and entropy were evaluated in terms of reflecting the structural complexity of the signal and information content changes. The calculation of HFD and Shannon entropy analysis of task and rest for the EEG channel on a channel basis is shown in Figure 4.

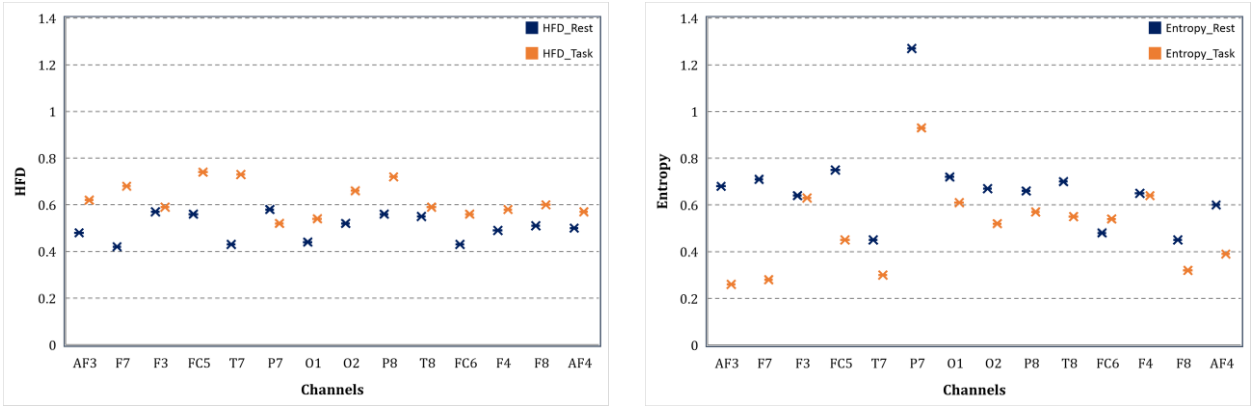


Figure 4. Distribution of average HFD and Entropy values in channels under resting and task conditions (ID: 2).

In the study, a multi-analysis approach was adopted using ML and DL methods. In this study, it was aimed to classify cognitive workload levels by applying ML and DL based classification algorithms on EEG signals collected under rest and multitasking conditions. Signals obtained after feature extraction of data; accuracy, precision, recall and F1-score. In this context, cognitive workload classification was performed on a data set consisting of 13,230 samples using 309 attributes obtained from EEG data. When the class distribution is examined; An uneven distribution of approximately 6174, 3381 and 3675 specimens was observed, including Low, Medium and High. Table 2 presents the performance results of ML and DL algorithms.

Table 2. Performance results of ML and DL algorithms

MODEL	ACCURACY	PRECISION	RECALL	F1-SCORE	COHEN'S KAPPA
LR	0.597	0.572	0.556	0.55	0.362
RF	0.985	0.983	0.98	0.981	0.976
XGBoost	0.994	0.993	0.992	0.992	0.99
k-NN	0.836	0.832	0.819	0.824	0.741
SVM	0.486	0.7	0.36	0.271	0.046
DNN	0.9796	0.9747	0.9748	0.9746	0.968
CNN	0.9501	0.9485	0.9458	0.9471	0.922
LSTM	0.9875	0.9848	0.9845	0.9847	0.981

In the classification made with ML methods, RF and XGBoost stand out as the most successful algorithms. The LR model was applied in a multi-class structure and the overall accuracy of the results obtained was around 59%. In the classification report, a clear distinction was made between the low and high classes, but the recall value remained low in the medium class. The ROC-AUC score indicates a moderate performance of 73.8%. The RF model, consisting of 100 trees, has achieved a very successful distinction between the classes in the dataset. While the accuracy rate obtained was observed as 98.5%, the ROC-AUC score was close to 100%. In the complexity matrix, there is almost no margin of error between classes; This indicates the high generalization ability of the model. The XGBoost algorithm has shown high performance, similar to RF; the accuracy was recorded as 99.4% and the ROC-AUC was 100%. In the classification report, high precision, recall and F1-score values were obtained in all classes. The accuracy of the results obtained with the k-NN model (k=5) was determined as approximately 83.6%. In the performance of the model, it was observed that the confusion between classes was more pronounced; The ROC-AUC value was around 93.8%. The SVM model with RBF core has underperformed compared to other methods. While the overall accuracy was found to be 48.6%, there was serious confusion, especially between the Low and Medium classes. The ROC-AUC score was below the desired level with 67.2%. Figure 5 shows the accuracy performance results of different models. Comparative analysis provides insights into how each model performs in terms of accuracy.

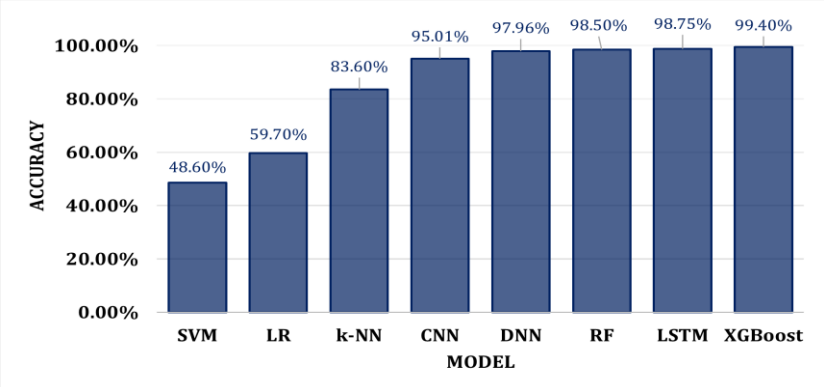
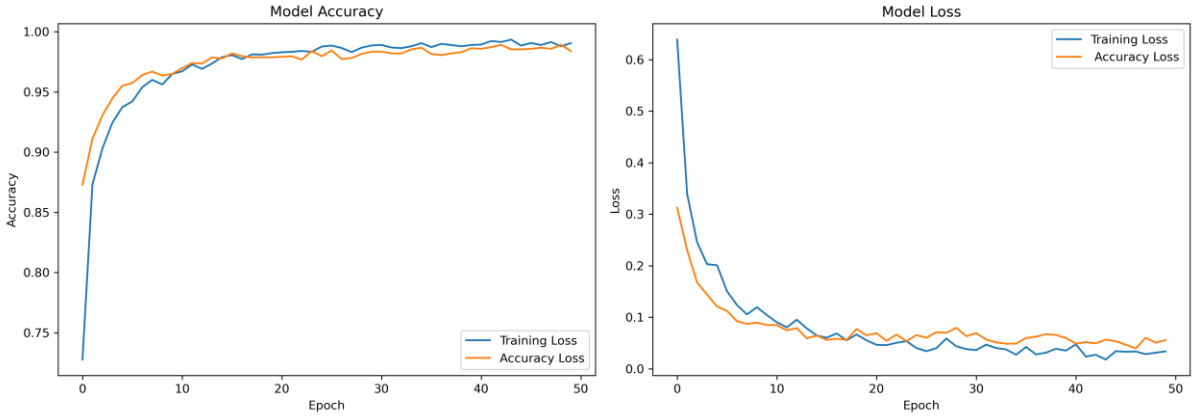
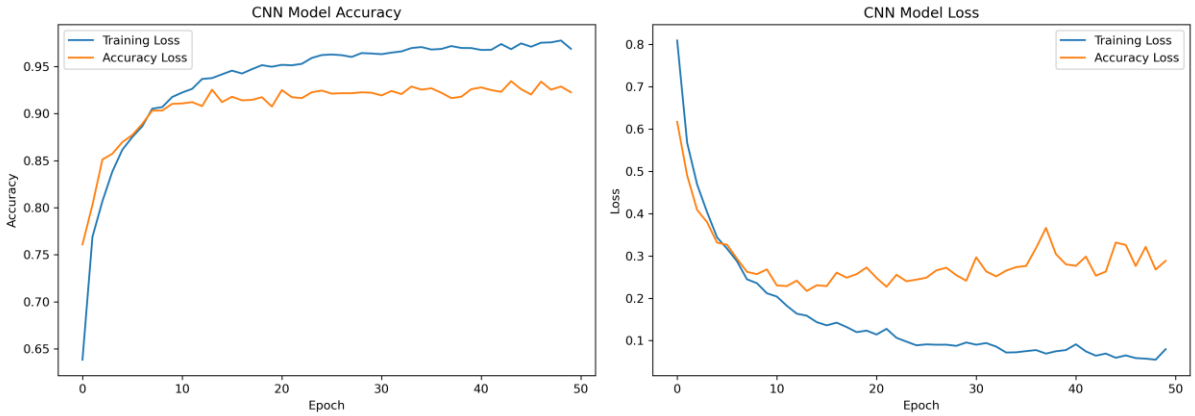


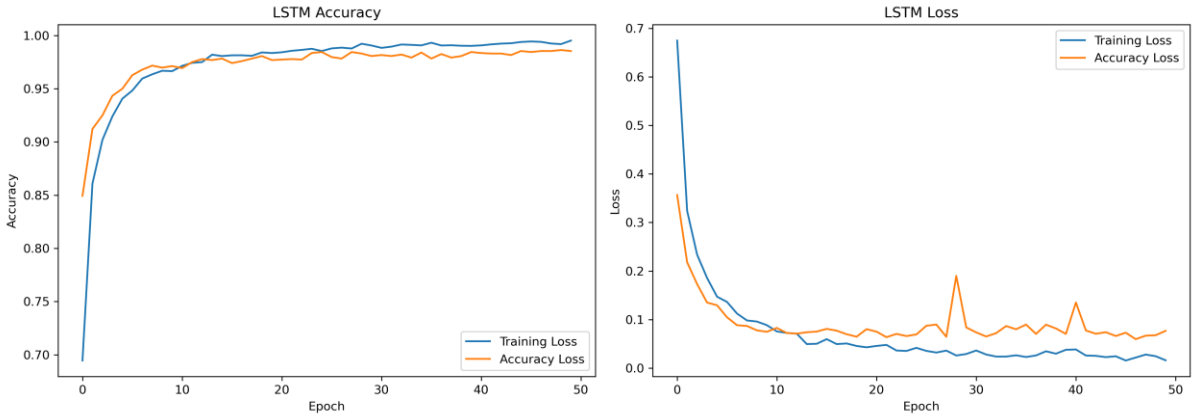
Figure 5. Models' accuracy performance results



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Training and validation performances (a) DNN model: Accuracy and loss curves indicate stable convergence after epoch 30 with minimal overfitting (b) CNN model: While training accuracy continues to increase, validation loss shows signs of overfitting after epoch 30 (c) LSTM model: High training and validation accuracy with stable loss values throughout training

In DL methods, the performances of DNN, CNN and LSTM methods were evaluated, respectively. In the DNN model, which was carried out using a multi-layer artificial neural network, the training process was continued for 50 epochs and the model gave successful results with an accuracy rate of 98.3%. In the classification report, high precision, recall and F1-score values were obtained in all classes. The ROC-AUC value is 99.88%, supporting the overall performance of the model. He focused on capturing local patterns in EEG data with the One-Dimensional Convolutional Neural Network (1D-CNN). The accuracy obtained in this model is 94.2%, and the ROC-AUC is 99.19%. In the classification report, although high achievement was shown in all grades, some minor confusion was observed. In order to model the time series structure well, the LSTM network was used, and the accuracy rate of this model was determined as 98.53%. In the complexity matrix, the model has achieved an almost perfect

distinction; The ROC-AUC was at 99.89%. LSTM has performed in parallel with the CNN and DNN models in capturing dependencies over time. The training and accuracy loss graphs obtained for DNN, CNN, and LSTM are presented with Figure 6.

5. Result and Discussion

In this study, cognitive workload levels that occur during rest and multitasking were attempted to be classified using EEG data. For this purpose, both ML and DL models were tested and compared to see which one gave more successful results. Since there was an imbalance between classes in the data set, this directly affected the model's success. As a result of the tests, the XGBoost model showed the highest success (99.4% accuracy, 0.992 F1 score, 0.990 Kappa). RF and LSTM models were also quite successful. While RF reached 98.5% accuracy and 0.976 Kappa, the LSTM model attracted attention on the DL side with 98.75% accuracy and 0.981 Kappa. This shows their suitability for models such as LSTM, especially for time-varying EEG data.

Although the CNN model falls slightly behind DNN and LSTM (with over 95% accuracy and 0.922 Kappa), it can still be considered a strong alternative. It was noticed that it was a bit confused, especially between low and high workload classes, and showed a slight tendency to over-fit. This model could perform even better with more data or some adjustments. The DNN model, on the other hand, gave consistent results in the training and validation processes. It provided a balanced approach to EEG data with 97.96% accuracy and 0.968 Kappa value. The k-NN algorithm gave lower but still acceptable results compared to the others (83.6% accuracy, 0.741 Kappa). This is most likely due to the k value not being well-tuned and the poor distance calculations in high-dimensional data. Simpler ML models, such as SVM and LR, performed lower than expected. While SVM made almost random predictions with 48.6% accuracy, the LR model had difficulty distinguishing classes, especially at medium load, with 59.7% accuracy. Overall, the XGBoost and LSTM models were the most successful in distinguishing cognitive workload levels. The main factors affecting the model's success include data imbalance, the types of features used, and the ability of the model to process time-varying data.

In this study conducted with the STEW dataset, EEG-based workload classification was tested under multi-channel and different conditions. Both ML and DL models were systematically tested in this study. In addition, methods such as channel-based fractal analysis and feature extraction by dividing into time windows were also used. According to channel-based Higuchi fractal analysis, the complexity of the signal increased during the task in some EEG channels. Time-varying EEG signals were divided into segments, which contributed to the more effective operation of time-sensitive models, especially LSTM. Several different analyses and perspectives may come to the fore in terms of future studies. In this context, end-to-end DL models that work with raw EEG data and process the signal directly instead of feature engineering can be tried. In addition, it can be understood more clearly which EEG channels or features the models are based on with methods such as SHAP or LIME. Transfer learning approaches can be applied to provide generalization across different task types or individuals. Such models can be integrated into real-time applications (e.g., driving simulations, training systems) and made more functional. In addition to EEG data, multiple systems that will work with physiological signals such as heart rate and skin conductance also have a strong potential for future research. In conclusion, the combined use of ML and DL methods has yielded quite successful results in cognitive workload classifications using EEG. This approach provides a strong option in terms of both accuracy and model diversity, creating a rich foundation for future studies.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

References

Akman Aydın, E., 2021. EEG Sinyalleri Kullanılarak Zihinsel İş Yükü Seviyelerinin Sınıflandırılması. Politeknik Dergisi 24, 681–689. https://doi.org/10.2339/politeknik.794655

Amalakanti, S., Mulpuri, R.P., Avula, V.C.R., Reddy, A., Jillella, J.P., 2024. Impact of smartphone use on cognitive functions: A PRISMA-guided systematic review. Medicine India 0, 1–8. https://doi.org/10.25259/medindia_33_2023

Archila-Meléndez, M.E., Valente, G., Gommer, E.D., Correia, J.M., ten Oever, S., Peters, J.C., Reithler, J., Hendriks, M.P.H., Cornejo Ochoa, W., Schijns, O.E.M.G., Dings, J.T.A., Hilkman, D.M.W., Rouhl, R.P.W., Jansma, B.M., van Kranen-Mastenbroek, V.H.J.M., Roberts, M.J., 2020. Combining Gamma With Alpha and Beta Power Modulation for Enhanced Cortical Mapping in Patients With Focal Epilepsy. Front Hum Neurosci 14. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.555054

Borra, D., Fantozzi, S., Bisi, M.C., Magosso, E., 2023. Modulations of Cortical Power and Connectivity in Alpha and Beta Bands during the Preparation of Reaching Movements. Sensors 23. https://doi.org/10.3390/s23073530

Chen, Z., Xu, Xianfa, Zhang, J., Liu, Y., Xu, Xianggang, Li, L., Wang, W., Xu, H., Jiang, W., Wang, Y., 2016. Application of LC-MS-based global metabolomic profiling methods to human mental fatigue. Anal Chem 88, 11293–11296. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b03421

Chikhi, S., Matton, N., Blanchet, S., 2022. EEG power spectral measures of cognitive workload: A meta-analysis. Psychophysiology. https://doi.org/10.1111/psyp.14009

Gupta, A., Siddhad, G., Pandey, V., Roy, P.P., Kim, B.G., 2021. Subject-specific cognitive workload classification using eeg-based functional connectivity and deep learning. Sensors 21. https://doi.org/10.3390/s21206710

Hamann, A., Carstengerdes, N., 2023. Assessing the development of mental fatigue during simulated flights with concurrent EEG-fNIRS measurement. Sci Rep 13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31264-w

Holding, B.C., Ingre, M., Petrovic, P., Sundelin, T., Axelsson, J., 2021. Quantifying Cognitive Impairment After Sleep Deprivation at Different Times of Day: A Proof of Concept Using Ultra-Short Smartphone-Based Tests. Front Behav Neurosci 15. https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.666146

Howells, F.M., Temmingh, H.S., Hsieh, J.H., Van Dijen, A. V., Baldwin, D.S., Stein, D.J., 2018. Electroencephalographic delta/alpha frequency activity differentiates psychotic disorders: A study of schizophrenia, bipolar disorder and methamphetamine-induced psychotic disorder. Transl Psychiatry. https://doi.org/10.1038/s41398-018-0105-y

Kamrud, A., Borghetti, B., Kabban, C.S., Miller, M., 2021. Generalized deep learning eeg models for cross-participant and cross-task detection of the vigilance decrement in sustained attention tasks. Sensors 21. https://doi.org/10.3390/s21165617

Karmakar, S., Kamilya, S., Koley, C., Pal, T., 2024. A Deep Learning Technique for Real Time Detection of Cognitive Load using Optimal Number of EEG Electrodes. IEEE Trans Instrum Meas. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3509604

Khan, M.A., Asadi, H., Zhang, L., Qazani, M.R.C., Oladazimi, S., Loo, C.K., Lim, C.P., Nahavandi, S., 2024. Application of artificial intelligence in cognitive load analysis using functional near-infrared spectroscopy: A systematic review. Expert Syst Appl. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123717

Korkmaz, O.E., Korkmaz, S.G., Aydemir, O., 2024. Detection of multitask mental workload using gamma band power features. Neural Comput Appl 36, 10915–10926. https://doi.org/10.1007/s00521-024-09627-9

Kunasegaran, K., Ismail, A.M.H., Ramasamy, S., Gnanou, J.V., Caszo, B.A., Chen, P.L., 2023. Understanding mental fatigue and its detection: a comparative analysis of assessments and tools. PeerJ 11. https://doi.org/10.7717/peerj.15744

Li, P., Zhang, Y., Liu, S., Lin, L., Zhang, H., Tang, T., Gao, D., 2023. An EEG-based Brain Cognitive Dynamic Recognition Network for representations of brain fatigue. Appl Soft Comput 146. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110613

Li, Z., Tong, L., Zeng, Y., Gao, Y., Gong, D., Yang, K., Hu, Y., Yan, B., 2024. A novel method of cognitive overload assessment based on a fusion feature selection using EEG signals. J Neural Eng 21, 066047. https://doi.org/10.1088/1741-2552/ad9cc0

Lim, W.L., Sourina, O., Wang, L.P., 2018. STEW: Simultaneous task EEG workload data set. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 26, 2106–2114. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2872924

Lorist, M.M., Boksem, M.A.S., Ridderinkhof, K.R., 2005. Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. Cognitive Brain Research 24, 199–205. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018

Mizuno, K., Tanaka, M., Yamaguti, K., Kajimoto, O., Kuratsune, H., Watanabe, Y., 2011. Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. Behavioral and Brain Functions 7. https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-17

Mundlos, P., Wulf, T., Mueller, F.A., 2024. Perceived task complexity in strategic decision situations: the role of cognitive integration and cognitive load. European Business Review. https://doi.org/10.1108/EBR-08-2024-0253

Ono, H., Sonoda, M., Sakakura, K., Kitazawa, Y., Mitsuhashi, T., Firestone, E., Jeong, J.W., Luat, A.F., Marupudi, N.I., Sood, S., Asano, E., 2023. Dynamic cortical and tractography atlases of proactive and reactive alpha and high-gamma activities. Brain Commun 5. https://doi.org/10.1093/braincomms/fcad111

Park, Y., Chung, W., 2020. A Novel EEG Correlation Coefficient Feature Extraction Approach Based on Demixing EEG Channel Pairs for Cognitive Task Classification. IEEE Access 8, 87422–87433. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993318

Roy, Y., Banville, H., Albuquerque, I., Gramfort, A., Falk, T.H., Faubert, J., 2019. Deep learning-based electroencephalography analysis: A systematic review. J Neural Eng. https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab260c

Safari, M.R., Shalbaf, R., Bagherzadeh, S., Shalbaf, A., 2024. Classification of mental workload using brain connectivity and machine learning on electroencephalogram data. Sci Rep 14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59652-w

Shafiei, S.B., Shadpour, S., Mohler, J.L., 2024. An Integrated Electroencephalography and Eye-Tracking Analysis Using eXtreme Gradient Boosting for Mental Workload Evaluation in Surgery. Hum Factors. https://doi.org/10.1177/00187208241285513

Sheng, Q., 2025. Understanding the biomechanics of smartphone addiction: The physical and cognitive impacts of prolonged device use on college students. Molecular & Cellular Biomechanics 22, 650. https://doi.org/10.62617/mcb650

Skowronek, J., Seifert, A., Lindberg, S., 2023. The mere presence of a smartphone reduces basal attentional performance. Sci Rep 13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36256-4

Stancin, I., Cifrek, M., Jovic, A., 2021. A review of eeg signal features and their application in driver drowsiness detection systems. Sensors. https://doi.org/10.3390/s21113786

Subasi, A., 2007. EEG signal classification using wavelet feature extraction and a mixture of expert model. Expert Syst Appl 32, 1084–1093. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.02.005

Sweller, J., 1988. Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. Cogn Sci 12, 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4

Sweller, J., van Merriënboer, J.J.G., Paas, F., 2019. Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. Educ Psychol Rev. https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5

Taddeini, F., Avvenuti, G., Vergani, A.A., Carpaneto, J., Setti, F., Bergamo, D., Fiorini, L., Pietrini, P., Ricciardi, E., Bernardi, G., Mazzoni, A., 2025. Extended Cognitive Load Induces Fast Neural Responses Leading to Commission Errors. eNeuro 12. https://doi.org/10.1523/ENEURO.0354-24.2024

Wang, J., 2024. Research on the Speed of Information Transmission and User Cognition in the New Media Era. Communications in Humanities Research 40, 204–210. https://doi.org/10.54254/2753-7064/40/20242397

Wang, Y., Huang, Y., Gu, B., Cao, S., Fang, D., 2023. Identifying mental fatigue of construction workers using EEG and deep learning. Autom Constr 151. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104887

Weiler, H., Russell, S., Spielmann, J., Englert, C., 2025. Mental Fatigue: Is It Real? Journal of Applied Sport and Exercise Psychology 32, 14–26. https://doi.org/10.1026/2941-7597/a000033

Zadeh, M.Z., Babu, A.R., Lim, J.B., Kyrarini, M., Wylie, G., Makedon, F., 2020. Towards cognitive fatigue detection from functional magnetic resonance imaging data, in: Proceedings of the 13th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '20. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3389189.3397648

Zafar, R., Dass, S.C., Malik, A.S., 2017. Electroencephalogram-based decoding cognitive states using convolutional neural network and likelihood ratio based score fusion. PLoS One 12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178410

Zeng, H., Li, X., Borghini, G., Zhao, Y., Aricò, P., Di Flumeri, G., Sciaraffa, N., Zakaria, W., Kong, W., Babiloni, F., 2021. An eeg-based transfer learning method for cross-subject fatigue mental state prediction. Sensors 21. https://doi.org/10.3390/s21072369

Zhou, Y., Huang, S., Xu, Z., Wang, P., Wu, X., Zhang, D., 2022. Cognitive Workload Recognition Using EEG Signals and Machine Learning: A Review. IEEE Trans Cogn Dev Syst. https://doi.org/10.1109/TCDS.2021.3090217

Zhou, Y., Jiang, J., Wang, L., Liang, S., Liu, H., 2025. Enhanced Cognitive Load Detection in Air Traffic Control Operators Using EEG and a Hybrid Deep Learning Approach. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3530091

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 480-493, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1671756

Araştırma Makalesi

Research Article

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINA SAHİP EVSEL UYGULAMALAR İÇİN HİBRİT ANAHTARLI BİR DA/AA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN FARKLI GÜÇ KOŞULLARI ALTINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Hakan AKÇA[1*], Uğur Savaş SELAMOĞULLARI[2]

[1] Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
[2] Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Yenilenebilir Enerji,
DA/AA Dönüştürücü,
Hibrit Anahtar,
Güç Faktörü,
Düşük Güç Verimliliği.

Öz

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda verimli kullanımı için hibrit anahtar yapısına sahip bir da/aa dönüştürücü ve kontrol yöntemi incelenmiştir. Konut uygulamalarında, elektrik güç talebinin büyük oranda 500 W ve altında kalması nedeniyle bu tip sistemlerde kullanılacak da/aa dönüştürücünün düşük güçlerde yüksek verimliliğe sahip olması kritik bir önem taşımaktadır. Da/aa devrelerinde yaygın olarak kullanılan IGBT anahtarı yerine paralel IGBT-MOSFET kombinasyonu ile beraber yük akımı geri besleme yöntemi kullanılarak düşük güç seviyelerinde ve farklı güç faktörlerinde verimlilik artırılmıştır. Analizlerde maksimum güç talebinin yanı sıra günlük yük değişkenliği de dikkate alınmıştır. Örneğin, 100 W gibi düşük bir güç seviyesinde hibrit anahtar kullanımı, yalnızca IGBT kullanımına kıyasla güç faktörü 1,00 ve 0,85 için sırasıyla %6,3 ve %8,0 oranında verim artışı sağlamıştır. Bu durum, hibrit anahtar yapısının yalnızca yüksek değil, aynı zamanda düşük güç faktörü koşullarında da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A HYBRID-SWITCHING DC/AC CONVERTER USED IN RENEWABLE ENERGY SUPPLIED HOUSES UNDER DIFFERENT POWER CONDITIONS

Keywords

Renewable Energy,
DC/AC Converter,
Hybrid Switch,
Power Factor,
Light Load Efficiency.

Abstract

In this study, a hybrid switch-based dc/ac converter and its control method are investigated for the efficient utilization of renewable energy sources in residential applications. Since the power demand in residential systems often remains below 500 W, achieving high efficiency at low power levels is critically important for dc/ac converters used in such systems. Instead of a conventional IGBT switch, a parallel IGBT-MOSFET combination along with a load current feedback method is employed to improve efficiency under low power levels and varying power factor conditions. In the analysis, not only the maximum power demand but also the daily load variability is taken into account. For example, at a low power level of 100 W, the hybrid switch configuration achieves an efficiency improvement of 6,3% and 8,0% compared to IGBT-only usage for power factors of 1,00 and 0,85, respectively. This indicates that the hybrid switch structure provides advantages both under high power factor conditions and under low power factor conditions.

Alıntı / Cite

Akça, H., Selamoğulları, U. S., (2025). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Kullanılan Hibrit Anahtarlı Bir DA/AA Dönüştürücünün Farklı Güç Koşulları Altındaki Performans Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 480-493.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

H. Akça, 0000-0001-9138-0755
U. S. Selamoğulları, 0000-0002-2272-4355

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	08.04.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	25.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	30.04.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

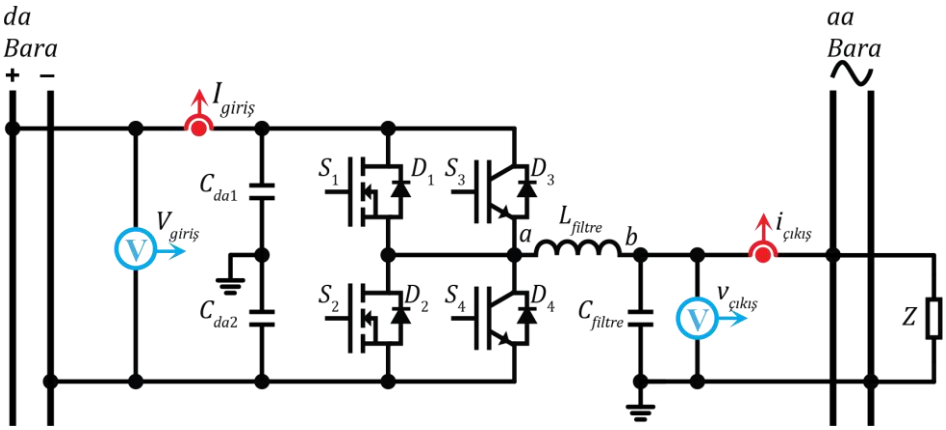
PERFORMANCE ANALYSIS OF A HYBRID-SWITCHING DC/AC CONVERTER USED IN RENEWABLE ENERGY SUPPLIED HOUSES UNDER DIFFERENT POWER CONDITIONS

Hakan Akça[1†], Uğur Savaş Selamoğulları[2]
[1] Ege University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, İzmir, Türkiye
[2] Yıldız Technical University, Faculty of Electrical and Electronics, Department of Electrical Engineering, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Hybrid switch-based dc/ac converter with load current feedback control is designed for efficient energy use for residential applications.
- Parallel IGBT-MOSFET combination and load current feedback increase efficiency at light loads and at different power factor values.
- Hybrid converter achieves efficiency improvements of 6,3% and 8,0% at power factors of 1,00 and 0,85, respectively, about 100 W output power.
- Hybrid switch operation improves efficiency over IGBT alone operation under varying power and load conditions.

Graphical Abstract



Şekil./Figure. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü (dc/ac converter with hybrid switches)

Purpose and Scope

This study aims to analyze the design of hybrid switch-based dc/ac converters to improve efficiency in residential applications, particularly at light loads and varying power factors. The study investigates the use of a parallel IGBT-MOSFET switch combination and a load current feedback method to achieve better converter performance at light loads compared to IGBT based dc/ac converter performance.

Design/methodology/approach

A hybrid dc/ac converter with a parallel IGBT-MOSFET switch combination and load current feedback method is designed to enhance efficiency in residential applications. The converter's performance is analyzed under varying power factors (1,00 and 0,85) and light load conditions.

Findings

The hybrid IGBT-MOSFET switch combination improves the dc/ac converter efficiency and hybrid converter achieves maximum efficiency improvements of 6,3% and 8,0% at power factors of 1,00 and 0,85, respectively.

Originality

This study presents a method for improving dc/ac converter efficiency, particularly at light load conditions under different power factor conditions.

† İlgili yazar / Corresponding author: hakan.akca@ege.edu.tr, +90-232-311-1817

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde enerji ihtiyacının artması, fosil yakıtların azalması ve çevresel etkiler, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Özellikle fotovoltaik (FV) paneller ve rüzgar türbini gibi yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır (Blaabjerg vd., 2004; Selamoğulları, 2020; Akça ve Ayaz, 2024). Yenilenebilir kaynakların elektriksel bir yükü beslemek için kullanıldığı sistemlerde da/aa dönüştürücüler temel bir bileşen olarak yer almaktadır. FV sistemleri ile birlikte kullanılan düşük maliyetli dönüştürücü tasarımları üzerine yapılan araştırmalarda, güç elektroniği devrelerinin optimizasyonu, enerji kalitesi vb. konularda çalışmalar yapılmıştır (Stecca vd., 2022; Zhang vd., 2024). Bu dönüştürücüler; devre topolojileri, kontrol algoritmaları ve devre bileşenleri açısından farklılık gösterebilmekte ve her bir unsurun sistem performansı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bunlar arasında yarıiletken anahtarların türü sistemin genel verimliliğini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir (Oneill, 2004).

Yarıiletken anahtarlar olarak MOSFET ve IGBT günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir yarıiletken teknolojisinin avantaj ve dezavantajları bulunduğundan, uygulama alanına göre uygun anahtar seçimi yapılmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, MOSFET'lerin düşük akım değerlerinde IGBT'lerin ise yüksek akım değerlerinde daha verimli çalıştığını göstermektedir (Marinov ve Valchev, 2009; Stecca vd., 2022). Ancak her iki anahtar tipinin de sınırlamaları nedeniyle, belirli çalışma aralıklarında tek başına kullanımları verim kayıplarına yol açabilmektedir. Bu nedenle MOSFET ve IGBT'nin paralel bağlanarak hibrit bir yapı şeklinde kullanılması önerilmiştir (Selamoğulları vd., 2010; Marinov ve Valchev, 2009; Wang vd., 2022; Long vd., 2024). İletim kaybının incelendiği bir çalışmada hibrit anahtar yapısının tek başına SiC MOSFET kullanımına göre daha düşük iletim kaybı sunduğu ve bu sayede yüksek frekanslı çalışma için daha uygun olduğu ortaya konulmuştur (Hu vd., 2023). Gecikme sürelerinin analiz edildiği bir diğer çalışmada ise hibrit yapının kesime girme kayıplarını azalttığı belirtilmiştir (Jin vd., 2024). Diğer bir çalışmada hibrit yapı için kullanılan SiC MOSFET/Si IGBT ve SiC FET/Si IGBT hibrit anahtarları karşılaştırılmış ve SiC FET tabanlı yapının daha düşük anahtarlama kaybı ve iletim gerilim düşümü sunduğu belirlenmiştir (Hu vd., 2024). Ayrıca, Si-IGBT ve SiC-MOSFET tabanlı yapılarda özel paketleme teknikleri kullanılarak düşük endüktanslı yapı elde edilerek hem düşük güç kaybı hem de yüksek termal performans sağlanmıştır (Deshpande vd., 2023).

Hibrit anahtar kullanımında, her iki anahtarın avantajlarını birleştiren kontrol algoritmaları (Jiang vd, 2022) geliştirilmiştir. Özellikle yük akımına göre anahtar seçimi yapan geri beslemeli kontrol stratejileri ile düşük güç bölgelerinde MOSFET, yüksek güç bölgelerinde ise IGBT kullanılarak dönüştürücü verimliliği artırılmaktadır (Li vd., 2022; Woldegiorgis vd., 2023; Selamoğulları vd., 2010). Anlık yük akımına göre hangi anahtarın aktif olacağı belirlenmekte ve sistemin tüm çalışma aralığında yüksek verim elde edilmesi hedeflenmektedir (Selamoğulları vd., 2010). Bu sayede, MOSFET'in düşük yüklerdeki yüksek verim avantajı ile IGBT'nin yüksek yüklerdeki düşük iletim kaybı avantajı birleştirilerek genel verimlilik artırılmaktadır (Akca vd., 2013; Quin vd., 2023). Farklı iki anahtara ait anahtarlama sinyallerinin zamanlamasının yanında genlik değerinin de değiştirilmesiyle verim arttırmaya çalışılmıştır (Xiao vd. 2024). Ayrıca, bu yapıların yüksek frekanslı anahtarlama sırasında oluşabilecek elektromanyetik parazitleri azalttığı ve sistem güvenilirliğini artırdığı rapor edilmiştir (Zhang vd., 2022). Hibrit anahtar yapılarıyla ilgili literatürde sürme devresi tasarımına odaklanan çalışmalar da bulunmaktadır. Si ve SiC gibi farklı yarıiletken teknolojilerinin birlikte kullanıldığı hibrit yapılarda, aşırı akım problemini çözmek amacıyla aktif kapı sürme devresi kullanılarak sistemin güvenli ve kararlı çalışmasının sağlanabileceği gösterilmiştir (Liu vd., 2025).

Literatürdeki hibrit yapılar çoğunlukla yüksek güçlü sistemlerde test edilmiş olup düşük güçlü konut tipi uygulamalarda kullanımları nadiren ele alınmıştır (Woldegiorgis vd., 2023; Yin vd., 2023). Oysa konut tipi sistemlerde kullanılan yüklerin çoğu 500 W ve altındaki güç seviyelerinde (Selamoğulları vd, 2010) çalışmaktadır. Ayrıca, konut tipi yükler genel olarak 1,00 ile 0,85 aralığındaki güç faktörlerinde çalışmakta olup, literatürde güç faktörünün 0,3 seviyelerine kadar düştüğü örneklere de rastlanmaktadır (Anderson vd., 2012). Bu durum, diyotlar üzerinden geçen ters yönlü akımı artırarak anahtarlama ve iletim kayıplarını yükseltmekte, dolayısıyla dönüştürücü verimliliğini azaltmaktadır. Bu bağlamda, diyotun ileri yönlü gerilim düşümünün azaltılması da verimlilik açısından önemli bir parametre haline gelmiştir (Anderson vd., 2012). Özellikle MOSFET diyotlarının düşük ileri gerilim değerleri sayesinde bu kayıpların azaltılabileceği belirtilmiştir (Stecca vd., 2022).

Kontrol algoritmalarına odaklanan diğer bazı çalışmalarda, hibrit yapıların sürülmesi için eşik akım düzeyi tabanlı geçiş stratejileri mantıklar ve çok desenli modülasyon teknikleri önerilmiştir (Selamoğulları vd, 2010; Li vd., 2022; Xu vd., 2021). Düşük frekansta IGBT ve yüksek frekansta MOSFET çalıştırılması ile farklı anahtarlama frekansı çalışmaları önerilmiştir (Li vd., 2024; Zhang vd., 2022). Ancak, bu yöntemler genellikle teorik ya da modüler çok seviyeli dönüştürücülere özgü yapılar üzerinde uygulanmış olmasına rağmen günlük yük profilini dikkate alan konut tipi sistemlerde uygulama örnekleri sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, hibrit anahtarlamalı dönüştürücülerle ilgili literatürde önemli bir birikim olmakla birlikte, bu yapının günlük yük profiline göre konut tipi uygulamalara

özel uyarlanması, akım geri beslemeli geçiş kontrolüyle birleştirilmesi ve farklı güç faktörlü yüklerin incelenmesi henüz yeterince ele alınmamıştır.

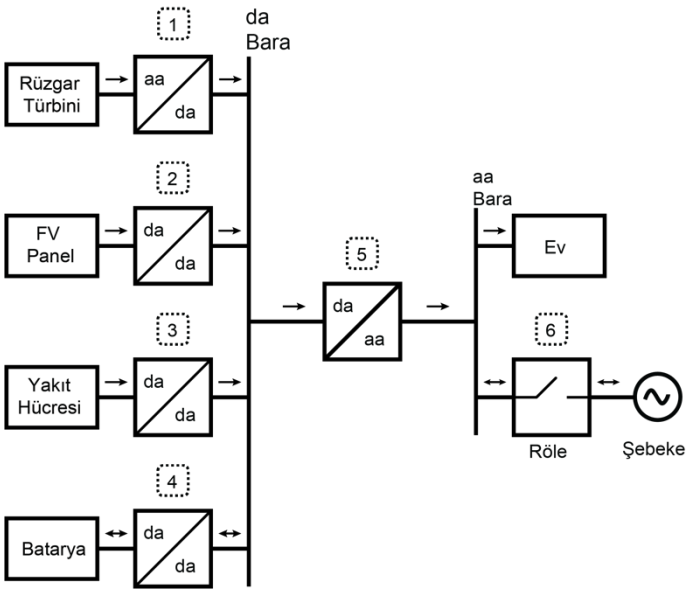
Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile beslenen bir evin günlük yük profilini dikkate alarak, MOSFET ve IGBT anahtarlarının paralel bağlandığı hibrit anahtarlı bir da/aa dönüştürücü topolojisi tasarlanmış, bu topoloji için anlık yük akımı geri beslemeli bir kontrol algoritması geliştirilmiş ve farklı güç faktörü koşullarında analizler yapılmıştır.

Makalenin organizasyonu şu şekildedir: İkinci bölümde yük karakteristikleri ile önerilen hibrit anahtarlı dönüştürücü yapısı ve kontrol algoritması sunulmuştur. Üçüncü bölümde simülasyon sonuçları ve performans analizlerine yer verilmiştir. Son bölümde ise genel sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bir evin enerji ihtiyacını aa baradan karşılayan örnek bir sistem Şekil 1'de verilmiştir. Bu şekilde, rölenin (Blok 6) konumuna bağlı olarak sistem şebeke bağlantılı (grid-connected) veya ada modu (stand-alone) çalışma modlarında çalışabilmektedir. Bu çalışmada, sadece ada modu çalışma durumu ele alınmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağından elde edilen enerji ilk olarak bir da barada toplanmakta ve ikinci aşamada ise evsel yükleri besleyebilmek için aa baraya aktarılmaktadır. Bu dönüşüm ve aktarım işlemlerinde aa/da, da/da veya da/aa dönüştürücüler kullanılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynağı ile da bara arasında kullanılacak dönüştürücünün türü, kaynağın ürettiği enerji formuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, rüzgâr enerjisinden yararlanıldığında aa çıkışlı bir generatör tercih edilirse, rüzgârdan elde edilen enerji bir aa/da dönüştürücü yardımıyla da baraya aktarılır. Öte yandan, fotovoltaik paneller, yakıt hücreleri veya bataryalar kullanıldığında, üretilen enerji da/da dönüştürücüler aracılığıyla da baraya iletilir. İkinci aşamada ise da barada toplanan enerji da/aa dönüştürücü kullanılarak aa baraya aktarılır. Bu dönüştürücü, elektriksel yüklerin ihtiyaç duyduğu gerilim genliği ve frekansta enerji sağlayarak evdeki yüklerin kesintisiz beslenmesini sağlar.



Şekil 1. Farklı enerji kaynaklarından beslenen bir eve ait blok diyagramı (Block diagram of a house powered by different energy sources)

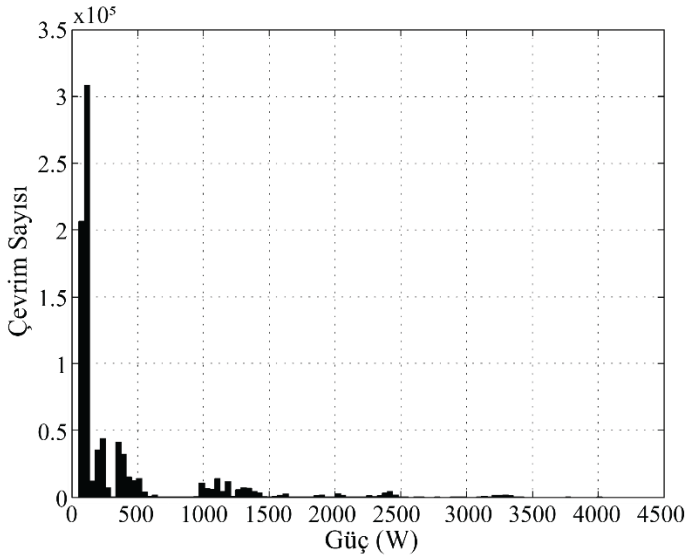
Bu çalışmada şebekeden bağımsız çalışan bir evin enerji ihtiyacının güneş gibi yenilenebilir enerji kaynağından karşılandığı senaryoda, üretilen enerjinin daha verimli şekilde kullanılması amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Bu kapsamda, bir evin günlük yük profili analiz edilmiş, bu profil doğrultusunda MOSFET ve IGBT tabanlı tipik da/aa dönüştürücü verim eğrileri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, daha yüksek verim elde etmeyi sağlayacak hibrit anahtarlama yapısı ve buna uygun bir kontrol algoritması geliştirilmiştir.

Önerilen hibrit da/aa dönüştürücü topolojisinin ve kontrol algoritmasının performansları PSIM2022 yazılımı kullanılarak simülasyon ortamında analiz edilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri

MATLAB 2023a ortamına aktarılmış ve m-file kodları ile sistemin giriş-çıkış güçleri hesaplanarak verim analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.1. Bir Eve Ait Güç Talebi Profili ve Yük Karakteristikleri (Power Demand Profile and Load Characteristics of a Residential House)

Bir evin günlük güç talebi zamana bağlı olarak farklı güç seviyelerinde değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenliğin başlıca sebepleri arasında evde yaşayan birey sayısı, cihazların çalışma süreleri ve mevsimsel faktörler gibi etkenler bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada, dört kişilik bir evden elde edilen elektriksel güç talebi verileri incelenmiş ve Şekil 2'de gösterildiği gibi güç talebinin gün boyunca değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu deneysel veriler, güç talebinin genel olarak günün büyük bir bölümünde düşük seviyelerde kaldığını, ancak bazı aktiviteler veya cihaz kullanımı nedeniyle kısa süreli yüksek güç değerlerine de çıkıldığını ortaya koymaktadır (Selamoğulları vd., 2010).



Şekil 2. Bir evin günlük güç talep dağılımı (Daily power demand distribution of a household) (Selamoğulları vd., 2010)

Şekil 2'de verilen güç dağılımı analiz edilmiş ve belirlenen güç aralıklarında güç talebinin gün içinde ne kadar sürdüğü ve buna karşılık gelen yüzde değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de düşük, orta, yüksek ve çok yüksek güç seviyesi olmak üzere dört farklı güç aralığında yükler gruplanmıştır. Bu gruplardaki cihazlar ayrıntılı olarak incelendiğinde farklı güç ve güç faktörlerinde cihazlar karşımıza çıkmaktadır. Düşük güçlü yükler grubunda yer alan buzdolabı, LED lambalar, floresan lambalar, laptop ve televizyon gibi cihazlar, günlük kullanım süresinin %85,01'ini oluşturmaktadır. Bu cihazlar genellikle düşük ve orta seviyede güç faktörüne sahiptir. Sürekli çalıştıkları için toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptirler. Orta düzey güçteki yükler ($500 \leq P \leq 1000$ W) arasında çamaşır makinesi, masaüstü bilgisayar, nem alıcılar bulunmaktadır. Bu cihazlar daha kısa süreli çalışsa da belirli zaman dilimlerinde enerji tüketimine etki etmektedir. Bu gruptaki cihazlar, günlük toplam kullanım süresinin %2,36'sını oluşturmaktadır. Yüksek güçlü yükler ($1000 \leq P \leq 1500$ W) kategorisinde bulaşık makinesi ve elektrikli süpürge yer almaktadır. Bu cihazlar genellikle yüksek güç faktörüne sahiptir, ancak kısa süreli çalıştıkları için toplam enerji tüketimi içindeki payları daha düşüktür. Günlük kullanım süresi %8,91'dir. Çok yüksek güçlü yükler ($1500 \leq P \leq 4500$ W) ise su ısıtıcısı ve çamaşır kurutma makinesi gibi cihazları içermektedir (Anderson vd., 2012). Bu cihazlar yüksek güç faktörüne sahip olup, güç tüketimleri oldukça yüksektir. Günlük kullanım süresi %3,72 olmasına rağmen, anlık güç talepleri yüksek olduğu için kullanılacak da/aa dönüştürücü tasarımı açısından dikkate alınması gereken cihazlardır.

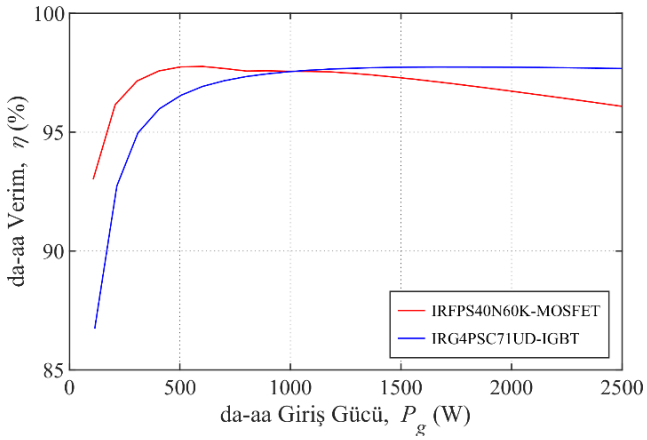
Tablo 1. Bir evdeki güç tüketiminin günlük yüzdesel dağılımı (Daily power consumption percentage distribution) (Selamoğulları vd., 2010)

Güç Seviyesi	Güç (W)	Zaman (Saat)	Yüzde (%)
Düşük	$P < 500$	20,40	85,01
Orta	$500 \leq P \leq 1000$	0,570	2,36
Yüksek	$1000 \leq P \leq 1500$	2,140	8,91
Çok Yüksek	$1500 \leq P$	0,892	3,72

Cihazların Tablo 1'de belirtilen seviyelerde güç ihtiyacını da baradan karşılayabilmek için kullanılan da/aa dönüştürücünün gün içinde büyük oranda düşük güç bölgesinde çalışması gerekecektir. Çalışma gücüne uygun olarak bu dönüştürücülerde IGBT ve MOSFET gibi yarıiletken anahtarlar kullanılmaktadır. Yarıiletken yapısı ve çalışma değerlerine (frekans, gerilim, akım, güç vb.) bağlı olarak çalışma sırasında kayıplar meydana gelmektedir. Bu nedenle, güç elektroniği sistemlerinde kayıpları en aza indirmek ve verimliliği artırmak için devre tasarımı ve bileşen seçimi büyük önem taşımaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji sistemleri gibi verimliliğin doğrudan performansı etkilediği uygulamalarda, bu kayıpların anlaşılması ve minimize edilmesi kritik bir gerekliliktir.

2.2. MOSFET ve IGBT Kullanımının da/aa Dönüştürücü Verimi Üzerindeki Etkisi (Impact of MOSFET and IGBT Utilization on dc/ac Converter Efficiency)

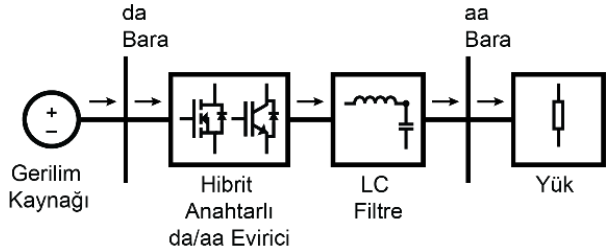
Dönüştürücü yapısında MOSFET ve IGBT kullanıldığı durumda farklı güçlerde farklı verim değerleri elde edilmektedir. Şekil 3'te MOSFET ve IGBT için elde edilmiş tipik verim eğrileri gösterilmektedir. MOSFET, özellikle düşük güç seviyelerinde daha yüksek verim sağlarken, güç seviyesi arttıkça iletim direncine bağlı kayıplar nedeniyle verimde düşüş yaşanmaktadır. Buna karşılık, IGBT yüksek güç seviyelerinde daha düşük iletim kayıplarına sahip olduğu için MOSFET'e kıyasla daha yüksek verim sağlamaktadır. Ancak, IGBT'nin anahtarlama kayıpları özellikle düşük güç seviyelerinde daha belirgin hale geldiğinden, bu bölgelerde verim düşmektedir. Eğer MOSFET ve IGBT paralel olarak hibrit yapıda kullanılırsa, her iki anahtarın avantajlarından faydalanılarak tüm çalışma bölgelerinde yüksek performanslı bir enerji dönüşümü sağlanabilir. Hibrit yapı sayesinde geniş bir çalışma aralığında daha yüksek verimli bir güç dönüşümü elde edilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 3. IRFPS40N60K MOSFET ve IRG4PSC71UD IGBT tabanlı da/aa dönüştürücü devresi verim eğrileri (IRFPS40N60K MOSFET and IRG4PSC71UD IGBT based dc/ac converter circuit efficiency curves)

2.3. Önerilen Anlık Akım Kontrol Algoritması (Proposed Instantaneous Current Control Algorithm)

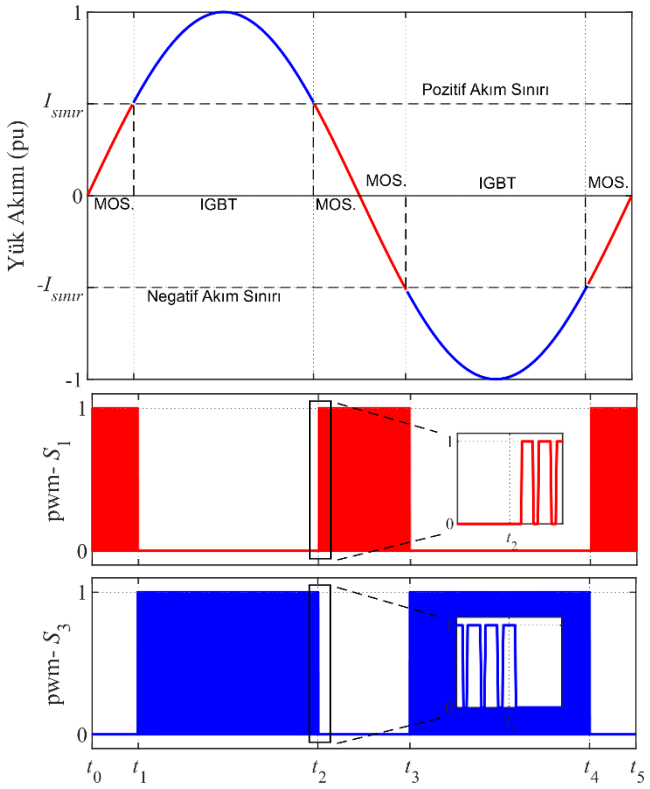
Hibrit anahtarlı devre yapısına ait blok diyagram Şekil 4'te sunulmuştur. Hibrit yapıyı gerçekleştirebilmek için yarım köprü dönüştürücü yapısındaki her bir faz kolunda paralel bağlı IGBT-MOSFET anahtar kombinasyonu kullanılmıştır. Hibrit anahtar yapısı, farklı güç seviyelerinde da/aa dönüşümü sağlamak için kullanılırken, LC filtre da/aa dönüştürücü çıkışındaki yüksek frekanslı elektriksel bileşenlerin bastırılması için kullanılmıştır.



Şekil 4. Hibrit anahtarlı devre blok diyagramı (Hybrid switch circuit block diagram)

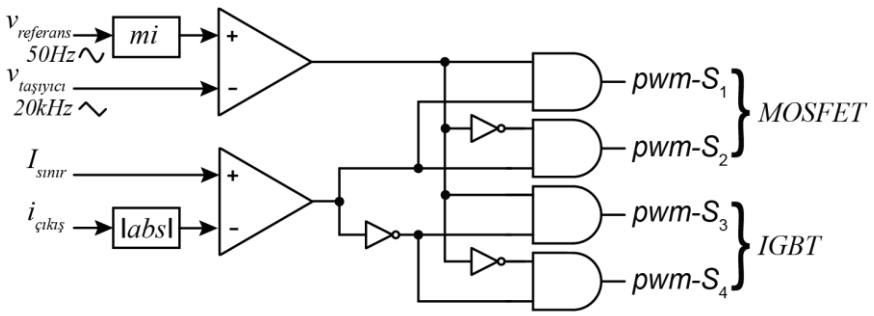
Anahtar seçimi için kullanılan yük akımı geri beslemesi için tasarlanan anlık akım kontrol algoritması ve anahtarların çalıştırılması için gerekli olan kapı sinyalleri Şekil 5'te verilmiştir. Akım geri beslemesi sayesinde uygun anahtar seçimi yapılarak dönüştürücü devresinin verimliliğinin arttırılması amaçlanmıştır. Şeklin üst kısmında verilen grafikte, sinüzoidal olarak zamanla değişen yük akımı ve anahtar seçimi için belirlenen sınır akım ($I_{sınır}$) değeri görülmektedir. Yük akımının anlık değeri ile $I_{sınır}$ akım değeri karşılaştırılarak belirli zaman dilimlerinde farklı anahtarlar devreye sokularak MOSFET ve IGBT'lerin yük akımının belirli aralıklarında aktif hale

gelmesi sağlanır. Yük akımının belirlenen pozitif ve negatif akım sınırlarının altında olduğu bölgelerde ($t_0 - t_1$, $t_2 - t_3$, $t_4 - t_5$ aralıkları) MOSFET'ler aktif durumdadır. Bu bölgelerde MOSFET'ler için uygun kapı sinyalleri üretilirken, IGBT'lere 0 seviyesinde kapı sinyali uygulanır, yani IGBT'ler bu zaman diliminde kesimde tutulur. Yük akımının belirlenen pozitif ve negatif akım sınırlarının üstünde olduğu bölgelerde ($t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$ aralıkları) IGBT'ler aktif durumdadır. Bu bölgelerde IGBT'lere kapı sinyalleri uygulanırken, MOSFET anahtarına 0 seviyesinde kapı sinyali uygulanır, yani MOSFET'ler bu zaman diliminde kesimde tutulur. Şeklin ortasında MOSFET için üretilen PWM sinyalleri verilirken en alttaki grafikte de IGBT için üretilen PWM sinyalleri verilmiştir. PWM sinyalleri, anlık yük akımına göre her iki anahtarın farklı zaman aralıklarında çalışmasını sağlayacak şekilde üretilmiştir. Bu sayede, her iki anahtarın da avantajları kullanılarak sistemin verimliliği artırılarak düşük ve yüksek güç seviyelerinde maksimum performans elde edilecektir.



Şekil 5. Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtarlama algoritması dalga şekli ve kapı sürme sinyalleri (Signal waveform of the proposed instantaneous load current feedback hybrid switching algorithm and gate driving signals)

Dönüştürücünün çalışması için gerekli olan PWM sinyallerini (Şekil 5) üretmek için Şekil 6'da şematiği verilen kontrol devresi kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü üzere 50 Hz frekanslı referans sinüzoidal sinyal ($v_{referans}$) Eşitlik (1)'de verilen modülasyon indeksi (mi) ile işleme sokularak elde edilen sinyal 20 kHz frekanslı taşıyıcı sinyali ($v_{taşıyıcı}$) ile karşılaştırılarak PWM sinyalleri üretilmiştir. Bu işlem dönüştürücü devrenin çıkışında istenilen gerilimi elde etmek üzere doğru anahtarlama işlemini sağlamak için gereklidir. Ayrıca, çıkış akımının ($i_{çıkış}$) mutlak değeri ile Eşitlik (7) ile elde edilen $I_{sınır}$ değeri anlık olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı hangi anahtarın aktif olacağını belirlemektir. $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri ile $I_{sınır}$ karşılaştırması sonucunda üretilen PWM sinyali aktif olacak anahtarlara doğrudan uygulanarak anahtarların iletime girmesi sağlanırken, pasif olacak anahtarlara 0 seviyesinde sinyal uygulanarak kesimde kalması sağlanır. Bu şekilde, uygun anahtarın çalışması sağlanarak önerilen çalışma algoritması ile verimli bir dönüştürme işlemi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6. Önerilen anlık yük akımı geri beslemeli hibrit anahtarlama algoritması devre şematiği (Circuit schematic of the proposed instantaneous load current feedback hybrid switching algorithm)

Eşitlik (1)'e göre kontrol sinyali olan referans gerilim ($v_{referans}$) ve taşıyıcı gerilim ($v_{taşıyıcı}$) oranı bize modülasyon indeksini (mi) vermektedir. Eşitlik (2)'ye göre modülasyon indeksi (mi) ile giriş da bara geriliminin ($V_{giriş}$) çarpımı ile çıkış aa bara geriliminin maksimum değeri ($V_{çıkış}$) elde edilmektedir.

$$mi = \frac{v_{referans}}{v_{taşıyıcı}} \quad (1)$$

$$V_{çıkış} = mixV_{giriş} \quad (2)$$

$I_{sınır}$ akımının değeri belirlenirken MOSFET ve IGBT kayıpları göz önüne alınmıştır. Normal şartlarda bu kayıplar iletim, kesim ve anahtarlama kayıplarından oluşmaktadır. Burada Eşitlik (3) ve Eşitlik (4) kullanılarak sadece iletim kayıplarının göz önüne alınmıştır. Bu eşitliklere göre $I_{sınır}$ akım değerinde MOSFET iletim kaybı ($P_{iletim-MOSFET}$) ve IGBT iletim kaybı ($P_{iletim-IGBT}$) birbirine eşit hale gelmektedir. Bu akım değerinin altında MOSFET iletim kaybı daha düşükken bu akım değerinin üstüne çıkıldığında IGBT iletim kaybı daha düşük olmaktadır. Bu nedenle bu akımın altında MOSFET üstünde ise IGBT'nin kullanılması kayıpların azaltılmasını sağlamaktadır. Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) kullanılarak Eşitlik (7) elde edilir. Eşitlik (7)'ye göre $I_{sınır}$ akım değeri IGBT iletim geriliminin ($V_{CE(on)}$) MOSFET iletim direncine ($R_{DS(on)}$) oranı olarak hesaplanabilmektedir.

$$P_{iletim-MOSFET} = {I_{sınır}}^2 . R_{DS(on)} \quad (3)$$

$$P_{iletim-IGBT} = I_{sınır} . V_{CE(on)} \quad (4)$$

$$P_{iletim-MOSFET} = P_{iletim-IGBT} \quad (5)$$

$${I_{sınır}}^2 . R_{DS(on)} = I_{sınır} . V_{CE(on)} \quad (6)$$

$$I_{sınır} = \frac{V_{CE(on)}}{R_{DS(on)}} \quad (7)$$

2.4. Önerilen Hibrit Anahtarlı da/aa Dönüştürücü Yapısı (Proposed Hybrid Switch-Based dc/ac Converter Structure)

Hibrit anahtar yapısı yarım köprü da/aa dönüştürücü topolojisi üzerinde kurgulanmıştır. Bu yapıyı gerçekleştirebilmek için yarım köprü dönüştürücü yapısındaki her bir faz kolunda paralel bağlı IGBT-MOSFET anahtar kombinasyonu kullanılmıştır. MOSFET anahtarı olarak International Rectifier firmasının 600 V, 40 A ve 110 mΩ iç direnç değerlerine sahip IRFPS40N60K model numaralı MOSFET (Tablo 2) ve 600 V, 40 A ve 1,67 V iletim gerilimine sahip IRG4PSC71UD model numaralı IGBT (Tablo 3) anahtarları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan IGBT ve MOSFET anahtarlara ait parametreler Eşitlik (7)'de görüldüğü devrenin çalışma noktasını ($I_{sınır}$) etkilemektedir. Bu parametreler, MOSFET diyotunun ileri yönlü gerilim düşümü 1,5 V ve IGBT diyodunun ise 1,7 V olarak teknik dökümanlardan elde edilmiştir.

Tablo 2. IRFPS40N60K MOSFET karakteristik değerleri (Characteristic values for IRF40N60K MOSFET)

Açıklama	Parametre	Değer
Anahtar maksimum gerilimi	V_{DSS}	600 V
Anahtar maksimum akımı	I_D	40A
Anahtar iletim direnci	$R_{DS(on)}$	110 mΩ
Diyot ileri yönlü gerilim düşümü	V_{SD}	1,5 V

Tablo 3. IRG4PSC71UD IGBT karakteristik değerleri (Characteristic values for IRG4PSC71UD IGBT)

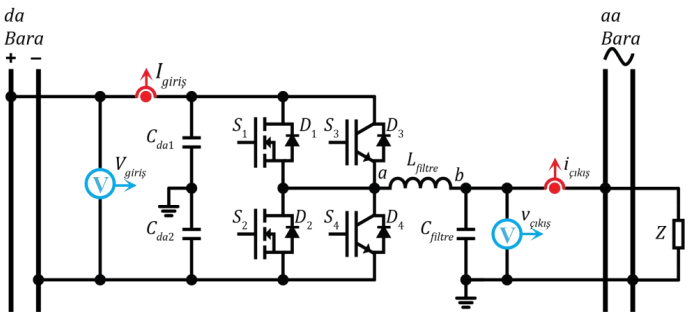
Açıklama	Parametre	Değer
Maksimum anahtar gerilimi	V_{CES}	600 V
Maksimum kollektör akımı	I_C	60A
Anahtar iletim gerilimi	$V_{CE(on)}$	1,67 V
Diyot ileri yönlü gerilim düşümü	V_{FM}	1,7 V

Devrenin çalışma parametreleri Tablo 4'te verilmiştir. Eşitlik (2)'de verilen modülasyon indeksi $mi = 0{,}85$ olarak kullanılarak girişte $V_{giriş} = 300\,V$ da bara gerilimi için çıkışta aa bara gerilimin maksimum değeri $V_{çıkış_max} = 127{,}5\,V$ olarak elde edilmiştir. Şebeke frekansı $50\,Hz$ olup anahtarlama frekansı $20\,kHz$ olarak kullanılmıştır. Devre çıkış gücü olarak $4500\,W$ seviyesinde aktif güç sağlayabilmektedir. Dönüştürücü girişinde da bara hattına bağlı her biri 4700 µF olan iki adet kondansatör (C_{da1},C_{da2}) kullanılmıştır. Dönüştürücü çıkış geriliminin filtrelenerek yüksek frekanslı bileşenlerin bastırılması için 343,5 μH değerinde filtre endüktansı (L_{filtre}) ve 14,7 µF değerinde filtre kondansatörü (C_{filtre}) kullanılmıştır. Devrede sırasıyla IRFPS40N60K ve IRG4PSC71UD kodlu MOSFET ve IGBT kullanılmıştır. Eşitlik (7) kullanılarak sınır akım değeri, MOSFET iletim direnci ($R_{DS(on)}$) ve IGBT iletim gerilimi ($V_{CE(on)}$)'nin oranından yaklaşık $15\,A$ olarak hesaplanmıştır. Ancak bu değer, yalnızca iki parametreye dayanan teorik bir yaklaşım olup simülasyonlar sırasında yapılan detaylı analizlerde, en yüksek verimin $13\,A$ akım değerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu sapmanın nedeni; diyot gerilim değerleri, anahtarlama frekansı, filtre elemanları ve yükün güç faktörü gibi diğer devre ve sistem parametrelerinin de sınır akım üzerinde etkili olmasıdır. Konut tipi sistemlerde kullanılan yükler genel olarak $cos\varphi_1 = 1{,}00$ ve $cos\varphi_2 = 0{,}85$ aralığında güç faktörleriyle çalıştığı için dönüştürücü performansı bu iki güç faktörü için incelenmiştir. Şekil 7'de hibrit anahtarlı yarım köprü da/aa dönüştürücü devreleri sunulmuş ve çalışma prensipi açıklanmıştır.

Tablo 4. da/aa yarım köprü dönüştürücü devre parametreleri (Circuits parameters of dc/ac half bridge converter)

Açıklama	Parametre	Değer
da bara gerilimi	$V_{giriş}$	$300\,V$
Modülasyon indeksi	mi	0,85
aa bara gerilimi	$V_{çıkış_max}$	$127{,}5\,V$
Şebeke frekansı	$f_{şebeke}$	$50\,Hz$
Anahtarlama frekansı	$f_{anahtarlama}$	$20\,kHz$
Nominal güç	$P_{nominal}$	$4500\,W$
Giriş kondansatörü	C_{da1},C_{da2}	$4700\,\mu F$
Filtre endüktansı	L_{filtre}	$343{,}5\,\mu H$
Filtre kondansatörü	C_{filtre}	$14{,}7\,\mu F$
MOSFET	S_1,S_2	IRFPS40N60K
IGBT	S_3,S_4	IRG4PSC71UD
Akım sınırı	$I_{sınır}$	$13\,A$
Güç faktörü	$cos\varphi_1$ $cos\varphi_2$	1,00 0,85

Şekil 7'de hibrit anahtar yapısının kullanıldığı da/aa dönüştürücüsüne ait devre verilmiştir. Yük akımı geri beslemesi kullanılarak üst ve alt kollarda bulunan paralel IGBT-MOSFET anahtar yapısında herhangi bir anda sadece bir anahtar aktif olarak çalıştırılmaktadır. $I_{sınır}$ akım seviyesine bağlı olarak anahtar seçimi yapılır. $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri $I_{sınır}$ seviyesinin altındayken ($t_0 - t_1,\ t_2 - t_3, t_4 - t_5$ aralıkları) MOSFET aktif olurken, $i_{çıkış}$ yük akımının anlık değeri $I_{sınır}$ seviyesinin üstündeyken ($t_1 - t_2,\ t_3 - t_4$ aralıkları) IGBT aktif olur. Hibrit çalışma durumunda anahtar geçişleri sırasında tek anahtarlı devreye göre yük akımı tek diyot yerine iki anahtarın diyotu üzerinden paylaşılır. Akım paylaşımı diyotların ileri yönlü gerilimi ve iç dirençlerine bağlı olarak sağlanır. Önerilen hibrit anahtar yapısı ile her bir yarıiletken anahtar kendisine uygun akım değerlerinde çalıştırılarak her bir anahtarın sunduğu avantajlar bir araya getirilerek dönüştürücü devrenin tüm güç değerlerinde daha iyi verim eğrisine sahip olması sağlanmaktadır.



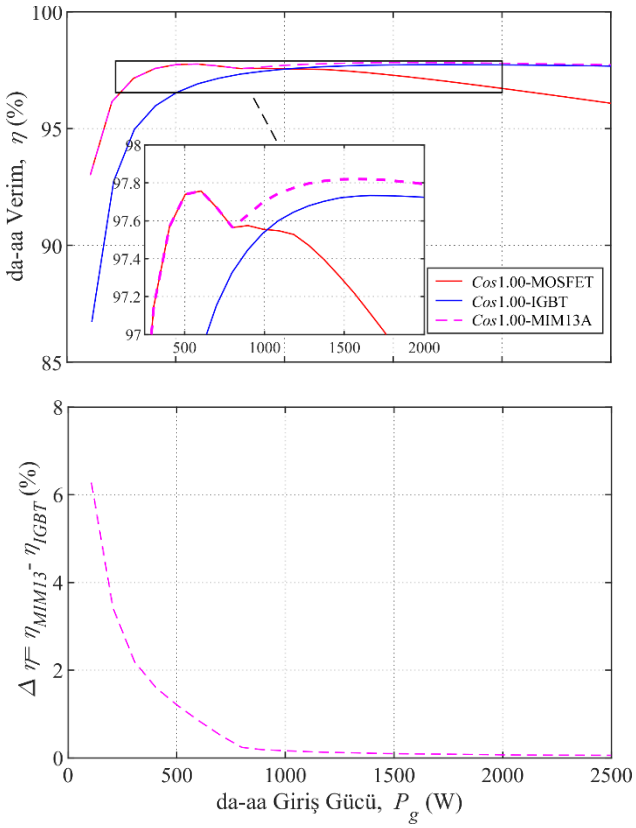
Şekil 7. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü (Hybrid switch-based dc/ac converter)

4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

Analizlerde yalnızca MOSFET içeren yarım köprü da/aa dönüştürücü, yalnızca IGBT içeren yarım köprü da/aa dönüştürücü ve anlık yük akımı geri beslemeli kontrol algoritmasının uygulandığı hibrit anahtarlı yarım köprü da/aa dönüştürücü (MIM) devre yapıları incelenmiştir. Her bir devre yapısı için giriş ve çıkış akım-gerilim değerleri PSIM programından elde edilerek MATLAB ortamında anlık giriş ve çıkış güçleri hesaplanmış, buna bağlı olarak da sistem verimliliği analiz edilmiştir. Analizlerde yük tarafında $cos\varphi_1 = 1{,}00$ ve $cos\varphi_2 = 0{,}85$ olmak üzere iki farklı güç faktöründe çalışma durumu ele alınmış ve her bir dönüştürücü yapısı için verim değerleri hesaplanmıştır. Yatay eksende dönüştürücünün 2500 W değerine kadar çıkış gücü ($Pçıkış, W$), dikey eksende ise verimlilik ($\eta, \%$) yer almaktadır. Çalışma kapsamında özellikle düşük güçteki verimlilik üzerine durulduğu için minimum 100 W ve maksimum 2500 W değerine kadar inceleme yapılmıştır.

Şekil 8'de verilen üstteki grafikte $cos\varphi_1 = 1.00$ için verilen ilk analiz sonuçlarına göre yalnızca MOSFET kullanılan yapıda maksimum verim %97,75, $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki 600 W gibi düşük bir güç seviyesinde elde edilirken aynı noktada yalnızca IGBT kullanılan yapıda ise verim %96,90 seviyesinde kalmıştır. Bu da MOSFET'e kıyasla %0,85 daha düşük bir verim anlamına gelmektedir. Öte yandan, 2500 W gibi yüksek bir çıkış gücünde, MOSFET yapısının maksimum verimi %96,10'a düşerken, IGBT yapısı %97,70 verimle çalışarak MOSFET'e göre %1,60 daha yüksek verim sağlamıştır. $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki düşük güç bölgesinde MOSFET ve üstündeki yüksek güç bölgesinde IGBT kullanımının olduğu hibrit anahtarlı yapı olan MOSFET-IGBT-MOSFET (MIM) konfigürasyonuna ait verim eğrisi incelendiğinde, MOSFET eğrisinin eğiminin işaret değiştirdiği yaklaşık 13 A akım değerine kadar hibrit yapının verim eğrisinin MOSFET'in eğrisini takip edip bu noktanın sonrasında hibrit yapının verim eğrisi hem MOSFET hem de IGBT yapıların verim eğrilerinin üzerine çıkarak daha yüksek performans göstermiştir.

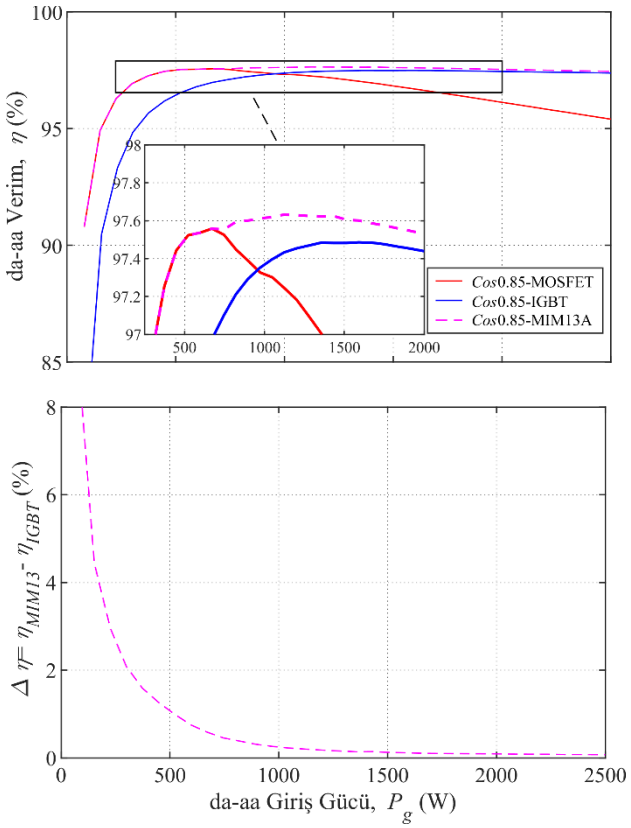
Şekil 8'de verilen alttaki grafikte hibrit yapı ile tek başına IGBT'ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Bu grafiğe göre 100 W gibi düşük güç seviyesinde hibrit yapı, yalnızca IGBT kullanımına göre %6,3 oranında daha yüksek verim sağlarken 2500 W gibi yüksek güç seviyesinde küçükte olsa %0,057 düzeyinde bir verim artışı sağlamıştır. Verim artışında, düşük güç bölgesinde MOSFET'in IGBT'ye göre sağladığı daha düşük iletim kaybı etkili olurken, yüksek güç bölgesinde MOSFET'in düşük gerilimli diyotu verim artışına katkı sağlamıştır. Buradaki etki şu şekilde açıklanabilir. Çıkışta bulunan yük uçlarında güç faktörü her ne kadar $cos\varphi_1 = 1{,}00$ olsa da çıkış filtresinden kaynaklı olarak meydana gelen endüktif etki nedeniyle da bara yönüne doğru diyotlar üzerinden ters yönde akım geçişi oluşmaktadır. Bu akım, üzerinden geçtiği diyotun ileri yönlü gerilim düşümüne bağlı olarak güç kaybına neden olmaktadır. Hibrit yapı kullanımında bu akım paralel bağlı anahtarların diyotları arasında diyotların ileri yönlü gerilimi ve iç dirençlerine bağlı olarak paylaşılır özellikle yüksek güç seviyelerinde dahi sistem verimliliğinin artmasında katkı sağlar. Bu durum, hibrit anahtar yapısının sadece düşük değil, aynı zamanda yüksek güç seviyelerinde de avantaj sağladığını göstermektedir.



Şekil 8. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü $\boldsymbol{cos\varphi_1 = 1,00}$ için güç/verim grafiği (Power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\boldsymbol{cos\varphi_1 = 1,00}$)

Şekil 9'da verilen üstteki grafikte $cos\varphi_2 = 0{,}85$ için elde edilen ilk analiz sonuçlarına göre yalnızca MOSFET kullanılan yapıda maksimum verim %97,55 olarak $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki 600 W gibi düşük bir güç seviyesinde elde edilirken aynı noktada yalnızca IGBT kullanılan yapıda ise verim %96,97 seviyesinde kalmıştır. Bu da MOSFET'e kıyasla %0,55 daha düşük bir verim anlamına gelmektedir. Öte yandan, 2500 W gibi yüksek bir çıkış gücünde, MOSFET yapısının verimi %95,35'a düşerken, IGBT yapısının verimi %97,36'ya çıkarak MOSFET'e göre %2,01 daha yüksek verim sağlamıştır. $I_{sınır}$ seviyesinin altındaki düşük güç bölgesinde MOSFET ve üstündeki yüksek güç bölgesinde IGBT kullanımının olduğu hibrit anahtarlı yapı olan MOSFET-IGBT-MOSFET (MIM) konfigürasyonuna ait verim eğrisi incelendiğinde, MOSFET eğrisinin eğiminin işaret değiştirdiği yaklaşık 13 A akım değerine kadar hibrit yapının verim eğrisinin MOSFET'in eğrisini takip edip bu noktanın sonrasında hibrit yapının verim eğrisi hem MOSFET hem de IGBT yapıların verim eğrilerinin üzerine çıkarak daha yüksek performans göstermiştir.

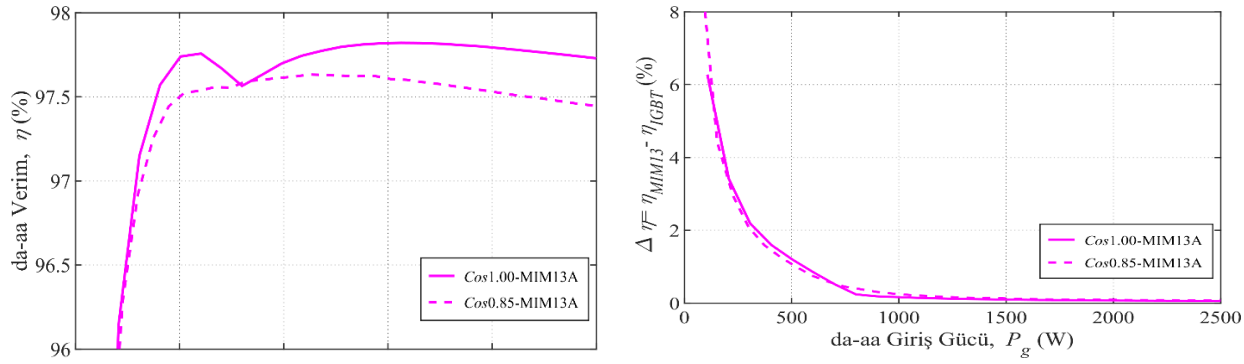
Şekil 9'da verilen alttaki grafikte hibrit yapı ile tek başına IGBT'ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Bu grafiğe göre 100 W gibi düşük güç seviyesinde hibrit yapı, yalnızca IGBT kullanımına göre %8,0 oranında daha yüksek verim sağlarken 2500 W gibi yüksek güç seviyesinde küçükte olsa %0,072 düzeyinde bir verim artışı sağlamıştır. Verim artışında, düşük güç bölgesinde MOSFET'in IGBT'ye göre sağladığı daha düşük iletim kaybı etkili olurken, yüksek güç bölgesinde MOSFET'in düşük gerilimli diyotu verim artışına katkı sağlamıştır. Önceki çalışma durumundan farklı olarak $cos\varphi_2 = 0{,}85$ olduğu durumda diyotların iletim süresi uzamış ve diyot kayıpları artmıştır. Fakat önceki durumdakine benzer şekilde hibrit yapı kullanımında bu akım yine paylaşılarak sistem verimliliğinin artmasında katkı sağlamıştır. Bu sonuca göre önerilen hibrit anahtar yapısı yalnızca birim güç faktörü altında değil, endüktif yük koşullarında da yüksek verimli çalışmayı mümkün kılmaktadır.



Şekil 9. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücü $\boldsymbol{cos\varphi_2 = 0,85}$ için güç/verim grafiği (Power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\boldsymbol{cos\varphi_2 = 0,85}$)

Şekil 10'da verilen üstteki grafikte önerilen hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücünün $cos\varphi_1 = 1{,}00$ ve $cos\varphi_2 = 0{,}85$ güç faktörleri altındaki güç-verim eğrileri karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Grafik, hibrit yapının iki farklı çalışma koşulundaki performansını ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre hibrit yapı, $cos\varphi_2 = 0{,}85$ güç faktörü için $cos\varphi_1 = 1{,}00$ güç faktörüne göre daha düşük verim sağlamıştır. Bu azalmanın temel nedeni, güç faktörünün 1,00'den sapmasıyla birlikte sistemdeki endüktif etkinin artarak diyotlar üzerinden geçen ters yönlü akım iletim süresinin artmasıdır. Güç faktörü düştükçe bu akım diyotlardan daha uzun süre geçtiği için toplam diyot iletim kayıpları da artmakta ve bu durum sistem verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, hibrit anahtarlı yapının verim avantajı, birim güç faktörüne sahip senaryolarda daha belirgin şekilde ortaya çıkarken, endüktif yüklerin baskın olduğu durumlarda diyot iletim süresinin artması nedeniyle azalmaktadır.

Şekil 10'da verilen alttaki grafikte $cos\varphi_1 = 1{,}00$ ve $cos\varphi_2 = 0{,}85$ için hibrit yapı ile tek başına IGBT'ye ait verim eğrilerinin arasındaki fark sunulmuştur. Her ne kadar $cos\varphi_2 = 0{,}85$ durumunda hibrit yapı için sistem verimi azalsa da ortaya çıkan verim farkı genel olarak yaklaşık aynı değerde kalmıştır. Dolayısıyla farklı güç koşullarında tek başına IGBT kullanımına göre hibrit yapı benzer verim artışı sağlamıştır.



Şekil 10. Hibrit anahtarlı da/aa dönüştürücünün $\boldsymbol{cos\varphi_1 = 1,00}$ ve $\boldsymbol{cos\varphi_2 = 0,85}$ için karşılaştırmalı güç/verim grafiği (Comparative power/efficiency graph of hybrid switch-based dc/ac converter at $\boldsymbol{cos\varphi_1 = 1,00}$ and $\boldsymbol{cos\varphi_2 = 0,85}$)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla hibrit anahtarlama yapısına sahip bir da/aa dönüştürücü topolojisi ve bu yapıya özgün anlık yük akımı geri beslemeli bir kontrol algoritması sunulmuştur. Önerilen hibrit yapı, MOSFET ve IGBT anahtarlarının avantajlarını bir araya getirerek farklı yük koşullarında yüksek verimlilik sağlamıştır.

Gerçekleştirilen analizlerde hibrit anahtarlı yapının farklı güç faktörleri altında yalnızca MOSFET ve yalnızca IGBT kullanılan yapılara göre özellikle düşük güçlerde %8'e varan daha verimli bir yapı sunduğunu göstermiştir. Bu verim artışı, düşük güç bölgelerinde MOSFET'in düşük iletim kaybı, yüksek güç bölgelerinde ise diyotların akım paylaşımı sayesinde diyot kayıplarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, özellikle çıkış filtresinin endüktif etkisiyle oluşan diyot üzerinden ters akım geçişlerinin arttığı çalışma koşulları için önemlidir. Önerilen yapı sayesinde, diyot iletim süresi boyunca oluşan kayıplar minimize edilmiş ve tüm çalışma aralığında sistemin genel verimliliği artırılmıştır.

Sonuç olarak, önerilen hibrit anahtarlama yapısı ve kontrol algoritması; yenilenebilir enerjiye dayalı konut uygulamalarında daha yüksek enerji verimliliği, düşük kayıplı güç dönüşümü ve farklı güç faktörü koşullarında kararlı çalışma gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Sistem, özellikle ada modunda çalışan fotovoltaik sistemler gibi uygulamalarda enerjinin daha verimli kullanımı açısından çözüm sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, önerilen hibrit anahtarlama yapısının yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan yeni nesil yarı iletken anahtarlarla (örneğin SiC, GaN-FET) performans analizleri, ayrıca doğrusal olmayan ya da hızlı değişen yük profillerinde verim değerlendirmeleri incelenmesi hibrit yapının farklı uygulama alanlarına taşınabilirliğini ve sistem genelinde sağladığı katkının sürdürülebilirliğini ortaya koyacaktır. Ayrıca, hibrit anahtar yapısındaki her iki anahtarın eş zamanlı olarak iletime girmesi durumunda oluşabilecek anahtarlar arası akım paylaşımındaki dengesizlik ve/veya iletim kayıplarındaki artış gibi olası durumlar toplam verim yanında devre elemanlarının güvenliğini de etkileyebilir. Bu nedenle bu konu hem performans hem de koruma açısından gelecek çalışmalarda daha kapsamlı şekilde ele alınacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2010-04-02-KAP03 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Akça, H., Ayaz, R., 2024. Fotovoltaik Sistem Entegreli Elektrikli Araç Şarj Sistemlerinde Optimum Kapasitenin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 12(3), 476–487.

Akca, H. ve Selamogullari, U. S., 2013. Hybrid switch use for light load efficiency improvement of a power inverter for stand-alone residential renewable energy system, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, Fransa, ss. 1–6.

Anderson, H. C., Hadi, A.A., Jones, E. S. ve Ionel, D. M., 2012. Power Factor and Reactive Power in US Residences – Survey and EnergyPlus Modeling, 10th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, September 26-29, 2021, Istanbul, TURKEY

Blaabjerg, F., Chen, Z. ve Kjaer, S. B. (2004). Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 19(5), 1184–1194.

Deshpande, A., Paul, R., Emon, A. I., Yuan, Z., Peng, H., ve Luo, F., 2022. Si-IGBT and SiC-MOSFET hybrid switch-based 1.7 kV half-bridge power module. Power Electronic Devices and Components, 3, 100020.

Hu, Z., Xu, J., Wang, Y., He, Z., Yuan, X., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2023. Comparative Study on the Characteristics of SiC FET–Si IGBT and SiC MOSFET–Si IGBT Hybrid Switches. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 11(2), ss. 1749–1761.

Hu, Z., Wang, Y., He, Z., Xu, J., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2024. Research on Characteristics of SiC FET–Si IGBT and SiC MOSFET–Si IGBT Hybrid Switches. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(2), ss. 2902–2914.

Jiang, X., Jiang, H., Zhong, X., Mao, H., Wu, Z., Tang, L., Chen, H., Cheng, J. ve Ran, L., 2022. Impact of gate resistance on improving the dynamic overcurrent stress of the Si/SiC hybrid switch, IEEE Transactions on Power Electronics, 37(11), 13319–13330.

Jin, M., Zhang, C., Wang, J., Hu, B., Yin, X. ve Shen, Z. J., 2024. A Si/SiC Hybrid Full-Bridge Inverter and Its Modulation Scheme. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(3), ss. 3425–3437.

Li, Z., Zhang, C., Yu, J., Hu, B., He, Z., Wang, J. ve Shen, Z. J., 2022. Dynamic gate delay time control of Si/SiC hybrid switch for loss minimization in voltage source inverter, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10(4), 4227–4238.

Li, N., Macavilca, M. B., Wu, C., Finney, S. ve Judge, P. D., 2024. Converter topology for megawatt scale applications with reduced filtering requirements, formed of IGBT bridge operating in the 1000 Hz region with parallel part-rated high-frequency SiC MOSFET bridge, IEEE Transactions on Power Electronics, 39(1), 799–812.

Liu, P., Liu, Y., Cao, Q., Xiao, B., Tang, M., Tu, C. ve Yu, B., 2025. Active gate driver for current overshoot suppression of SiC+Si hybrid switches with dynamic gate current regulation. *Microelectronics Reliability, 168*, 115689.

Long, L., Xiao, F., Tu, C., Guo, Q, Xiaq, B., Liu, P. ve Blaabjerg, F., 2024. Adaptive Multipattern Inverter Control of Si/SiC Hybrid Switches Based on Safe Operating Range Characteristics. IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, (12) 6, 5828-5838.

Marinov, A. ve Valchev, V., 2009. Power loss reduction in electronic inverters through IGBT-MOSFET combination. The 6th International Conference on Mining Science & Technology, 1539-1543.

Oneill, M. 2004. Silicon carbide MOSFETs challenge IGBTs. www.powerelectronics.com

Selamogullari, U. S., Torrey, D. A. ve Salon, S., 2010. A systems approach for a stand-alone residential fuel cell power inverter design, IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(3), 741–749.

Selamoğulları, U. S., 2020. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip bir evin talep karakteristiğine uygun bir inverter tasarımının incelenmesi, Politeknik Dergisi, 2020; 23(2) : 257-265.

Stecca, M., Tan, C., Xu, J., Soeiro, T. B., Bauer, P. ve Palensky, P., 2022. Hybrid Si/SiC switch modulation with minimum SiC MOSFET conduction in grid connected voltage source converters, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10(4), 4275–4287.

Qin, H., Xiw, S., Ba, Z., Liu, X., Chen, W., Fu, D. ve Xun, Q., 2023. Evaluation and Suppression Method of Turn-Off Current Spike for SiC/Si Hybrid Switch. IEEE Access, (11)2023, 26832-26842.

Xiao, B., Guo, Q., Tu, C., Xiao, F., Liu, P., Long, L., ve Blaabjerg, F., 2024. A Novel Switching Strategy Based on the Driving Voltage and Switching Sequence for Si/SiC Hybrid Switch, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 71, No. 11.

Xu, C., He, J. ve Lin, L., 2021. Research on capacitor-switching semi-full-bridge submodule of modular multilevel converter using Si-IGBT and SiC-MOSFET, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9(4), 4385–4396.

Wang, Y., Chen, M. ve Xu, D., 2022. Design of low inductance SiC-MOS/Si-IGBT hybrid module for PV inverters, IEEE Open Journal of Power Electronics, 3, 942–954.

Woldegiorgis, D., Hossain, M. M., Saadatizadeh, Z., Wei, Y. ve Mantooth, H. A., 2023. Hybrid Si/SiC switches: A review of control objectives, gate driving approaches and packaging solutions, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 11(2), 1737–1752.

Yin, T., Lin, L., Shi, X. ve Jing, K.,2023. A Si/SiC hybrid full-bridge submodule for modular multilevel converter with its control scheme. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 11(1), 327–339.

Zhang, C., Qu, K., Hu, B., Wang, J. Yin, X. (2022). A High-Frequency Dynamically Coordinated Hybrid Si/SiC Interleaved Totem-Pole PFC Converter, IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, (10)2, 2088-2100.

Zhang, C., Yuan, X., Wang, J., Hu, B., Liu, Z. ve Shen, Z. J., 2024. Si/WBG hybrid half-bridge converter using coupled inductors for power quality improvement and control simplification, IEEE Transactions on Power Electronics, 39(3), 3339–3350.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 494-508, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1631767

Araştırma Makalesi Research Article

ERZURUM BİYOLOJİK ATIKSU ARITMA TESİSİ (BAAT) İLAÇ KALINTILARININ TESBİTİ VE FOTO-OKSİDASYONLA ARITILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ZEYNEP EREN[1*], GÖKHAN YILMAZ[2]

[1]Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, TÜRKİYE
[2]Aziziye Belediyesi, 25700 Aziziye, Erzurum, TÜRKİYE

Anahtar Kelimeler

Çevrsel Mikrokirleticiler, İlaç Kalıntısı, Foto-oksidasyon, Atıksu Arıtma Tesisi.

Öz

Bu çalışmada atıksu arıtma tesislerinde geleneksel yöntemlerle arıtılamayan ve bu nedenle başta yüzey suları olmak üzere çeşitli çevresel bileşenlerde son yıllarda gittikçe artan konsantrasyonlarda rastlanan en önemli çevresel mikrokirleticilerden (ÇMK) biri olan ilaç kalıntılarının tesbiti için, Erzurum BAAT çıkış suyunda deşarj öncesi noktadan alınan arıtılmış atıksu numunesinde LC-MS/MS cihazı ile geniş bir kalıntı ilaç bileşikleri analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; Erzurum BAAT'nde Alzheimer, Analjezik, Analjezik-Antipiretik, Anestezik, Hemoreolojik, Antibakteriyal, Antidepresan, Antiepileptik, Antihipertansif, Antihistaminik, Antikolinerjik ve Spazmalotik, Antipsikotik, Grip ilacı, Antihistaminik, Mide ilacı, Nöropatik ağrı tedavisi ve Uyku bozukluğu gruplarına ait olmak üzere 55 ilaç etken madde tespit edilmiştir. Erzurum BAAT çıkış atıksu numunelerinde tespit edilen en yüksek 5 ilaç etken madde sırasıyla; Analjezik gruptan Flurbiprofen, Anestezik gruptan Pentobarbital, Nöropatik ağrı tedavisi için Gabapentin, Aneljezik gruptan Etodolac ve son olarak Antiepileptik gruptan Phenobarbital olup arıtılmış atıksudaki konsantrasyonları sırasıyla; 1375,48 µg/L, 93,82 µg/L, 41,11 µg/L, 19,03 µg/L ve 15,39 µg/L olarak analiz edilmiştir. Ardında bu numneler 366 nm dalga boyunda UV-A lamba, 312 nm dalga boyunda UV-B lamba ve 254 nm dalga boyunda UV-C lamba ile bir saat boyunca doğrudan foto-oksidasyona tabi tutulmuştur. UV-A, UV-B ve UV-C ışık kaynağından en yüksek oksidasyon verimi UV-C ışıma ile elde edilmiş ve 30 dakikalık foto-oksidasyon sonunda en yüksek konsantasyona sahip ilaç etken maddelerin suda kalan konsantrasyonları 374,13 µg/L, 84,92 µg/L, 3,71 µg/L, 0 µg/L ve 5,23 µg/L olarak analiz edilmiştir. Ayrıca foto-oksidasyon prosesi sonrası bu bileşiklerin alıcı su ortamında yaratacağı ekotoksisite değerleri de çalışma kapsamında hesaplanmıştır. Tüm ilaç kalıntıları içerisinde Flurbiprofen'in foto-oksidasyon sonunda ekotoksikolojik risk değerlendirmesinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

THE DETERMINATION OF PHARMACEUTICALS AT THE BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANT OF ERZURUM CITY AND THE INVESTIGATION OF THEIR TREATABILITY BY PHOTO-OXIDATION

Keywords

Environmental Micropollutants, Pharmaceuticals, Photo-Oxidation, Waste Water Treatment Plant.

Abstract

In this study, a comprehensive analysis of residual pharmaceuticals was performed in the treated wastewater sample taken from the discharge point in Erzurum BAAT with LC-MS/MS, which are one of the most important environmental micropollutants (EMPs) that cannot be treated by conventional treatment methods and therefore are transferred into environmental components, especially in surface waters. According to the results obtained; 55 active pharmaceutical substances belonging to the Alzheimer, Analgesic, Analgesic-Antipyretic, Anesthetic, Hemorheological, Antibacterial, Antidepressant, Antiepileptic, Antihypertensive, Antihistamine, Anticholinergic and Spasmalotic, Antipsychotic, Influenza drug, Antihistamine, Stomach drug, Neuropathic pain treatment and Sleep disorder groups were detected in Erzurum BAAT. The highest 5 drug active substances detected in Erzurum WWTP effluent samples were Flurbiprofen from Analgesic group, Pentobarbital from Anesthetic group, Gabapentin for neuropathic pain treatment, Etodolac from Analgesic group and finally Phenobarbital from Antiepileptic group and their concentrations in treated wastewater samples were analyzed as 1375,48 µg/L, 93,82 µg/L, 41,11 µg/L, 19,03 µg/L and 15,39 µg/L, respectively. Then, these samples were subjected to direct photooxidation with UV-A lamp at 366 nm wavelength, UV-B lamp at 312 nm wavelength and UV-C lamp at 254 nm wavelength for one hour. Among UV-A, UV-B and UV-C light sources, the highest oxidation efficiency was obtained with UV-C irradiation and at the end of 30 min. photooxidation, the remaining concentrations of these active pharmaceutical compounds were analyzed as 374,13 µg/L, 84,92 µg/L, 3,71 µg/L, 0 µg/L and 5,23 µg/L, respectively. Ecotoxicological risk assessment of the receiving environment was also performed based on the remaining pharmaceutical concentrations. Ecotoxicological risk assessment of flurbiprofen as a result of photo-oxidation was determined as High Risk (HR) still.

[*] İlgili yazar / Corresponding author: zeren@atauni.edu.tr, +90-442-231-4606

Alıntı / Cite

Eren, Z., Yılmaz, G., (2025). Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde (BAAT) İlaç Kalıntılarının Tespiti ve Foto-oksidasyonla Arıtılabilirliğinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 494-508.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
Z. EREN, 0000-0003-1633-2547	**Başvuru Tarihi / Submission Date**	03.02.2025
G. YILMAZ, 0009-0004-0340-0808	**Revizyon Tarihi / Revision Date**	23.03.2025
	Kabul Tarihi / Accepted Date	12.05.2025
	Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

THE DETERMINATION OF PHARMACEUTICALS AT THE BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PLANT OF ERZURUM CITY AND THE INVESTIGATION OF THEIR TREATABILITY BY PHOTO-OXIDATION

Zeynep Eren[1†], Gökhan Yılmaz[2]

[1]Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 25240 Erzurum, TÜRKİYE

[2]Aziziye Belediyesi, 25700 Aziziye, Erzurum, TÜRKİYE

Highlights

- 55 different active pharmaceuticals substances were detected in the discharge point of Biological Wastewater Treatment Plant of Erzurum City
- The highest concentration was determined as Flurbiprofen from the Analgesic group with 1375,48 µg/L.
- Over 90% photo-oxidation efficiency by UV-C was obtained for Gabapentin and Etodolac.
- It was determined that after photooxidation with UV-C, the pharmaceuticals still pose high ecotoxicological risk to the receiving water environment due to their high initial concentrations.

Graphical Abstract

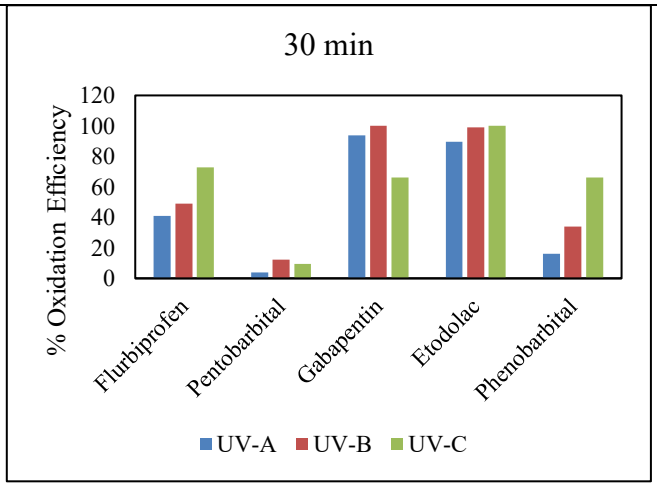


Figure. The photo-oxidation (UV-A, UV-B, UV-C) of pharmaceuticals that have the highest concentrations in Erzurum BWWTP

Purpose and Scope

In recent years, many micropollutants in wastewater have been discharged to surface waters because they cannot be treated by conventional or biological processes. Pharmaceuticals are a large group of these micropollutants and pose a threat to the water environment. Therefore, pharmaceuticals remaining in Erzurum BWWTP's effluent were analyzed, their degradability by photooxidation was examined and an ecotoxicological risk assessment was done for the environment to which they were discharged. Thus, a pioneer study was developed for the integration of advanced treatment processes to the classical WWTP for the treatment of these pharmaceuticals before their discharge to the receiving environment.

† Corresponding author: zeren@atauni.edu.tr, +90-442-231-4606

Design/methodology/approach

The main method includes the use of a UV-oxidation process, that was integrated into the whole treatment of wastewater which ends up with secondary biological treatment. This may further lead to the photooxidation of pharmaceuticals in treated wastewater before discharging them into the water environment. The theoretical scope of the paper is to investigate whether the pharmaceutical's ecotoxicological effects are reduced or not by an advanced oxidation process before discharging into the river. Therefore, the ecotoxicological risk analysis was also evaluated to assess the effect of the advanced oxidation process, UV oxidation. In the study, photo-oxidation experiments were conducted on wastewater samples taken from Erzurum BAAT using UV-A, UV-B and UV-C light sources. Pharmaceutical residues in the samples were analyzed with LC-MS/MS device and oxidation efficiencies were measured using three different UV sources. In addition, environmental risk assessment of pharmaceuticals residues was performed after the photo-oxidation processes.

Findings

55 different drug active ingredients were detected in Erzurum BAAT effluent. The pharmaceuticals with the highest concentrations include Flurbiprofen, Pentobarbital, Gabapentin, Etodolac and Phenobarbital. In oxidation experiments conducted with UV-C radiation, over 90% treatment efficiency was achieved for some pharmaceuticals such as Gabapentin and Etodolac. However, the photo-oxidation efficiency of some pharmaceuticals such as Flurbiprofen was lower. UV-C was generally determined to be the most effective oxidation method. Environmental risk assessment of pharmaceuticals residues remaining after UV-C oxidation was conducted. Flurbiprofen poses a high risk (High Risk, HR), while other pharmaceuticals (Phenobarbital, Pentobarbital, Gabapentin) pose a negligible risk (Insignificant Risk, IR). Etodolac was completely oxidized and the risk was eliminated.

Research limitations/implications

The main limitation was that the concentrations of pharmaceuticals had a fluctuation instead of a stable concentration during the sampling period. This has an important effect on the treatment method, UV-oxidation. Therefore, samples should be collected for a definite period and then subjected to an advanced oxidation process. This implies that a neutralization tank before applied to any oxidation process at the WWTP.

Social Implications

Inadequately treated wastewater poses a risk to aquatic life. The processes of WWTPs are not designed for the emergence of new organic pollutants, so they are inadequately treated in these classical treatment processes. Therefore, these emergency pollutants rapidly affect our water resources and even can pollute drinking water sources. Moreover, since WWTP is designed for classical pollutants, there are no standards for these new pollutants. The results presented in this study have the potential to draw attention to these new pollutants and to help with legal regulations to be made for receiving water media in the future.

Originality

Extensive scanning of all pharmaceuticals, and UV oxidation of them by considering ecotoxicology risk assessment at the wastewater discharged from Erzurum BWWTP was the first time studied in the literature.

1. Giriş (Introduction)

Sanayi ve teknoloji alanında gelişmeler her geçen gün hızla artmakta bunun sonucu olarak insan yaşam kalitesini artıran birçok ürün üretilmektedir. Her yeni ürünün üretilme süreci ise pekçok yeni kimyasal bileşiğin hayatımıza girmesine ve sonuç olarak eser miktarlarda da olsa toprağa, suya, havaya veya besin zincirleri yoluyla çevreye karışması anlamına gelmektedir. Temel olarak besin maddelerinin uzaklaştırılması için tasarlanan geleneksel atık su arıtma tesisleri, bu yeni ortaya çıkan kimyasalları yalnızca sınırlı bir ölçüde arıtabilir, dolayısıyla çevre için önemli bir yayılım kaynağını temsil ederler (Gupta et al., 2024; Gülcan, 2019). Böylelikle bu kimyasalların çevresel bileşenlerde her geçen gün miktar ve tür olarak artışı endişe yaratmaktadır. Bu kirleticiler genel olarak Çevresel Mikro Kirleticiler (ÇMK) olarak adlandırılmakta ve nano ile mikrogram seviyelerinde çeşitli çevresel bileşenlerde tespit edilmektedirler. Bu ÇMK'ler temel olarak pestisitler, kalıcı organik kirleticiler, alev geciktiriciler, hormonlar, endokrin bozucular, yüzey aktif maddeler, eser metaller, ilaç kalıntıları, kişisel bakım ürünleri ve mikroplastikler olarak tanımlanmaktadırlar. ÇMK'ler doğal özelliklerine göre değişiklik gösterirler ve genel olarak organik (poliklorlu bifeniller, poliaromatik hidrokarbonlar, organoklorlu pestisitler, DDT, hormonlar, EDC, pestisitler) ve inorganik (ağır metaller) olarak sınıflandırılırlar (Abbasi et a. 2022; Afzaal et al, 2022; Ahmed et al., 2022). Tablo 1'de bu ÇMK'lerin sınıflandırılması ve önemli türleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Sucul Ortamdaki Çevresel Mikrokirleticiler, Önemli Türleri ve Kaynakları (Environmental Micropollutants in Aquatic Environment, Major Types and Sources)

Çevresel Mikrokirletici Grupları	**Önemli Türleri**	**Çevresel Mikrokirletici Kaynakları**	
		Noktasal kaynaklar	***Belirgin bir kaynağı olmayan kaynaklar***
İlaç kalıntıları	Antienflamatuar ilaçlar, antidepresan ilaçlar, antibiyotikler, β-blokerler vb.	Evsel atıksu, hastane atıksuyu, hayvan çiftlikleri ve balıkçılık üretim tesisleri	Endüstriyel üretimden kaynaklanan atıksular Depolama sahası sızıntı suyu
Kişisel bakım ürünleri	Dezenfektanlar, güneş koruyucular, parfümler vb.	Evsel atıksu, klinik-hastane atıksuyu	
Steroidler ve hormonlar	Doğal veya sentetik östrojenler	Evsel atıksu, hayvan çiftlikleri ve balıkçılık üretim tesisleri	
Yüzey aktif maddeler	Deterjanlar, sabunlar vb.	Evsel ve endüstriyel atıksu	
Endüstriyel kimyasallar	BPA, Fitalat gibi plastikleştiricler ile PFAS gibi tutuşmayı engelleyici kimyasallar vb.	Evsel atıksu	
Pestisitler	Böcek, mantar, zararlı ot öldürücü ilaçlar vb.	Evsel atıksu ve tarımsal alanlar	

Son yıllarda göl, nehir, dere gibi yüzey suları ile yer altı suları, arıtma tesisinden gelen sular ve atık sular gibi hemen hemen tüm sucul ekosistemlerde ilaç kalıntıların mevcut olduğu bulunmuştur. Farmasötik olarak aktif mikro kirleticiler tıp, biyoteknoloji, tarım, hayvancılık, gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İlaçların ana kaynakları insan ve veterinerlik uygulamaları olsa da başlıca kanalizasyona bağlı arıtma tesisleri tarafından çevreye salınırlar (Pomiès et al., 2013; Peake et al., 2016). Yıllık küresel kullanımının yaklaşık 100,000 ton ve üzerinde olduğu tahmin edilen ilaç kalıntıları, bir organizma tarafından kullanıldıktan ve tüketildikten sonra metabolitler olarak idrar akıntısı ve dışkıyla atılırlar. Son otuz yıldır sucul ekosistemde tespit edilen ilaç kalıntıları şu şekilde sıralanabilir: Anti-inflamatuarlar ve analjezikler, hormonlar, antibiyotikler, antiepileptikler, antidepresanlar, lipid düşürücü maddeler, antihistaminikler, β-blokerler, narkotik ilaçlar vb. (Bush 1997; Ternes, 1998; Heberer, 2002). Örneğin, hormonlar ve antibiyotikler, sucul canlılarda endokrin bozulmalara ve antibiyotik direncine yol açabilmektedir. İnsan sağlığı açısından ise, içme sularında düşük konsantrasyonlarda bulunan ilaç kalıntılarının uzun vadeli etkileri henüz tam olarak anlaşılamamıştır, ancak potansiyel riskler taşıdığı düşünülmektedir (Fent et al., 2006; Boxall et al., 2012).

AAT'leri mevcut durumda bu tür kirleticileri ortadan kaldıracak şekilde dizayn edilmemiştir. Bunun nedeni, ilaç kalıntılarının biyolojik olarak parçalanabilirliği zayıf ve hidrofilikliği iyi olduğundan, atıksu arıtımında kullanılan klasik yöntemlerle arıtımını zorlaştırmaktadır (Luo et al., 2014). Bu durum, kullanılmayan ilaçların yüzey sularına karışmasına neden olmakta ve sucul ekosistem üzerinde olumsuz etkiye yol açmaktadır. Hatta su kaynakları yoluyla ilaç kalıntıları içme sularına bile ulaşabilmektedir (Jjemba, 2018; Srinivasulu et al., 2022). Farmasötik

bileşikler ve metabolitleri, kimyasal yapısındaki özelliklere göre örneğin; hidrofobiklik, biyolojik bozunabilirlik, adsorpsiyon-absorpsiyon özellikleri, seyrelme veya parçalanma yoluyla doğal bozunma sürecine maruz kalırlar. Bir kez su kaynaklarına giren ilaç kalıntıları çeşitli bozunma mekanizmalarına maruz kaldığı için su kaynaklarına eser miktarlarda ulaşırlar. Ayrıca içme suyu arıtma tesislerinde de bir miktar arıtılmaya uğrayarak konsantrasyonları prosesin türüne bağlı olarak düşebilir. Ancak her geçen gün artan ilaç kullanım oranı göz önüne alındığında ve ilaçlarının birçoğunun insan vücudundan atılma oranları da yüksek olduğu için atıksu arıtma tesisleri kanalıyla çevreye yayılım hızları artmaktadır (USEPA, 2024) ve tek bir arıtma yöntemini etkin verimle belirlemek kolay olmamaktadır. Bu nedenle içme suyundaki mevcut konsantrasyonları bile kronik olarak insan sağlığı için bir tehdit oluşturmaktadır (Eren, 2018; Eren and O'Shea, 2019; Kumar et al., 2023) ve genellikle İleri Oksidasyon Prosesleri (İOP) ile arıtılabilmektedir (Sharma et al., 2012). Ozonlama, aktif karbon filtrasyonu, membran filtrasyonu ve diğer İOP daha etkili olmakla birlikte, yüksek maliyetleri ve enerji gereksinimleri nedeniyle kullanımları sınırlı olmaktadır (Esplugas et al., 2007; Rivera-Utrilla et al., 2013).

Geleneksel biyolojik arıtma yöntemleri, farmasötiklerin düşük konsantrasyonlarda ve biyolojik olarak parçalanamayan formlarda olması nedeniyle genellikle yetersiz kalmaktadır. Özellikle doğal güneş ışığını simüle eden dinamik yapay ışınlama koşulları altında bir fotoreaktörün atık su arıtma tesislerinden gelen mikro kirleticileri gidermedeki etkinliğini son yıllarda öne çıkan araştırma konularındandır. Özellikle güneş enerjisini kullanan foto-oksidasyon teknolojilerinin, kalıcı ÇMK gidermek için mevcut biyolojik arıtma süreçlerini tamamlayabileceği ve böylece arıtılmış atık suyun yeniden kullanım için kalitesinin artırabileceği de öne sürülmektedir (Birce et al., 2022). Literatürde foto-oksidasyon ya da fotokatalitik oksidasyon prosesleri ilaç kalıntılarının sudan uzaklaştırılmasında etkili bir yöntem olarak bilinmektedir ve genellikle son işlem (polishing) olarak kullanılmaktadır. İlaç kalıntılarının arıtılmasında fotooksidasyon prosesleri, özellikle ultraviyole (UV) ışınları ve katalizörler (örneğin TiO_2) kullanılarak gerçekleştirildiğinde, farmasötiklerin yüksek oranda giderilmesini sağlar. Örneğin, diklofenak, ibuprofen ve kloramfenikol gibi yaygın ilaç kalıntılarının %90'ın üzerinde giderim verimliliği elde edilmiştir (Achilleos et al., 2010; Rizzo et al., 2009). Fotooksidasyon prosesleri, ilaç kalıntılarının toksik ana bileşiklerini daha az toksik veya toksik olmayan metabolitlere dönüştürür. Örneğin, diklofenak gibi anti-inflamatuar ilaçların fotooksidasyonu sonucu oluşan ara ürünlerin toksisitesi, ana bileşiğe göre önemli ölçüde düşüktür (Czech et al., 2014). Bu süreç, atıksulardaki kirleticilerin çevresel etkilerini azaltarak sucul ekosistemlerin korunmasına katkıda bulunur. Ayrıca fotooksidasyon prosesleri, genellikle biyolojik olarak zor parçalanan ilaç kalıntılarının karbondioksit (CO_2), su (H_2O) ve inorganik asitlere kadar tamamen parçalanmasını yani mineralizasyonunu sağlayabilir (Chong et al., 2010). Ayrıca, fotooksidasyon prosesleri, kimyasal çöktürme veya adsorpsiyon gibi diğer fizikokimyasal yöntemlere kıyasla atık çamur üretmez ve ikincil kirlilik riskini azaltır (Paz, 2010). Fotooksidasyon prosesi, atıksulardaki farmasötik konsantrasyonlarını önemli ölçüde azaltır. Örneğin, diklofenak ve metoprolol gibi yaygın farmasötiklerin konsantrasyonları, fotooksidasyon sonrasında ng/L seviyelerine kadar düşürülebilmektedir (Qin et al., 2012).

İlaç kalıntılarının çevresel etkileri değerlendirilirken hem çevresel zararlar hem de çevresel riskler açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Çevresel zarar, farmasötik bileşiğinin doğal çevreye zarar verebilen kalıcılık ve biyolojik birikim özelliklerini ifade eder. Kalıcılık, su ortamındaki bozulmaya direnme yeteneği olarak tanımlanırken, biyobirikim, suda yaşayan organizmaların dokularında birikim ve suda yaşayan organizmalar için potansiyel toksik etki olarak ifade edilir. Öte yandan çevresel risk, su ortamındaki toksisite riskini ifade eder ve maddenin su ortamındaki tahmini çevresel konsantrasyonu ile bu maddenin su ortamı üzerinde zararlı etkileri olmayan en yüksek konsantrasyonu arasındaki orana dayanır. Bu oran risk katsayısı, RQ (Risk Quotient) olarak ifade edilir (Eren, 2025). Bu çalışmada arıtma tesisinden biyolojik olarak arıtılmış çıkış suyundan deşarj öncesi atıksu numunelerinden alınan numunelerde LC-MS/MS cihazı ile kalıntı ilaçlar önce tespit edilmiş ve ardından bu bileşiklerin üç farklı dalga boyuna sahip ışık kaynağı kullanılarak oksidasyon sonucunda kalan konsantrasyonları ölçülmüştür. Böylelikle arıtma tesisi çıkış suyundaki ilaç kalıntılarının foto-oksidasyon ile arıtılabilirliği ve ekotoksisite değerlendirilmesi ortaya koyulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Erzurum Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi, BAAT (Erzurum Biological Wastewater Treatment Plant, BWWTP)

Erzurum BAAT Merkez Aziziye ilçesine bağlı Kuşçu Köyü mevkii Ferah mahallesi bitişiğinde Karasu nehri ve Pülür çayının kuzeyinde yer almaktadır. Şekil 1'de tesisin görüntüsü yer almaktadır. Erzurum şehir merkezinde toplanan atıksu yaklaşık 15 km'lik ve 1200 mm çapında kanalizasyon hattıyla taşınıp 2400 mm çapında 300 m beton boru ile tesise ulaştırılmaktadır. Erzurum BAAT, Biyolojik Proses Havuzlarında max. 130,000 m3/gün atıksu debisini ve aşağıdaki kirlilik yüklerini arıtabilecek biçimde dizayn edilmiştir. Tesisin 1. kademesi 444,934 kişilik evsel nüfusa ve 56,700 kişilik endüstriyel nüfusa göre; 2. kademesi ise 528,595 kişi evsel ve 58,733 kişi endüstriyel nüfusa göre dizayn edilmiştir. Aktif çamur prosesi karbon ve azot gierim esasına dayanmaktadır. Tesise gelen

atıksu önce 8 cm aralıklı kepçe tipi giriş kaba ızgara ardından 2 cm aralıklı mekanik temizlemeli kaba ızgaradan geçirilerek atıksu içerisindeki 2 cm ve üzerindeki katı maddeler tutulmaktadır. Atıksu, yaklaşık 6,8 m terfi pompalarıyla yükseltilerek cazibeli ile akımı sağlanır ve 6 mm aralıklı mekanik temizlemeli ince ızgaradan geçirilir. Buradan çıkan atıksu iki bölmeli havalandırmalı kum-yağ tutucuya gönderilir ve inorganik madde havuz dibine hava yardımıyla çökeltilerek, yüzer maddelerde (yağ, köpük vs.) havuz yüzeyinden ayrılır. Ardından atıksu ön çöktürme havuzlarına gönderilir ve debiye bağlı olarak burada dinlendirildikten sonra savaklanarak atıksu ara terfi merkezine girer ve buradan da havalandırma tanklarına yüklenir. Havalandırma havuzlarında nitrifikasyon-denitrifikasyon proseslerinin gerçekleşmesi sağlanarak atıksudaki azot, karbon, fosfor ve diğer organik maddelerin birlikte arıtımı sağlanır. Havalandırma havuzundan çıkan atıksu son çöktürme ünitesine iletilir ve savaklanarak önce Pülür Çayına ve sonrasında Karasu Nehrine deşarj edilir. Fazla çamur ise çamur pompası vasıtasıyla Çamur Binasına gönderilir. Tesiste günlük ortalama 3650 m3/h atıksu arıtılarak Karasu Nehrine deşarj edilmektedir (ESKİ 2024).

Şekil 1. Erzurum BAAT görüntüsü (Google Earth 2022).(general view of Erzurum BWWTP (Google Earth 2022))

2.2. Numune Alma ve Analiz (Sampling and Analysis)

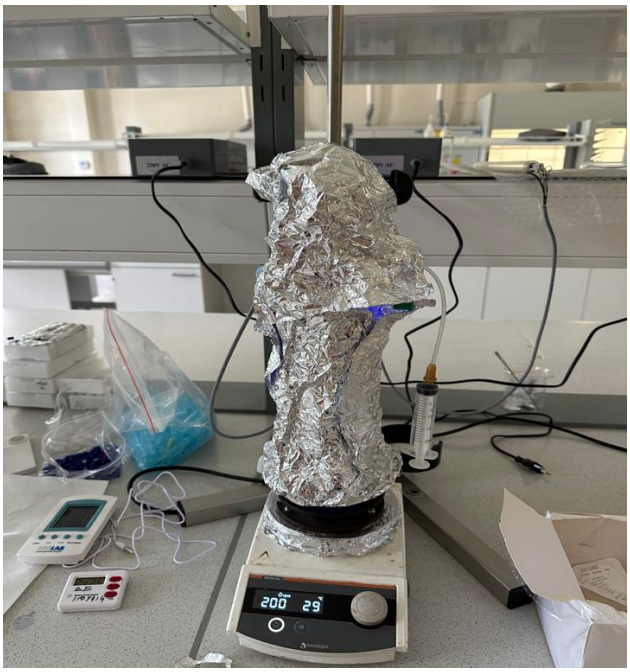
Erzurum BAAT deşarj noktasındaki çıkış suyu numuneleri tesis uzman personeli tarafından numune alma koşullarına uygun olarak alınmış ve +4 ^{o}C'de saklanarak hızla laboratuvara ulaştırılmıştır. Erzurum BAAT'ne ait teknik ve işletme verilerinin temini ile numune alma işlemleri Atatürk Üniversitesi ve Erzurum Büyükşehir Belediyesi arasında imzalanan ikili protokol kapsamında gerçekleştirilmiş ve bu çalışmada kullanılmıştır. LC-MS/MS (Agilent Technology 6460 Triple Quad LC/MC) analizleri hizmet alımı ile Atatürk Üniversitesi Merkezi Laboratuvarlarında (DAYTAM-Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi) yaptırılmıştır. LC-MS/MS, çoklu analiz tayininin yanı sıra numunelerdeki eser miktardaki analitlerin tayini için tercih edilen en hassas metotlardan biridir. Ölçüm hassasiyeti µL numune hacimlerinde ng, pg düzeyinde bir duyarlılığa sahiptir. Bu nedenle özellikle son yıllarda su ve atıksu numunelerinde birçok eser miktardaki bileşiklerin analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tablo 2'de ilaç kalıntılarının analiz edilmesi için cihazda kullanılan metot bilgisi yer almaktadır.

Tablo 2. LC-MS/MS Cihazında Kullanılan Metot. (Method for LC-MS/MS)

Metot	**Açıklama**
Kolon	Zorbax Eclipse XDB-C8 4,6 x 150 mm, 5-micron
Mobil Faz-A	5 mM amonyum asetat-H_2O çözeltisi
Mobil Faz-B	95/5 (asetonitril/10 mM amonyum asetat-H_2O çözeltisi)
Enjeksiyon Hacmi	5 µL (BPA için), 10 µL
Akış Süresi	12 dak. (BPA için), 14 dak.
Kolon Sıcaklığı	30 ^{o}C (BPA için), 40 ^{o}C
Akış Hızı	0,7 mL/min (BPA için), 0,6 mL/min

2.3. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Çalışmada UV-A, UV-B ve UV-C dalga boylarında üç farklı ışık kaynağı kullanılmıştır. Lambalar UVL3000 serisi olup The Vilber Lourmat firmasından temin edilmiştir. UV-A lamba 366 nm dalga boyunda, UV-B lamba 312 nm dalga boyunda ve UV-C lamba 254 nm dalga boyunda ve 8'er W gücündedir. Lambaların ışık şiddetleri sırasıyla 820 µW/cm2 720 µW/cm2 ve 520 µW/cm2'dir. Çalışmada kullanılan deneysel sistem Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. İlaç kalıntılarının foto-oksidasyonu için kullanılan deney sistemi. (The experiemntal system used for the photo-oxidation of pharmaceuticals)

Erzurum BAAT'nden getirilen arıtılmış atıksu numuneleri kaba filtreden (90 mm) süzüldükten sonra deney hacmi 750 mL olan ve 24 ^{o}C'de sabit tutulan reaktörde 30 dakika boyunca atıksuyun kendi doğal pH'sinde (pH=8) UV-A (366 nm), UV-B (312 nm) ve UV-C (254 nm) ışık kaynakları ile ayrı ayrı oksidasyona tabi tutulmuştur. UV oksidasyonu esnasında deney çözeltisi 200 rpm hızda karıştırılmıştır. UV lambalar 33 cm uzunluğunda olup reaktördeki çözeltiye 16,5 cm daldırılmışlardır. Oksidasyon sonunda alınan numuneler LC-MS/MS metodu ile analiz edilmiştir. Deney çözeltisinde 1 saat boyunda doğrudan reaktöre daldırılarak kullanılan UV lambaların çözelti içinde ışık şiddeti Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır (URL-1, 2020):

$$\text{UV dozu } \mu Ws/cm^2 = [\text{UV ışık şiddeti } (\mu W/cm^2) \text{ x maruz kalma süresi (saniye)}] \quad (1)$$

2.4. RQ Hesaplamaları

Bu çalışmada Erzurum BAAT'nde tespit edilen ilaçların ekolojik riskleri yaygın olarak kullanılan RQ kullanılarak değerlendirilmiştir. RQ değerini hesaplamak için bazı parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar;

- MEC/PEC: Ölçülen veya tahmin edilen çevresel konsantrasyon-Measured or Predicted Environmental Concentration
- PNEC: Çevrede zararlı bir etki meydana getirmeyen en yüksek konsantrasyon-Predicted Non Effect Environmental Concentration

PNEC konsantrasyonu Eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PNEC = EC_{50} \text{ ya da } LC_{50} / AF \quad (2)$$

EC_{50} ya da LC_{50} değerleri: Daphnia magna, alg ya da balık test organizmaları için %50 etkili konsantrasyon (EC_{50}) veya %50 öldürücü konsantrasyon (LC_{50})
AF: Değerlendirme faktörü-Assessment Factor olarak ifade edilir.

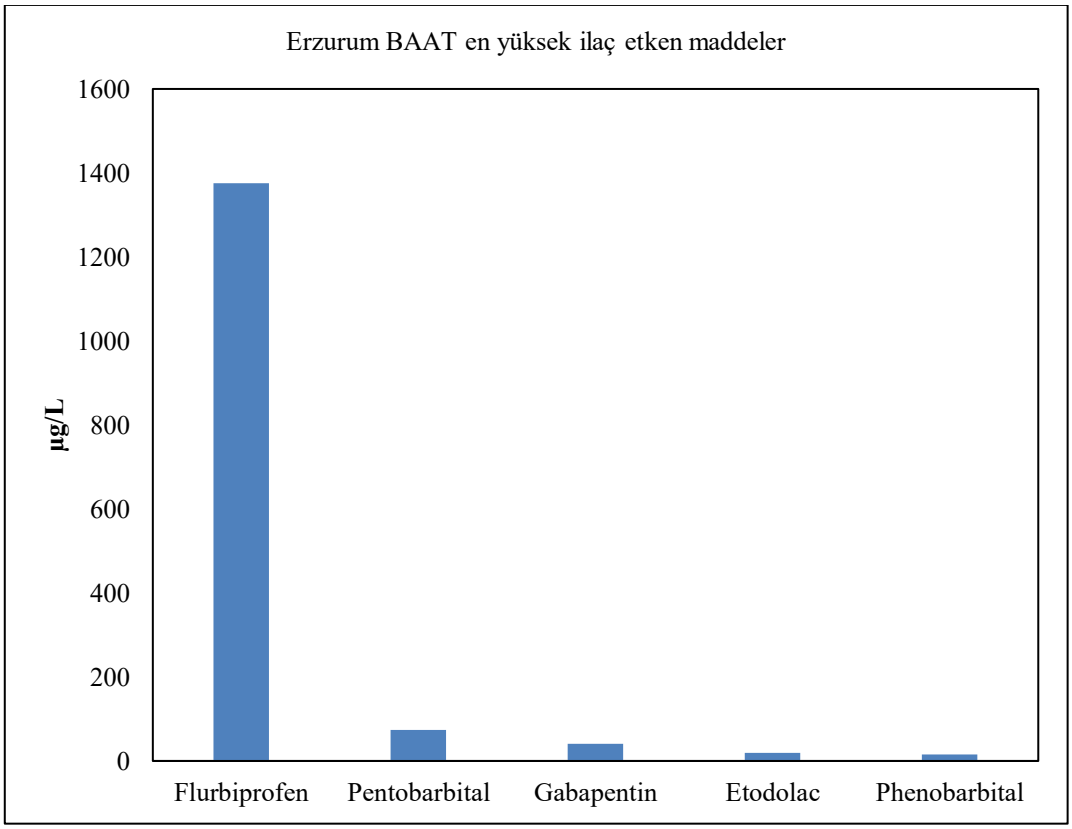
AF değeri EU Directive/2000/EC'e göre 1000 olarak kabul edilmektedir (Tekinay 2017). RQ değeri 0,1'e eşit veya

daha küçük olan ilaç kalıntılarının düşük çevresel risk taşıdığı kabul edilirken; RQ değeri 10'dan büyük olan ilaç kalıntıları yüksek risk taşımaktadır (Wennmalm and Gunnarsson, 2009; Mostafa et al. 2023). RQ değerlerinin risk aralığı aşağıda gösterilmiştir:

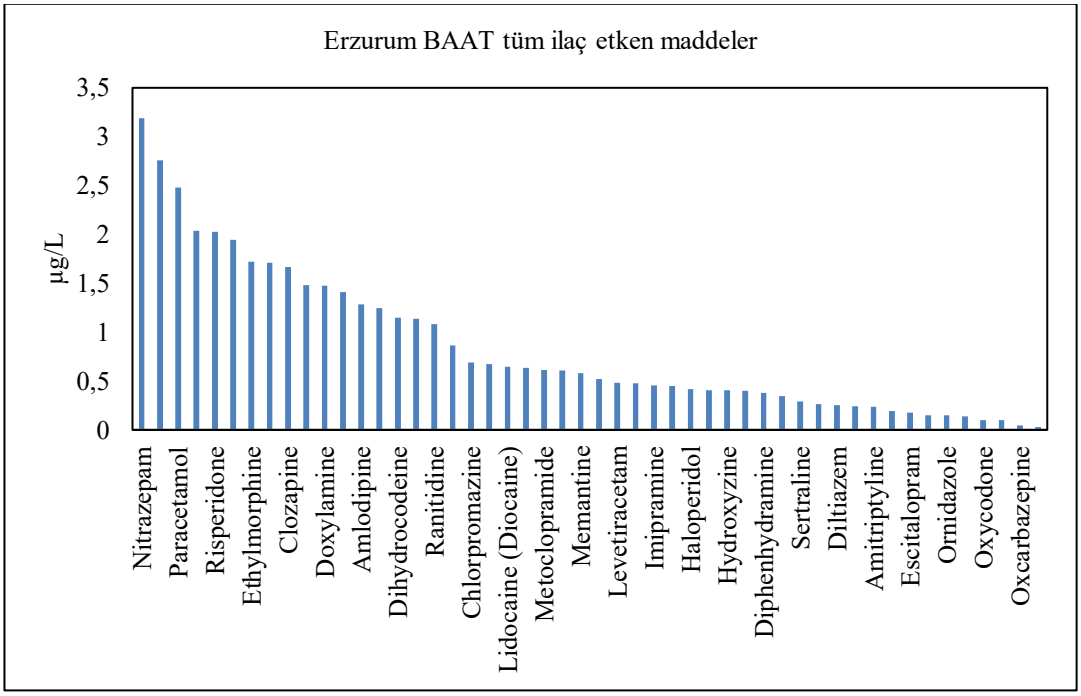
RQ ≤ 0,1	önemsiz risk
RQ > 0,1 – ≤ 1	düşük risk
RQ > 1 – ≤ 10	orta risk
RQ > 10	yüksek risk

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Erzurum BAAT'nin 2023 yılı yıllık ortalama AKM, KOİ, BOİ ve TN giderim verimleri sırasıyla %92,11, %91,82, %91,93 ve %75 olarak belirtilmiştir. Şekil 3'te Erzurum BAAT çıkış suyundan deşarj öncesi alınan numunelerde LC-MS/MS ile analiz edilen en yüksek konsantrasyona sahip ilaç etken maddeler; Şekil 4'te ise tüm ilaç etken maddeler gösterilmiştir. Buna göre Erzurum BAAT'nde Alzheimer, Analjezik, Analjezik-Antipiretik, Anestezik, Hemoreolojik, Antibakteriyal, Antidepresan, Antiepileptik, Antihipertansif, Antihistaminik, Antikolinerjik ve Spazmalotik, Antipsikotik, Grip ilacı, Antihistaminik, Mide ilacı, Nöropatik ağrı tedavisi ve Uyku bozukluğu gruplarına ait olmak üzere 55 ilaç etken madde tespit edilmiştir. Bu ilaç etken maddelerden en yüksek konsantrasyona sahip ilaç etken maddeler Analjezik gruptan Flurbiprofen ve Etodolac, Anestezik gruptan Pentobarbital, Nöropatik Ağrı Tedavisi grubundan Gabapentin ile Antiepileptik gruptan Phenobarbital olarak tespit edilmiştir. Bu beş ilaç toplam atıksuda bulan ilaç konsnatrasyonunun %97.3'ünü oluşturmaktadır (Şekil 4). Diğer kalan ilaçlar ise %2,7'sini oluşturmaktadır.



Şekil 3. Erzurum BAAT çıkış atıksu numunelerinde tespit edilen en yüksek 5 ilaç etken madde.(5 highest pharmaceutical detected in outlet samples of Erzurum BWWTP.)



Fgiure 4. Erzurum BAAT çıkış atıksu numunelerinde tespit edilen 10 µg/L'den küçük konsantrasyona sahip ilaç etken maddeler. (The pharmaceutical detected in outlet samples of Erzurum BWWTP (<10 µg/L))

Şekil 3'e göre Erzurum BAAT çıkış atıksu numunelerinde tespit edilen en yüksek 5 ilaç etken madde sırasıyla; Analjezik gruptan Flurbiprofen=1375,48 µg/L, Anestezik gruptan Pentobarbital=93,82 µg/L, Nöropatik ağrı tedavisi için Gabapentin=41,11 µg/L, Aneljezik gruptan Etodolac =19,03 µg/L ve Antiepileptik gruptan Phenobarbital=15,39 µg/L olarak tespit edilmiştir. Bu beş ilaç etken maddenin konsantrasyonu 10 µg/L'den büyüktür. İkinci grupta ise (Şekil 4) konsantrasyonu 1 µg/L'nin üzerinde olan ilaç etken maddeler gelmektedir. Bu grupta ise Nitrazepam, Pheniramine, Paracetamol, Chlorpheniramine, Risperidone, Opipramol, Ethylmorphine, Phenytoin, Clozapine, Olanzapine, Doxylamine, Atenolol, Amlodipine, Mirtazepine, Dihydrocodeine, N-Desmethylclozapine ve Ranitidine olmak üzere 17 ilaç etken madde bulunmaktadır. Son grupta ise konsnatrasyonu 1 µg/L'nin altında bulunan 33 ilaç etken madde yer almaktadır. Bunlar ise sırasıyla; Codeine, Chlorpromazine, Amphetamine, Lidocaine (Diocaine), Amisulpride, Metoclopramide, Lansoprazole, Memantine, Clomipramine, Levetiracetam, Flunitrazepam, Imipramine, Pentoxifylline, Haloperidol, Doxepin, Hydroxyzine, Chlordiazepoxide, Diphenhydramine, Morphine, Sertraline, Flurazepam, Diltiazem, Atropine, Amitriptyline, Midazolam, Escitalopram, Citalopram, Ornidazole, Propranolol, Oxycodone, Pseudoephedrine, Oxcarbazepine, Buprenorphine olarak tespit edilmiştir.

Çalışmada ikinci aşama Erzurum BAAT'nden alınan bu atıksu numunesinin 366 nm UV-A, 312 nm UV-B ve 254 nm UV-C dalga boyunda üç farklı ışık kaynağı ile 30 dakika boyunca foto-oksidasyona tabi tutulmuştur.
Fotoliz deneylerinde çözelti içindeki ışık şiddeti kimyasal aktinometri ile hesaplanabilmektedir. Kimyasal aktinometri; kullanılan UV lambanın ışık dozunu hesaplamak için 0,01 M potasyum peroksidisülfat ve 0,1 M tert butanol içeren peroksidisülfat/tert butanol çözelti karışımının UV ışıma altında oluşturduğu sülfürik asit (H+) miktarından yani pH değişiminden ölçülmektedir (Mark et al. 1990). Ancak UV lambaların temin edildiği firma lambaların ışık şiddetini sağlamaktadır. Buna göre fotoliz deneyleri esnasında atıksu numunelerini oksitlemek için kullanılan ışık şiddeti Eşitlik 1'e göre hesaplanarak Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. UV Lambaların Çözelti İçinde Işık Şiddeti (The light intensity of UV lamba in the solution)

UV-Lamba	Dalga Boyu, nm	Işık şiddeti, µW/cm²	Deney Çözeltisindeki Işık Şiddeti, J/cm²
UV-A	366	720	1,295
UV-B	312	820	1,475
UV-C	254	520	0,935

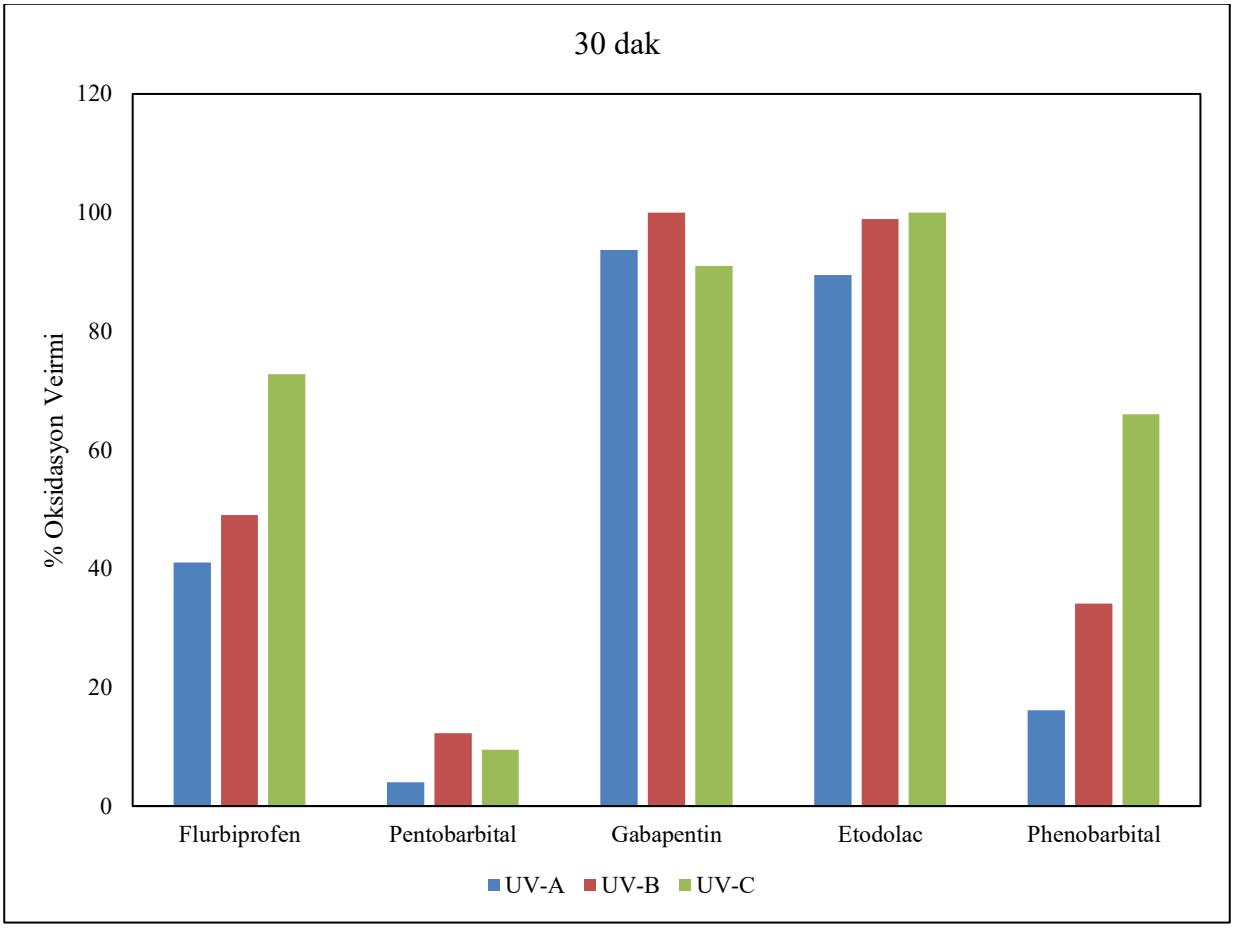
Erzurum BAAT çıkış parametrelerine ait yıllık ortalama değerleri ve arıtma verimleri tesisten temin edilerek Tablo 4'te gösterilmiştir. Buna göre tesiste AKM, KOİ, BOİ5 ve TN parametreleri arıtılmakta olup çıkış arıtma verimleri sırasıyla %92,1, %91,8, %91,9 ve %75'tir. Tesis organik maddeler ve azot bakımından oldukça yüksek arıtma verimine sahip olduğu halde çıkış suyu ilaç kalıntı konsantrasyonları oldukça yüksektir. Bu durum ilaç etken maddelerin atıksu arıtma tesislerinde etkin bir şekilde arıtılamadığını ve özellikle bazı ilaçların biyolojik arıtma

direnç gösterdiğini doğrulamaktadır. Dolayısı ile ilaç bileşiklerini parçalamak için özel ileri arıtım yöntemlerine ihtiyaç vardır.

Tablo 4. Erzurum BAAT 2023 yılı ortalama arıtma verileri.(The average treatment data of Erzurum BWWTP)

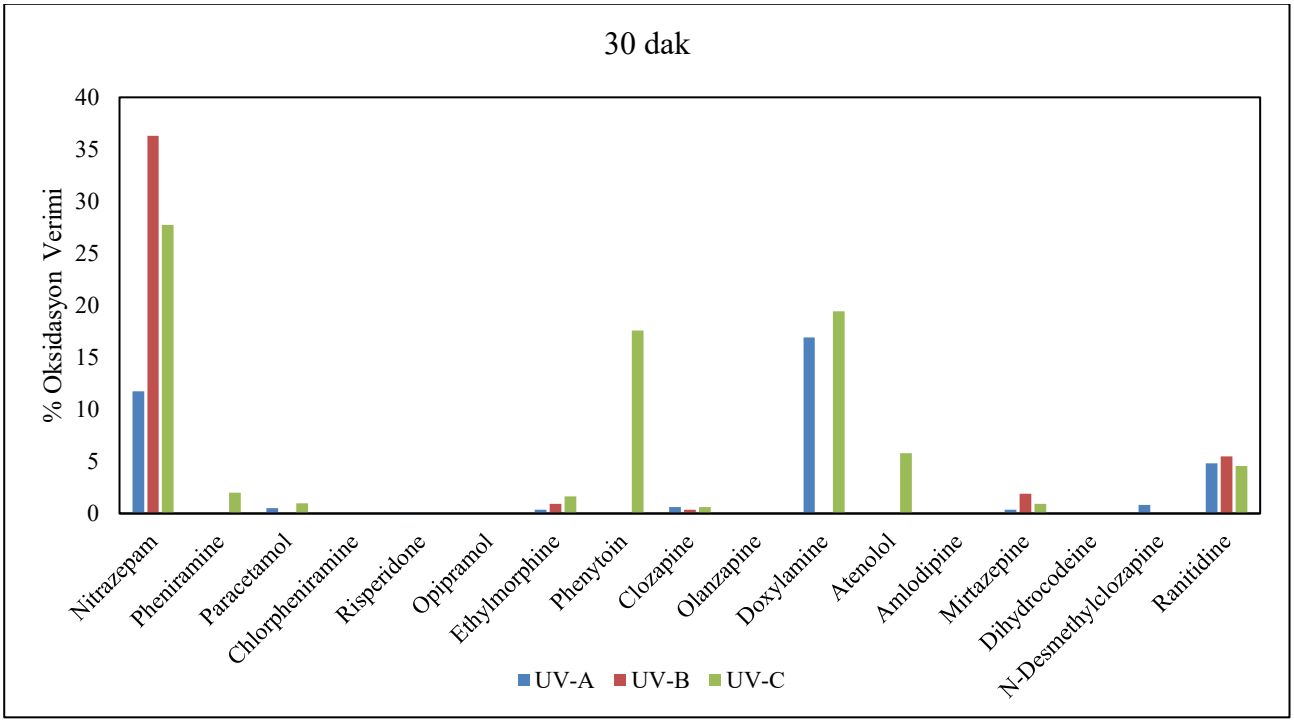
Debi	**Sıcaklık**	**pH**	**İletkenlik**	**AKM**	**KOİ**	**BOİ$_5$**	**TN**
m^3/gün	^oC		µs/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
74,2	16	8	698	15	32	18	7
				92,1	91,8	91,9	75

Şekil 5'te atıksuda en çok bulunan ilk 5 ilaç etken maddenin 30 dakika boyunca UV-A, UV-B ve UV-C ile foto-oksidasyonundan elde edilen oksidasyon verimleri gösterilmiştir. Şekil 5'e göre Erzurum BAAT çıkış suyunda en çok bulunan ilaç etken maddelerden olan Nöropatik ağrı tedavisi için kullanılan Gabapentin ile Aneljezik gruptan Etodolac ilaç etken maddeler her üç ışın türü ile %90'ın üzerinde oksidasyon verimine sahip olmuşlardır. Dolayısı ile başlangıçta 41,11 µg/L konsantrasyona sahip olan Gabapentin; UV-A ile 30 dakika oksidasyon sonunda 2,59 µg/L, UV-B ile 30 dakika oksidasyon sonunda 0 µg/L ve UV-C ile 30 dakika oksidasyon sonunda 3,71 µg/L konsantrasyona düşmüştür. Benzer şekilde, başlangıçta 19,03 µg/L konsantrasyona sahip olan Etodolac; UV-A ile 30 dakika oksidasyon sonunda 1,99 µg/L, UV-B ile 30 dakika oksidasyon sonunda 0,20 µg/L ve UV-C ile 30 dakika oksidasyon sonunda 0 µg/L konsantrasyona düşmüştür. Bu iki ilaç etken maddenin herhangi bir katalizör eklenmeden fotolitik olarak oksidasyonu oldukça yüksektir. Çıkış atıksu örneğinde bulunan en yüksek konsantrasyona sahip ilaç etken madde Analjezik gruptan Flurbiprofen ise UV-A, UV-B ve UV-C oksidasyon ile 30 dakika reaksiyon süresi sonunda sırasıyla; %41,08, %49,08 ve %72,8 arıtma verimine sahip olmuştur. Dolayısı ile başlangıçta 1375,48 konsantrasyona sahip olan Flurbiprofenin 30 dakikalık fotolitik oksidasyon sonunda çıkış atıksuyunda UV-A ile oksidasyonundan kalan 810,45 µg/L, UV-B ile oksidasyonundan kalan 700,33 µg/L ve UV-C ile oksidasyonundan kalan 374,12 µg/L konsantrasyonları bulunmaktadır. Bu yüksek grup ilaç etken madde içerisinde fotolitik olarak en zor arıtılan gruplar ise Anestezik gruptan Pentobarbital ile Antiepileptik gruptan Phenobarbital olmuştur. Antiepileptik gruptan olan Phenobarbital UV-A, UV-B ve UV-C ile 30 dakika oksidasyon sonunda sırasıyla %16,12, %34,10 ve %65,99 oksidasyon verimine sahip olurken; Anestezik gruptan Pentobarbital UV-A, UV-B ve UV-C ile 30 dakika oksidasyon sonunda sırasıyla %4,05 %12,27 ve %9,50 oksidasyon verimine sahip olmuştur. Dolayısı ile özellikle 93,82 µg/L olan yüksek başlangıç konsantrasyonu dikkate alındığında Pentobarbitalin 30 dakika sonunda UV-A, UV-B ve UV-C ile oksidasyonundan kalan konsantrasyonlar sırasıyla 90,02 µg/L, 82,31 µg/L ve 84,92 µg/L olup hala yüksek miktarda bulunmaktadır. Phenobarbitalin ise 15,39 µg/L başlangıç konsantrasyonuna sahip olduğu dikkate alındığında UV-A, UV-B ve UV-C ile oksidasyonundan kalan konsantrasyonlar sırasıyla 4,90 µg/L, 10,14 µg/L ve 5,23 µg/L'ye düşmüştür. UV-C oksidasyonu genel olarak diğer ışık türlerinden daha etkili oksidasyon kapasitesine sahiptir.



Şekil 5. Erzurum BAAT çıkış suyundaki en yüksek ilaç etken maddelerin UV-A, UV-B ve UV-C ile foto-oksidasyonu. (Photo-oxidation of the highest pharmaceutical in effluent of Erzurum BWTTP by UV-A, UV-B and UV-C.)

Şekil 6'da ise Erzurum BAAT çıkış suyunda alınan numunelerde bulunan ve konsantrasyonu 10 µg/L'den küçük olan ilaç etken maddelerin (en yüksek 3 µg/L) 30 dakika boyunca UV-A, UV-B ve UV-C ile oksidasyonundan elde edilen verimler gösterilmiştir. Bu ilaçlardan en yüksek konsantrasyona sahip olan Uyku bozukluğu için kullanılan Nitrazepan olup 3,19 µg/L konsantrasyona sahiptir. Diğerleri ise 0-2 µg/L aralığında değişmektedir. Nitrazepam'ın 30 dakika boyunca UV-A, UV-B ve UV-C ile oksidasyonundan elde edilen verimler sırasıyla; %11,72 %36,28 ve %27,73 olarak belirlenmiştir. Diğer gruptaki ilaç etken maddelerin oksidasyon verimleri %1-20 arasında değişim göstermektedir. UV-C'nin yine ilaçlar üzerinde genel olarak daha etkin olduğu görülmekle beraber Antihistaminik gruptan Doxylamine için UV-A oksidasyon daha etken olmuştur. Bu grupta yer alan grip ilacı Pheniramine, Analjezik/Antipiretik olan Paracetamol, Grip İlacı, Antihistaminik gruptan Chlorpheniramine, Antipsikotik gruptan Risperidone ve Antidepresan gruptan Opipramol her üç ışın türünde neredeyse sıfıra yakın arıtma verimine sahip olmuştur. Bu ilaçların atıksudaki başlangıç konsantrasyonları sırasıyla 2,76 µg/L, 2,47 µg/L, 2,03 µg/L, 2,02 µg/L ve 1,95 µg/L olup düşük başlangıç konsantrasyonları nedeniyle analiz edilebilme zorlukları da göz önüne alınmalıdır. Ancak deşarj edildikleri su ortamı için tespit edilebilir seviyeye geldikleri de unutulmamalıdır.



Şekil 6. Erzurum BAAT çıkış suyundaki ilaç etken maddelerin UV-A, UV-B ve UV-C ile foto-oksidasyonu (<10 µg/L).**(**Photo-oxidation of the highest pharmaceutical in effluent of Erzurum BWTTP by UV-A, UV-B and UV-C (<10 µg/L))

UV oksidasyon ile yapılan deneylerde en yüksek verimlerin UV-C ile yapılan oksidasyon deneylerinden elde edildiği görülmektedir. UV-C oksidasyonundan sonra en yüksek 5 ilaç etken maddenin alıcı ortama deşarj edileceği kabul edildiğinde alıcı ortamın ekotoksikolojik risk değerlendirmesi yapılmıştır. Buna göre Eşitlik (1)'de yer alan PNEC değerleri olan Balıklar, Omurgasızlar ve Yosunlar için literatürdeki çalışmalar referans alınmıştır. PEC değerleri ise çalışmada tespit edilen oksidasyon sonrası kalan ilaç konsantrasyonlarıdır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. UV-C oksidasyon sonrası atıksudaki ilaç etken maddelerin risk değerlendirmesi. (Risk assessment of pharmaceuticals in wastewater effluent after UV-C oxidation.)

İlaç Grubu	**Etken Madde**	**PEC**	**PNEC**	**RQ**	**RQ**	
Analjezik	Flurbiprofen	374,13	2,02	2650	HR	Backhaus and Karlsson, 2014
Antiepileptik	Phenobarbital	5,23	$1.16x10^{+6}$	0,00006	IR	ME, 2023
Anestezik	Pentobarbital	84,92	$4.95x10^{+4}$	0,0245	IR	Finckh et al. 2022
Nöropatik ağrı	Gabapentin	3,71	10^{+5}	0,00053	IR	Nieto-Juárez et al. 2021

Tablo 4'e göre UV-C ile foto-oksidasyon sonunda atıksuda bulunan Flurbiprofen konsantrasyonu (374 µg/L) ekotoksikolojik olarak yüksek risk (High Risk, HR) oluşturuken; Phenobarbital, Pentobarbital, Gabapentin ilaç etken maddeleri ihmal edilebilir riske (Insignificant Risk, IR) sahip olarak değerlendirilmiştir. Erzurum BAAT çıkış suyunda başlangıçta en yüksek konsantrasyonlardan birine sahip olan Etodolac için hesaplanan ekotoksikolojik risk düşük (Low Risk, LR) olarak belirlenmişken UV-C oksidasyonu ile %100 arıtıldığı için bu risk tamamen ortadan kaldırılmıştır. Konya'da kanalizasyon sistemindeki 23 farklı noktadan ve Konya Kentsel Atık Su Arıtma Tesisi'nin giriş ve çıkış sularından toplanan numunelerde antibiyotiklerin ve antifungal ilaçların varlığını araştıran ve ekolojik ve antimikrobiyal direnç risklerini değerlendirmek amacıyla yapılan bir çalışmada; Metronidazol ve Ornidazol gibi antibiyotikler ve Flukonazol gibi antifungal ilaçlar LC-MS/MS kullanılarak analiz edilmiştir. Tespit edilen ilaç konsantrasyonları sırasıyla; Metronidazol <dl (tespit sınırının altında) ile 2234 ng/L arasında; Ornidazol <dl ile 91,84 ng/L arasında değişen konsantrasyonlarda; Flukonazol <dl ile 13,76 ng/L arasında değişen konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Tespit eidlen ilaçların algler, Daphnia magna ve balıklar için alıcı ortam için önemsiz bir risk oluşturduğunu ancak Metronidazol ve Flukonazolün varlığı nedeniyle antimikrobiyal direnç gelişimi için orta düzeyde bir risk oluşturduğunu ortaya koymuştur (Aydın et al., 2024).

Literatürde ilaç kalıntılarının fotooksidasyonla arıtılmasına yönelik pekçok çalışma bulunmaktadır ancak prosesin tek başına yetersiz verime sahip olması nedeniyle çoğu çalışma katalizör kullanımına odaklanmaktadır. Örneğin; ilaç endüstrisi atıksularının fotokatalitik oksidasyon ile arıtımının yapıldığı bir çalışmada parasetamol gibi farmasötik kalıntıların TiO_2 katalizörü ve UV ışığı kullanılarak fotokatalitik arıtımının yapıldığı bir çalışmada başlangıç parasetamol konsantrasyonu 50 mg/L iken 120 dakika sonunda parasetamol giderim verimi %98 ve KOİ giderim verimi ise %85 olarak belirlenmiştir (Fujishima et al., 2000). $CoFe_2O_4/BaSnO_3$ nanokompozitleri ile görünür ışık altında ciprofloxacin (CIP) antibiyotiğinin fotooksidasyonunun incelendiği bir çalışmada 90 dakika içinde CIP'nin tamamen bozunmasını sağlamış ve 0,0324 dakika^{-1}'lik bir reaksiyon hız sabiti elde etmiştir. Nanokompozit malzeme, beş kullanım döngüsü boyunca yüksek stabilite ve fotokatalitik aktivite göstermiştir. Böylelikle, görünür ışık altında aktif ve yeniden kullanılabilir fotokatalizörlerin tasarımı ile ilaç kalıntılarını tammaen okside etmek mümkün olabilmektedir (Alhaddad and El-Hout, 2023). Karbon nanotüp (MWCNT) ve TiO_2/SiO_2 nanokompozitlerinin (MWCNT-TiO_2-SiO_2) kullanıldığı ve sucul çözeltiden bisfenol A (BPA) ve karbamazepin (CBZ) gibi farmasötik kirleticilerin fotokatalitik olarak uzaklaştırıldığı başka bir çalışmada UV-A ışınımı altında 20 dakika içinde başlangıç konsantrasyonlarının yarıya indirilmesi sağlanmıştır. Fotooksidasyon ürünlerinin toksisitesi ise Vibrio fischeri ve Daphnia magna üzerinde ölçülerek toksik olmayan ürünlerin oluştuğu belirtilmiştir (Czech and Buda, 2015). TiO_2, yaygın olarak kullanılan bir fotokatalizör olmasına rağmen, sadece UV ile aktive olması ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle hala sınırlı kullanıma sahip bir malzemedir. Ayrıca literatürdeki her çalışma elde edilen oksidasyon ürünlerinin toksisitesine odaklanmamaktadır. Bu nedenle fotokatalitik proseslerin bir diğer önemli dezavantajı toksik yan ürünler üretebilecek olmasıdır. Ancak çalışmamız, katalizör kullanımı yerine doğrudan ilaç kalıntılarının fotolitik prosesle oksidasyonuna odaklanarak elde edilen ürünlerin ekotoksisitesine odaklanmıştır. Gerçek atıksularda yapılmış çalışmalara bakıldığında ise; Kurt (2018) hem hastane hem de sentetik atık sularında bulunan antibiyotikleri arıtmak için Fenton, UV/H_2O_2 ve O_3/UV/H_2O_2 prosesleri dahil olmak üzere çeşitli İOP kullanmış ve optimal koşullar altında Fenton prosesi ile (pH 4, 0,7 mM H_2O_2 ve 0,3 mM Fe^{2+}) hastane atık suyunda %91,8 KOİ ve %70,8 TOK giderimi elde etmiştir. 3,7 mM H_2O_2 ve 30 dakikalık UV reaksiyon süresinde yaptığı deneyde ise %91,8 KOİ ve %91 TOK giderimi elde etmiştir. Prosese ozon oksidasyonu eklediğinde ise 0,7 mM H_2O_2 ve 90 dakikalık reaksiyon süresinde hastane atık suyunda %89 KOİ ve %64,5 TOK giderimi elde etmiştir (Kurt, 2018). Sulu ortamdan siprofloksasin antibiyotik maddesinin persülfat/UV-C (PS/UV-C) ve persülfat/UV-A (PS/UV-A) kullanılarak arıtıldığı bir çalışmada; PS/UV-C, 0,05 mM PS ve 120 dakikalık reaksiyon süresiyle %98 giderim verimine ulaştığı belirtilmiştir. Sentetik su örnekleri ile yapılan çalışmada yüzey suyu matrisinde devam ettirilmiş ve oksidasyon için daha uzun reaksiyon süreleir gerektirdiği bulunmuştur. Oksidasyon yan ürünlerinin toksisite etkisini değerlendirmek için ise biyolüminesan bir bakteri olan Aliivibrio fischeri kullanılarak toksisite analizi yapılmış ve Aliivibrio fischeri üzerinde inhibitör etki göstermediği, oksidasyon sürecinin yan ürünlerinin toksik olmadığı belirtilmiştir (Gülcan et al., 2023). Yine başka bir çalışmada, Penisilin Prokain G (PPG) içeren sentetik antibiyotik formulasyon atıksuyunun Fenton-benzeri (Fe^{2+}/H_2O_2) ve Foto-Fenton-benzeri (Fe^{2+}/H_2O_2/UV-A) ileri oksidasyon prosesleri ile arıtılabilirliği incelenmiştir. Foto-Fenton-benzeri proses için optimum Fe^{2+} ve H_2O_2 konsantrasyonları sırasıyla 1,5 mM ve 25 mM olarak belirlenmiştir ve bu koşullarda Foto-Fenton-benzeri proses ile %56 KOİ giderim verimi elde edilirken, Fenton-benzeri proses ile %44 KOİ giderim verimi sağlanmıştır. TOK giderimi ise Foto-Fenton-benzeri prosesinde %42 Fenton-benzeri prosesinde %35 olarak gerçekleşmiştir (F, 2004). Görüldüğü gibi UV-A görünür ışık Fenton prosesin arıtma verimini çok fazla artırmamaktadır ve ortamda ayrıca fenton çamuru oluşmasına sebep olmaktadır. İlaç kalıntılarının giderimi için düşük maliyetli, sürdürülebilir ve çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Kombine arıtma yöntemleri (örneğin, AOPs ve biyoremediasyonun birlikte kullanımı) daha yüksek verimlilik sağlayabilir (Nguyen et al., 2024).

Gerek sentetik çözeltilerde gerekse gerçek atıksu numunelerinde ilaçların ileri arıtım yöntemleriyle arıtımı çok geniş bir aralıkta arıtma verimine sahiptir. Bunun temel sebebi ilaçların birbirinden oldukça farklı organik yapısı ve fizikokimyasal özelliklere sahip olmasıdır. Bu nedenle tek bir arıtma yönetmini önermek oldukça zordur. Ancak genel olarak klasik arıtma yöntemleri ile düşük arıtma verimine sahip ilaçlar için İOP deşarj öncesi önemli bir azaltım sağlamaktadır. Burada da bu proseslerin getireceği ek kimyasal, enerji vb. kullanımı göz önüne alınmalıdır. İlaçların sebep olduğu ekotoksikolojik riskler göz önüne alındığında bu durum tesislere ek yük getirse de her geçen gün hızla artan çevresel konsantrasyonları nedeniyle ilaçların çevreye verilmeden önce mutlaka azaltılmasını sağlayan metotların kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Ayrıca, güneş enerjisi kullanılarak işletilen foto-oksidasyon prosesleri atık sudaki kalıcı ÇMK'in arıtımı için biyolojik arıtım sonrası yerinde uygulanabilir bir tamamlayıcı çözüm olabileceğini göstermektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada Erzurum BAAT çıkış suyundan alınan biyolojik olarak arıtılmış ve Karasu Nehrine deşarj edilecek atıksuyun içerisindeki ilaç kalıntıları LC-MS/MS ile analiz edilmiş ve UV-A, UV-B ve UV-C'den oluşan üç farklı UV kaynağı ile ayrı ayrı foto-oksidasyon kapasitesi incelenmiştir. Erzurum BAAT'nde Alzheimer, Analjezik, Analjezik-Antipiretik, Anestezik, Hemoreolojik, Antibakteriyal, Antidepresan, Antiepileptik, Antihipertansif, Antihistaminik,

Antikolinerjik ve Spazmalotik, Antipsikotik, Grip ilacı, Antihistaminik, Mide ilacı, Nöropatik ağrı tedavisi ve Uyku bozukluğu gruplarına ait olmak üzere 55 ilaç etken madde tespit edilmiştir. Erzurum BAAT çıkış atıksu numunelerinde tespit edilen en yüksek 5 ilaç etken madde sırasıyla; Analjezik gruptan Flurbiprofen, Anestezik gruptan Pentobarbital, Nöropatik ağrı tedavisi için Gabapentin, Aneljezik gruptan Etodolac ve son olarak Antiepileptik gruptan Phenobarbital olup arıtılmış atıksudaki konsantrasyonları sırasıyla; 1375,48 µg/L, 93,82 µg/L, 41,11 µg/L, 19,03 µg/L ve 15,39 µg/L olarak analiz edilmiştir. İlaç etken maddelerin birçoğunun biyolojik parçalanabilirliği zor hatta mümkün olmadığından bu kalıntıları içeren atık suların klasik arıtma yöntemleri ile arıtılmaları tam olarak gerçekleşmemektedir. Bu nedenle AAT'ler ilaç kalıntıları için sıcak nokta alanları olarak kabul edilmektedir. Nitekim Erzurum BAAT karbonlu ve azotlu bileşikleri etkin bir şekilde arıtabilmekte ama aynı çıkış suyund ayükske ilaç konsnatrasyonları görülmektedir. Bu nedenle klaisk atıksu arıtma tesisileirnin bir İOP ile birleştirierek üçüncül arıtma uygulanması giderek bir zorunluluk halini almıştır. Bu nednele bu çalışamda da sadece bir UV ışık kaynağı kullanılarak atıksuyun ek bir foto-oksidasyonu ile ilaç kalıntılarındaki azalma belirlenmiştir. Atıksuyun çıkış deşarj noktasındna alınan numunelre uygulanan UV-A, UV-B ve UV-C ışık kaynağından en yüksek oksidasyon verimi UV-C ışıma ile elde edilmiş ve 30 dakikalık bir reaksiyon süresi sonunda atıksuyun kendi doğal şartlarında saatlik foto-oksidasyon sonunda bu ilaç etken maddelerin suda kalan konsantrasyonları 374,13 µg/L, 84,92 µg/L, 3,71 µg/L, 0 µg/L ve 5,23 µg/L olarak analiz edilmiştir. Kalan ilaç konsantrasyonları üzerinden alıcı ortamın ekotoksikolojik risk değerlendirmesi de yapılmış ve Flurbiprofen, Pentobarbital, Gabapentin, Etodolac ve Phenobarbital bileşiklerinin RQ değerleri hesaplanmıştır. Buna göre Etodolac'ın başlangıçta sahip olduğu düşük risk değeri tamamen ortadan kaldırılmıştır. Flurbiprofen'in %72,8 verimle UV-C ile arıtılmasına rağmen alıcı ortam için sahip olduğu yüksek risk değeri devam etmektedir. Sucul ortalardaki ilaç kalıntılarının UV ışık kaynağı ile oksidasyonuna yönelik uygulama zorluklarının başında maliyet yer almaktadır. Özellikle ortamda katalizör bulunduğunda; katalizör varlığı, katalizörün sentezlenmesi, stabilitesi, geri kazanılması vb. ile birlikte bu maliyetler artmaktadır. Atıksu numunelerindeki kalıntı ilaç bileşikleri için en önemli arıtım zorluğu onlarca çeşit ilaç kalıntısı ve her birinin farklı biyolojik parçalanabilirliğe sahip olmasıdır. Bu durum fotoliz/fotokataliz proseslerinin uygulanmasını toksik reaksiyon ürünleri üretebilme sorununu da beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle bu bileşiklerin ekotoksisitesi gerçek atıksu arıtım uygulamalarında dikkatle değerlendirilmelidir. Ayrıca yapılan literatür çalışmaları, yeni arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi, mevcut proseslerin optimize edilmesi ve ilaç kalıntılarının çevresel davranışlarının daha iyi anlaşılması üzerine odaklanmaktadır. Ancak ilaç kalıntılarının çevresel etkilerini azaltmak için yeni standartlar ve yönetmelikler geliştirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmanın bir kısmı TÜBİTAK tarafından 123Y445 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Achilleos, A., Hapeshi, E., Xekoukoulotakis, N. P., Mantzavinos, D., & Fatta-Kassinos, D. (2010). Factors affecting diclofenac decomposition in water by UV-A/TiO2 photocatalysis. Chemical Engineering Journal, 161(1-2), 53-59.

Abbasi, N. A., Shahid, S. U., Majid, M., & Tahir, A. (2022). Ecotoxicological risk assessment of environmental micropollutants. In Environmental micropollutants (pp. 331-337). Elsevier.

Afzaal, M., Mazhar, I., Rasheed, R., Sharif, F., Khan, W. U. D., Bashir, N., ... & Khan, A. (2022). Industrial chemicals as micropollutants in the environment. In Environmental Micropollutants (pp. 13-44). Elsevier.

Ahmed, T., Faridullah, & Kanwal, R. (2022). In Hazardous environmental micro-pollutants, health impacts and allied treatment technologies (pp. 21-36). Cham: Springer International Publishing.

Alhaddad, M., & El-Hout, S. I. (2023). Visible-light photooxidation of ciprofloxacin antibiotic contaminant over cobalt ferrite-modified BaSnO3 heterojunction. Surfaces and Interfaces, 42, 103301.

Aydın, S., Ulvi, A., & Aydın, M. E. Kentsel Atıksularda Bazı Antibiyotik (Metronidazole, Ornidazole) ve Antifungal (Fluconazole) Farmasötiklerin Varlığı ve Risk Değerlendirmesi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2).

Backhaus, T., Karlsson, M., (2014). Screening level mixture risk assessment of pharmaceuticals in STP effluents. Water research 49:157-165.

Boxall, A. B., Rudd, M. A., Brooks, B. W., Caldwell, D. J., Choi, K., Hickmann, S., ... & Van Der Kraak, G. (2012). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: what are the big questions?. Environmental health perspectives, 120(9), 1221-1229.

Bush, K. (1997). Antimicrobial agents. Current Opinion in Chemical Biology, 1(2), 169–175. https://doi.org/10.1016/S1367-5931(97)80006-3.

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. Water research, 44(10), 2997-3027.

Czech, B., Jośko, I., & Oleszczuk, P. (2014). Ecotoxicological evaluation of selected pharmaceuticals to Vibrio fischeri and Daphnia magna before and after photooxidation process. Ecotoxicology and environmental safety, 104, 247-253.

Czech, B., & Buda, W. (2015). Photocatalytic treatment of pharmaceutical wastewater using new multiwall-carbon nanotubes/TiO2/SiO2 nanocomposites. Environmental research, 137, 176-184.

Eren, Z. (2018). Su kaynaklarındaki ilaç kalıntılarının ileri oksidasyon yöntemleri ile arıtılabilirliğinin incelenmesi. Academic Platform-Journal of Engineering and Science, 6(3), 153-163.

Eren, Z., O'Shea, K. 2019. Hydroxyl radical generation and partitioning in degradation of methylene blue and DEET by dual-frequency ultrasonic irradiation, Journal of Environmental Engineering, 145(10), 04019070.

Eren, Z. (2025). The determination of wide-range pharmaceuticals class in Erzurum biological wastewater treatment plant using liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry: occurrence, treatment efficiency, and environmental risk assessment. Environmental Toxicology and Chemistry, vgae009.

ESKİ, 2024. Atıksu Arıtma, https://www.eski.gov.tr/atiksu-aritma-tesisi, Erişim Tarihi: 1.08.2024

Esplugas, S., Bila, D. M., Krause, L. G. T., & Dezotti, M. (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. Journal of hazardous materials, 149(3), 631-642.

Fent, K., Weston, A. A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. Aquatic toxicology, 76(2), 122-159.

Heberer, T. (2002). Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. Toxicology letters, 131(1-2), 5-17.

Jjemba, P. K. (2018). Pharma-ecology: the occurrence and fate of pharmaceuticals and personal care products in the environment. John Wiley & Sons.

Finckh S., Beckers L.M., Busch W. et al (2022). A risk based assessment approach for chemical mixtures from wastewater treatment plant effluents. Environment International 164:107234.

Gupta, A., Kumar, S., Bajpai, Y., Chaturvedi, K., Johri, P., Tiwari, R. K., ... & Trivedi, M. (2024). Pharmaceutically active micropollutants: origin, hazards and removal. Frontiers in Microbiology, 15, 1339469.

Gülcan, H. (2019). Antibiyotiklerin fotokimyasal ileri oksidasyon prosesleri ile giderimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Kumar, M., Sridharan, S., Sawarkar, A. D., Shakeel, A., Anerao, P., Mannina, G., ... & Pandey, A. (2023). Current research trends on emerging contaminants pharmaceutical and personal care products (PPCPs): a comprehensive review. Science of The Total Environment, 859, 160031.

Kurt, A. (2018). Sentetik ve hastane atıksularından çeşitli antibiyotik bileşiklerinin ileri oksidasyon prosesleri ile gideriminin araştırılması, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi Doktora Tezi, Bursa.

Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., ... & Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Science of the total environment, 473, 619-641.

Mark, G., Schuchman, M.N., Schuchman, H.P. and von Sonntag, C., 1990. A chemical actinometer for use in connection with UV treatment in drinking-water processing. Journal of Water SRT-Aqua 39, 309-313.

ME, Ministry of the Environment 2023. Phenytoin. Accessed 10 Sep 2023 https://www.env.go.jp/content/000130399.pdf

Mostafa, A., Shaaban, H., Alqarni, A., Al-Ansari, R., Alrashidi, A., Al-Sultan, F., ... & Aga, O. (2023). Multi-class determination of pharmaceuticals as emerging contaminants in wastewater from Eastern Province, Saudi Arabia using eco-friendly SPE-UHPLC-MS/MS: Occurrence, removal and environmental risk assessment. Microchemical Journal, 187, 108453.

Nguyen, M. K., Lin, C., Bui, X. T., Rakib, M. R. J., Nguyen, H. L., Truong, Q. M., ... & Idris, A. M. (2024). Occurrence and fate of pharmaceutical pollutants in wastewater: Insights on ecotoxicity, health risk, and state–of–the-art removal. Chemosphere, 141678.

Paz, Y. (2010). Application of TiO2 photocatalysis for air treatment: Patents' overview. Applied Catalysis B: Environmental, 99(3-4), 448-460.Peake, B.M., Braund R., Tong A.Y.C., Tremblay LA (2016) Impact of pharmaceuticals on the environment. In: The life-cycle of pharmaceuticals in the environment. Woodhead Publisher, pp 109–152.

Pomiès, M., Choubert, J. M., Wisniewski, C., & Coquery, M. (2013). Modelling Of Micropollutant Removal in Biological Wastewater Treatments: A Review. Science of The Total Environment, 443, 733–748. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.11.037

Qin, M., Yang, H., Chen, S., Xie, H., & Guan, J. (2012). Photochemical characteristics of diclofenac and its photodegradation of inclusion complexes with β-cyclodextrins. Quimica Nova, 35, 559-562.

Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Ferro-García, M. Á., Prados-Joya, G., & Ocampo-Pérez, R. (2013). Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. A review. Chemosphere, 93(7), 1268-1287.

Rizzo, L., Meric, S., Kassinos, D., Guida, M., Russo, F., & Belgiorno, V. (2009). Degradation of diclofenac by TiO2 photocatalysis: UV absorbance kinetics and process evaluation through a set of toxicity bioassays. Water research, 43(4), 979-988.

Sharma, V. K., Triantis, T. M., Antoniou, M. G., He, X., Pelaez, M., Han, C., ... & Dionysiou, D. D. 2012. "Destruction of microcystins by conventional and advanced oxidation processes: a review", Separation and Purification Technology, 91, 3-17.

Srinivasulu, M., Chandra, M. S., Gooty, J. M., & Madhavi, A. (2022). Personal care products—fragrances, cosmetics, and sunscreens—in the environment. In Environmental Micropollutants (pp. 131-149). Elsevier.

Tekinay, A., 2017. Atıksularda Farmasötiklerin Araştırılması ve Çevresel Risk Değerlendirmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya, Türkiye

Ternes, T. A. (1998). Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. Water research, 32(11), 3245-3260.URL-1, 2024. Calculating exposure time needed to kill all viruses, https://www.look-int.com/, cess Date: 05.08.2024.

USEPA, 2024. The Impact of Pharmaceuticals Released to the Environment, https://www.epa.gov, Access Date: 10.07.2024.

Wennmalm, Å., & Gunnarsson, B. (2009). Pharmaceutical management through environmental product labeling in Sweden. Environment International, 35(5), 775-777.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 509-527, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1630961

Araştırma Makalesi Research Article

INVESTIGATION OF DESIGN AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MATERIALS USED IN CEMENT MORTAR MIXTURES DESIGNED FOR SEMI-RIGID PAVEMENTS

Alev AKILLI EL[1*],Erkut YALÇIN[2], Mehmet YILMAZ[3]

[1] Bitlis Eren University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Construction, Bitlis, Turkey
[2,3] Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Elâzığ, Turkey

Keywords
Semi Rigid Pavement, Cement Mortar, Material, Design.

Abstract
Semi-rigid pavements are a type of pavement constructed by injecting a flowable cement mortar into the voids of a compacted porous asphalt skeleton with a void percentage between 25-35%. Cement mortar is one of the most important components for semi-rigid pavements, but the properties of the mortar are not well researched. The design of cement mortar for semi-rigid pavements is different from the traditional cement mortar used for concrete design. In semi-rigid pavements, workability, flowability and strength of mortars play an important role in the performance level of mixtures. In this study, the properties, mixing ratios and performance characteristics of the materials in cement mortar used in the production of semi-rigid pavement systems were evaluated. In the study, the flowability and compressive strength properties of cement mortar prepared using two different aggregates, different w/c ratios and different proportions of superplasticizing admixtures were investigated. In addition, research on the materials, design and performance of cement mortar is summarized and presented. As a result of this study, it was determined that in order for the cement mortar to penetrate well into the voids in porous asphalt, the w/c ratio used should be kept low and the ratio of superplasticizing additive should be maximum 2%.

YARI RİJİT KAPLAMALAR İÇİN DİZAYN EDİLEN ÇİMENTO HARÇ KARIŞIMLARINDA KULLANILAN MALZEMELERİN TASARIM VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler
Yarı Rijit Kaplama, Çimento Harcı, Malzeme, Tasarım.

Öz
Yarı rijit kaplamalar, boşluk yüzdesi %25-35 arasında olan sıkıştırılmış Poroz asfalt iskeletinin boşluklarına akıcı çimento harcının enjekte edilmesiyle inşa edilen bir kaplama çeşididir. Çimento harcı, yarı rijit kaplamalar için en önemli bileşenlerden biridir ancak harcın özelliklerine dair fazla araştırma yapılmamaktadır. Yarı rijit kaplamalar için çimento harcı tasarımı, beton tasarımı için kullanılan geleneksel çimento harcından farklıdır. Yarı rijit kaplamalarda, harçların işlenebilirliği, akışkanlığı ve mukavemeti karışımların performans seviyesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, yarı rijit kaplama karışımları elde etmek için kullanılan çimento harcı içerisindeki malzemelerin özelliklerinin, karışım oranları ve performans özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, iki farklı agrega, farklı s/ç oranları ile farklı oranlarda süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılarak hazırlanan çimento harcının akışkanlık ve basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca çimento harcının malzemeleri, tasarımı ve performansı üzerine yapılan araştırmalar özetlenmiş ve sunulmuştur. Bu araştırmadaki sonuçlar neticesinde, çimento harcının poroz asfalt içerisindeki boşluklara iyi nüfus edebilmesi için, kullanılan w/c oranın düşük tutulması ve süperakışkanlaştırıcı katkı malzemesinin oranının en fazla %2 oranında olması gerektiği belirlenmiştir.

Alıntı / Cite
El, A.A., Yalçın, E., Yılmaz, M., (2025). Investigation of Design and Performance Characteristics of Materials Used in Cement Mortar Mixtures Designed for Semi-Rigid Pavements, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(2), 509-527.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
A.A. El, 0000-0003-0158-9008
E. Yalçın 0000-0002-6389-4211
M. Yılmaz 0000-0002-2761-2598

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	31.01.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	12.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: aakilli@beu.edu.tr, +90-434-222-0097

INVESTIGATION OF DESIGN AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MATERIALS USED IN CEMENT MORTAR MIXTURES DESIGNED FOR SEMI-RIGID PAVEMENTS

Alev AKILLI EL†[1], Erkut YALÇIN[2], Mehmet YILMAZ[3],
[1] Bitlis Eren University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Construction, Bitlis, Turkey
[2,3] Fırat University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Elâzığ, Turkey

Highlights

- Cement mortar used in semi-rigid pavements
- Effect of w/c ratio in cement mortar
- Fluidity and strength of cement mortar
- Injecting cement mortar into voids in porous asphalt

Graphical Abstract

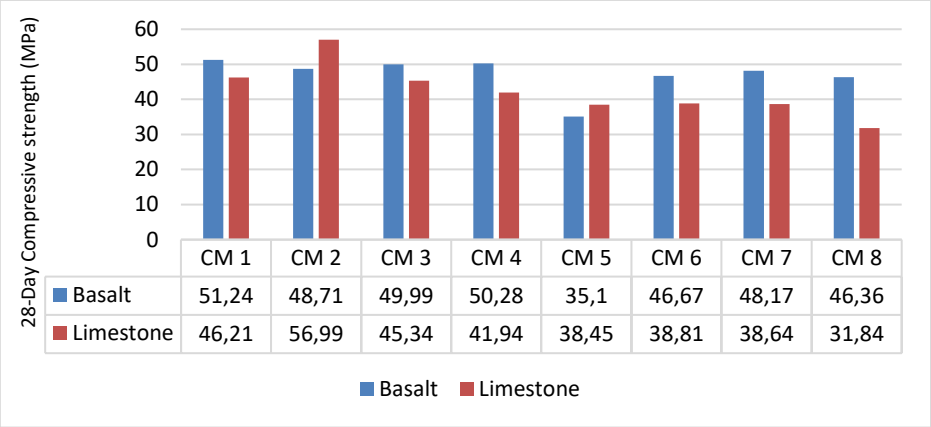


Figure. 28-day Compressive Strength Of Cement Mortars Prepared with Basalt and Limestone Aggregates

Purpose and Scope

The main objective of the study was to evaluate the material properties, mixing ratios and performance characteristics of the cement mortar used to obtain semi-rigid pavement mixtures.

Design/methodology/approach

In this study, the flowability and compressive strength properties of cement mortar prepared using two different aggregates, different w/c ratios and different proportions of superplasticizing admixtures were investigated. In addition, research on the materials, design and performance of cement mortar is summarized and presented.

Findings

When the viscosity times of the cement mortar mixtures were examined, it was determined that all mortar mixtures were suitable since the viscosity times of the mixture types with 2%, 1% and 0.8% superplasticizer additives were within the viscosity time determined as 10-14 seconds. Since the cement mortar injected into the voids in the porous asphalt is required to be very fluid, it would be appropriate to use CM 4 cement mortar mixes with an additive amount of 2%, a w/c ratio of 50% and viscosity times of 10.32 and 10.16 sec, respectively.

Originality

When the studies were examined, it was seen that the performance of semi-rigid pavements was generally investigated. It has been determined that there are no detailed studies on material selection and mixing of cement mortar material and there are few studies. In this study, appropriate mixing ratios for cement mortar used to obtain semi-rigid pavements were tried to be given by using aggregates of two different origins with different w/c ratios and superplasticizing admixtures at different ratios and the performances of the mixtures were investigated by performing fluidity and compressive strength tests on the mixtures.

† İlgili yazar / Corresponding author: aakilli@beu.edu.tr, +90-434-222-0097

1. Introduction

Semi-rigid pavements are a hybrid type of pavement that combines the flexibility of flexible pavements with the high-strength properties of rigid pavements. They offer many advantages, such as high strength, good abrasion resistance, a comfortable vehicle ride, and easy maintenance. These pavements are particularly suitable for areas with heavy loads, such as highway toll stations, tunnel entrances and exits, city roads, bus stops, and traffic light intersections (Afonso et al., 2016).

Semi-rigid pavement was first introduced in airport road construction in France in the 1960s. Since then, semi-rigid pavement systems have attracted significant research interest due to their structural advantages. In recent years, its application has expanded, making it widely used across Europe (Husain et al., 2014). Semi-rigid pavements were used extensively during the 1970s and 1980s across Africa, the South Pacific, the Far East, and North America, as well as in many European countries, including the UK and Spain. They were applied on major road networks, yielding positive results in terms of both functional and structural performance. Today, semi-rigid pavements are widely used in European countries like Germany, England, Italy, and the Netherlands, as well as in Asian countries such as China, Malaysia, Singapore, and India. They are applied in various settings, including highways, bridge deck coatings, tunnel linings, industrial areas with heavy machinery traffic, airport aprons, and metrobus stations, where high levels of chemical compounds and fuel spills are common (Corradini et al., 2017; Gong et al., 2019; Hassan et al., 2018).

Semi-rigid pavements are constructed in three main stages. The first stage involves the laying of porous asphalt concrete, which is a combination of porous asphalt and high-performance cement mortar. In the second stage, cement mortar is injected to fill the voids within the asphalt layer. Finally, in the third stage, any excess injection material is removed from the pavement surface (An et al., 2018). After a curing period lasting from several hours to several days, the cement bonds with the asphalt mixture, enhancing the overall strength of the composite. As a result, the pavement exhibits semi-rigid properties, providing improved durability and performance (Gong et al., 2019). By utilizing both rigid and flexible pavement materials, semi-rigid pavement offers advantages such as superior resistance to tread wear, high load-carrying capacity, and excellent ride comfort.

Porous asphalt mixtures used in semi-rigid pavements typically have a minimum air void content of 20%. However, in practical applications, this ratio can increase to 30-35% (Cihackova et al., 2015). Given that the air voids in porous asphalt mixtures are partially filled with grouting materials, an initial air void content of 20-35% is recommended as a prerequisite for asphalt mixtures.

If the initial air void content is reduced to less than 20%, and considering the low permeability of semi-rigid pavements, the injection materials despite being sufficiently fluid may not effectively fill the air voids in the asphalt mix. Therefore, semi-rigid pavements may lack homogeneous mechanical properties and sufficient resistance to traffic and environmental loads (Hassani et al., 2020).

Compared to conventional open-graded mixtures, porous asphalt used in semi-rigid pavements offers not only stability, tensile strength, and abrasion resistance, but the porous asphalt skeleton must also have sufficient porosity to allow adequate penetration of the injection material, enabling the formation of a dense skeletal structure in the semi-rigid pavement(Afonso et al., 2016).

Porous asphalt, which forms the skeletal system of semi-rigid pavement, is made with a high proportion of coarse aggregate and bitumen as the binder. During pavement design, cement binder mortar should be injected under the influence of gravity, without compaction or vibration, to ensure that the pores in the porous asphalt remain sufficiently open for proper filling (Husain et al., 2014).

The optimum binder is essential to ensure that the aggregates remain securely in place without being either under-coated or over-coated. A thin binder film does not provide enough hardness to protect the aggregates from friction and wear, and the bitumen will oxidize over time, compromising durability. Studies have shown that an insufficient binder film thickness can lead to aggregate breakage and pavement cracking (Hardiman et al., 2004). Conversely, an excessively thick binder film can cause the binder to flow too much during mixing, transportation, and paving. This excessive flow can clog the voids in the porous asphalt after paving, significantly reducing the properties of the mix.

Semi-rigid pavement is composed of porous asphalt and cement mortar, and therefore its performance depends on the characteristics of both components. Some factors affecting the performance of semi-rigid pavement are as follows:

•*Grading of porous asphalt mixture*; The choice of aggregate gradation plays an important role in the performance of the properties of the final mix. For the preparation of porous asphalt mixtures, a one-dimensional aggregate is usually used in an open graded asphalt mixture. For semi-rigid pavement applications, 90-95% coarse aggregate, 4-5% sand and 2-4% filler are usually used in the design of porous asphalt mixtures (Hassan et al., 2018).
•*Void ratio of porous asphalt mix*; If the void ratio in porous asphalt mixtures is low, the cement mortar cannot be injected into the voids sufficiently, resulting in a weak connection within the mixture. A high void ratio means that a large amount of cement mortar is used. This causes the mixture to behave like a very hard structure (Gong et al., 2019).

•*Bitumen Type*; The type of bitumen used in porous asphalt mixtures has a significant influence on the properties of the semi-rigid pavement layer. When a harder bitumen is used, the hardness and compressive strength resistance of the pavement increases considerably at high temperatures (Fediuk et al., 2017). However, with the use of a harder binder and repetition of traffic loads, cracking of the pavement occurs. The effect of modified and conventional binders on the performance characteristics of semi-rigid pavement specimens has been analyzed by many researchers. It was found that the modified binder significantly improved the strength of semi-rigid specimens and the modification of conventional binders.

•*W/c ratio in cement mortar*; The cement mortar used in semi-rigid pavement surfaces must be highly fluid in order to fully penetrate the voids in the porous asphalt structure. Therefore, the w/c ratio plays a major role in improving the strength and fluidity of the cement mortar(Corradini et al., 2017).

•*Admixtures and other supplementary cementitious materials*; Materials such as w/c ratio, additives, polymers in cement mortar have a significant influence on the design of semi-rigid pavement. There is little research on the different compositions and performance of cement mortars for semi-rigid pavement design. Controlling the viscosity of the cement mortar plays an effective role in ensuring that it fully penetrates into the voids of the porous asphalt skeleton and that the mixture provides sufficient strength. If the viscosity of the mortar is low, some voids at the base of the specimen may not be filled, on the other hand, a high w/c ratio leads to a decrease in the overall strength of the mixture. Superplasticizer additive ratios should be used at a relatively low w/c ratio to achieve high fluidity (An et al., 2018).

•*Degree of saturation of cement mortar*: The degree of saturation of the cement mortar indicates the extent to which the air voids in the porous asphalt mixture are filled with mortar (Luo et al., 2020). The degree of saturation is one of the important parameters affecting the performance of semi-rigid mixtures subjected to heavy traffic loading and poor weather conditions. The degree of mortar saturation is not only a function of its injection into the air voids in the porous asphalt mixture, but also depends on the morphological characteristics, size and structure of the voids, which directly affect the interlocking of voids in porous asphalt mixtures (Vavrik et al., 2001).

High-fluidity cement mortar serves as an injection material that can penetrate the porous asphalt mix due to its fluidity, forming a fiber-like network structure within the asphalt (Guo & Hao, 2021). The water-cement ratio is a critical factor influencing both the fluidity and strength of cement mortar. The fluidity of the mortar is positively correlated with the water-cement ratio and negatively correlated with the sand-cement ratio (Vijaya et al., 2009). However, shrinkage may occur in the mix when the water-cement or sand-cement ratio is too high. The design of grouting materials for semi-rigid pavements differs from traditional cement mortar used in concrete. In semi-rigid pavements, the workability, flowability, and strength of the mortar are crucial factors that influence the performance of the mixture.

If the fluidity is insufficient, the air voids in the porous asphalt mixture will not be adequately filled, resulting in semi-rigid pavements that lack the required durability and strength to withstand applied loads (Figure 1).

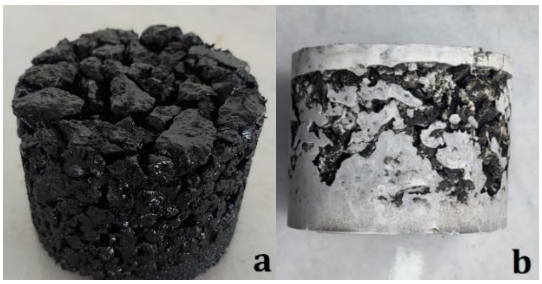


Figure 1. (a) Low air void content of porous asphalt mix and (b) insufficient cement injection

It has been stated that the optimum water-binder ratio for the cement mortar used in semi-rigid pavements should be less than 0.55%, with mineral powder content generally kept below 20% and sand content at approximately 15% (Zhiqiang et al., 2016). Zhang et al. investigated the composition and formulation of cement mortar in mixtures, determining suitable formulations for use in semi-rigid pavement. They examined the effects of flowability, strength, and shrinkage on the cement mortars, and compared various mix designs to identify the most suitable one (Zhang et al., 2020). Sunil et al.evaluated the performance and mechanical properties of semi-rigid pavement mixtures using different aggregate gradations (Sunil et al., 2019). Hasani et al. conducted both laboratory and field evaluations of the design and construction of semi-rigid pavements. They assessed the pavement's performance under loading, resistance to impacts, and resistance to fuel and oil leaks. Additionally, they provided insights into the field evaluation method and discussed the current challenges associated with semi-rigid pavement design (Hassani et al., 2020). Chen et al. conducted an extensive literature review on semi-rigid pavement design, summarizing the design principles, materials, technical requirements, design methods, and testing procedures (Chen et al., 2023). Han et al. investigated the effect of partially replacing cement with waste polyethylene terephthalate (PET) and fly ash (FA) in cement mortars used for semi-rigid pavement design, focusing on the strength and fatigue properties of the mixtures (Khan et al., 2023).

In general, studies have been conducted on semi-rigid mix design, porous asphalt mix design(Gong et al., 2022; Ling, Chen, et al., 2022; Zhao & Yang, 2022) , cement mortar materials (Pei et al., 2016; Yajun et al., 2013), the performance of cement mortar (Davoodi et al., 2021; Khan, Sutanto, Napiah, et al., 2022; Koting et al., 2014), and semi-rigid pavement design (Hu et al., 2022; Li et al., 2022; Ling, Sun, et al., 2022; Wang & Juan, 2020).

Upon reviewing the studies, it was found that the performance of semi-rigid pavements had been widely investigated. However, there were few detailed studies on material selection and the mixing of cement mortar, with limited research in this area.

In this study, by using aggregates from two different sources, varying the water-cement (w/c) ratios and adding superplasticizing admixtures at different ratios, suitable mixing ratios for cement mortar used in semi-hard pavement were determined. The performance of the mixtures was evaluated. The study begins by presenting a detailed analysis of the factors affecting the design of semi-rigid pavements. The following sections provide information on the properties of the materials used to prepare cement mortar, the mortar mixtures, and the experiments conducted. Finally, a comprehensive evaluation of the materials and formulations for semi-rigid pavement mixtures is presented, along with recommendations. Rough fluidity and compressive strength tests. The main objective of the study is to evaluate the material properties, mixing ratios, and performance characteristics of the cement mortar used in semi-rigid pavement mixtures.

2. Materials

Within the scope of the study, porous asphalt mixtures, which are the skeleton of the semi-rigid pavement, were prepared. Separate porous asphalt mixture samples were prepared for basalt and limestone aggregate. Separate cement mortars were prepared for each aggregate to be injected into the voids in the porous asphalt mixtures. CEM I 42.5 Portland cement and superplasticizer additives were used in the cement mortar. The properties of the materials used are listed as items.

2.1. Cement

Within the scope of the study, CEM I 42.5 R type Portland cement obtained from Elazığ cement factory was used in the semi-rigid pavement design. The content of the cement used was stated by the manufacturer as 95%-100% clinker and 0%-5% minor additional components. The physical and mechanical properties of the cement used are given in Table 1.

Table 1. Mechanical and physical properties of cement material

Mechanical and Physical properties	Results	Requirements according to TS EN 197-1	Analysis Method
Compressive Strength 2 days, N/mm²	Min. 20	Min. 20	EN 196-1
Compressive Strength 28 days, N/mm²	42.5-62.5	42.5-62.5	EN 196-1
Initial setting time of concrete, min	Min. 60	Min. 60	EN 196-3
Expansion, mm	Max. 10	Max. 10	EN 196-3

Additionally, chemical analysis using the glass tablet method with XRF was conducted on the CEM I 42.5 R strength cement obtained from the Elazığ Seza cement factory using the fusion method (Figure 2).

Figure 2. Preparation of cement in glass tablet form using the fusion method

The analysis method using XRF is a non-destructive technique that performs element analysis by measuring the characteristic wavelength and intensity generated from the interaction of X-rays with the analyzed material. With this method, the oxide components of Si, Al, Fe, and Ca in the cement are determined. The chemical analysis results are presented in Table 2.

Table 2. Chemical analysis results of the cement

Composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LSF	C_3S	C_3A
Value (%)	19.84	5.28	3.36	60.52	2.38	3.31	94.59	45.84	8.31

2.2. Aggregate

In this study, two types of aggregate were used: basalt and limestone. Necessary tests were conducted on each aggregate to determine their properties, and their effects within the mixture were compared. The basalt aggregate to be used was obtained from BAYSAN Construction Materials Ltd. in Seke village, Ahlat district of Bitlis, while the limestone aggregate was sourced from a marble quarry located in the Bitlis region (Figure 3).

Figure 3. Limestone (a) and basalt (b) aggregates used in the study

Chemical analyses of the basalt and limestone aggregates used in the study were performed using the glass tablet method with XRF, utilizing the fusion technique. The preparation of the samples as glass tablets for chemical analysis is shown in Figure 4.

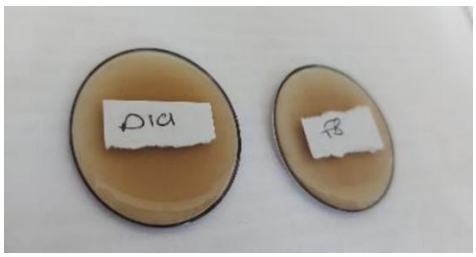


Figure 4. Conversion of basalt and limestone aggregates into glass tablet form

The chemical analysis results of the aggregates are presented in Table 3.

Table 3. Chemical analysis results of basalt and limestone aggregates

Compounds	Basalt Aggregate (%)	Limestone Aggregate (%)
BaO	0.04	-0.01
SiO_2	55.43	1.93
Al_2O_3	16.84	0.15
Fe_2O_3	8.49	0.14
CaO	4.77	52.74
MgO	1.97	1.38
K_2O	2.59	0.03
Na_2O	4.61	0.06
TiO_2	1.66	0.00
P_2O_5	0.20	0.05
Mn_3O_4	0.18	0.00
LSF	2.64	929.12
C_3S	-527.13	198.84
Aluminium Ratio	1.98	1.08
Silica Ratio	2.19	6.74
C_2S	556.35	-144.41
C_4AF	25.84	0.42
Liquid Phase	78.80	2.24
C_3A	30.26	0.16
Total Alkali	6.32	0.08
Loss on Ignition	2.91	43.33

Aggregates have been used in both porous asphalt mixtures and cement mortar mixtures. The physical and mechanical properties of the limestone and basalt aggregates are presented in Table 4. It has been determined that the test results meet the limit values specified in the standards.

Table 4. Physical and mechanical properties of the aggregates

Sieve Size (mm)	Gradation values	Flatness index values		Water Absorption (%)		Apparent Specific Gravity (gr/cm³)		$MgSO_4$ Missing (%)		Micro-Deval Abrasion Values (%)	
		Limestone	Basalt	Limestone	Basalt	Limestone	Basalt	Limestone	Basalt	Limestone	Basalt
25	100	-	-	-	-	-	-				
19	95-100	19.2	16.1	-	-	-	-				
12.5	90-100	11.6	19.6	0.50	1.25	2.75	2.78	8%	4.5%	19%	17%
9.5	63-77	19.7	10.9	0.20	1.25	2.72	2.74				
4.75	11-35	19.6	19.6	0.68	1.48	2.70	2.74				
2	10-20	-	-	1.16	1.99	2.60	2.73				
0.180	5-10	-	-	1.66	1.43	2.62	2.71				
0.075	3-7	-	-	1.77	1.56	2.76	2.58				

2.3. Mixing Water

The quality of mixing water plays an important role in the preparation of concrete. The water used in the mixture should be as clean as possible and free from harmful substances. Drinking water can be used as mixing water for the produced mortar. In this study, the municipal water supply of Elâzığ was used in the design of the mixtures. The analysis results of the municipal water provided by Elâzığ Municipality are presented in Table 5.

Table 5. Analysis results of Elazığ Municipality tap water

Parameter	Method	Directional value	Result
Color	Physical	Normal	
Cloudiness	Turbidimeter	Normal	
Odor	Physical	Normal	
Conductivity	Conductivity meter	2500 µS/cm	656 µS/cm
pH	pH meter	6.5-9.5	7.3
Nitrate	Spectrophotometric	0-500 ppb	9.7
Chloride	Spectrophotometric		0.4
Iron	Spectrophotometric	0.2	Yok

2.4. Chemical Additive

In this study, a superplasticizer additive was used in the mortar mixture for obtaining semi-rigid pavement samples. The reason for using a superplasticizer in the mortar mixture is that the voids in the porous asphalt mixture samples need to be filled to the maximum level with mortar, thus requiring the mortar to have fluid consistency and adequate workability. Fluid Optima 280 is a new generation polycarboxylate-based superplasticizer. It is particularly recommended for concrete that requires high early and ultimate strength while

maintaining consistency in all seasons. By enabling concrete production at low w/c ratios, it enhances the impermeability and strength of the concrete. Following the manufacturer's usage recommendations, the superplasticizer additive was incorporated into the mortar mixture during the second half of the mixing water. The technical specifications of the chemical additive used, provided by the manufacturer, are presented in Table 6.

Table 6. Technical specifications of the additive used in the mortar mixture

Property	Superplasticizer additive	Standard Values	Examination Method
Homogeneity	Homogeneous	Homogeneous	Visual inspection
Appearance/Color	Brown	Brown	Visual inspection
Density (g/cm³)	1.050±0.02 gr/cm³		ISO 758
pH value	4.00±1		ISO 4316
Amount of additive (%)	-		EN 480-8
Soluble chloride in water (%)	<%0.1		EN 480-10
Alkali amount (%)	Suitable		EN 480-12
FT-IR Spectrum active component	Suitable		EN 480-6

2.5. Bitumen

In the conducted study, to determine the degree of saturation of the voids within the porous asphalt, the most suitable cement mortar mixture was prepared using an optimum bitumen content of 4%. Samples of porous asphalt mixtures with a void ratio of 27% were prepared for each type of aggregate. In this context, 50/70 pure bitumen obtained from Turkish Petroleum Refineries was used in the mixtures. According to the binding test results conducted on the 50/70 pure bitumen, it has been determined that the properties of the bitumen meet the technical specifications as presented in Table 7.

Table 7. 50/70 Properties of Pure Bitumen

Property	Results	Specification limits	Standard
Specific Weight	1.02	1.01/1.06	TS EN 15326+A1
Penetration	53.5	50/70	TS EN 1426
Softening Point (°C)	51.3	49/56	TS EN 1427
Viscosity 135 °C (pa.s)	587.5	-	AASHTO TP48
Viscosity 165 °C (pa.s)	165	-	

3. Method

3.1. Preparation of Cement Mortar Mixture

In this study, while obtaining semi-rigid pavement design samples, two different w/c ratios and four different additive material proportions were used for the basalt and limestone aggregates in the mortar mixture. The same coding was applied for both types of aggregate in the naming of the mixtures. The materials used and their quantities are presented in Table 8.

Table 8. Materials used in the cement mortar mixture and their quantities (%)

Mixture	Additive Type	Aggregate	Cement	Water	Additive Material	Water/Cement Ratio
CM 1	S1	26.8	48.8	24.4	-	0.50
CM 2					0.8	
CM 3					1	
CM 4					2	
CM 5		24.4		26.8	-	0.55
CM 6					0.8	
CM 7					1	
CM 8					2	

In the selection of the optimum cement mortar, workability and compressive strength are two important properties. To obtain a sturdy semi-rigid pavement, the cement mortar must penetrate well into the voids of the porous asphalt mixture. For this purpose, the cement mortar should possess high workability (Figure 5).

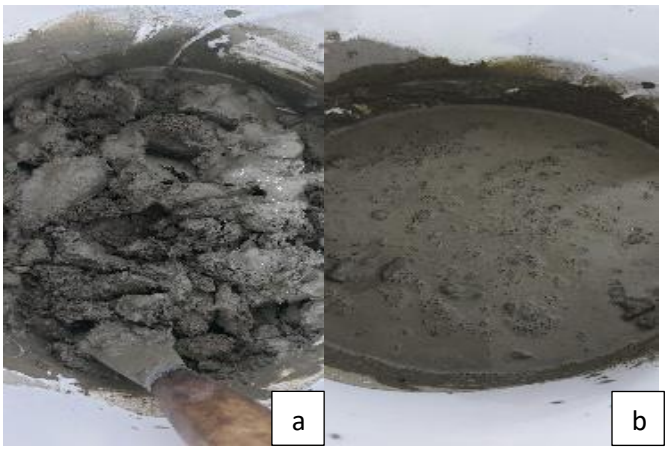


Figure 5. (a) Non-fluid mortar mixture, (b) Mortar mixture that becomes fluid with additive

The second important aspect is compressive strength. The composition of semi-rigid pavements consists of approximately ¼ cement mortar. Therefore, the strength of the cement mortar significantly affects the overall strength of the design. Among these properties, the most critical consideration is the fluidity of the cement mortar, which must completely penetrate the depth of the porous asphalt surface layer without excessive compaction and vibration. Another factor is the pressure of the cement mortar, which significantly influences the final strength and durability characteristics of the semi-rigid mixtures. In this context, flowability and compressive strength tests were conducted on the mortar mixtures in the study.

3.2. Fluidity of Cement Mortar

The cement mortar, which is one of the important components in a semi-flexible pavement, contributes to high compressive strength and rigidity. For the cement mortar to fully penetrate the voids in the porous asphalt, it must have a highly fluid consistency. The properties of the mortar are significant parameters that can affect the performance of semi-rigid pavements when exposed to heavy traffic loads and adverse weather conditions. The water/cement (w/c) ratio plays an important role in achieving a high degree of fluidity in the cement mortar. In this study, a w/c ratio of 0.50 and 0.55 was used.

For the fluidity test of the mortar used in semi-rigid pavement mixtures, different types of funnels, such as the Marsh flow cone, Malaysian mortar flow cone, Leeds flow cone, and flow funnel tests, are utilized (Khan, Sutanto, Yusoff, et al., 2022).

In this study, the fluidity value of the mortar was determined using a flow cone. The test was conducted according to the ASTM C939-10 standard (Astm:C939-10, 2010). A quantity of 1725 ml of the prepared mortar was poured into the flow cone apparatus, allowing it to flow out. The time required to empty the flow cone was measured in seconds and recorded as the flow of the cement mortar (Figure 6).

Figure 6. Flow cone used to determine the fluidity of cement mortar

The higher the flow time, the lower the fluidity of the mortar, making it more difficult to penetrate the voids in the mixture. However, the standard flow time depends on the geometry and size of the flow cone used. For the cement mortar to fully penetrate the porous asphalt structure, the ideal flow time has been determined to be 10-14 seconds according to the technical specifications of the injection material for semi-rigid pavements(Davoodi et al., 2021).

3.3. Compressive Strength of Cement Mortar Materials

The strength of the mortar material used for the semi-rigid pavement design is a crucial factor. In this context, compressive tests were performed on the mortar samples. Samples of 50×50×50 mm were used in the experiment. After determining the material ratios in the mixture, the prepared mixtures were filled into 50 mm^3 sample molds in two layers and placed using a table-type vibrator (Figures 7).

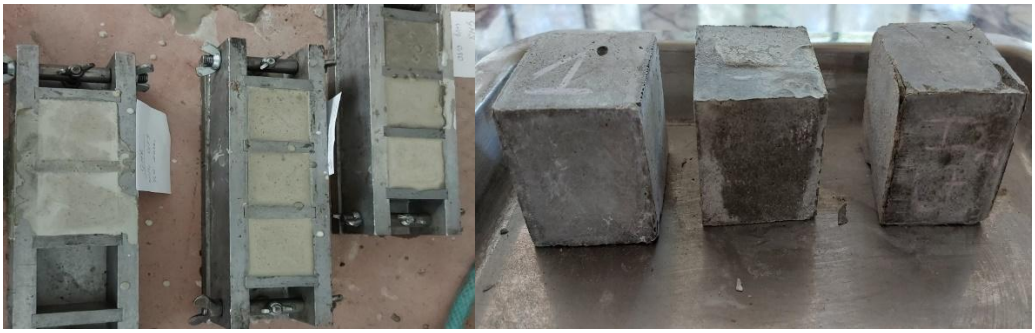


Figure 7. Molds and samples used for the compressive strength of cement mortar

The samples were kept in molds for 24 hours to set, and wet jute cloths were placed over the samples to prevent moisture loss. After 24 hours, the samples were removed from the molds and placed in a curing tank at a temperature of 20±2°C for curing periods of 7 and 28 days. The test was conducted in accordance with the BS EN 196-1 standard (British Standards Institution BSI, 2016). The compressive test was performed using a fully automated press machine at a speed of 2400±200 N/s (Figure 8).

Figure 8. Fully automated press machine

The experiment was conducted on a total of 48 samples, with 3 samples from each of the different combination mortar mixtures, according to the curing durations (Figure 9). Mortar mixtures were prepared separately for each type of aggregate.

Figure 9. Samples of cement mortar after the applied compressive strength test

The compressive strength values of the samples were determined using Equation 1.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (1)$$

In Equation 1;
f_m: Compressive strength, MPa
P: Maximum breaking load, N
A: Surface area of the sample, mm^2

The 28-day compressive strengths of the cement mortar samples were approximately determined to be 50 MPa (Bang et al., 2017).

In the literature reviews conducted, bending tests have also been applied to prismatic-shaped samples of cement mortar. The bending property previously sought in Turkish standards is no longer included in the current testing standards. Therefore, the requirement to calculate the bending-tensile values of the mortar samples has been eliminated. According to the latest Turkish standards, while obtaining bending strength is not mandatory, tests are still conducted on prismatic samples for compressive strength. In examining American standards, compressive strength tests are performed on cube samples measuring 50×50×50 mm. In this context, less material is used when preparing cube samples compared to prismatic molds. Consequently, the BS EN 196-1 standard was employed in this study, and only compressive tests were conducted on cube samples, with no need for bending-tensile tests.

3.4. Mortar Ratio and Saturation Degree in Semi-Rigid Mixtures

In semi-rigid pavements, the mortar ratio, saturation degree, and the remaining air voids in porous asphalt mixtures after being filled with mortar are three critical parameters related to performance and durability under traffic loads and climatic conditions. Due to the potential flow of the asphalt binder at high temperatures, approximately 4-8% air voids are required in asphalt mixtures(Arabani et al., 2017). In contrast, in semi-rigid pavements, the mortar materials with sufficient coverage over the components of the asphalt mixture prevent the flow of the asphalt binder. Therefore, studies have indicated that semi-rigid pavements should have remaining air voids ranging from 3% to 6%.

After filling the voids in porous asphalt mixtures, the parameters of mortar saturation degree and mortar ratio, as well as the remaining porosity in semi-rigid pavements, are calculated. The saturation degree of the mortar materials (Sg) is used to calculate the amount of mortar materials in the porous asphalt mixtures and is determined using Equation 2 (Luo et al., 2020).

$$S_g = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho \times V \times V_a} \times 100 \quad (2)$$

In Equation 2;
Sg: The degree of saturation of mortar materials (%)
m_1: Weight of the specimen before filling with mortar (g)
m_2: Weight of the specimen after filling with mortar (g)
ρ : Cement density (g/cm^3)
V: Sample volume (cm^3)
Va: Air void of porous asphalt mixtures (%)

The proportion of mortar mix is generally the ratio of the volume of mortar material to the target air space. Equation 3 is used for the calculation(Abedini et al., 2017).

$$G_r = \frac{m_0 - m_1}{\rho V_a} \quad (3)$$

In Equation 3;
Gr: Proportion of mortar material in porous asphalt mixtures (%)
m_1: Weight of the sample before filling the mortar mix (g)
m_2: Weight of the specimen after filling the mortar mixture (g)
ρ : Cement density (g/cm^3)
Va: Air void of porous asphalt mixtures (%)

One of the most important parameters that can affect the performance of semi-rigid pavements exposed to heavy traffic loads and bad weather conditions is the degree of saturation. According to Chinese standards, the degree of saturation of mortar should be ≥92% (Corradini et al., 2017).

3.5. Preparation of Porous Asphalt Mixture Samples

Porous asphalt Marshall specimens were prepared after determining the aggregate gradation and optimum bitumen content. Porous asphalt specimens prepared using Marshall mix design were obtained by mixing 1100 g of aggregate with 4% pure bitumen (Figure 10).

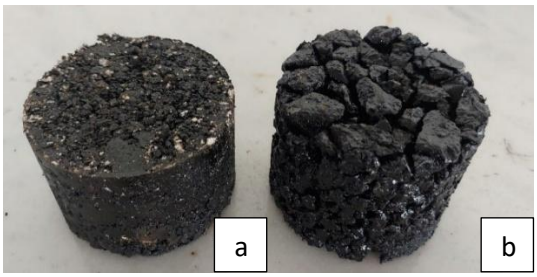


Figure 10. (a) Conventional asphalt mix and (b) Porous asphalt mix marshall specimens

For the basalt aggregate mixtures, 50 strokes were applied on both surfaces in the Marshall compaction device. For the limestone aggregate mixtures, impact compaction on both surfaces was found to cause severe crushing of the limestone aggregate in specimens formed by the standard forming method (Figure 11). This type of crushing is not consistent with real engineering. Therefore, the Marshall impact number of limestone aggregate mixtures should be reduced.

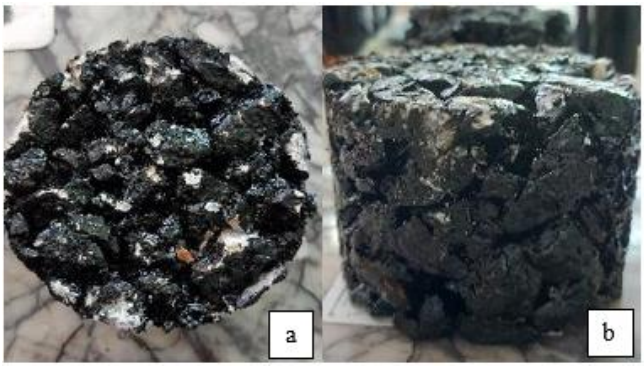


Figure 11. (a) Crushing of limestone mixed specimen with 50 strokes on both surfaces and (b) specimen without sufficient void ratio

In their study, Xu et al. performed compaction by selecting 36 impacts on both surfaces of the specimen to ensure that the void ratio of limestone aggregate mixtures reaches the targeted void value in the specimens. They suggested that the number of impacts in the compaction of Marshall specimens should be adjusted by considering the targeted void ratio of porous asphalt mix specimens(Xu et al., 2021).
Based on these studies, porous asphalt with limestone aggregate was compacted on Marshall specimens with 35 impacts on each side (Figure 12).

Figure 12. Porous asphalt specimens with limestone aggregate compacted to 35 impacts on both surfaces

The voids in the prepared porous asphalt mixture specimens were filled with cement mortar and semi-rigid pavement mixtures were obtained to determine the degree of saturation (Figure 13).

Figure 13. Porous asphalt and semi-rigid mix specimens

4. Results and Discussion

Within the scope of the study, the results of fluidity, compressive strength and degree of mortar saturation of cement mortar mixtures are given under headings.

4.1. Results of the Fluidity Experiment

Within the scope of the study, the mixture ratios used in the literature were taken as references for the mixture ratios of the cement mortar injected into the porous asphalt mixture specimens to obtain semi-rigid pavement specimens. As a result, it was deemed appropriate to use two different w/c ratios in the cement mortar Accordingly, the first mix used a 0.50 w/c ratio, 26.8% aggregate and 48.8% cement, while the second mix used a 0.55 w/c ratio, 24.4% aggregate and 48.8% cement. For each type of mixture, both control samples and mortar mixtures with superplasticizers added at 2%, 1% and 0.8% were tested separately for flowability and compressive strength. CEM I 42.5 N Portland cement was used in the mixtures. Figure 14 shows the flow times of the mixture types prepared with basalt aggregate and limestone aggregate.

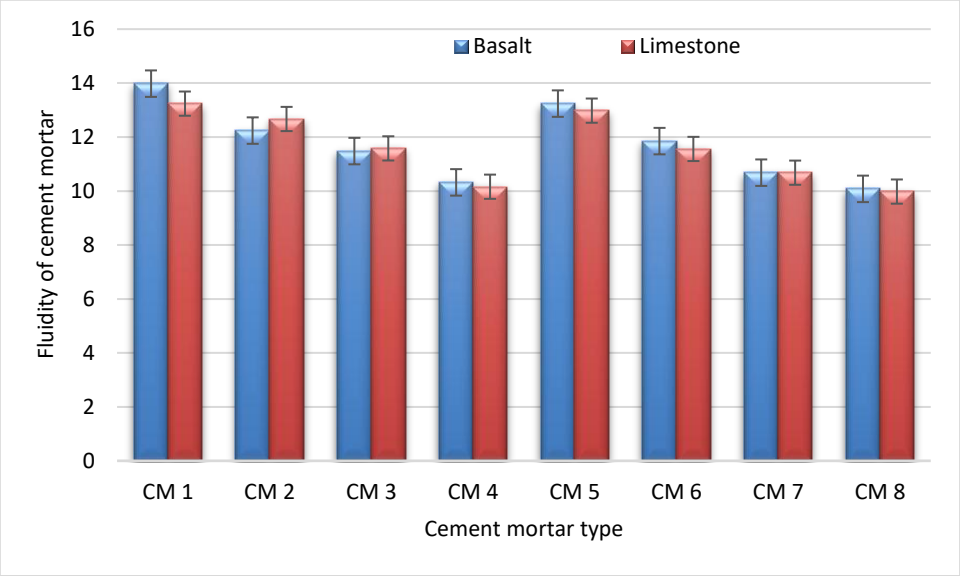


Figure 14. Fluidity times of mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregate

When the fluidity times of the cement mortar types were examined, the fluidity time of the control sample with a w/c ratio of 0.50 without additives in the mortar mixtures of basalt aggregate was determined as 13.98 seconds. Likewise, the fluidity time of the control sample prepared with limestone aggregate without additives was determined to be 13.24 seconds. The viscosity times of the mortar mixtures with 2%, 1% and 0.8% superplasticizer additives were determined to be suitable since they were within the viscosity time determined as 10-14 seconds. Since the cement mortar injected into the voids in the porous asphalt was required to be very fluid, CM 4 cement mortar mixtures with an additive content of 2%, a w/c ratio of 0.50 and viscosity times of 10.32 and 10.16 s, respectively, were selected.

High fluidity (short flow time) can lead to poor mechanical properties of hardened cement mortar materials. In addition, high fluidity increases the likelihood of the cement mortar flowing out at the bottom or sides when injected into the porous asphalt mix. Low viscosity (long flow time), on the other hand, makes it difficult for the grouting materials to penetrate into the porous asphalt mix specimens, which may affect the injection rate and injection time. The flow time selected for the study was in the range of 10-14 seconds. The majority of the mixtures produced had the specified flow times.

4.2. Compression Test Results

In the compressive strength test, 50×50×50 cm cube specimens were used. Cement mortars were prepared separately for limestone and basalt aggregates. Two different w/c ratios and three different proportions of additives were added to the mixtures and compressive strength tests were performed on the combined specimens. The compressive strength test results are given in Table 9 for basalt aggregate and Table 10 for limestone aggregate.

Table 9. Compressive strength values of cement mortar mixtures prepared with basalt aggregate

Basalt Mix	Additive Ratio	W/C ratio	Fluidity Time (sn)	7-day Compressive Strength (MPa)	28-day Compressive Strength (MPa)
CM 1	-	0.50	13.98	42.75	51.24
CM 2	0.8%		12.24	34.52	48.71
CM 3	1%		11.48	40.66	49.99
CM 4	2%		10.32	37.48	50.28
CM 5	-	0.55	13.24	25.1	35.1
CM 6	0.8%		11.85	34.61	46.67
CM 7	1%		10.68	32.63	48.17
CM 8	2%		10.08	31.89	46.36

Table 10. Compressive strength values of cement mortar mixtures prepared with limestone aggregate

Limestone Mix	Additive Ratio	W/C ratio	Fluidity Time (sn)	7-day Compressive Strength (MPa)	28-day Compressive Strength (MPa)
CM 1	-	0.50	13.24	39.18	46.21
CM 2	0.8%		12.67	51.62	56.99
CM 3	1%		11.58	33.84	45.34
CM 4	2%		10.16	28.8	41.94
CM 5	-	0.55	12.98	27.06	38.45
CM 6	0.8%		11.56	33.2	38.81
CM 7	1%		10.68	27.49	38.64
CM 8	2%		9.98	30.2	31.84

The comparison of the 7-day and 28-day compressive strengths of the mortar mixtures according to the types of mixtures is presented separately in Figures 15-18.

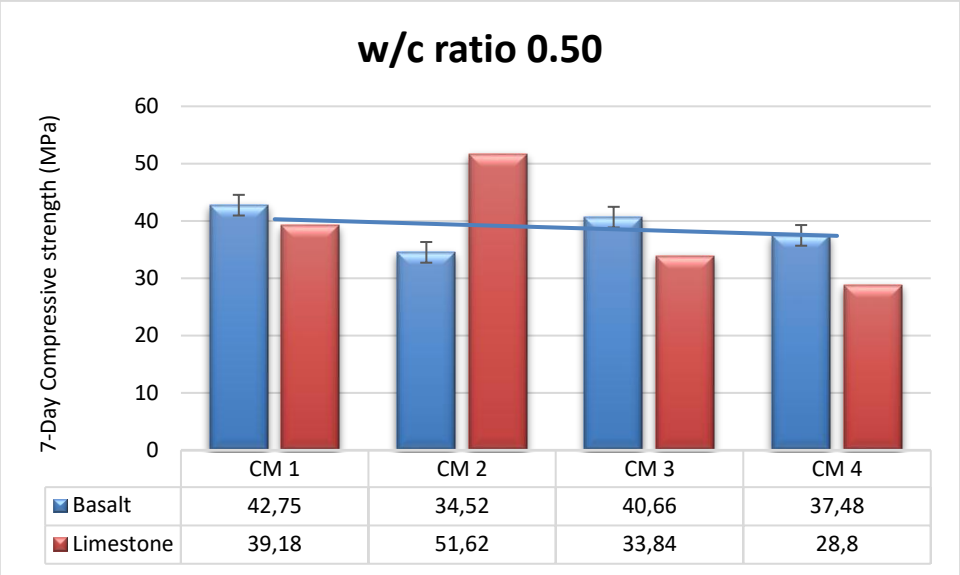


Figure 15. 7-day compressive strengths of mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregates with a w/c ratio of 0.50 and according to additive ratios

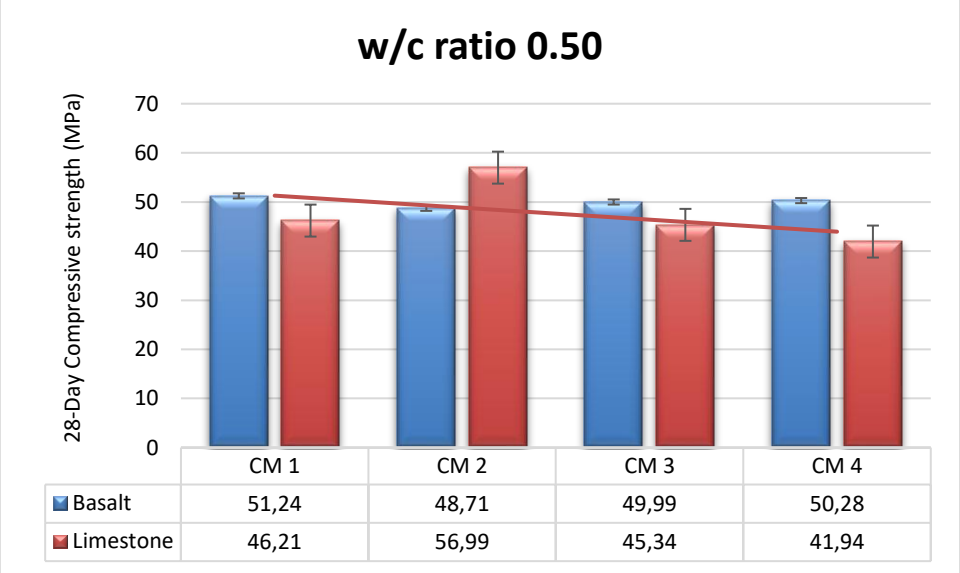


Figure 16. 28-day compressive strengths of mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregates with a w/c ratio of 0.50 and according to additive ratios

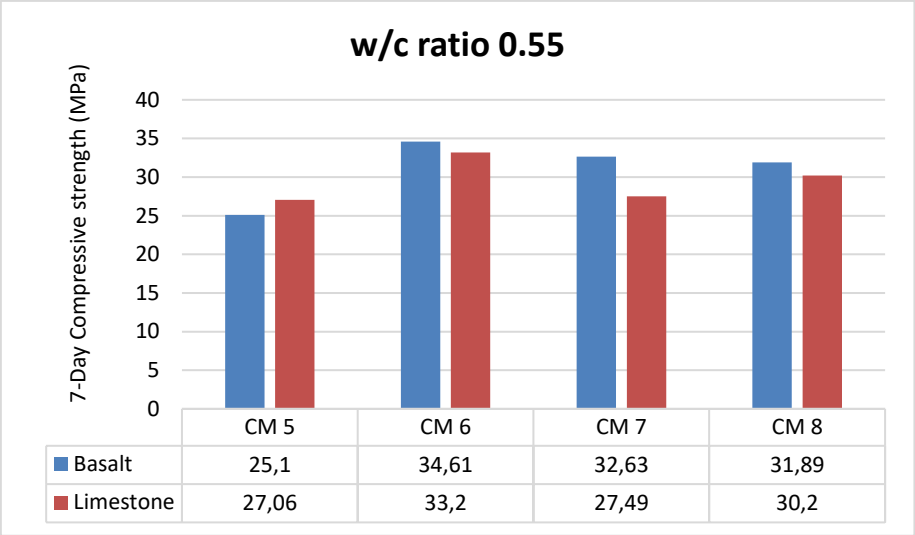


Figure 17. 7-day compressive strengths of mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregates with a w/c ratio of 0.55 and according to additive ratios

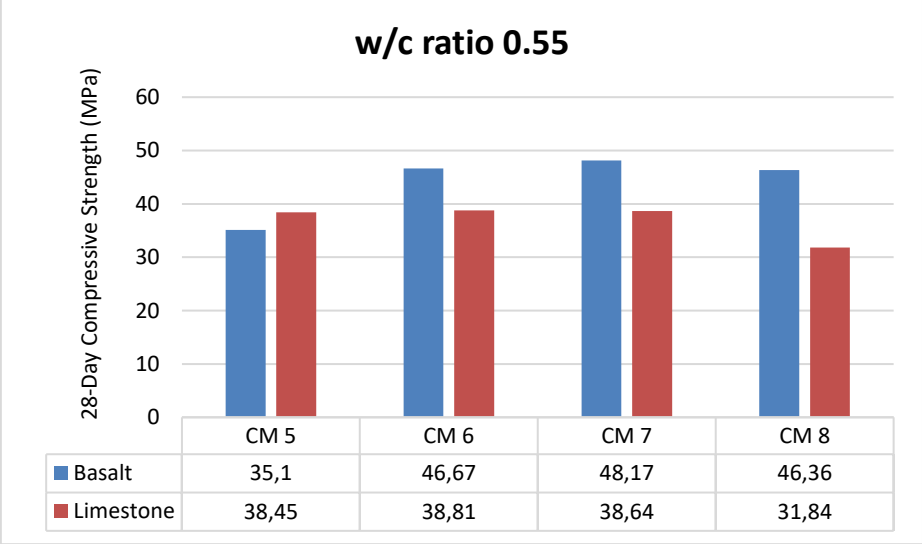


Figure 18. 28-day compressive strengths of mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregates with a w/c ratio of 0.55 and according to additive ratios

When the results were examined, it was found that as the curing time of the cement mortar increased, the compressive strengths showed an increase in each mixture. In the cement mortar prepared with basalt aggregate, the mixture with a w/c ratio of 0.50 exhibited the highest compressive strength in the control sample named CM1, with a 7-day compressive strength of 42.75 MPa and a 28-day compressive strength of 51.24 MPa. Since the cement mortar injected into the porous asphalt was desired to be fluid, the ideal mixture in terms of fluidity and compressive strength was the one with a w/c ratio of 0.50 and 2% additive material, which had a fluidity time of 10.32 and a 28-day compressive strength of 50.28 MPa. This CM4 basalt aggregate mortar mixture was used to obtain semi-rigid mixture samples.

Looking at the results of the mortar mixtures prepared with limestone aggregate, the control sample CM1 with a w/c ratio of 0.50 had a 28-day compressive strength of 46.21 MPa, while the control sample with a w/c ratio of 0.55 had a 28-day compressive strength of 38.45 MPa. To select the ideal mixture type in terms of fluidity and compressive strength, the CM4 limestone aggregate mortar mixture with a w/c ratio of 0.50, containing 2% additive material and a 28-day compressive strength of 41.94 MPa, was used to obtain semi-rigid samples. Since a high amount of superplasticizer can cause separation in the mixture, literature sources indicate that the superplasticizer content in cement mortar should be a maximum of 2%. Therefore, in this study, the superplasticizer ratio was selected as a maximum of 2%.

When the results of the experiment were analyzed comprehensively, when the compressive strengths based on the additive ratios used in the cement mortar are examined, the mixture prepared with basalt aggregate at a w/c ratio of 0.50 with 2% additive material had a 7-day compressive strength of 37.48 MPa. The mixture with 1% additive material achieved a 7-day compressive strength of 40.66 MPa, while the mixture with 0.8% additive material had a compressive strength of 34.25 MPa. For mixtures with a w/c ratio of 0.55, the 7-day compressive strength of the mixture with 2% additive material was determined to be 31.89 MPa, the mixture with 1% additive material was 32.63 MPa, and the mixture with 0.8% additive material was 34.61 MPa.

In the mortar mixtures prepared with limestone aggregate, the 7-day compressive strengths for the mixtures with a w/c ratio of 0.50 and with 2%, 1%, and 0.8% additive materials were found to be 28.8 MPa, 33.84 MPa, and 51.62 MPa, respectively. For the mixtures with a w/c ratio of 0.55 and with 2%, 1%, and 0.8% additive materials, the 7-day compressive strengths were obtained as 30.2 MPa, 27.49 MPa, and 33.2 MPa, respectively.

To select the most suitable mixture among the mortar combinations, the flowability time and compressive strengths of the mortar were generally examined. The cement mortar injected into the porous asphalt mixture samples was prepared by injecting each aggregate type with its corresponding mortar mixture, resulting in semi-rigid mixture samples. Since flowability is the most important factor in the mortar mixtures prepared with basalt and limestone aggregates, the CM4 mortar mixtures with a w/c ratio of 0.50 and 2% additive material were used to obtain the semi-rigid mixture samples.

Due to the lack of a standard for semi-rigid pavement design in our country, the experimental results were evaluated based on data collected from literature reviews. Accordingly, for the production of semi-rigid pavement samples, the flowability time of the cement mortar should be selected between 10 and 14 seconds, with 7-day compressive strengths ranging from 10 to 30 MPa and 28-day compressive strengths between 20 and 50 MPa. Additionally, according to Chinese standards, the flowability time of the mortar should also be within the range of 10 and 14 seconds, with compressive strengths of at least 15 MPa for 7 days and at least 30 MPa for 28 days.

4.3. Mortar Ratio and Saturation Degree

In semi-rigid pavement design, the mortar ratio and saturation degree represent the connections between the voids within the mixture. According to the literature, the saturation degree of the mortar should exceed 90%. This ensures uniform penetration within the mixture, eliminating the gaps between the interconnections. In this study, the saturation values of the mortar within the porous asphalt samples are presented in Table 11.

Table 11. The saturation degree values for the semi-rigid mixtures prepared with basalt aggregate

Type of Aggregate	M1 (g)	M2 (g)	ρ (g/cm^3)	V (cm^3)	Va (%)	Sg (%)
Basalt	1129.4	1379.4	1.92	528.62	27.2	90.5579
Limestone	1132.63	1382.63	1.92	512.35	27.2	93.4336

When examining the experimental results, the saturation degrees of the semi-rigid mixtures prepared with limestone aggregate were found to be higher than those prepared with basalt aggregate. This is attributed to the smoother surface of the limestone aggregate compared to the basalt aggregate. The saturation degrees of the prepared mixtures exceeded the threshold values.

5. Conclusion

In the study, the material properties and mixture formulations used in the production of semi-rigid pavements were presented. Flowability and compressive strength tests were conducted on the cement mortar mixtures, leading to the proposal of the most suitable mixture design. In this work, porous asphalt samples were prepared, and the selected optimal cement mortar mixture was injected into the voids to determine the saturation degrees for the semi-rigid mixtures. The results obtained from the study are as follows:

• One of the most important parameters for semi-rigid pavement layers is the cement mortar. The better the flowability of the cement mortar, the better it will penetrate the voids within the porous asphalt and connect the spaces between them.

• When examining the flowability times of the cement mortar mixtures, it was determined that the mixtures containing 2%, 1%, and 0.8% superplasticizer additives remained within the established flowability time of 10-14

seconds. Therefore, all mortar mixtures were deemed suitable. Since the cement mortar injected into the voids of the porous asphalt needs to be very fluid, it is appropriate to use CM4 cement mortar mixtures with a 2% additive amount, a w/c ratio of 0.50, and flowability times of 10.32 and 10.16 seconds, respectively.

• According to the experimental results, the compressive strengths of the cement mortars with different additive ratios showed very high values for both basalt and limestone aggregate mixtures. The mortar mixtures for both aggregate types are quite suitable for semi-rigid superstructure mixtures. However, since flowability is more important than compressive strength, better results can be achieved by using mixtures with a 2% additive ratio and a w/c ratio of 0.50.

• Additionally, it was determined that selecting lower w/c ratios in the cement mortar mixtures positively affects their strength.

• In future studies, it is suggested to investigate many factors of the cement mortar, such as curing time, rheological properties, shear strength, elastic modulus, segregation rate, and adhesion strength. Furthermore, cement production causes carbon dioxide emissions both directly and indirectly. Therefore, research can be conducted to develop durable, sustainable, and cost-effective cement mortars for semi-rigid pavement surfaces by using a significant percentage of municipal/industrial waste.

Acknowledgment

This work has been derived from the PhD research conducted by A. A. EL. We would like to thank the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) for supporting this study with research project number 123M766.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

Abedini, M., Hassani, A., Kaymanesh, M. R., & Yousefi, A. A. (2017). Low-temperature adhesion performance of polymer-modified Bitumen emulsion in chip seals using different SBR latexes. *Petroleum Science and Technology*, *35*(1). https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1238932

Afonso, M. L., Dinis-Almeida, M., Pereira-De-Oliveira, L. A., Castro-Gomes, J., & Zoorob, S. E. (2016). Development of a semi-flexible heavy duty pavement surfacing incorporating recycled and waste aggregates - Preliminary study. *Construction and Building Materials*, *102*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.165

An, S., Ai, C., Ren, D., Rahman, A., & Qiu, Y. (2018). Laboratory and Field Evaluation of a Novel Cement Grout Asphalt Composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *30*(8). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002376

Arabani, M., Tahami, S. A., & Taghipoor, M. (2017). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Materials and Pavement Design*, *18*(3). https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1189349

Astm:C939-10. (2010). Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method). *ASTM International*, *04*(c).

Bang, J. W., Lee, B. J., & Kim, Y. Y. (2017). Development of a semirigid pavement incorporating ultrarapid hardening cement and chemical admixtures for cement grouts. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2017*. https://doi.org/10.1155/2017/4628690

British Standards Institution BSI. (2016). Methods of testing cement Part 1: Determination of strength. In *British Standard*.

Chen, Z., Qiao, J., Yang, X., Sun, Y., & Sun, D. (2023). A review of grouting materials for pouring semi-flexible pavement: Materials, design and performance. In *Construction and Building Materials* (Vol. 379). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131235

Cihackova, P., Hyzl, P., Stehlik, D., Dasek, O., Šernas, O., & Vaitkus, A. (2015). Performance characteristics of the open-graded asphalt concrete filled with a special cement grout. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *10*(4). https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.40

Corradini, A., Cerni, G., D'Alessandro, A., & Ubertini, F. (2017). Improved understanding of grouted mixture fatigue behavior under indirect tensile test configuration. *Construction and Building Materials*, *155*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.048

Davoodi, A., Aboutalebi Esfahani, M., Bayat, M., & Mohammadyan-Yasouj, S. E. (2021). Evaluation of performance parameters of cement mortar in semi-flexible pavement using rubber powder and nano silica additives. *Construction and Building Materials*, *302*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124166

Fediuk, R. S., Smoliakov, A. K., Timokhin, R. A., Batarshin, V. O., & Yevdokimova, Y. G. (2017). Using thermal power plants waste for building materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *87*(9). https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/9/092010

Gong, M., Xiong, Z., Chen, H., Deng, C., Chen, X., Yang, J., Zhu, H., & Hong, J. (2019). Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation. *Construction and Building Materials*, *207*.

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.064
Gong, M., Xiong, Z., Deng, C., Peng, G., Jiang, L., & Hong, J. (2022). Investigation on the impacts of gradation type and compaction level on the pavement performance of semi-flexible pavement mixture. *Construction and Building Materials*, *324*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126562
Guo, X., & Hao, P. (2021). Influential factors and evaluation methods of the performance of grouted semi-flexible pavement (Gsp)—a review. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(15). https://doi.org/10.3390/app11156700
Hardiman, Hamzah, M. O., & Mohammed, A. A. (2004). Binder Drainage Test for Porous Mixtures Made By Varying the Maximum Aggregate Sizes. *Civil Engineering Dimension*, *6*(1).
Hassan, K. E., Setyawan, A., & Zoorob, S. E. (2018). Effect of cementitious grouts on the properties of semi-flexible bituminous pavements. In *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*. https://doi.org/10.1201/9780203743928-15
Hassani, A., Taghipoor, M., & Karimi, M. M. (2020). A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance. In *Construction and Building Materials* (Vol. 253). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119196
Hu, C., Zhou, Z., & Chen, G. (2022). Effects of different types of acid rain on water stability of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, *322*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126308
Husain, N. M., Karim, M. R., Mahmud, H. B., & Koting, S. (2014). Effects of aggregate gradation on the physical properties of semiflexible pavement. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/529305
Khan, M. I., Sutanto, M. H., Khahro, S. H., Zoorob, S. E., Nur, N. I., Al-Sabaeei, A. M., & Javed, Y. (2023). Fatigue Prediction Model and Stiffness Modulus for Semi-Flexible Pavement Surfacing Using Irradiated Waste Polyethylene Terephthalate-Based Cement Grouts. *Coatings*, *13*(1). https://doi.org/10.3390/coatings13010076
Khan, M. I., Sutanto, M. H., Napiah, M. Bin, Zoorob, S. E., Yusoff, N. I. M., Usman, A., & Memon, A. M. (2022). Irradiated polyethylene terephthalate and fly ash based grouts for semi-flexible pavement: design and optimisation using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*, *23*(8). https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1861446
Khan, M. I., Sutanto, M. H., Yusoff, N. I. M., Zoorob, S. E., Rafiq, W., Ali, M., Fediuk, R., & Vatin, N. I. (2022). Cementitious Grouts for Semi-Flexible Pavement Surfaces—A Review. *Materials*, *15*(15). https://doi.org/10.3390/ma15155466
Koting, S., Karim, M. R., Mahmud, H., Mashaan, N. S., Ibrahim, M. R., Katman, H., & Husain, N. M. (2014). Effects of using silica fume and polycarboxylate-type superplasticizer on physical properties of cementitious grout mixtures for semiflexible pavement surfacing. *The Scientific World Journal*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/596364
Li, G., Xiong, H., Ren, Q., Zheng, X., & Wu, L. (2022). Experimental Study and Performance Characterization of Semi-Flexible Pavements. *Coatings*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/coatings12020241
Ling, S., Chen, Z., Sun, D., Ni, H., Deng, Y., & Sun, Y. (2022). Optimal Design of Pouring Semi-Flexible Pavement via Laboratory Test, Numerical Research, and Field Validation. In *Transportation Research Record* (Vol. 2676, Issue 11). https://doi.org/10.1177/03611981221093631
Ling, S., Sun, Y., Sun, D., & Jelagin, D. (2022). Pore characteristics and permeability simulation of porous asphalt mixture in pouring semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *330*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127253
Luo, S., Yang, X., Zhong, K., & Yin, J. (2020). Open-graded asphalt concrete grouted by latex modified cement mortar. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(1). https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1479290
Pei, J., Cai, J., Zou, D., Zhang, J., Li, R., Chen, X., & Jin, L. (2016). Design and performance validation of high-performance cement paste as a grouting material for semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *126*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.036
Sunil, S., Varuna, M., & Nagakumar, M. S. (2019). Performance evaluation of semi rigid pavement mix. *Materials Today: Proceedings*, *46*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.311
Vavrik, W. R., Pine, W. J., Huber, G., Carpenter, S. H., & Bailey, R. (2001). The Bailey method of gradation evaluation: The influence of aggregate gradation and packing characteristics on voids in the mineral aggregate. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *70*.
Vijaya, S. S. A., Karim, M. R., Mahmud, H., & Ishak, N. F. (2009). Influence of superplasticiser on properties of cementitious grout used in semi-flexible pavement. *In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 296–296.
Wang, L., & Juan, H. (2020). Research on the Influence Factors of Low-Temperature Crack Resistance of Semiflexible Pavement Materials Based on Freezing Test. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, *14*(3). https://doi.org/10.1061/jhtrcq.0000740
Xu, G., Fan, J., Ma, T., Zhao, W., Ding, X., & Wang, Z. (2021). Research on application feasibility of limestone in sublayer of Double-Layer permeable asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, *287*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123051
Yajun, W., Guo, C., Yanfeng, T., & Jianjun, W. (2013). Design of mix proportion of cement mortar with high-performance composite semi-flexible pavement. *Advanced Materials Research*, *641–642*(1). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.641-642.342
Zhang, J., Huang, W., Zhang, Y., Lv, Q., & Yan, C. (2020). Evaluating four typical fibers used for OGFC mixture modification regarding drainage, raveling, rutting and fatigue resistance. *Construction and Building Materials*, *253*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119131
Zhao, W., & Yang, Q. (2022). Study on the applicability of asphalt concrete skeleton in the semi-flexible pavement. *Construction and Building Materials*, *327*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126923
Zhiqiang, C. H. E. N. G., Fansheng, K. O. N. G., & Rongrong, J. (2016). Study on the bleeding performance of cement grouting material on semiflexible pavement. *Journal of China and Foreign Highway*, *36(4)*, 276-279.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 528-544, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1604190

Araştırma Makalesi Research Article

PROJE EFOR TAHMİNİ İÇİN MAKİNE ÖĞRENMESİ MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE SHAP YÖNTEMİ KULLANILARAK AÇIKLANMASI

Esma Nur KAYA[1], Yasin GÖRMEZ[2*]

[1] Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, Sivas, Türkiye

[2] Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Sivas, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Proje Yönetimi, Proje Efor Tahmini, Makine Öğrenmesi, Açıklamalı Yapay Zekâ, SHAP.

Öz

Günümüzde işletmeler, dijitalleşen dünyaya uyum sağlamak için başarılı bir proje yönetimine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle yazılım projelerinin artışıyla birlikte, doğru efor tahmini yapmak kritik bir süreç haline gelmiştir. Efor tahmini, projenin tamamlanması için gereken zaman ve iş gücü miktarını tahmin ederek maliyetleri optimize etmeyi sağlamaktadır. Bu çalışmada, proje efor tahmini için rastgele orman, karar ağacı, doğrusal regresyon, yapay sinir ağı, GradientBoost ve AdaBoost yöntemleri geliştirilmiştir. china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05 ve usp05-ft gibi 6 farklı veri seti üzerinde 50 tekrarlayan sınama yaklaşımı kullanılarak analizler yapılmış ve modeller ortalama mutlak hata, ortalama logaritmik kare hatası, belirleme katsayısı ve ortalama göreli büyüklük hatası metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre yapay sinir ağı, rastgele orman, karar ağaçları ve GradientBoost modellerinin farklı veri setlerinde en başarılı modeller olduğu gözlemlenmiştir. Proje efor tahmini için ise en başarılı modelin karar ağacı olduğu kanısına varılmıştır. Çalışmada yapılan diğer bir analizde ise, geliştirilen modeller açıklamalı yapay zekâ modeli olan SHAP (SHapley Additive exPlanations) yöntemi kullanılarak açıklanmıştır. Yapılan açıklamalar doğrultusunda her bir veri seti için bazı özniteliklerin model karar alma sürecinde diğer özniteliklere göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

DEVELOPMENT OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PROJECT EFFORT PREDICTION AND EXPLANATION USING SHAP METHOD

Keywords

Project Management, Project Effort Estimation, Machine Learning, Explainable Artificial Intelligence, SHAP.

Abstract

In today's digitalized world, successful project management has become essential for businesses, with accurate effort estimation emerging as a critical component due to the increasing prevalence of software projects. Effort estimation facilitates cost optimization by predicting the time and labor required for project completion. This study developed and evaluated six regression models—random forest, decision tree, linear regression, neural network, GradientBoost, and AdaBoost—for project effort estimation. Analyses were conducted on six datasets (china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05, and usp05-ft) using 50 repeated holdout tests, and model performance was compared using metrics such as mean absolute error, mean squared logarithmic error, coefficient of determination, and mean relative magnitude error. The results demonstrated that artificial neural networks, random forest, decision trees, and GradientBoost models performed most effectively across the datasets, with the decision tree identified as the best-performing model for effort estimation. Furthermore, the study utilized the SHAP (Shapley Additive Explanations) method to interpret the models, revealing that specific attributes were more influential than others in the decision-making process across different datasets.

Alıntı / Cite

Kaya, E. N., Görmez, Y., (2025). Proje Efor Tahmini İçin Makine Öğrenmesi Modellerinin Geliştirilmesi ve SHAP Yöntemi Kullanılarak Açıklanması, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 528-544.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. N. Kaya, 0000-0003-1688-3832
Y. Görmez, 0000-0001-8276-2030

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	20.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	08.05.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	16.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: yasingormez@cumhuriyet.edu.tr, +90 346 487 00 00

DEVELOPMENT OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PROJECT EFFORT PREDICTION AND EXPLANATION USING SHAP METHOD

Esma Nur KAYA[1] Yasin GÖRMEZ[2†],
[1] Sivas Cumhuriyet University, Institute of Social Sciences, Department of Management Information Systems, Sivas, Turkey
[2] Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Department of Management Information Systems, Sivas, Turkey

Highlights

- The performance of regression models in project effort prediction was evaluated.
- Regression models were interpreted using the SHAP method.
- The effects of attributes from different datasets on model decision-making were analyzed.

Purpose and Scope

The study evaluates the performance of regression models in project effort estimation, aiming to identify the most suitable models for automated project effort estimation systems. Using diverse datasets, multiple evaluation metrics, and a repeated holdout approach, the study seeks to generalize findings by assessing model performance under varying conditions. Furthermore, through model interpretability analyses, the study investigates which attributes have the most significant impact on automatic project effort estimation.

Design/methodology/approach

Random Forest, Decision Tree, Artificial Neural Network, Gradient Boosting, AdaBoost, and Linear Regression methods were employed to achieve the objectives of this study. The models were compared using evaluation metrics, including mean absolute error, mean squared logarithmic error, coefficient of determination, and mean relative magnitude error. Analyses were conducted on six datasets (china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05, and usp05-ft) and interpreted using the SHAP method. Beeswarm plots were generated to visualize the explanations, measuring the impact of each attribute on the model's estimation process.

Findings

Based on the analyses, it was observed that Artificial Neural Network, Random Forest, Gradient Boosting, and Decision Tree models were the most successful across different datasets. While both Random Forest and Decision Tree models performed best on the cocomonasa_v1 dataset, the Decision Tree model was the top-performing model on two datasets, Gradient Boosting excelled on two datasets, and Artificial Neural Network was the most successful on one dataset. Consequently, the Decision Tree model is considered the most effective among the models analyzed in this study for project effort estimation. Furthermore, explanation analysis revealed that certain attributes are significantly more influential than others during the model decision-making process.

Research limitations/implications

The number of regression models and datasets used in the study is limited and could be increased. In addition, the study did not perform hyperparameter optimization and used a single explainable artificial intelligence method. For future studies, it is suggested to diversify the methods used and to make comparisons for the explainable artificial intelligence models.

Originality

The innovative aspect of the study is the analysis of different regression models on different datasets. In addition to this situation, the fact that explainable artificial intelligence approaches have never been used for project effort estimation in the literature makes the study novel.

† Corresponding author: yasingormez@cumhuriyet.edu.tr, +90 346 487 00 00

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde dijitalleşme, kurum ve kuruluşların gündemini oldukça meşgul etmektedir. Özellikle büyük ölçekli firmalar birçok iş sürecini dijital ortama taşımıştır ve taşımaya da devam etmektedir. Bu kapsamda firmalar, yazılım projeleri üreterek yeni ürün ya da sistem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Planlanan projelerin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için iyi bir proje yönetim sürecinin yürütülmesi gerekmektedir. Yetersiz bir proje yönetimi sonucunda hedeflere ulaşamama, kaynak israfı, takım içi çatışmalar, risklerin yönetilmemesi, gecikmeler, kalite problemleri ve iletişim sorunları gibi olumsuz durumlarla karşılaşılabilmektedir. Proje yönetim sürecinde birçok temel unsuru etkileyen efor tahmini (ET), proje yönetimi için kritik bir öneme sahiptir.

Proje efor tahmini (PET), bir projenin tamamlanması için gereken iş miktarının zaman ve kaynaklar açısından önceden belirlenmesini kapsayan bir süreç olarak tanımlanabilmektedir. İş birimlerinde genellikle adam/saat, adam/gün ya da adam/ay gibi ölçütlerle ifade edilen ET, projenin kapsamına, görevlerin karmaşıklığına, mevcut kaynaklara ve geçmiş deneyimlere dayanılarak yapılmaktadır. Bu durumlar dikkate alındığında ET, proje yönetim sürecinde birçok açıdan önem taşımaktadır. Projenin tamamlanması için gereken sürenin belirlenmesi, doğru ET ile başladığı için yanlış tahminler, gereksiz gecikmelere neden olabilmektedir. Projede kullanılacak kaynakların (personel, donanım, yazılım vb.) miktarı ve kullanım süresi de ET ile belirlenmektedir. Yanlış ET, gereğinden az ya da fazla kaynak ayrımına neden olabileceği için projenin maliyet ve zaman açısından başarısız olmasına sebep olabilmektedir. Maliyet planlamasının da temelini oluşturan ET'nin yanlış yapılması durumunda bütçe aşımları veya finansal kaynak yetersizlikleri meydana gelebilmektedir. Doğru ET proje aşamalarına ve kalite kontrol süreçlerine yeterli zaman ayırmayı sağlarken, yanlış ET aşırı iş yükü ve gecikmelere neden olacağı için hem kalite süreçlerinde hem de risk yönetiminde olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir.

Proje yönetim sürecinde ET yapabilmek için farklı yöntem ve teknikler kullanılmaktadır. Efor tahmininde uzman görüşlerinden sıklıkla faydalanılmaktadır. Uzman görüşleri kullanılarak yapılan efor tahmininde tecrübeli profesyonellerin geçmiş deneyimlerine güvenilmektedir. Genellikle karmaşık projelerde uygulanan ve sezgisel bir yaklaşımla hızlı sonuç alınan uzman görüş yönteminde tahmin sonucu uzmanların yanlılıklarına ve bilgi seviyesine bağlı olarak değişebilmektedir (Jorgensen, 2005). Analog yöntemler kullanılarak yapılan ET, geçmiş projelerle olan benzerliklere dayanılarak yapılmaktadır. Veri tabanındaki tamamlanmış projeler arasından mevcut projeye benzer olanların seçilerek değerlendirme yapıldığı bu yaklaşım, özellikle benzer projelerin bulunduğu durumlarda yüksek doğruluk sağlamaktadır (Shepperd vd., 1996). Paramedik yaklaşımla yapılan proje efor tahmininde matematiksel formüller veya istatistiksel modeller kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda kullanılacak olan parametreler projelerin büyüklüğüne, karmaşıklığına ve diğer ölçütlere göre belirlenmektedir (Tsunoda vd., 2012). PET için kullanılan bir diğer yaklaşım olan Delphi yöntemi, anonim uzmanlardan gelen tahminlerin birden fazla turda toplandığı ve ortalama bir sonuca ulaşıldığı sistematik bir süreçtir. Delphi yönteminin temel amacı grup düşüncesi etkisini azaltmak ve daha tarafsız sonuçlar almayı sağlamaktır (Erasmus & Daneva, 2013). Son zamanlarda PET için yapay zekâ ve makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda kullanılan yöntemler, geçmiş verileri kullanarak otonom tahminler yapabilmektedir. Bu yöntemlerin büyük miktarlarda veriyi işleyebiliyor olması, başarılı sonuçları hızlı bir şekilde elde edebilmesindeki en önemli etkenlerden biridir (Ritu & Bhambri, 2023).

Bu çalışmada ilk olarak PET için makine öğrenmesi modellerinin performansını ölçmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda rastgele orman (RO), karar ağacı (KA), doğrusal regresyon (DR), yapay sinir ağı (YSA), GradientBoost (GB) ve AdaBoost (AB) olmak üzere 6 farklı yöntem süreğen değerleri tahmin etmek üzere eğitilmiştir. Modelleri eğitmek ve performanslarını karşılaştırmak için china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05 ve usp05-ft olmak üzere 6 farklı proje efor veri seti kullanılmıştır. Önerilen modellerin farklı koşullardaki performanslarının da ölçülebilmesi için tekrarlayan sınama yönteminden faydalanılmıştır. Çalışmanın diğer bir amacı ise veri setlerinde kullanılan özniteliklerin makine öğrenmesi modellerinin performansına olan etkisinin hesaplanmasıdır. Bu kapsamda, eğitilen makine öğrenmesi modelleri SHapley Additive exPlanations (SHAP) yöntemi kullanılarak açıklanmıştır. SHAP sayesinde eğitilmiş modellere hangi özniteliğin, modelin karar almasına ne kadar etki ettiği ölçülmüştür. Çalışmanın literatüre ilk katkısı, farklı makine öğrenmesi modellerinin PET üzerindeki etkisinin ölçülmesi olarak değerlendirilmektedir. Çalışmanın literatüre diğer bir katkısının ise PET için önerilen makine öğrenmesi modellerinin SHAP kullanılarak açıklanması olduğu düşünülmektedir. Bu yaklaşım sayesinde PET için önerilen makine öğrenmesi modellerinin karar alma süreçlerinin daha net bir şekilde yorumlanabileceği ön görülmektedir. Literatür incelendiğinde PET için açıklamalı yapay zekâ yaklaşımlarının daha önce kullanılmamış olması ise çalışmayı özgün olarak değerlendirmemizi sağlamıştır. Çalışmanın devamında literatür özeti yapılmış, materyal ve yöntem anlatılmış, deney sonuçları verilmiş ve sonuçlar özetlenmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Günümüze kadar PET için oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Anolog tabanlı yöntemlerin birbirleri ve doğrusal regresyon ile karşılaştırıldığı çalışmada, küçük bir veri kümesi sağlandığında insanların efor tahmininde araçlara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durumun yanı sıra aynı çalışmada yazılım projeleri için efor tahmininde insanların ve araçların yeteneklerinin birleştirilmesinin daha verimli sonuçlar elde etmeye katkı sunacağı çıkarımı yapılmıştır (Walkerden & Jeffery, 1999). Vaka tabanlı akıl yürütme yöntemlerinin proje efor tahminindeki başarısını artırmak için genetik algoritma ile birleştirildiği çalışmada öznitelik seçim ve öznitelik ağırlıklandırma yapılmıştır. PROMISE veri tabanı kullanılarak yapılan deney sonuçlarına göre genetik algoritma kullanarak yapılan parametre iyileştirmesinin proje efor tahmin modeli performansını artırdığı gözlemlenmiştir (Hameed vd., 2023). Destek vektör makinaları, YSA, genelleştirilmiş doğrusal modeller ve topluluk yöntemlerinin ISBSG veri seti kullanılarak eğitildiği çalışmada proje efor tahmini için 0.19 ortalama mutlak hata, 0.07 minimum karesel hata ve 0.27 ortalama karekök sapması elde edilmiştir (Pospieszny vd., 2018). Özelleştirilmiş makine geliştirme projeleri için efor tahmini yapılan çalışmada sekiz özniteliği olan bir veri seti kullanılmıştır. İlgili çalışmada YSA modelinin gizli katmandaki nöron sayısı optimize edilerek 0.11 logaritmik ortalama karesel hata ve 0.94 R skoru elde edilmiştir (Şengüneş & Öztürk, 2023). Yazılım projelerinde efor tahmini analizi yapılan çalışmada, yerelleştirilmiş mahalle karşılıklı bilgi tabanlı sinir ağı, nöro-bulanık mantık, uyarlanabilir genetik tabanlı sinir ağ ve genetik fil güdümünün optimizasyonu tabanlı nöro bulanık ağ önerilmiştir. cocomo81, cocomonasa_2, cocomonasa_v1, Desharnais ve China veri setleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda 88.23% ile 28.51% arasında tahmin doğruluk oranları elde edilmiştir (Sharma & Vijayvargiya, 2022). Destek vektör makinası ve radyal tabanlı sinir ağları kullanılarak önerilen hibrit model, endüstriyel ve öğrenci projelerinden toplanan çok sayıda örnek kullanılarak oluşturulan veri seti ile eğitilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre önerilen model, tüm veri setlerinde kullanım durum noktaları yöntemi kullanılarak geliştirilen modellere göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir (Azzeh & Nassif, 2016). GitHub platformundan toplanan verilerle gerçek projelerin efor veri setinin hazırlandığı çalışmada Adaboost ve sınıflandırma-regresyon ağacı yöntemleri kullanılmıştır. İlgili çalışmada yapılan analizler sonucunda personel faktörünün efor tahminini iyileştirmede etkili olduğu, önerilen modelin mevcut modellerle karşılaştırılabilir bir performans elde ettiği ve önerilen sınıflandırma-regresyon ağacı yöntemi sayesinde veri setindeki örneklerin çevrimiçi olarak artırılabileceği kanaatine varılmıştır (Qi vd., 2017). Nöro bulanık ağ ve genetik fil güdümü optimizasyonu kullanarak yazılım eforlarını maliyet açısından tahmin etmeyi amaçlayan model, endüstriyel projelerden elde edilen beş tarihsel ve kıyaslama veri seti kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda önerilen modelin, destek vektör regresyonları, dalgacık YSA ve karar ağacı yöntemlerine göre daha iyi yazılım projesi efor tahmini skoru elde ettiği gözlemlenmiştir (Sharma & Vijayvargiya, 2023). Optimize edilen YSA modelinin 15 farklı projedeki efor tahmini için kullanıldığı çalışmada, önerilen YSA modelinin COCOMO modeline göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır (Mukherjee & Malu, 2014). DR, destek vektör regresyonu, YSA, KA, RO ve topluluk yöntemlerinin 499 örneğe sahip Çin veri seti kullanılarak karşılaştırıldığı çalışmada RO ve DT yöntemlerinin diğer yöntemlere göre önemli ölçüde daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır (Sharma & Vijayvargiya, 2021). Çoklu eklemeli regresyon ağaçları yönteminin DR, radyal tabanlı fonksiyon sinir ağları ve destek vektör regresyon modelleriyle NASA veri seti kullanılarak karşılaştırıldığı çalışmada, çoklu eklemeli regresyon ağaçları modelinin diğer modellere üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir (Elish, 2009). NASA veri setinin kullanıldığı bir çalışmada COCOMO modeli Naive Bayes, lojistik regresyon ve rastgele orman yöntemleri ile karşılaştırılmış ve doğruluk, hassasiyet, kesinlik ve ROC eğrisi altında kalan alan bakımından en başarılı yöntemlerin Naive Bayes ve rastgele orman yöntemleri olduğu görülmüştür (BaniMustafa, 2018). Bayes ağları yönteminin efor tahmini için önerildiği çalışmada sırasıyla 40, 50 ve 70 proje içeren veri kümeleri kullanılmış ayrıca, birinci ve ikinci veri kümeleri birleştirilerek dördüncü veri seti ve birinci, ikinci ve üçüncü veri kümeleri birleştirilerek beşinci veri seti oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda veri setlerinde %90 ile %99.375 arasında doğruluk, 0.026 ile 0.1065 ortalama mutlak hata ve 3.29 ile 12.80 arasında bağıl hatanın ortalama büyüklüğü elde edilmiştir (Dragicevic vd., 2017). Regresyon ağaçları, model ağaçları, çok katmanlı algılayıcı, doğrusal regresyon ve destek vektör regresyonu yöntemlerinin torbalama yaklaşımı ile topluluk modeline dönüştürüldüğü çalışmada NASA veri seti kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre torbalama yaklaşımının modellerin performansını iyileştirdiği görülmüştür. Bu durumun yanı sıra önerilen model, literatürde kendisinden önce kullanılmış olan hem doğrusal regresyon hem de radyal temel fonksiyonundan daha iyi sonuçlar etmiştir (Braga vd., 2007). Yazılım projelerinde erken aşamada efor tahmini için açık erişimli SEERA veri setinin kullanıldığı çalışmada rastgele orman yöntemi ile %70'den daha iyi başarı oranı elde edilmiştir (Mustafa & Osman, 2024). Yazılım geliştirmede efor tahmini için önerilen tam bağlı YSA modelinin hiper parametrelerinin meta sezgisel gri kurt yöntemi ile optimize edildiği çalışmada 12 farklı veri seti üzerinde analizler yapılmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda meta sezgisel gri kurt ile hem hiper parametre optimizasyonu yapmanın hem de yerel optimumlara düşmekten kaçınma yeteneğini geliştirmenin YSA modelinin performansında istatiksel olarak anlamlı iyileşmeler yaptığı gözlemlenmiştir (Kassaymeh vd., 2024). Yazılım efor tahmini için SVR tabanlı topluluk yönteminin önerildiği çalışmada farklı çekirdek fonksiyonları kullanan SVR modelleri birleştirilmiştir. Çalışma sonucunda SVR yönteminin tek başına kullanılması ile farklı çekirdek fonksiyonları yardımıyla topluluk yöntemine dönüştürülmesi arasında fark olmadığı gözlemlenmiştir (Hosni,

2024). Yapılan bir çalışmada proje yönetim sürecinde farklı kurum ve kuruluşların personel yeterliliklerine göre proje tanımlanması ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Geçmiş projelerden elde edilen veriler, makine öğrenmesi süreçleriyle analiz edilerek proje başarısına etkileri incelenmiştir. Geliştirilen sistem, yapay zekâ tekniklerini kullanarak proje başarısını tahmin etmiş ve proje bileşenlerini değerlendirme kriterlerine göre puanlayarak başarıyla sonuçlandırmıştır (Özgür vd., 2023). Yapay zekâ tekniklerinden yararlanarak proje yönetiminde risk analizi için kavramsal bir çerçeve geliştirilen çalışmada yapay zekânın proje yönetimindeki dönüştürücü potansiyeli, risk analizi ve karar alma süreçlerindeki rolü üzerinde durulmuştur.

Tablo 1. Yazılım projesi efor tahmini çalışmalarının karşılaştırmalı analizi
(Comparative analysis of software project effort estimation studies)

Çalışma	Kullanılan Veri Setleri	Yöntemler	Metrikler	Sonuçlar
(Hameed vd., 2023)	PROMISE	Vaka tabanlı akıl yürütme + Genetik algoritma (özellik seçim/ağırlıklandırma)	----------	Genetik algoritma ile parametre iyileştirme, model performansını artırmıştır.
(Pospieszny vd., 2018)	ISBSG	Destek vektör makinaları (SVM), YSA, GLM, topluluk yöntemleri	MAE: 0.19, MSE: 0.07, RMSE: 0.27	En iyi sonuçlar topluluk yöntemleri ile elde edilmiştir.
(Şengüneş & Öztürk, 2023)	8 özniteliğe sahip özel veri seti	Optimize edilmiş YSA	LogMSE: 0.11, R: 0.94	Optimize edilmiş YSA, yüksek doğruluk sağlamıştır.
(Sharma & Vijayvargiya, 2022)	Cocomo81, Cocomonasa_2, Cocomonasa_v1, Desharnais, China	LKMI-tabanlı sinir ağı, nöro-bulanık, genetik tabanlı sinir ağ	Tahmin doğruluğu: %28.51 - %88.23	Önerilen hibrit modeller, geleneksel yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir.
(Azzeh & Nassif, 2016)	Endüstriyel ve öğrenci projelerinden oluşan veri seti	Hibrit model (SVM + Radyal tabanlı sinir ağı)	----------	Hibrit model, kullanım durum noktaları tabanlı modellerden daha iyi sonuç vermiştir.
(Qi vd., 2017)	GitHub'tan toplanan bir veri seti	AdaBoost, CART	----------	Personel faktörü efor tahminini iyileştirmede etkili olmuştur. CART ile çevrimiçi veri artırımı mümkündür.
(Sharma & Vijayvargiya, 2023)	5 farklı endüstriyel veri seti	Nöro-bulanık ağ + Genetik fil güdümü optimizasyonu	----------	Önerilen model, SVR, dalgacık YSA ve karar ağacından daha iyi performans göstermiştir.
(Mukherjee & Malu, 2014)	15 farklı projeden elde edilmiş veri seti	Optimize edilmiş YSA, COCOMO	----------	YSA, COCOMO'dan daha başarılıdır.
(Sharma & Vijayvargiya, 2021)	Çin veri seti (499 örnek)	DR, SVR, YSA, KA, RO, DT	----------	RO ve DT, diğer yöntemlere göre anlamlı üstünlük sağlamıştır.
(Elish, 2009)	NASA	Çoklu eklemeli regresyon ağaçları, RBF ağları, SVR	----------	Çoklu eklemeli regresyon ağaçları diğer modelleri geride bırakmıştır.
(BaniMustafa, 2018)	NASA	Naive Bayes, lojistik regresyon, rastgele orman	Doğruluk, hassasiyet, kesinlik, ROC AUC	Naive Bayes ve rastgele orman en iyi performansı göstermiştir.
(Dragicevic vd., 2017)	40, 50, 70 projeli veri setleri (birleştirilmiş)	Bayes Ağları	Doğruluk: %90 - %99.375, MAE: 0.026 - 0.1065, Bağıl hata: 3.29 - 12.80	Bayes ağları yüksek doğruluk ve düşük hata oranları sağlamıştır.
(Braga vd., 2007)	NASA	Torbalama (Regresyon ağaçları, model ağaçları, MLP, SVR)	----------	Torbalama, model performansını iyileştirmiş ve literatürdeki diğer yöntemleri geride bırakmıştır.
(Mustafa & Osman, 2024)	SEERA	RO	Başarı oranı>%70	Rastgele orman, erken aşama efor tahmini için etkili olmuştur.
(Kassaymeh vd., 2024)	12 farklı veri seti	YSA + Gri kurt optimizasyonu	----------	Hiper parametre optimizasyonu, YSA performansını istatistiksel olarak anlamlı şekilde artırmıştır.
(Hosni, 2024)	Albrecht, COCOMO81, Desharnais, Kemerer, and Miyazaki	SVR tabanlı topluluk yöntemi (farklı çekirdekler)	----------	Topluluk yöntemi ile tek SVR arasında performans farkı bulunmamıştır.
(Özgür vd., 2023)	Geçmiş proje verileri	KA, RO, SVR	MAE: 0.581, MAPE: 0.007, RMSE: 1.005, R: 0.959	Proje başarısını tahmin eden sistem geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır.
(Tuncer, 2024)	----------	Yapay zekâ tabanlı risk analizi çerçevesi	----------	Yapay zekâ, proje yöneticilerinin riskleri öngörme ve azaltma becerilerini geliştirmiştir.
(Haris vd., 2023)	USP05-FT veri seti + uzman tahminleri	6 homojen sınıflandırıcı topluluğu	Doğruluk, duyarlılık güvenilirlik, f score	Uzman görüşleri ve topluluk yöntemlerinin birleştirilmesi, tahmin doğruluğunu ve güvenilirliği artırmıştır.

Çalışmanın bulguları, yapay zekâ teknolojilerinin kullanımının proje yöneticilerinin riskleri öngörme ve azaltma becerilerini geliştirebileceğini göstermektedir. Böylece projelerin zamanında, bütçe sınırları içinde ve kalite standartlarına uygun şekilde tamamlanmasının sağlanabileceği ifade edilmiştir (Tuncer, 2024). Yazılım

projelerinin efor tahminini iyileştirmek amacıyla uzman görüşlerini ve topluluk tabanlı bir çerçeveyi birleştiren yenilikçi yöntem sunan çalışmada uzmanlar tarafından sağlanan efor tahminleri, usp05-ft veri setine eklenerek modelin insan deneyimi ve sezgisini yansıtması sağlanmıştır. Altı farklı homojen sınıflandırıcı topluluğunun tahminleri birleştirilerek, daha yüksek doğruluk ve güvenilirlikte sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen çerçevenin, yazılım yönetimi süreçlerini güçlendirerek kaynak tahsisini optimize etmesi ve yazılım projelerinin başarı oranını artırması beklenmektedir (Haris vd., 2023). Yapılan literatür taraması sonucunda elde edilen bulgular tablo 1'de özetlenmektedir.

PET için literatürde yapılan çalışmalar genel anlamda değerlendirildiğinde birçok makine öğrenmesi yönteminin kullanıldığı söylenebilmektedir. Bu çalışmalar literatüre farklı katkılar sunarak PET için uygun olan makine öğrenmesi yöntemleri, veri kümeleri ve performans metrikleri hakkında fikirler oluşmasını sağlamıştır. PET için modeller hem tek başına hem de topluluk yaklaşımı olarak önerilmiştir. Parametre optimizasyonu, öznitelik seçimi ve meta sezgisel yaklaşımlar ile modellerin performansını artırma gibi çalışmaların da literatürde yürütüldüğü görülmüştür. Literatürdeki bu durum dikkate alındığında önerdiğimiz çalışmada da farklı makine öğrenmesi modellerinin kullanılması literatür ile uyumluluk sağlamaktadır. Bu durumun yanı sıra çalışmada önerilmiş diğer bir yaklaşım olan açıklamalı yapay zekâ ise literatürde PET için daha önce kullanılmamıştır. Bu durum dikkate alındığında çalışmamızın, literatüre özgün katkılar sunacağı ön görülmektedir.

Çalışmamızı literatürdeki PET çalışmalarından ayıran en önemli yön ise kullanılan SHAP yöntemi olarak değerlendirilmektedir. Literatürde farklı açıklamalı yapay zekâ yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Yapılan bir çalışmada SHAP değerlerinin LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) yöntemine kıyasla daha tutarlı ve teorik olarak sağlam açıklamalar sunduğu gösterilmiştir. SHAP, oyun teorisindeki Shapley değerlerine dayanarak model çıktılarını küresel ve yerel düzeyde açıklarken, LIME yalnızca lokal yaklaşımlar sunmaktadır. Bu nedenle, SHAP'ın özellikle karmaşık modellerde daha güvenilir sonuçlar verdiği, LIME'nin ise seçilen örnekleme stratejisine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği belirtilmiştir (Lundberg & Lee, 2017). Açıklanabilir güçlendirme makinaları (Explainable Boosting Machine – EBM) ve SHAP yöntemlerinin karşılaştırıldığı çalışmada EBM yönteminin doğası gereği açıklanabilir bir model olması nedeniyle, SHAP gibi yöntemlere kıyasla daha şeffaf ve doğrudan yorumlanabilir olduğu vurgulanmıştır. EBM yönteminin bu avantaja sahip olmasına rağmen, SHAP yönteminin herhangi bir model üzerinde uygulanabilir olması, SHAP yöntemini daha esnek bir araç haline getirmektedir. Çalışmada, EBM yönteminin performansının lineer olmayan ilişkilerde sınırlı kalabildiği, SHAP yönteminin ise daha karmaşık etkileşimleri yakalayabildiği belirtilmiştir (Molnar, 2020). Yapılan başka bir çalışmada Morris Hassasiyet Analizi yönteminin (Morris Sensitivity Analysis - MSA) genel model davranışını anlamada etkili olduğu, ancak SHAP yönteminin aksine bireysel tahminlerin açıklanmasında yetersiz kaldığını ortaya konulmuştur. MSA, özellikle yüksek boyutlu verilerde hesaplama açısından verimli olsa da SHAP yönteminin sunduğu bireysel özellik katkılarını sağlayamamaktadır. Çalışmada, SHAP yönteminin hem global hem de lokal açıklamalarda daha kapsamlı olduğu, MSA yönteminin ise daha çok ön analiz aşamasında kullanılabileceğini öne sürülmüştür (Plumb vd., 2018). Tüm bu çalışmalar dikkate alındığında çalışmamızda SHAP yönteminin kullanılmasının en uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Veri Setleri (Datasets)

Çalışmada, altı farklı proje efor veri seti kullanılmıştır: china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05 ve usp05-ft. Bu veri setlerinin her birinde, yazılım projelerinin efor tahmini için çeşitli öznitelikler ve gerçekleşen süreler yer almaktadır. Veri setleri, yazılım projelerinin efor tahminini doğru bir şekilde yapabilmek için gerekli olan bilgileri içermekte ve her bir projenin farklı özellikleriyle analiz yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çeşitlilik, modelin genelleme kapasitesini artırmayı hedefleyerek, yazılım mühendisliğinde efor tahmininin doğruluğunu geliştirmek için önemli bir kaynak oluşturmuştur (*Effor Estimation Datasets*, 2024).

3.1.1. china_original

china_original veri seti, Çin'deki yazılım geliştirme projelerinden toplanan toplamda 499 örnekten oluşmaktadır. Veri setinde, projelerin efor tahminlerini yapabilmek için 17 öznitelik yer almakta olup, efor değerleri ise adam/saat cinsinden sınıf değişkeni olarak sunulmaktadır. Bu efor değerleri, yazılım projelerinin tahmin edilmesi gereken önemli bir parametreyi temsil etmektedir. Veri seti, proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek efor süresinin 54620 saat, en düşük efor süresinin ise 26 saat olduğu görülmektedir. Ayrıca, efor sürelerinin standart sapma değeri 6474 saat olarak hesaplanmıştır, bu da veri setindeki efor sürelerinin önemli bir dağılım gösterdiğini ve çeşitliliğin yüksek olduğunu işaret etmektedir.

3.1.2. cocomonasa_v1

cocomonasa_v1 veri seti, 1980 ve 1990 yılları arasında gerçekleşen farklı merkezlerden toplanan 60 NASA projesinden oluşmaktadır. Bu veri seti, 16 öznitelik ve adam/saat cinsinden efor değerlerini içeren sınıf değişkenlerini barındırmaktadır. Proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek sürenin 3240 saat, en düşük sürenin ise 8.4 saat olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, süre verileri arasında standart sapma değeri 651 saat olarak hesaplanmıştır. Bu değerler dikkate alındığında, veri setindeki efor sürelerinin geniş bir dağılıma sahip olduğu ve projelerin farklı ölçeklerde yer aldığı görülmektedir. Bu çeşitlilik, modelin genel performansını test etmek için önemli bir zenginlik sunmaktadır.

3.1.3. humans2

Humans2 veri seti, yazılım mühendisliğinin tekrarlanabilir, doğrulanabilir, çürütülebilir ve/veya geliştirilebilir öngörü modellerini teşvik etmek amacıyla kamuya açık olarak sunulan bir PROMISE Yazılım Mühendisliği Deposu veri kümesidir. Bu veri seti, 14 öznitelikten ve katılımcıların tahminlerine yönelik genel göreli hatayı temsil eden bir sınıf değişkeninden oluşmaktadır. Proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek sürenin 9.76, en düşük sürenin ise 0.007 olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, süre verileri arasında standart sapma değeri 2.30 olarak hesaplanmıştır, bu nedenle veri setindeki sürelerin küçük bir aralıkta yoğunlaştığı ve tahminlerin nispeten daha tutarlı olduğunu kanısına varılmıştır. Bu durum, modelin doğruluğunu test etmek ve karşılaştırmak için önemli bir veri noktası sağlamaktadır.

3.1.4. nasa93

Nasa93 veri seti, 1971 ile 1986 yılları arasında yürütülmüş 93 farklı NASA projesinden oluşmaktadır. Bu veri seti, 16 öznitelik ve adam/saat cinsinden belirtilmiş sınıf değişkeni içermektedir. Proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek sürenin 8211 saat, en düşük sürenin ise 8.4 saat olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, süre verileri arasında standart sapma değeri 1129 saat olarak hesaplanmıştır. Elde edilen yüksek standart sapma, veri setindeki efor sürelerinin geniş bir dağılıma sahip olduğunu ve projelerin önemli ölçüde farklı ölçeklerde yer aldığını göstermektedir. Bu çeşitlilik, farklı büyüklükteki projelerin efor tahminlerini değerlendirmek için önemli bir kaynak sağlamaktadır

3.1.5. usp05

Usp05 veri seti, PROMISE Yazılım Mühendisliği Deposu veri kümelerinin bir elemanıdır. Bu veri seti, 15 öznitelik ve 203 örnekten oluşmaktadır. Usp05 veri setinde, adam/ay oranından efor değeri sınıf değişkeni olarak yer almaktadır. Proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek sürenin 400 ay, en düşük sürenin ise 0.5 ay olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, süre verileri arasında standart sapma değeri 34 ay olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, efor sürelerinin geniş bir dağılım gösterdiğini ve projelerin farklı ölçeklerde olduğunu, ancak veri setindeki sürelerin genel olarak bir miktar tutarlılığa sahip olduğunu işaret etmektedir. Bu özellik, efor tahminleri için modelin doğruluğunu test etme açısından önemli bir rol oynamaktadır.

3.1.6. usp05-ft

Usp05-ft veri seti, PROMISE Yazılım Mühendisliği Deposu veri kümelerinin bir elemanıdır. Bu veri seti, 13 öznitelik ve 76 örnekten oluşmaktadır. Usp05-ft veri setinde, adam/ay oranından efor değeri sınıf değişkeni olarak yer almaktadır. Proje efor süresi açısından değerlendirildiğinde, en yüksek sürenin 40 ay, en düşük sürenin ise 0.5 ay olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, süre verileri arasında standart sapma değeri 8 ay olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler, efor sürelerinin daha dar bir aralıkta yoğunlaştığını ve proje efor sürelerinin daha tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu özellik, efor tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmek için önemli bir gösterge sunmaktadır.

3.2. Regresyon Modelleri (Regression Models)

Çalışmada PET için süreğen değerlerin tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Literatürde süreğen değerlerin tahmin edilmesinde regresyon modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. Regresyon, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellemek ve tahmin etmek için kullanılan bir istatistiksel yöntem olarak tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada regresyon modellerini geliştirmek için RO, KA, DR, YSA, GB ve AdaBoost modelleri kullanılmıştır.

RO, birden fazla karar ağacının oluşturduğu bir topluluk yöntemi olup, her ağacın bağımsız bir şekilde eğitilmesiyle sonuçların birleştirilmesini sağlar. Her ağacın farklı bir veri alt kümesi ve rastgele seçilen öznitelikler üzerinde

eğitilmesiyle elde edilen sonuçlar ortalama değer ile birleştirilir. RO aşırı öğrenmeyi azaltmada etkilidir ve regresyon problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Breiman, 2001).

KA, veriyi belirli kurallara göre dallara ayırarak bir hedef değişkeni tahmin etmek için kullanılan hiyerarşik bir yapıdır. KA kullanılarak oluşturulan ağaç, her bir düğümde bir karar kuralı oluşturur ve veri kümelerini bölerek yapraklarda tahmin yapar. Kolay anlaşılabilir ve görselleştirilebilir olması nedeniyle avantajlıdır ancak tek başına kullanıldığında aşırı öğrenmeye eğilimlidir (Quinlan, 1986).

DR, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi, bu değişkenler arasındaki doğrusal bağıntıyı modelleyerek tahmin etmeyi amaçlayan regresyon yöntemidir. DR, veri kümesindeki en iyi doğrusal çizgiyi belirlemek için en küçük kareler yöntemini kullanmaktadır. Basit kullanımı ve kolay açıklanabilir olması nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılan yöntem özellikle doğrusal ilişkilerde etkili çalışmaktadır (Seber & Lee, 2012).

YSA, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alan, katmanlı bir yapıya sahip ve veri arasındaki karmaşık ilişkileri öğrenebilen bir makine öğrenimi yöntemidir. YSA, giriş verilerini farklı katmanlardan geçirerek öğrenir ve her katmanda belirli ağırlıklarla hesaplamalar yapar. Doğrusal olmayan ilişkilerde ve büyük veri setlerinde oldukça başarılıdır ancak modelin eğitimi için yüksek hesaplama gücü gerekmektedir (LeCun vd., 2015).

GB, hataları minimize etmek için karar ağaçları gibi zayıf öğreniciler ekleyerek adım adım bir model oluşturur. Her iterasyonda, önceki modelin hata terimlerini düzeltmek için yeni bir ağaç eğitilir. Hata azaltmada oldukça başarılı olan GB, genellikle hiper parametre optimizasyonu ile güçlü bir performans sergilemektedir. Ancak büyük veri setlerinde daha uzun eğitim süreleri gerektirebilir (Friedman, 2001).

AdaBoost, GB yöntemine benzer şekilde karar ağaçları gibi zayıf öğrenicilerin bir topluluğunu ağırlıklı olarak birleştirerek güçlü bir model oluşturmayı amaçlamaktadır. Her bir model, önceki modelin doğru tahmin edemediği örneklere daha fazla ağırlık vererek eğitilmektedir. AdaBoost, aşırı öğrenmeyi genellikle azaltır ve hızlı bir şekilde çalışır, ancak gürültülü verilere karşı duyarlıdır (Freund & Schapire, 1997).

3.3. SHAP (SHAP)

Makine öğrenimi modellerinin kararlarını açıklamak için kullanılan SHAP, her özelliğin modelin sonucuna olan katkısını adil bir şekilde tahmin etmeyi amaçlamaktadır. SHAP, kooperatif oyun teorisine dayanan Shapley değerlerini kullanmaktadır ve bir özelliğin diğer özelliklerle birlikte modeli nasıl etkilediğini hesaplamaktadır. Shapley değerleri, her özelliğin katkısını hesaplamak için tüm olası alt küme kombinasyonlarını değerlendirerek, adil ve tutarlı bir açıklama sağlamaktadır. SHAP, hem global hem de lokal açıklamalar sunarak, modelin genel davranışını ve bireysel tahminleri anlamayı mümkün kılmaktadır. Özelleştirilebilir ve görselleştirilebilir açıklama araçları sunan SHAP, model-agnostik bir yapıda olmasından dolayı herhangi bir makine öğrenimi algoritmasına uygulanabilmektedir (Lundberg & Lee, 2017).

3.4. Performans Değerlendirme

Çalışmada önerilen modellerin farklı koşullardaki performansını daha sağlıklı bir şekilde ölçmek için tekrarlayan sınama (Repeated Holdout) yöntemi kullanılmıştır. Tekrarlayan sınama, bir veri kümesini eğitim ve test olarak rastgele bölerek model performansını değerlendiren bir çapraz doğrulama yöntemidir. Bu işlem birçok kez tekrarlanır ve her bir tekrarın sonuçlarının ortalaması alınarak modelin genelleme performansı tahmin edilir. Her bir tekrarda farklı bir eğitim-test bölünmesi yapılması, modelin veri dağılımından kaynaklanabilecek varyanslara karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Tekrarlayan sınama, model performansını hem rastgele veri seçimine hem de farklı test senaryolarına göre değerlendirdiği için, sonuçların güvenilirliğini artırmaktadır (Kim, 2009).

Her bir sınamada eğitim ve test olarak ikiye bölünen veri setinde modeller, eğitim veri seti üzerinde eğitilmiş ve model performans sonuçları test veri seti üzerinde hesaplanmıştır. Performans hesabı için ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error - MAE), ortalama logaritmik kare hatası (Mean Squared Logarithmic Error - MSLE), belirleme katsayısı (R^2 Score - R) ve ortalama göreli büyüklük hatası (Mean Magnitude Relative Error - MMRE) metrikleri kullanılmıştır. MAE, tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını ölçmektedir. Duyarlılığı yüksektir ve tüm hatalara eşit ağırlık verir (Willmott & Matsuura, 2005). MSLE, logaritmik dönüştürülmüş tahmin ve gerçek değerler arasındaki farkın karesinin ortalamasını ölçer. Daha küçük değerleri ön plana çıkarır ve orantısal hataları cezalandırır (Amruthnath & Gupta, 2018). R, modelin toplam değişkenliğin ne kadarını açıkladığını ifade eden bir ölçüttür. 1'e yakın değerler daha iyi bir uyum gösterir; 0, modelin tahmin gücünün olmadığını belirtir (Draper & Smith, 1998). MMRE, tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki farkın, gerçek değere oranının mutlak ortalamasını ölçer. Özellikle oranlara dayalı analizlerde

kullanışlıdır (Kitchenham & Mendes, 2004).

4. Deney Sonuçları (Experiment Results)

Çalışma kapsamında yapılan deneylerin ilk aşamasında önerilen regresyon modelleri Python dilinde var olan sklearn kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir (*scikit-learn: machine learning in Python*, 2024). Geliştirilen modellerin tamamımın hiper-parametreleri sklearn kütüphanesinin 1.5.0 versiyonundaki varsayılan ayarda bırakılmıştır. Bu değerler geniş veri kümeleri ve farklı problem türleri için genelleştirilmiş ve kabul edilebilir bir performans sağlaması hiper-parametreleri varsayılan değerde bırakma sebebimizdir. Varsayılan ayarlar, hızlı model geliştirme ve test etme aşamalarında verimli bir başlangıç noktası sunarak, daha detaylı ayarlamalara gerek kalmadan güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Model geliştirmeleri tamamlandıktan sonra veri setinden rastgele %10 örnek seçilerek test, kalan örneklerle ise eğitim veri setleri oluşturulmuştur. Model performans ölçümlerinin daha anlamlı olması için farklı veri kümeleri kullanılarak ölçümler yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda eğitim ve test veri seti oluşturma süreçleri 50 kez tekrar edilerek 50 farklı eğitim ve test veri setleri oluşturulmuştur. Önerilen modeller her bir eğitim veri seti ile ayrı ayrı eğitilmiş daha sonra eğitim veri setine karşılık gelen test verisi üzerindeki başarı oranları hesaplanmıştır. Tablo 2-7 arasında her bir veri seti için hesaplanan ortalama performans değerleri ve sınamalar arasında performans metrik skorları kullanılarak hesaplanan standart sapma (STD) değerleri gösterilmektedir. Bu tablolarda kalın olarak gösterilen değerler her bir metrik için en yüksek skoru elde eden modeli temsil etmektedir.

Tablo 2. china_original veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the china_original dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	205.17	8.50	0.213	0.154	**0.992**	0.004	0.178	0,178
RO	**156.72**	18.55	0.019	0.023	0.991	**0.001**	0.088	0,088
AB	587.12	42.13	0.493	0.062	0.965	0.006	0.903	0,903
GB	181.46	**3.72**	0.026	0.020	0.990	0.002	0.104	0,104
KA	229.92	22.62	0.028	0.033	0.973	0.012	0.092	0,092
YSA	168.51	15.71	**0.009**	**0.001**	0.991	0.004	**0.079**	**0,079**

Tablo 2'de yer alan sonuçlar incelendiğinde en başarılı modellerin MAE metriğine göre RO, MSLE metriğine göre YSA, R metriğine göre DR ve MMRE metriğine göre YSA olduğu görülmektedir. STD açısından inceleme yapıldığında ise YSA modelinin en başarılı sonuçları aldığı metriklerde, yine en başarılı STD değerlerini elde ettiği görülmektedir. MAE ve R metriklerinde ise en başarılı modellerin sırasıyla RO ve DR olmasına rağmen, MAE_STD ve R_STD değerlerine göre en başarılı modeller sırasıyla GB ve RO olmuştur. Özellikle MAE metriğine göre AB diğer modellere göre oldukça kötü bir performans sergilemiştir. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında ise china_original veri seti için en başarılı modelin YSA olduğu değerlendirmesi yapılmaktadır.

Tablo 3. cocomonasa_v1 veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the cocomonasa_v1 dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	183.03	23.09	1.728	0.882	0.473	0.339	3.741	3.741
RO	**80.07**	24.86	**0.449**	**0.242**	0.654	0.494	0.858	0.858
AB	119.06	19.06	1.591	0.670	0.608	0.747	2.944	2.944
GB	95.62	25.12	0.779	0.408	0.836	**0.151**	1.313	1.313
KA	90.42	25.63	0.788	0.405	**0.986**	0.226	**0.761**	**0.761**
YSA	221.61	**12.24**	2.717	1.400	0.478	0.427	6.012	6.012

Tablo 3'te yer alan sonuçlar incelendiğinde MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerine göre en başarılı modellerin sırasıyla RO, RO, KA ve KA olduğu gözlemlenmektedir. STD açısından sonuçlar irdelendiğinde ise MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde elde edilen sonuçlara göre en başarılı modellerin sırasıyla YSA, RO, GB ve KA olduğu gözlemlenmektedir. Tabloda yer alan değerlere göre cocomonasa_v1 veri seti için özellikle YSA modelinin tüm metriklerde çok kötü sonuçlar elde ettiği kanaatine varılmaktadır. YSA için elde edilen MAE metrik skorunun yüksek olması ve STD değerinin düşük olmasından ötürü, bu modelin tüm veri kümelerinde MAE açısından düşük performans sergilediği çıkarımı yapılmaktadır. YSA modeline benzer bir durum ise DR modelinde bulunmaktadır.

DR modeli de R metriğinde en kötü sonucu elde ederken, diğer üç metrikte ise en kötü ikinci model olmuştur. YSA ve DR modelleri için R metrik skorunun 0'a yakın olması ise bu modellerin cocomonasa_v1 veri setinde oldukça başarısız performans sergilediği yorumunu yapmamıza neden olmuştur. Tüm bu durumlar dikkate alındığında en başarılı iki modelin ise RO ve KA olduğu yorumu yapılmaktadır.

Tablo 4. humans2 veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the humans2 dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	1.22	0.10	0.438	0.089	0.243	0.660	14.673	14.673
RO	1.30	0.14	0.495	0.141	0.572	0.644	14.982	14.982
AB	1.39	**0.07**	0.476	0.108	0.146	0.601	14.752	14.752
GB	**1.02**	0.13	**0.300**	**0.072**	**0.817**	0.201	**5.5870**	**5.5870**
KA	1.05	0.29	0.405	0.152	0.238	**0.058**	18.445	18.445
YSA	1.34	0.14	0.447	0.093	0.549	0.640	8.3301	8.3301

Tablo 4'te yer alan sonuçlar incelendiğinde humans2 veri seti için MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinin tamamında GB modelinin en iyi sonuçları elde ettiği görülmektedir. Bu durumun yanı sıra GB modeli STD_MSLE ve STD_MMRE değerlerine göre en düşük sonucu elde etmiştir. STD_MAE ve STD_R değerlerine göre ise en düşük sonuçlar sırasıyla AB ve KA modelleri ile elde edilmiştir. GB modeli STD_MAE ve STD_R değerlerine göre ilk sırada yer almasa da düşük sonuçlar elde etmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda GB modelinin hem yüksek performans skorları hem de düşük STD değerleri elde ettiği görülmektedir. Bu durum dikkate alındığında GB modelinin humans2 veri seti için en başarılı model olduğu yorumu yapılmaktadır. Tablo 4'te yer alanlar sonuçlardan çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise MAE metriğine göre AB, MSLE metriğine göre RO, R metriğine göre AB ve MMRE metriğine göre KA modelinin en kötü sonuçları elde etmiş olmasıdır. Özellikle R metrik sonucunda AB modelinin 0'a yakın bir değer elde etmesi, AB modelinin humans2 veri seti için uygun olmadığı yorumunun yapılmasına neden olmaktadır.

Tablo 5. nasa93 veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the nasa93 dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	181.72	42.15	1.943	1.008	0.388	0.770	2.172	2.172
RO	124.41	30.76	0.417	0.325	0.629	0.162	0.892	0.892
AB	203.42	20.26	1.515	0.807	0.331	0.201	3.124	3.124
GB	**94.12**	28.23	**0.217**	**0.128**	0.654	**0.152**	0.426	0.426
KA	122.13	38.50	0.390	0.170	**0.725**	0.183	**0.416**	**0.416**
YSA	142.17	**16.67**	0.776	0.512	0.571	0.637	1.619	1.619

Tablo 5'de yer alan sonuçlar incelendiğinde MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde en başarılı modellerin sırasıyla GB, GB, KA ve MMRE olduğu görülmektedir. Bu durumun yanı sıra GB modeli, MMRE metriğine göre en başarılı model olan KA modeline yakın bir sonuç elde ederek en iyi ikinci model olmuştur. R skoruna göre ise GB modeli en iyi üçüncü model olmuştur. STD değerlerine göre sonuçlar incelendiğinde ise STD_MSLE ve STD_R skorlarına göre de en iyi model GB olmuştur.

Tablo 6. usp05 veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the usp05 dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	6.90	0.99	1.346	0.216	0.299	0.673	3.960	3.960
RO	3.07	0.38	0.306	**0.109**	0.415	0.337	0.952	0.952
AB	5.67	**0.27**	1.123	0.167	**0.848**	**0.307**	3.522	3.522
GB	2.89	0.59	0.362	0.134	0.348	0.348	0.989	0.989
KA	**2.27**	0.47	**0.244**	0.112	0.516	0.584	**0.457**	**0.457**
YSA	5.82	0.43	0.899	0.173	0.500	0.680	2.724	2.724

Tüm bu durumlar dikkate alındığında nasa93 veri seti için en uygun modelin GB olduğu yorumu yapılmaktadır. Tablo 5'de yer alan sonuçlardan çıkarılan diğer bir sonuç ise AB ve DR modellerinin tüm metriklerde en kötü modeller olmasıdır. Bu modeller hem STD hem de metrik skorları açısından düşük performans sergilemiş, bu nedenle bu modellerin nasa93 veri seti için uygun olmadığı kanaatine varılmıştır.

Tablo 6'da yer alan sonuçlar incelendiğinde R dışında tüm metriklerde KA modelinin en iyi sonuçları elde ettiği görülmektedir. STD açısından incelendiğinde ise KA modelinin STD_MMRE değerinde en düşük skoru elde ettiği gözlemlenmiştir. R metriğine göre ise en başarılı sonuçlar AB modeli ile elde edilmiştir. STD_MAE, STD_MSLE ve STD_R sonuçlarına göre ise en iyi modeller sırasıyla AB, RO ve AB olmuştur. KA modeli üç metrikte hesaplanan STD değerlerine göre en başarılı model olmasa da özellikle STD_MAE ve STD_MSLE değerlerine göre düşük sonuçlar elde etmiştir. Bu durum dikkate alındığında KA modelinin usp05 veri seti için en başarılı model olduğu ve farklı veri kümelerinde benzer sonuçlar elde ettiği yorumu yapılmaktadır. DR modeli ise tüm metrik değerlerinde en kötü sonucu elde etmiştir. Özellikle R skoruna göre 0'a yakın bir skor elde etmesi DR modelinin zayıf bir yönü olarak değerlendirilmektedir. DR modeli için STD değerlerinin de yüksek olması, modelin farklı veri kümelerinde farklı sonuçlar elde ettiğinin bir göstergesidir. Bu sonuçlar dikkate alındığında DR modeli, usp05 veri seti için hem kötü sonuçları elde etmiştir hem de stabil olmayan bir modeldir. Bu nedenle DR modeli, usp05 veri seti için en uygun olmayan model olarak değerlendirilmektedir.

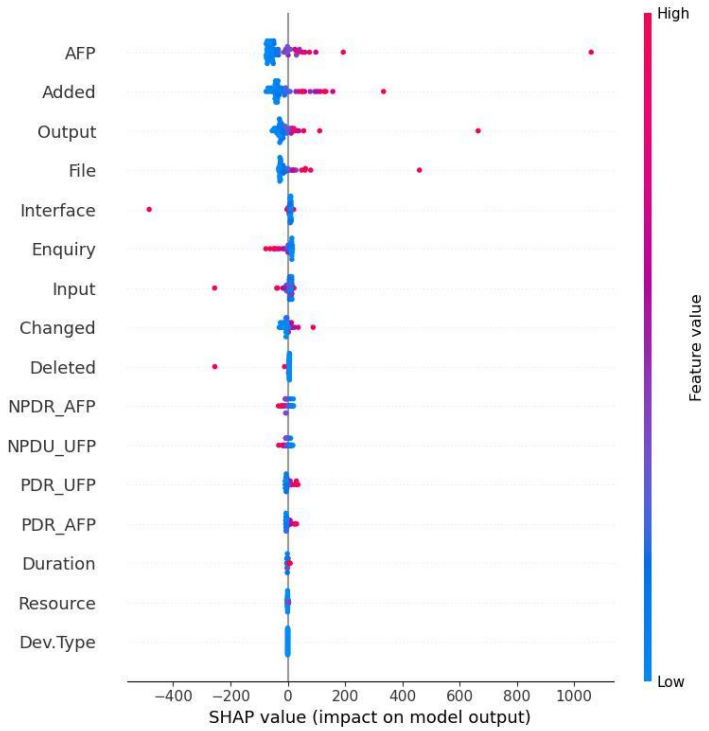
Tablo 7. usp05-ft veri setinde 50 tekrarlayan sınama yöntemi sonucunda elde edilen performans skorları (Performance scores obtained from 50 repeated holdouts on the usp05-ft dataset)

Model Adı	MAE	STD_MAE	MSLE	STD_MSLE	R	STD_R	MMRE	STD_MMRE
DR	1.53	0.42	0.270	0.136	0.722	5.661	1.064	1.06
RO	0.76	0.21	0.099	0.062	0.463	5.594	0.398	0.39
AB	1.44	0.21	0.253	0.068	0.306	5.404	1.165	1.16
GB	0.66	0.24	**0.049**	**0.025**	0.310	**0.259**	0.280	0.28
KA	**0.39**	**0.14**	0.054	0.043	0.716	3.211	**0.184**	**0.18**
YSA	1.45	0.36	0.201	0.137	**0.972**	1.715	0.692	0.69

Tablo 7'de yer alan sonuçlar incelendiğinde, KA modelinin MAE, STD_MAE, MMRE ve STD_MMRE skorlarında, GB modelinin MSLE, STD_MSLE ve STD_R skorlarında, YSA modelinin ise R skorunda en iyi model olduğu gözlemlenmektedir. KA modeli, MSLE ve STD_MSLE skorlarında en iyi ikinci, R ve STD_R skorlarında ise en iyi üçüncü model olmuştur. Bu bilgiler dikkate alındığında usp05-ft veri seti için en iyi modelin KA olduğu yorumu yapılmaktadır. Tablo 7'de yer alan dört metrik sonucunun değerlerine bakıldığında yapılabilecek diğer bir yorum ise DR, YSA ve AB modellerinin diğer modellere göre düşük sonuçlar elde etmesidir.

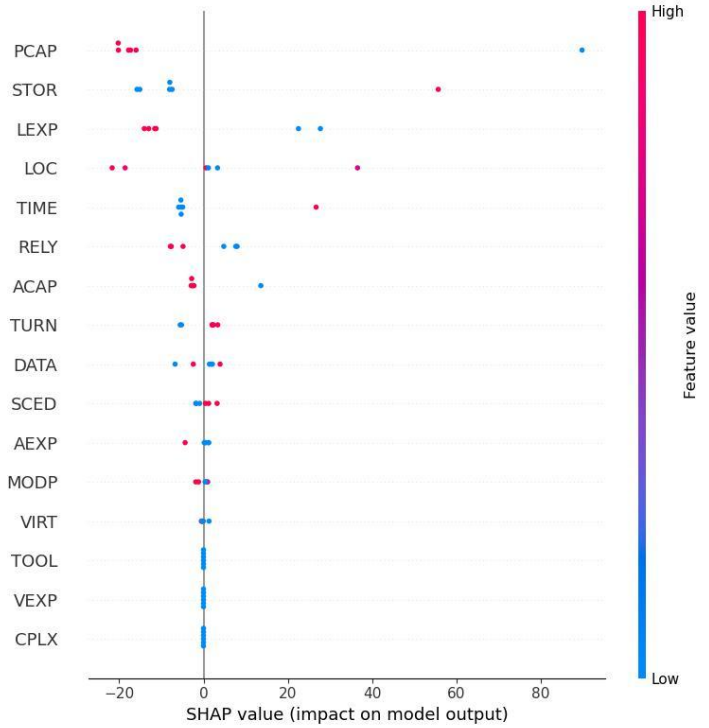
Çalışmada kullanılan regresyon modellerinden bazılarının belirli veri setleri üzerinde düşük performans göstermesinin temel nedenin, bu veri setlerindeki özellik dağılımlarının model varsayımlarıyla uyumsuzluğundan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Özellikle, yüksek boyutlu ve seyrek veri yapısına sahip olan veri setlerinde, DR modelinin lineer varsayımlarının aşırı basitleştirici etki yaparak öğrenememe durumuna yol açmış olabileceği ön görülmektedir. Benzer şekilde ağaç tabanlı modellerin, aşırı gürültülü veya aykırı değerler içeren veri setlerinde aşırı öğrenme eğilimi göstermiş olabileceği düşünülmektedir. YSA modelinin düşük performansının ise, küçük ölçekli veri setlerinde yetersiz eğitim örnekleri nedeniyle parametre optimizasyonunun yetersiz kalmasıyla ilişkilendirilmektedir.

Makine öğrenmesi modellerinin iç işleyişinin insanlar tarafından rahatlıkla anlaşılamaması bu modellerin kara kutu olarak adlandırılmasına neden olmaktadır (Gilpin vd., 2019; Kök, 2024; Lipton, 2017). DR ve KA gibi modeller diğerlerine göre daha anlaşılabilir olsa da bu modellerin de yorumlanabilir olması, makine öğrenmesi tarafından elde edilen sonuçların kullanılabilirliği açısından önemlidir. Bu nedenle son zamanlarda açıklanabilir yapay zekâ yöntemleri sıklıkla kullanılmıştır. Bu çalışmada eğitilen modelleri açıklamak için SHAP yöntemi kullanılmıştır. SHAP yöntemi Python dilinde var olan kütüphane kullanılarak geliştirilmiştir (*SHAP*, 2024). Her bir veri seti için altı farklı modelle 50 tekrarlı sınama ile analizler yapıldığı için 300 farklı model açıklaması yapılabilmesi mümkündür. Fazla sayıda açıklama karmaşıklığa neden olacağı için her bir veri setinde en başarılı sonucu elde eden modelin en başarılı sınama veri seti kullanılarak açıklaması yapılmıştır. Şekil 1-6'da her bir veri seti için yapılmış olan açıklamalara ait çizilen grafikler gösterilmektedir.



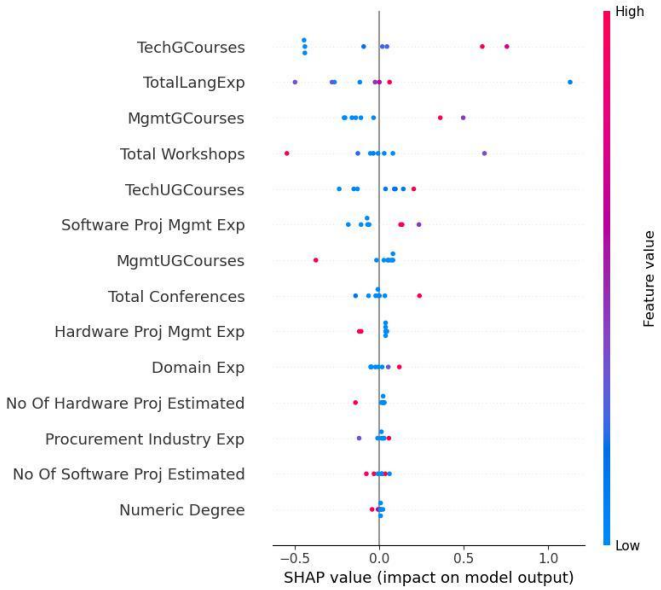
Şekil 1. china_original veri seti için YSA modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the artificial neural network model for the china_original dataset)

Şekil 1'de yer alan sonuçlar china_original veri seti için YSA yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 139.45, 0.0104, 0.994 ve 0.0855 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "AFP", "Added", "Output", "File" ve "Interface" olarak değerlendirilmektedir. "Dev.Type", "Resource", "Duration", "PDR_AFP" ve "PDR_UFP" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.



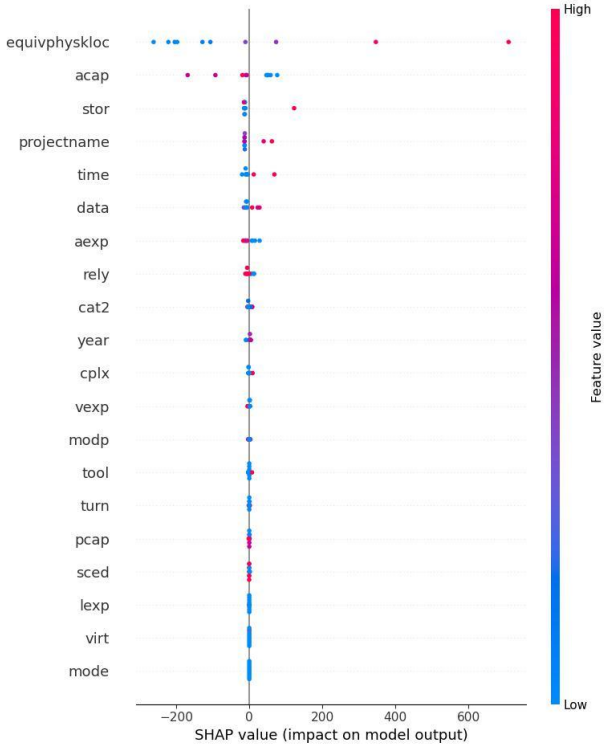
Şekil 2. cocomonasa_v1 veri seti için RO modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the random forest model for the cocomonasa_v1 dataset)

Şekil 2'de yer alan sonuçlar cocomonasa_v1 veri seti için RO yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 35.26, 0.3607, 0.8306 ve 0.801 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "PCAP", "STOR", "LEXP", "LOC" ve "TIME" olarak değerlendirilmektedir. "CPLX", "VEXP", "TOOL", "VIRT" ve "MODP" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.



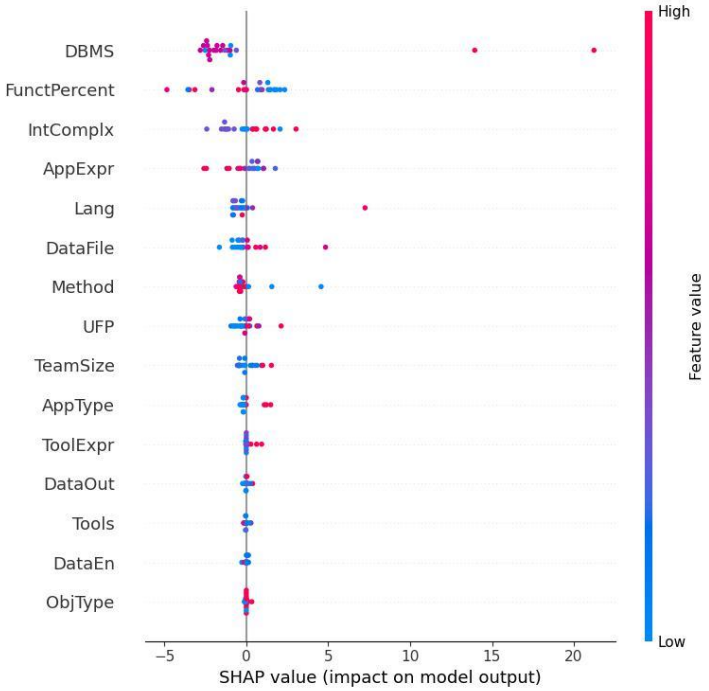
Şekil 3. humans2 veri seti için GB modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the gradient boosting model for the humans2 dataset)

Şekil 3'te yer alan sonuçlar humans2 veri seti için GB yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 0.763, 0.262, 0.875 ve 4.60 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "TechGCourses", "TotalLangExp", "MgmtGCourses", "Total Workshops" ve "TechUGCourses" olarak değerlendirilmektedir. "Numeric Degree", "No Of Software Proj Estimated", "Procurement Industry Exp", "No Of Hardware Proj Estimated" ve "Domain Exp" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.



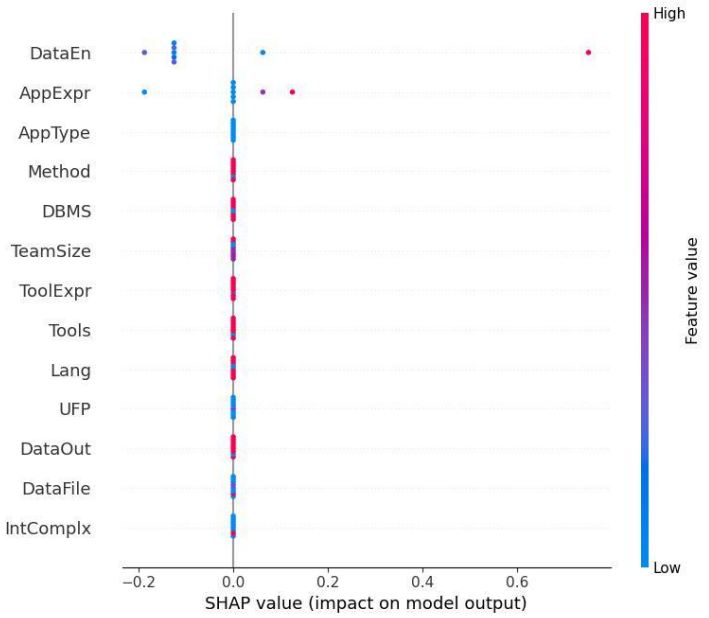
Şekil 4. nasa93 veri seti için GB modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the gradient bossting model for the nasa93 dataset)

Şekil 4'te yer alan sonuçlar nasa93 veri seti için GB yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 51.75, 0.217, 0.693 ve 0.364 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "equivphyskloc", "acap", "stor", "projectname" ve "time" olarak değerlendirilmektedir. "mode", "virt", "lexp", "sced" ve "pcap" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5. usp05 veri seti için KA modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the decision tree model for the usp05 dataset)

Şekil 5'te yer alan sonuçlar usp05 veri seti için KA yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 1.56, 0.091, 0.528 ve 0.275 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "DBMS", "FunctPercent", "IntComplx", "AppExpr" ve "Lang" olarak değerlendirilmektedir. "ObjType", "DataEn", "Tools", "DataOut" ve "ToolExpr" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 6. usp05-ft veri seti için KA modeli kullanılarak elde edilen model açıklama grafiği
(Model description graph obtained using the decision tree model for the usp05-ft dataset)

Şekil 6'da yer alan sonuçlar usp05-ft veri seti için KA yönteminin en başarılı sınama veri setiyle eğitilen modeli kullanılarak elde edilmiştir. Bu model, MAE, MSLE, R ve MMRE metriklerinde sırasıyla 0.125, 0.0205, 0.811 ve 0.0625 değerlerini elde etmiştir. Şekilde yer alan açıklama sonuçlarına göre model karar aşamasında en etkili olan ilk beş öznitelik "DataEn", "AppExpr", "AppType", "Method" ve "DBMS" olarak değerlendirilmektedir. "IntComplx", "DataFile", "DataOut", "UFP" ve "Lang" öznitelikleri ise model karar alma aşamasında en etkisiz olan beş öznitelik olarak değerlendirilmektedir.

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Proje efor tahmini amacıyla, bu çalışmada altı farklı regresyon temelli makine öğrenmesi modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, sırasıyla RO, KA, DR, YSA, GB ve AB olarak adlandırılmaktadır. Geliştirilen bu modeller, farklı veri setleri üzerinde test edilmiştir; bu veri setleri china_original, cocomonasa_v1, humans2, nasa93, usp05 ve usp05-ft olarak belirlenmiştir. Modellerin farklı koşullardaki performanslarını karşılaştırmak ve daha doğru bir değerlendirme yapmak amacıyla, tekrarlayan sınama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kapsamında, her bir veri setinden rastgele örnekler seçilerek 50 farklı eğitim ve test veri kümesi oluşturulmuş, böylece her bir modelin performansı birden fazla kez ölçülmüştür. Model performanslarının değerlendirilmesinde, MAE, MSLE, R ve MMRE gibi yaygın metrikler kullanılmıştır. Ayrıca, yapılan sınamalar arasındaki değişkenliği daha iyi anlayabilmek için her bir metrik skoruna ait standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, YSA, RO, GB ve KA modelleri, farklı veri setlerinde en başarılı performansı gösteren modeller olarak belirlenmiştir. Özellikle cocomonasa_v1 veri setinde hem RO hem de KA modelleri en başarılı modeller olarak öne çıkarken, diğer veri setlerinde KA modeli iki farklı veri setinde, GB modeli ise iki farklı veri setinde başarı göstermiştir. YSA modeli ise yalnızca bir veri setinde en başarılı model olmuştur. Bu bulgular, KA modelinin proje efor tahmininde genel olarak daha etkili olduğunu ve bu çalışma kapsamında incelenen modeller arasında en başarılı model olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, KA modelinin özellikle proje efor tahmini alanında güçlü bir performans sergilediğini ve farklı veri setleri üzerinde tutarlı bir başarı sağladığını ortaya koymaktadır.

Piyasada kullanılan sistemlerde bir modelin anlaşılabilir olması büyük bir öneme sahiptir, çünkü anlaşılabilir olma durumu modelin doğruluğu ve güvenilirliği hakkında kullanıcıların bilgi sahibi olmasını sağlamaktadır. Bu bağlamda, çalışmada önerilen modellerin açıklanabilirliğini sağlamak amacıyla SHAP yöntemi kullanılmıştır. SHAP yöntemi, model kararlarının arkasındaki mantığı anlamaya yönelik bir araç olarak, her bir özelliğin modelin çıktısına olan katkısını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Veri setlerinde farklı modellerin ve tekrarlayan sınama yaklaşımının kullanılması, bir veri seti için çok sayıda açıklama elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada her bir veri seti için yalnızca bir açıklamaya yer verilmiş ve bu açıklama, en başarılı modelin, en başarılı sınama veri setine dayalı olarak seçilmiştir. Yapılan model açıklamaları sayesinde, her bir veri setindeki hangi özniteliklerin model karar aşamasında daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, bazı özniteliklerin, modelin karar verme sürecinde diğer özniteliklere kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığı gözlemlenmiştir. Örneğin, china_original veri setinde "AFP", "Added", "Output" ve "File" öznitelikleri; cocomonasa_v1 veri setinde "PCAP", "STOR" ve "LEXP" öznitelikleri; humans2 veri setinde "TechGcourses", "TotalLangExp", "MgmtGcourses" ve "Total Workshops" öznitelikleri; nasa93 veri setinde "equivphyskloc" ve "acap" öznitelikleri; usp05 veri setinde "DBMS", "FunctPercent" ve "AppExpr" öznitelikleri; ve usp05-ft veri setinde "DataEn" ve "AppExpr" öznitelikleri, diğer özniteliklere kıyasla model karar aşamasında daha büyük bir etkiye sahip olmuştur.

SHAP analizlerinden elde edilen bulgular, yazılım projelerinin planlanması ve kaynak tahsisi süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Model kararlarında etkili olan özniteliklerin belirlenmesi, proje yöneticilerine, hangi faktörlere öncelik vermeleri gerektiği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Örneğin, "AFP", "PCAP" veya "TechGcourses" gibi özniteliklerin yüksek etkiye sahip olduğu projelerde, bu alanlara daha fazla kaynak ayırmanın proje başarısını artırabileceği çıkarımı yapılabilmektedir. Ayrıca, SHAP analizleri, proje risklerini değerlendirme ve potansiyel sorunları önceden belirleme konusunda da yardımcı olabilecektir. Çalışmada sonucunda elde edilen SHAP bulgularının, projelerin daha verimli ve başarılı bir şekilde yönetilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. Makine öğrenmesi modellerinin sonuçları incelendiğinde YSA modelinin sadece china_original veri setinde en iyi sonucu; cocomonasa_v1 veri setinde en kötü sonucu; humans2, usp05 ve usp05-ft veri setlerinde en kötü ikinci sonucu; nasa93 veri setinde ise en kötü üçüncü sonucu elde ettiği görülmektedir. Veri setlerinden china_original veri setinin en fazla, cocomonasa_v1 veri setinin ise en az örnek sayısına sahip olması, YSA modelinin eğitiminde örnek sayısının artmasının modelin performansını olumlu etkilediği yorumunu yapmamıza neden olmaktadır. KA modeli ise, china_original hariç tüm veri setlerinde ya en iyi ya da en iyi ikinci model olmuştur. Bu sonuç doğrultusunda KA modelinin örnek ve öznitelik sayısının düşük olduğu veri setlerinde iyi sonuçlar verdiği çıkarımı yapılmıştır. Sonuçlar genel anlamda incelendiğinde ise, yüksek performans sergileyen modellerde standart sapma değerinin de düşük olduğu görülmektedir. Bu durum dikkate alındığında model performansı artıkça modelin daha tutarlı olduğu çıkarımı da yapılmaktadır.

Çalışmada kapsamında yapılmış olan analizler sayesinde, tasarlanacak bir proje efor tahmin sisteminde hangi

regresyon modelinin kullanımının daha uygun olduğu konusunda yorum yapabilmek mümkündür. Bu durumun yanı sıra yapılan açıklamalar sayesinde hangi özelliklerin proje eforunu sağlıklı bir şekilde tahmin etmede daha etkin olduğu da çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda anlaşılabilmektedir. Gelecek çalışmalarda veri seti ve model sayısının artırılarak analizlerin tekrar edilmesi, daha kapsamlı bir çalışmanın yapılmasına katkı sunacaktır. Gelecekte çalışmayla ilgili yapılabilecek diğer bir analiz ise kullanılan modellerde hiperparametre optimizasyonların yapılması olarak düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda LIME, Morris Sensitivity Analysis ve Explainable Boosting Machine gibi farklı açıklamalı yapay zekâ yöntemlerini kullanılarak hem yerel hem de global açıklamaların yapılması, yapılan açıklamaların ise uygun metriklerle karşılaştırılarak daha detaylı bir model analizinin yapılması mümkündür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu araştırmada yer alan tüm/kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Dr. Öğretim Üyesi Yasin GÖRMEZ danışmanlığında yürütülen Esma Nur KAYA'ya ait "Proje Efor Tahmini İçin Makine Öğrenmesi Modellerinin Geliştirilmesi ve SHAP Yöntemi Kullanılarak Açıklanması" başlıklı tez çalışması kapsamında yapılan çalışma sonuçları kullanılarak üretilmiştir. Çalışma sonuçları ilgili tezde kullanılacaktır. Çalışmanın sonuçlarının bir kısmı ise (SHAP açıklamaları hariç) "Ege 12th International Conference on Applied Sciences" başlıklı konferansta özet metin olarak kabul edilmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Amruthnath, N., & Gupta, T. (2018). A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance. 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 355-361. https://doi.org/10.1109/IEA.2018.8387124

Azzeh, M., & Nassif, A. B. (2016). A hybrid model for estimating software project effort from Use Case Points. Applied Soft Computing, 49, 981-989. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.05.008

BaniMustafa, A. (2018). Predicting Software Effort Estimation Using Machine Learning Techniques. 2018 8th International Conference on Computer Science and Information Technology (CSIT), 249-256. https://doi.org/10.1109/CSIT.2018.8486222

Braga, P. L., Oliveira, A. L. I., Ribeiro, G. H. T., & Meira, S. R. L. (2007). Bagging Predictors for Estimation of Software Project Effort. 2007 International Joint Conference on Neural Networks, 1595-1600. https://doi.org/10.1109/IJCNN.2007.4371196

Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Dragicevic, S., Celar, S., & Turic, M. (2017). Bayesian network model for task effort estimation in agile software development. Journal of Systems and Software, 127, 109-119. https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.01.027

Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons.

Effor Estimation Datasets. (2024). GitHub. https://github.com/danrodgar/DASE/tree/master/datasets/effortEstimation

Elish, M. O. (2009). Improved estimation of software project effort using multiple additive regression trees. Expert Systems with Applications, 36(7), 10774-10778. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.013

Erasmus, I. P., & Daneva, M. (2013). ERP Effort Estimation Based on Expert Judgments. 2013 Joint Conference of the 23rd International Workshop on Software Measurement and the 8th International Conference on Software Process and Product Measurement, 104-109. https://doi.org/10.1109/IWSM-Mensura.2013.25

Freund, Y., & Schapire, R. E. (1997). A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting. Journal of Computer and System Sciences, 55(1), 119-139. https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504

Friedman, J. H. (2001). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. The Annals of Statistics, 29(5), 1189-1232.

Gilpin, L. H., Bau, D., Yuan, B. Z., Bajwa, A., Specter, M., & Kagal, L. (2019). Explaining Explanations: An Overview of Interpretability of Machine Learning (arXiv:1806.00069). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.00069

Hameed, S., Elsheikh, Y., & Azzeh, M. (2023). An optimized case-based software project effort estimation using genetic algorithm. Information and Software Technology, 153, 107088. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107088

Haris, M., Chua, F.-F., & Lim, A. H.-L. (2023). An Ensemble-Based Framework to Estimate Software Project Effort. 2023 IEEE 8th International Conference On Software Engineering and Computer Systems (ICSECS), 47-52. https://doi.org/10.1109/ICSECS58457.2023.10256337

Hosni, M. (2024). Comparative Analysis of Single and Ensemble Support Vector Regression Methods for Software Development Effort Estimation: Proceedings of the 16th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, 509-516. https://doi.org/10.5220/0013072300003838

Jorgensen, M. (2005). Practical guidelines for expert-judgment-based software effort estimation. IEEE Software, 22(3), 57-63. IEEE Software. https://doi.org/10.1109/MS.2005.73

Kassaymeh, S., Alweshah, M., Al-Betar, M. A., Hammouri, A. I., & Al-Ma'aitah, M. A. (2024). Software effort estimation modeling and fully connected artificial neural network optimization using soft computing techniques. Cluster Computing, 27(1), 737-760. https://doi.org/10.1007/s10586-023-03979-y

Kim, J.-H. (2009). Estimating classification error rate: Repeated cross-validation, repeated hold-out and bootstrap. Computational Statistics & Data Analysis, 53(11), 3735-3745. https://doi.org/10.1016/j.csda.2009.04.009

Kitchenham, B., & Mendes, E. (2004). Software productivity measurement using multiple size measures. IEEE Transactions on Software Engineering, 30(12), 1023-1035. IEEE Transactions on Software Engineering. https://doi.org/10.1109/TSE.2004.104

Kök, İ. (2024). Açıklanabilir Yapay Zekaya Dayalı Müşteri Kaybı Analizi ve Elde Tutma Önerisi. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 6(1), Article 1. https://doi.org/10.46387/bjesr.1344414

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Lipton, Z. C. (2017). The Mythos of Model Interpretability (arXiv:1606.03490). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.03490

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. Advances in Neural Information Processing Systems, 30. https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html

Molnar, C. (2020). Interpretable Machine Learning. Lulu.com.

Mukherjee, S., & Malu, R. K. (2014). Optimization of project effort estimate using neural network. 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies, 406-410. https://doi.org/10.1109/ICACCCT.2014.7019474

Mustafa, E. I., & Osman, R. (2024). A random forest model for early-stage software effort estimation for the SEERA dataset. Information and Software Technology, 169, 107413. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107413

Özgür, A. S., Tarhan, Ç., Komesli, M., & Tecim, V. (2023). Yapay Zeka Teknikleri Kullanılarak Proje Üretim Sistemlerinin Tasarımı ve Geliştirilmesi. Journal of Information Systems and Management Research, 5(1), Article 1. https://doi.org/10.59940/jismar.1214440

Plumb, G., Molitor, D., & Talwalkar, A. S. (2018). Model Agnostic Supervised Local Explanations. Advances in Neural Information Processing Systems, 31. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2018/hash/b495ce63ede0f4efc9eec62cb947c162-Abstract.html

Pospieszny, P., Czarnacka-Chrobot, B., & Kobylinski, A. (2018). An effective approach for software project effort and duration estimation with machine learning algorithms. Journal of Systems and Software, 137, 184-196. https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.11.066

Qi, F., Jing, X.-Y., Zhu, X., Xie, X., Xu, B., & Ying, S. (2017). Software effort estimation based on open source projects: Case study of Github. Information and Software Technology, 92, 145-157. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.07.015

Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. Machine Learning, 1(1), 81-106. https://doi.org/10.1007/BF00116251

Ritu, & Bhambri, P. (2023). Software Effort Estimation with Machine Learning – A Systematic Literature Review. Içinde Agile Software Development (ss. 291-308). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119896838.ch15

scikit-learn: Machine learning in Python. (2024). https://scikit-learn.org/stable/

Seber, G. A. F., & Lee, A. J. (2012). Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons.

SHAP. (2024). https://shap.readthedocs.io/en/latest/

Sharma, S., & Vijayvargiya, S. (2021). Applying Soft Computing Techniques for Software Project Effort Estimation Modelling. Içinde V. Nath & J. K. Mandal (Ed.), Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems (ss. 211-227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7486-3_21

Sharma, S., & Vijayvargiya, S. (2022). Modeling of software project effort estimation: A comparative performance evaluation of optimized soft computing-based methods. International Journal of Information Technology, 14(5), 2487-2496. https://doi.org/10.1007/s41870-022-00962-5

Sharma, S., & Vijayvargiya, S. (2023). An Optimized Neuro-Fuzzy Network for Software Project Effort Estimation. IETE Journal of Research, 69(10), 6855-6866. https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2027282

Shepperd, M., Schofield, C., & Kitchenham, B. (1996). Effort estimation using analogy. Proceedings of IEEE 18th International Conference on Software Engineering, 170-178. https://doi.org/10.1109/ICSE.1996.493413

Şengüneş, B., & Öztürk, N. (2023). An Artificial Neural Network Model for Project Effort Estimation. Systems, 11(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/systems11020091

Tsunoda, M., Monden, A., Keung, J., & Matsumoto, K. (2012). Incorporating Expert Judgment into Regression Models of Software Effort Estimation. 2012 19th Asia-Pacific Software Engineering Conference, 1, 374-379. https://doi.org/10.1109/APSEC.2012.58

Tuncer, Y. (2024). Artificial Intelligence Based Risk Analsis in Project Management [M.Eng.]. https://www.proquest.com/docview/3143984193/abstract/4ABE168365614041PQ/1

Walkerden, F., & Jeffery, R. (1999). An Empirical Study of Analogy-based Software Effort Estimation. Empirical Software Engineering, 4(2), 135-158. https://doi.org/10.1023/A:1009872202035

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30(1), 79-82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 545-555, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1594994

Araştırma Makalesi

Research Article

DERİ DOKUSUNUN FARKSAL BAĞLAŞIMLI VÜCUT İÇİ HABERLEŞME KANALININ DAĞITIK PARAMETRELİ İLETİM HATTI MODEL ANALİZİ

Kayhan ATEŞ[1,2*], Şükrü ÖZEN[2]

[1] University of Pavia, Telecommunications & Remote Sensing Laboratory, Pavia, Italy

[2] Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Vücut İçi Haberleşme, Farksal Bağlaşım, İletim Hattı Modeli, Analitik Hesaplama, Biyoelektromanyetik.

Öz

Vücut içi haberleşme, insan vücudunu elektriksel sinyallerin iletimi için haberleşme kanalı olarak kullanan yenilikçi bir yöntemdir. Bu çalışmada, giyilebilir sistemler-için 100 MHz'e kadar olan farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalı, dağıtık parametreli iletim hattı modeli kullanılarak analitik olarak incelenmiştir. Söz konusu model, dokunun frekansa bağlı elektriksel özellikleri dikkate alınarak iletim hattı davranışının detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, eşdeğer devredeki direnç ve kapasitansın artan frekansla birlikte azaldığını, kondüktansın ise arttığını göstermektedir. Özellikle, zayıflama ve faz sabitlerinin incelenen frekans bandında 100 kHz'de sırasıyla 3,85 Np/m ve 3,58 rad/m ile en yüksek değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, haberleşme kanalında iletilen gücün frekans arttıkça aynı uzaklıklarda artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yeni nesil giyilebilir sistemlerin haberleşme kanalı tasarımı için kritik bilgiler sunmakta ve sistem performansını optimize etmek için frekans seçimi açısından yol gösterici bir çerçeve oluşturmaktadır. Bu çalışma, düşük güçlü ve yüksek verimli veri haberleşmesi için vücut içi haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

DISTRIBUTED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL ANALYSIS OF THE GALVANIC COUPLED INTRABODY COMMUNICATION CHANNEL OF SKIN TISSUE

Keywords

Intrabody Communication, Galvanic Coupling, Transmission Line Model, Analytical Calculation, Bioelectromagnetics.

Abstract

Intrabody communication is an innovative method that utilizes the human body as a communication channel for transmitting electrical signals. In this study, the galvanic coupled intrabody communication channel for wearable systems was analytically investigated using a distributed parameter transmission line model up to 100 MHz. The proposed model enables a detailed analysis of the transmission line behavior by considering the frequency dependent electrical properties of the tissue. The results indicate that the resistance and capacitance in the equivalent circuit decrease with increasing frequency, while conductance increases. Notably, the attenuation and phase constants were found to reach their maximum values at 100 kHz within the investigated frequency band, measured as 3.85 Np/m and 3.58 rad/m, respectively. Additionally, it was observed that the transmitted power in communication increases with frequency at the same distances. These findings provide critical insights into the design of communication channels in next-generation wearable systems and establish a guiding framework for optimizing system performance through frequency selection. This study aims to contribute to the development of intrabody communication systems for low-power and high-efficiency data communication.

Alıntı / Cite

Ateş, K., Özen, Ş., (2025). Deri Dokusunun Farksal Bağlaşımlı Vücut İçi Haberleşme Kanalının Dağıtık Parametreli İletim Hattı Model Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 545-555.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
K. Ateş / 0000-0002-6016-6577
Ş. Özen / 0000-0002-5538-6786

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	02.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	16.04.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: kayhanates@akdeniz.edu.tr, +90-242-227-4400-4305

DISTRIBUTED PARAMETER TRANSMISSION LINE MODEL ANALYSIS OF THE GALVANIC COUPLED INTRABODY COMMUNICATION CHANNEL OF SKIN TISSUE

Kayhan Ateş[1,2†], Şükrü Özen[2]
[1] University of Pavia, Telecommunications & Remote Sensing Laboratory, Pavia, Italy
[2] Akdeniz University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Eng., Antalya, Türkiye

Highlights

- Intrabody communication is defined as a communication channel modeling of tissue.
- This study investigates the transmission line model of tissue communication channel.
- Results indicate that dielectric properties affect the equivalent circuit model of tissue.
- Maximum attenuation was observed as 3.85 Np/m at 100 kHz.

Graphical Abstract

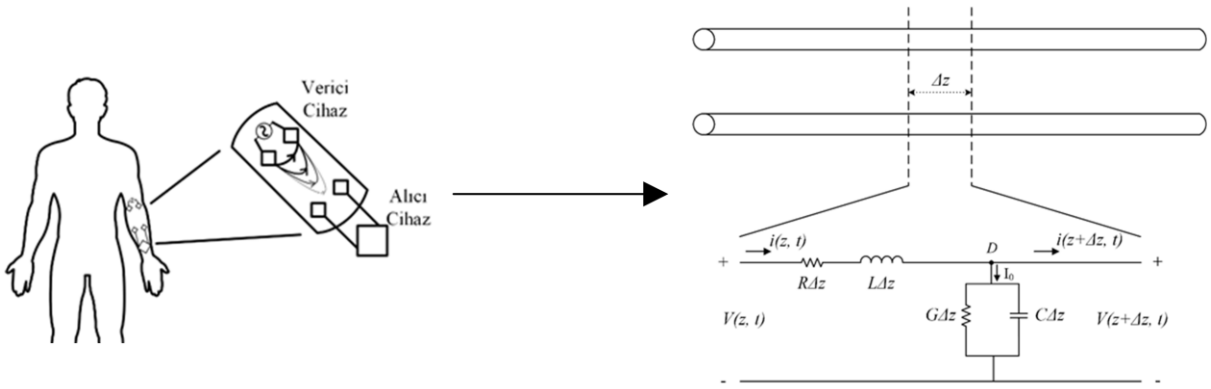


Figure. Galvanic Coupled Intrabody Communication Channel and Distributed Parameter Transmission Line Model

Purpose and Scope

In this study, a galvanic coupled-based intrabody communication channel was investigated according to the distributed parameter transmission line model of tissue. Consequently, the equivalent circuit model was derived in order to analyze further research about the data signal propagation through the biological tissue.

Design/methodology/approach

The transmission line model was analyzed up to 100 MHz in this study to address the communication channel model, with the equivalent circuit parameters considered frequency-dependent. Dielectric properties of tissues, which define aforementioned circuit parameters, were derived from realistic values available in open-access database libraries. Consistent with the assumptions of intrabody communication, the inductance parameter of the transmission line model was disregarded.

Findings

The study revealed that the transmission line model parameters vary with frequency: resistance and capacitance decrease, while conductance increases. Transmitted power at different frequencies was also calculated using the propagation constant of the galvanic coupling-based intrabody communication model.

Practical implications

The findings of this study can be applied to advanced wearable technologies and may help optimize a flatter communication channel in the frequency domain. In the future, data signal modulation could be explored to meet enhanced communication requirements.

Originality

This study highlights the transmission line model analysis for galvanic coupled-based intrabody communication channel in the frequency range of 0 – 100 MHz. Therefore, new generation communication systems for IoT-based wearable technologies might be designed in light of these results.

† Corresponding author: kayhanates@akdeniz.edu.tr, +90-242-227-4400-4305

1. Giriş (Introduction)

Günlük yaşamda haberleşme, temel ihtiyaçların karşılanmasında hayatî bir rol oynamaktadır. Elektriğin keşfinden sonra telgrafın geliştirilmesi, insanların yaşantısını kolaylaştırmaya zemin hazırlamıştır. Bu tür teknolojik ilerlemeler, haberleşme sistemlerinin evriminde kritik bir noktayı temsil etmektedir. Günümüzde ise haberleşme teknolojileri, tıp gibi doğrudan insan yaşamını etkileyen alanlarda belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Geliştirilen sistemler sayesinde son yıllarda bireylerin hastanelere başvurma oranı düşmüş ve doktorlar, teşhis ve tedavi süreçlerini uzaktan gerçekleştirebilecek yöntemlere yönelmiştir (Cosoli vd., 2021; Troller-Renfree vd., 2021; Gigena vd., 2022; Mishra vd., 2022). Bu dönemde, sağlık uygulamalarının performansını artırma ve maliyetleri düşürme çabaları öncelikli hedefler arasında yer almıştır. Geleneksel tıbbi sistemlerde sensörlerin çoğu kablolu bir şekilde cihazlara bağlanmaktadır; ancak bu yöntem ile hastaların hareket özgürlüğü kısıtlanabilmekte ve sinyal kaydı zorlaşabilmektedir. Günümüzde, bu sorunlara kablosuz teknolojiler çözüm olarak sunulmuş ve hem hastaların hem de sağlık personelinin konforunu artıran bir alternatif oluşturulmuştur (Wegmüller, 2007).

Literatürde, farklı frekans bantlarında ve farklı tekniklerle hastalıkların çözümleri incelenmektedir. Son yıllarda araştırmacılar tarafından incelenen biyotelemetri sistemleri ile insan vücudundaki önemli sinyallerin takibi ve hastaların tedavisi gerçekleştirilebilir (Alper ve Coşkun, 2020). Gözel vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 868 MHz frekansında implant edilebilir mikroşerit dipol anten tasarımı incelenmiştir. Tasarım, H-şeklinde katlanmış bir mikroşerit dipol anteni ele almaktadır. İncelemelerde boş uzaydaki antenin doku içerisinde davranışı ve dokuya etkileri ele alınmıştır. Bu kapsamda, ilgilenilen frekansta söz konusu antenin kazancı -25 dB olarak hesaplanmışken bant genişliği ise 250 MHz olarak belirtilmiştir. 1gr ortalama en yüksek özgül soğurma oranı ise 396,8 W/kg hesaplanmıştır. Alper ve Coskun (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 2,45 GHz'de implant anten tasarımı sunulmuştur ve deneysel olarak doku modeli içi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, doku içinde ve dışında geri dönüş kaybı sırasıyla -18 dB ve -33 dB elde edilmiştir. İmplant antenin dokudaki dozimetrik etkileri incelendiğinde ise özgül soğurma oranının 153 W/kg hesaplanmıştır.

Sağlık sektörünün yanı sıra günümüz teknolojisinin önemli bir diğer unsuru, cihazlar arası haberleşmenin geliştirilmesidir. Farklı amaçlarla kullanılan cihazların birbirleriyle ve çevreleriyle uyumlu bir şekilde haberleşmesi gerekmektedir. Yeni nesil cihazlarda kullanılan haberleşme sistemlerinin düşük gecikme, yüksek veri hızı ve çok sayıda cihazın bağlantı kurabilme kapasitesi kritik bir öneme sahiptir (Ateş, 2024). Kablosuz alan ağları ve nesnelerin interneti sayesinde bağlı cihazlar, bu ihtiyaçlara yanıt vermekte ve teknolojik ekosistemin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. Bu tür zorluklara yönelik geliştirilen yöntemlerden birisi, biyolojik dokuyu bir sinyal iletim ortamı olarak ele alan vücut içi haberleşme tekniğidir. Düşük enerji ihtiyacı ve yüksek güvenilirliği sayesinde bu teknik, vücutların interneti kavramını gündeme getirmiştir (Chatterjee vd., 2023). Ayrıca, literatürde bu teknolojinin iş sağlığı ve güvenliği, artırılmış gerçeklik uygulamaları, spor aktivitelerinde sanal koçluk ve beslenme takibi gibi farklı alanlarda da kullanıldığına dair çalışmalar yer almaktadır (Celik vd., 2021).

Vücut içi haberleşme kanalının iletim hattı modelini inceleyen çalışmalar, son yıllarda literatürde yer almaktadır. Callejón vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deri üzerinden sinyal yayılımını açıklamak için dağıtık parametreli bir iletim hattı modeli geliştirilmiştir. Farksal bağlaşım temelli model, 1 GHz'e kadar olan frekanslarda test edilmiş ve zayıflama ile yayılım parametreleri literatürle uyumlu bulunmuştur. QPSK ve BPSK modülasyonları 30 cm mesafeye kadar düşük bit hata oranı sunarken, QPSK daha yüksek veri hızlarında da başarılı olmuştur. 16-QAM en düşük performansı göstermiştir. Swaminathan vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada deri, yağ, kas ve kemikten oluşan çok katmanlı insan dokusu için farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme tekniği temelli eşdeğer devre modeli sunulmuştur. Model sayesinde frekans, elektrot mesafesi, doku kalınlığı gibi farklı parametrelerin haberleşme kanal kazancına etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, modelin doğruluğunu ve implant edilebilir sensör tasarımı için uygunluğunu göstermiştir. Wang vd. (2016), vücut dokusunu sığa bağlaşım temelli kademeli RC devre modeliyle temsil eden yeni bir iletim hattı modeli önermiştir. Ayrıca, BPSK modülasyonu kullanılarak kanal analizi ve bit hata oranı değerlendirilmiştir. Lodi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 1 kHz – 1 MHz aralığında sığa bağlaşım temelli bir iletim hattı modeli önerilmiştir. Faz açısı ve empedans ölçümleriyle modelin doğruluğu %3 hata payı ile kanıtlanmıştır. Belirtilen çalışmalar incelendiğinde, devre elemanlarının frekansa bağlı ayrıntılı davranışlarının analiz edilmesi ve ilgili frekanslardaki transfer fonksiyonu cevaplarının değerlendirilmesi, vücut içi haberleşme sistemlerinin daha doğru ve optimize bir şekilde tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, haberleşme kanal kazancının artırılmasına yönelik uyumlandırma devreleri tasarlanarak sistem performansı iyileştirilebilir. Bu çalışma, söz konusu ihtiyaçlara odaklanarak mevcut modellere alternatif bir yaklaşım sunmakta; elde edilen parametrik analiz ve modelleme yöntemiyle vücut içi haberleşme sistemlerinin tasarım süreçlerine özgün bir katkı sağlamaktadır.

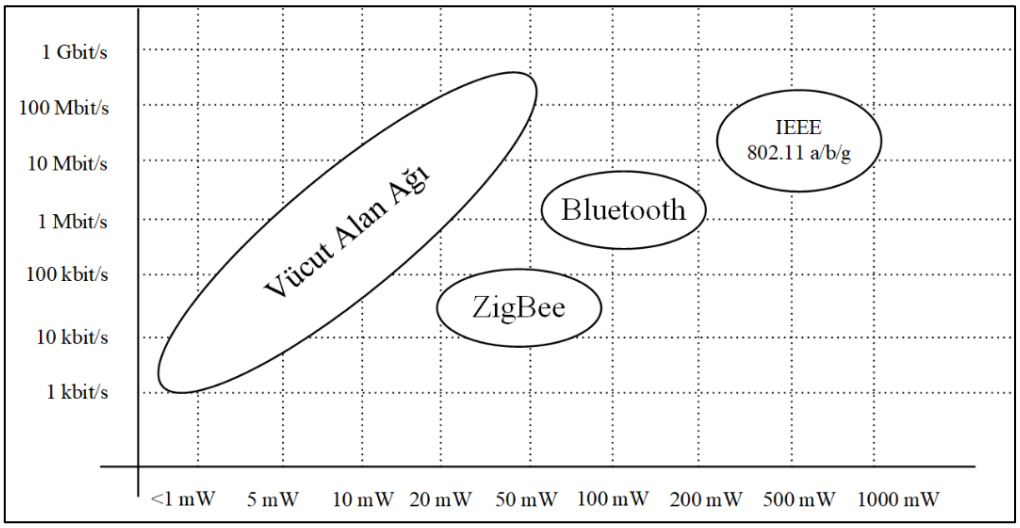
Araştırmacılar, son yıllarda farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalını hem teorik hem de deneysel olarak incelemelerine rağmen dağıtık parametreli iletim hattı model analizi ile ilgili güncel çalışmalar kısıtlıdır (Vizziello

vd., 2022; Ateş vd. 2024b). Bu çalışmada, deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametreli iletim hattı modeli analitik olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, frekansa bağlı iletim hattı parametreleri, deri dokusunun gerçekçi dielektrik özelliklerine göre hesaplanmıştır. Ayrıca, doku üzerinde farklı frekanslarda iletilen gücün davranışı ele alınmıştır. Bu çalışmanın amacı, giyilebilir sistemler için farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametreli iletim hattı modellenerek frekansa bağlı devre elemanlarının analitik olarak hesaplanmasıdır ve bu sayede giyilebilir sistemlerin vücut içi haberleşme kanal cevabının modellenmesi için öngörü oluşturmaktır.

Çalışmanın gidişatı, şu şekilde planlanmıştır: Öncelikle vücut içi haberleşme konusu, farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşmenin önemi ve teorik altyapısı açıklanmıştır. Ardından, vücut dokusunun iletim hattı modeli analitik olarak incelenmiştir ve farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme yaklaşımlarına göre analiz edilmiştir. 100 MHz'e kadar olan dağıtık parametreli iletim hattı modeli analitik olarak incelenmiştir ve farklı frekanslarda ve uzaklıklarda doku modelinde iletilen elektriksel sinyalin davranışı değerlendirilmiştir. Son olarak, elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Taşınabilir elektronik sistemlerin boyutlarının küçülmesi ve işlevselliklerinin artması, insan vücudunda haberleşme kurabilen teknolojilerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Giyilebilir ya da implant edilebilir özelliklere sahip bu cihazlar, kısa mesafeli kablosuz haberleşme için önemli bir altyapı oluşturmaktadır. Bu bağlamda, IEEE'nin 802.15.6-2012 standardı (IEEE, 2012), insan vücudu içinde ve çevresinde kullanılabilecek kablosuz haberleşme sistemleri için bir çerçeve sunmaktadır. Vücut içi haberleşme teknikleri, bu standart kapsamında detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Mevcut kablosuz haberleşme yöntemleri arasında, enerji tüketimi, veri güvenliği ve sinyal kaybı gibi faktörler nedeniyle vücut içi haberleşme ön plana çıkmaktadır (Alam ve Ben Hamida, 2014). Şekil 1, farklı kablosuz haberleşme yöntemlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. Yatay eksen güç gereksinimlerini, dikey eksen ise veri hızını temsil etmektedir. Bu karşılaştırma, vücut alan ağlarının diğer tekniklere kıyasla daha düşük enerji harcayarak daha yüksek veri hızlarına ulaşabildiğini göstermektedir.



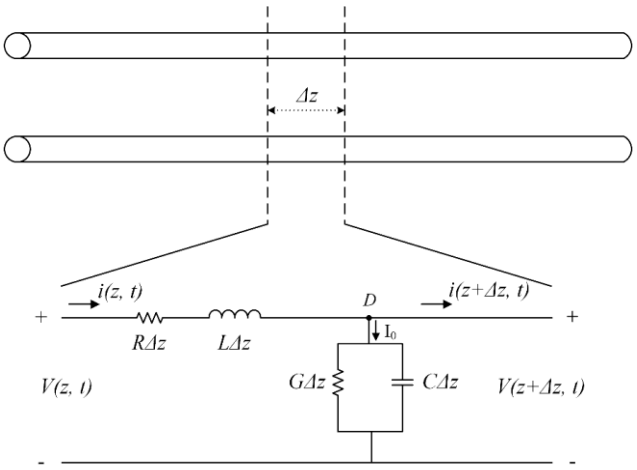
Şekil 1. Kablosuz haberleşme yöntemlerinin karşılaştırılması
(Comparison of wireless communication methods (Drude, 2007))

Vücut içi haberleşme yöntemi, insan vücudunu elektriksel sinyal iletim ortamı olarak modelleyerek enerji verimliliği, bilgi güvenliği ve frekans bandının yeniden kullanımı gibi pek çok avantaj sunmaktadır (Ateş vd., 2024a). Bu alanda literatürde farklı yöntemler sunulmuştur (Vizziello vd., 2023). Bu yöntemler temel olarak ultrasonik ve elektromanyetik olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta ve kullanılan yönteme bağlı olarak farklı çalışma frekanslarında incelenmektedir. Elektromanyetik tekniklerin ultrasonik yöntemlere göre daha hızlı veri iletimi, düşük sinyal zayıflaması ve geniş bir uygulama alanı gibi avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte radyo frekansı (RF) tabanlı teknikler yaygın olarak kullanılmasına rağmen, biyolojik dokularda yüksek düzeyde sinyal kayıplarına neden olabilmektedir (Vizziello vd., 2022). Bu çalışmada, farksal bağlaşım tekniği tercih edilmiştir. Bu teknolojinin seçimi, girişim ve güvenlik kaygıları, biyolojik doku üzerindeki etkileri ve diğer vücut içi haberleşme yöntemlerine göre daha basit bir alıcı-verici mimarisi sunması gibi çeşitli faktörlere dayandırılmıştır (Vizziello vd., 2023).

Sunulan bu çalışmada, farksal bağlaşım teknolojisini temel alan vücut içi haberleşme yöntemi incelenmiştir. Literatürde, farksal bağlaşım temelli sinyal iletimi için sinyal ve topraktan oluşan bir verici elektrot çifti ve bir alıcı elektrot çifti kullanılmaktadır (Ateş ve Özen, 2019). Elektriksel topraklama gerektirmeyen bu teknik, verici elektrot çifti arasında bir akım yoğunluğu oluşturarak sinyalleri iletir. Oluşan düşük akım yoğunluğu, alıcı elektrot çiftine farksal olarak ulaşır ve böylece sinyalin iki elektrot çifti arasında iletimi gerçekleşir. Yapılan çalışmalar, farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme tekniğinin çalışma frekansını 100 MHz'e kadar ele almaktadır (Vizziello vd., 2023). Bu yöntem, farksal bağlantı topolojisinin sağladığı avantajlarla elektriksel gürültüye karşı daha dirençlidir. Ayrıca, giyilebilir sistemler ve implant edilebilir teknolojiler için düşük enerji tüketimi ve güvenilir bir performans sunar (Chen vd., 2018).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Biyolojik dokuları iletim hattı olarak modelleyen çalışmalar literatürde sınırlı sayıda bulunmaktadır (Mao vd., 2018; Lodi vd., 2020). İnsan vücudunun fiziksel boyutları, 100 MHz'in altındaki frekanslarda sinyal dalga boyuna kıyasla küçük olduğundan, bu frekans aralığında iletim hattı modelinin kullanımı uygundur (Swaminathan vd., 2016). Bu model, eşdeğer devre elemanlarının seri şekilde bağlanarak periyodik bir yapı oluşturmasıyla elde edilir (Ferikoğlu vd., 2014). Şekil 2, dağıtık parametreli iletim hattını belirtir. Elektriksel sinyal bu modelde iletim hattı boyunca yayılırken, devre elemanları dokunun sinyal iletim özellikleri üzerinde önemli bir etki oluşturur.



Şekil 2. Dağıtık parametreli iletim hattı modeli (Distributed parameter transmission line model (Ateş, 2019))

Şekil 2'de belirtilen modelde, R ifadesi birim uzunluktaki direnç (Ω/m) olarak, L ise seri indüktans (H/m) olarak tanımlanır. C ve G ise sırasıyla kapasitans (C/m) ve kondüktans (S/m) elemanlarını temsil eder. $V(z, t)$, iletim hattının bilinen gerilimini ifade ederken, $V(z+\Delta z, t)$, Δz uzaklıktaki bilinmeyen gerilimi belirtir. Benzer şekilde, $i(z, t)$ ve $i(z+\Delta z, t)$, sırasıyla iletim hattındaki bilinen ve Δz uzaklıktaki bilinmeyen akımı gösterir. Bu eşdeğer devrenin çözümü sayesinde Eşitlik (1) – (3) elde edilir. Bu denklemler, devre parametrelerine bağlı olarak, akım ve gerilimin konum ve zamana göre belirlenmesini sağlar.

$$-\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = R\, i(z,t) + L\frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = G\, v(z,t) + C\frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

Eşitlik (1) ve (2), iletim hattındaki sırasıyla gerilim eşitliğini ve akım eşitliğini tanımlarken Eşitlik (3) ise iletim hattı modelinin yayılma sabitini ifade etmektedir. Burada, α iletim hattının zayıflama sabitini (Np/m) ve β faz sabitini (rad/m) belirtirken, ω ise açısal frekansı ifade eder ($\omega=2\pi f$, rad/s).

Yapılan araştırmalarda, dokunun eşdeğer devre modeli ile dielektrik özellikleri arasında bir ilişki olduğu gösterilmiştir (Chen vd., 2018). Çalışma frekansına bağlı olarak dokunun dielektrik özellikleri değişir ve bu durum, farklı frekanslar için çeşitli eşdeğer devre modellerinin oluşmasını sağlar. Bu değişim, sinyal iletim ortamının karakteristiğini de etkiler. Vücut içi haberleşme kanalının iletim hattı modelindeki indüktif eleman, elektriksel potansiyel değişimine göre düşük etkili olduğundan, genellikle ihmal edilmektedir (Wegmüller, 2007). Dokunun eşdeğer iletim hattı modelindeki devre elemanları ise elektrot ve doku özelliklerine göre Eşitlik (4) – (6) ile

tanımlanmıştır (Callejón vd., 2012).

$$G = \frac{A}{d}\omega\varepsilon_0\varepsilon'' \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{G} \quad (5)$$

$$C = \frac{A}{d}\omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad (6)$$

Burada, A elektrot yüzey alanını, d ise dokunun kalınlığını ifade eder. Bu çalışmada elektrot yüzeyi olarak 2 cm × 1 cm referans alınmışken doku kalınlığı ise 1,5 mm'dir (Ateş, 2024). Elektrotlar, farksal bağlaşım tekniğine göre verici ve alıcı elektrot çifti olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada incelenen eşdeğer modelde, elektrot çiftleri deri dokusu üzerinde 10 cm aralık olacak şekilde konumlandırılmıştır. Hem verici hem de alıcı taraftaki sinyal ile toprak elektrotları ise kendi arasında 6,3 cm aralıklı yerleştirilmiştir. ε_0, boşluğun dielektrik sabiti olup ε_0=8,854×10^{-12} F/m olarak tanımlanmıştır. ε' ve ε'', sırasıyla dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımlarını ifade eder (Ates vd., 2017). Bu parametreler temel alınarak, haberleşme kanalı olan dokunun eşdeğer devre modeli oluşturulabilir.

Gabriel vd. (1996), dokuların dielektrik sabitlerini matematiksel olarak modellemek amacıyla Cole-Cole dağılım modelini geliştirmiştir. Bu model, dokuların dielektrik özelliklerindeki değişimi geniş bir frekans aralığında aşağıdaki şekilde tanımlar:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_n \frac{\Delta\varepsilon_n}{1+(j\omega\tau_n)^{(1-\alpha_n)}} - j\frac{\sigma_i}{\omega\varepsilon_0} \quad (7)$$

Yüksek frekanslarda ($\omega\tau \gg 1$), dokunun dielektrik sabiti ε_∞ ile tanımlanır. Düşük frekanslarda ($\omega\tau \ll 1$) ise $\Delta\varepsilon_n$, dokunun dielektrik sabiti ile ε_∞ arasındaki farkı ifade eder. τ_n, ilgili frekanstaki zaman sabiti olup, α_n ise dağılım genişliğini temsil eder. Bir malzemenin dielektrik özellikleri sayesinde elektriksel karakterizasyonu ve eşdeğer devre modeli incelenebilir (Polat vd., 2019).

Şekil 2'de belirtilen eşdeğer devre modeli parametrelerinden biri de iletim hattının yayılma sabitidir. Bu çalışmada modellenen yayılma sabiti, dokunun dielektrik özelliklerine bağlıdır. Buna göre, frekans değiştikçe malzemenin dielektrik özellikleri de değişmekte ve bu durum farklı eşdeğer devrelerin oluşmasına yol açmaktadır. Böylelikle sinyal haberleşme ortamının karakteristiği de değişecektir. Farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşmede yayılma sabiti, literatürde aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Nikita, 2014):

$$\gamma(\omega) = \sqrt{2(R(\omega))(G(\omega)+jC(\omega))} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan 2 çarpanı, elektrotların farksal bağlaşımı sonucunda devre modelinde oluşturduğu geri dönüş empedanslarından kaynaklanmaktadır (Callejón vd., 2012). Hesaplanan yayılma sabiti, karmaşık bir sayı olup, zayıflama sabitini gerçek kısmıyla, faz sabitini ise sanal kısmıyla tanımlar. Doku üzerinde iletilen gücün hesaplanmasında, kaynak gücü ve zayıflama sabiti kullanılabilir (Pozar, 2011; Tomlinson vd., 2015):

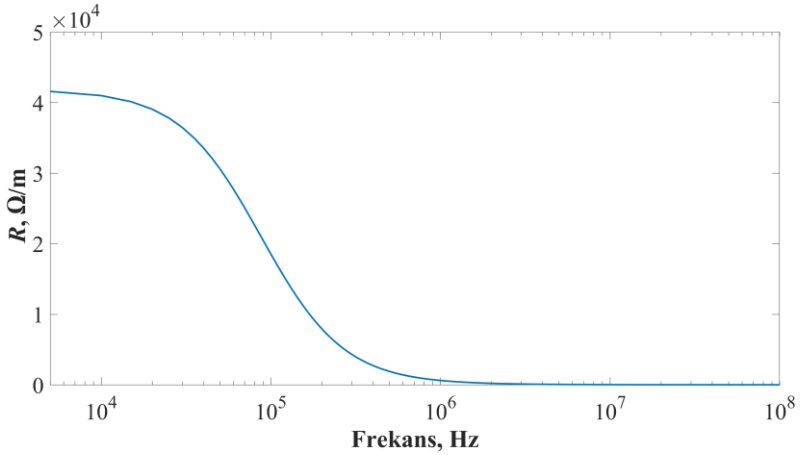
$$P(d) = P(0)e^{-2\alpha d} \quad (9)$$

$P(0)$, kaynak gücünü temsil ederken, $P(d)$ ise kaynaktan d mesafedeki gücü ifade etmektedir. Zayıflama sabiti olan α, farksal bağlaşım tekniğine göre Eşitlik (8)'de tanımlandığı şekilde hesaplanır.

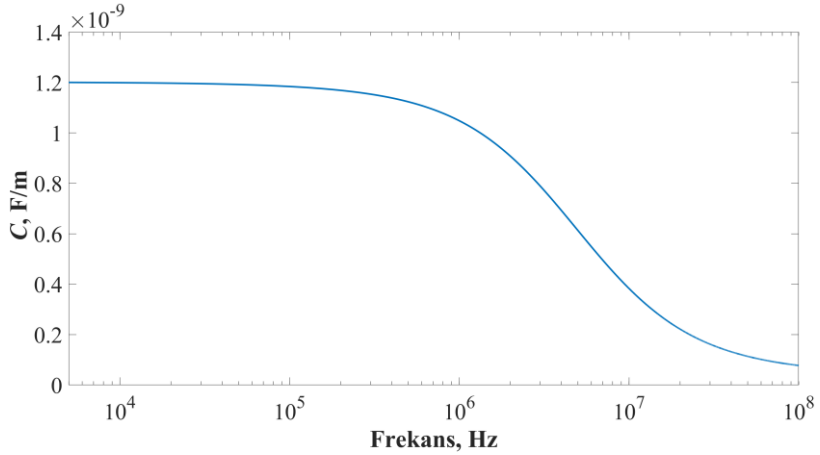
4. Hesaplamalı Sonuçlar (Computational Results)

Literatürde daha önce yayınlanmış çalışmalar, giyilebilir sistemlerde vücut içi haberleşmenin çoğunlukla deri dokusu üzerinden sağlandığını göstermektedir (Nikita, 2014). Bu çalışmada, deri dokusunun dielektrik özellikleri literatürdeki kaynaklardan alınmıştır (Andrecuetti vd., 2012). Deri dokusunun dağıtık parametreli iletim hattı modeli; dış ve iç katmanlardaki sinyal iletimini temsil eden dirençleri, epidermisin keratinli hücreleri ile çift katmanlı yağ dokusunu modelleyen kapasitör elemanını ve ter bezleri ile hücre membranındaki iyonik kanalları ifade eden kondüktansı içermektedir (Ateş, 2019). İç katmanın direnci, dış katmanlara oranla çok daha düşük olduğundan genellikle ihmal edilmektedir. Bu devre elemanlarının özellikleri, dokunun elektriksel yapısına bağlı

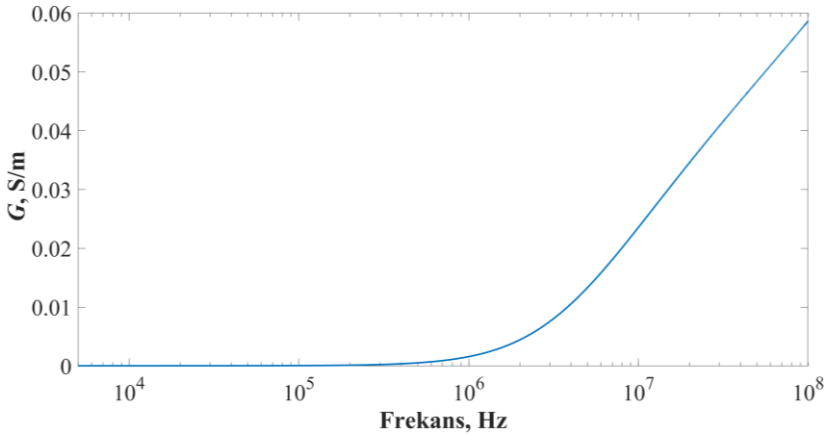
olarak Eşitlik (4)-(6)'da verilmiştir. Şekil 3-5, deri dokusunun dağıtık parametreli iletim hattı devre elemanlarının frekans ile değişimini göstermektedir. Frekans arttıkça, direnç ve kapasitans azalma eğilimi gösterirken kondüktans artmaktadır. Direnç, 10 kHz'den itibaren azalarak 100 MHz'de yaklaşık 17,03 Ω/m'ye düşmüştür. Kapasitans ise 1 MHz'den itibaren hızlı bir şekilde azalarak 100 MHz'de yaklaşık 0,77 pF/m değerine ulaşmıştır. Kondüktans elemanı ise 1 MHz'den sonra hızla artarak 100 MHz'de 58,7 mS/m'dir.



Şekil 3. Direncin frekansla değişimi (Variation of resistance with frequency)

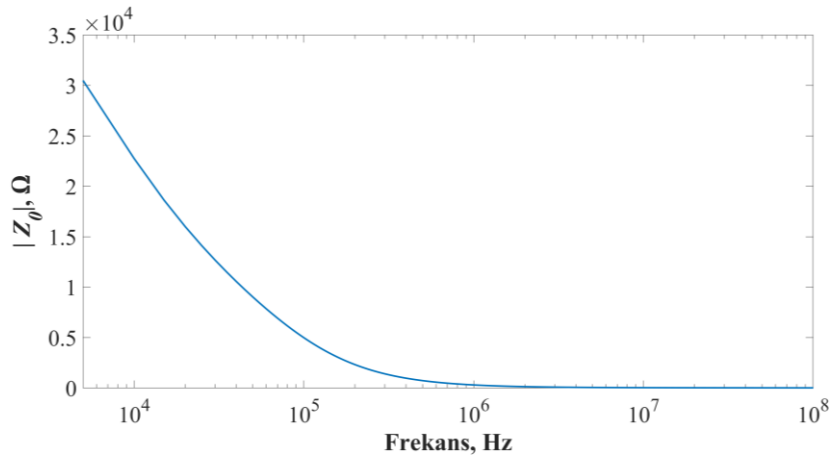


Şekil 4. Kapasitansın frekansla değişimi (Variation of capacitance with frequency)



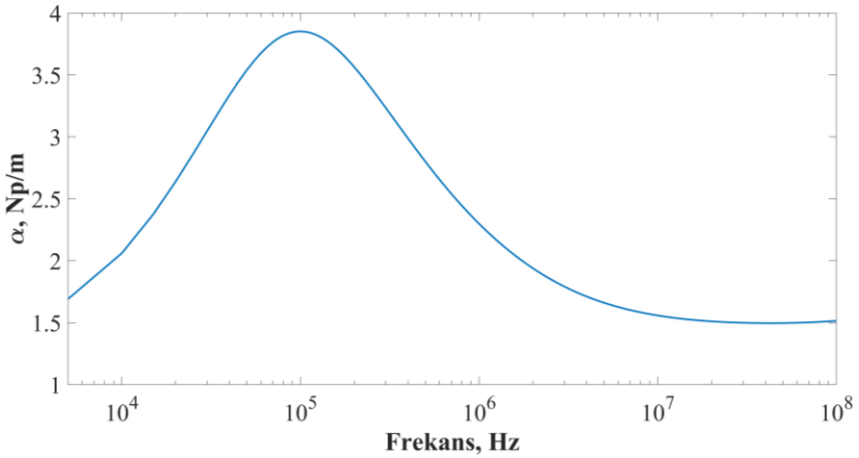
Şekil 5. Kondüktansın frekansla değişimi (Variation of conductance with frequency)

Şekil 2'de belirtilen iletim hattı modelinde karakteristik empedans önemli bir parametredir ve sinyalin dokuda iletilmesini etkiler (Callejón vd., 2011). Şekil 6'da ise eşdeğer devre elemanları kullanılarak deri dokusunun karakteristik empedansı hesaplanmıştır. Burada sunulan sonuçlara göre, frekans arttıkça karakteristik empedansın azaldığı gözlemlenmiştir. Empedans, 100 kHz'de 4986 Ω, 1 MHz'de 305 Ω, 10 MHz'de 35,6 Ω ve 100 MHz'de yaklaşık 14,96 Ω olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, frekans bağımlı davranışın karakteristik empedans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

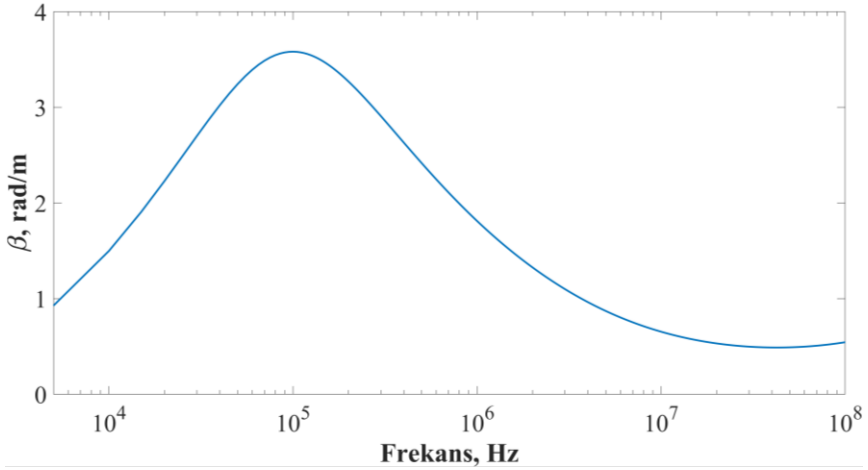


Şekil 6. Karakteristik empedansın frekansla değişimi (Variation of characteristic impedance with frequency)

Deri dokusunun yayılma sabitinin gerçek (α) ve sanal (β) bileşenleri, Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur ve Eşitlik (8) temel alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre, 100 kHz frekansında α yaklaşık 3,85 Np/m, β ise 3,58 rad/m değerine ulaşarak en yüksek seviyelerini göstermiştir. Frekans arttıkça bu sabitlerin azaldığı gözlemlenmiş ve 100 MHz frekansında α yaklaşık 1,51 Np/m, β ise 0,54 rad/m olarak belirlenmiştir.



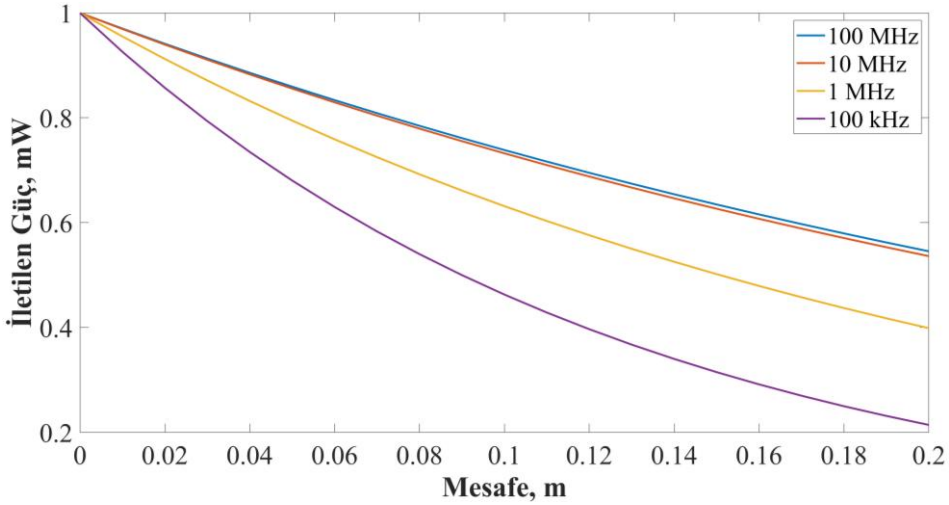
Şekil 7. Zayıflama sabitinin frekansla değişimi (Variation of attenuation constant with frequency)



Şekil 8. Faz sabitinin frekansla değişimi (Variation of phase constant with frequency)

Deri dokusu sayesinde iletilen farklı frekanslardaki elektriksel gücün değişimi Şekil 9'da ve Tablo 1'de gösterilmiştir. Burada, kaynak giriş gücü olarak 1 mW normalize değer referans alınmıştır. Giriş noktası olan verici elektrotlardan 5 cm, 8 cm ve 10 cm uzaklıklardaki güç değerleri, Eşitlik (8) ve (9) kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, aynı mesafe için frekans arttıkça iletilen gücün arttığı, ancak mesafenin artmasıyla aynı frekanstaki güç değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm mesafeler için en yüksek güç değeri 100 MHz'de, en düşük güç

değeri ise en fazla zayıflamanın gerçekleştiği 100 kHz frekansında elde edilmiştir.



Şekil 9. Deri dokusundaki farklı frekanslarda uzaklığa bağlı iletilen güç değişimi
(Variation of transmitted power with distance at different frequencies on skin tissue)

Tablo 1. Farklı frekanslar ve uzaklıklar için deri dokusunda iletilen güç değerleri (mW)
(Transmitted power values at various frequencies and distances (mW))

Çalışma Frekansı	5 cm	8 cm	10 cm
100 kHz	0,68	0,54	0,463
1 MHz	0,79	0,692	0,631
10 MHz	0,856	0,779	0,732
100 MHz	0,856	0,785	0,738

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada; deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalının dağıtık parametreli iletim hattı modeli, 100 MHz'e kadar analitik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda frekans bandında teorik çalışmalarla ele alınan farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanalında, dokunun elektriksel özelliklerinin ve buna bağlı dağıtık parametreli iletim hattı eşdeğer devre modelinin elektriksel sinyal iletimindeki davranışı vurgulanmıştır.

Literatürde giyilebilir sistemler için vücut içi haberleşme, genellikle deri dokusu üzerinden gerçekleştiği belirtilmiştir. Deri dokusunun farksal bağlaşımlı vücut içi haberleşme kanal parametreleri, Şekil 3-9'da analitik olarak sunulmuştur. Burada sunulan parametrelerin frekansla beraber değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişim, dokuların frekans bağımlı elektriksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 7 ve 8'de sırasıyla α ve β sabitlerinin 10 kHz – 1 MHz aralığında doğrusal olmayan bir artış ve ardından azalış sergilediği, her iki sabitin de 100 kHz'de en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür ($\alpha \approx 3{,}85$ Np/m; $\beta \approx 3{,}58$ rad/m). Şekil 9'da bu sonuçlara dayanarak farklı frekans ve uzaklıklarda iletilen güç grafiği sunulmuş ve en düşük güç seviyesinin aynı uzaklıklar için 100 kHz'de olduğu hesaplanmıştır. Callejón vd., (2012), farksal ve sığa bağlaşımlı yöntemlerde deri dokusunun iletim hattı parametrelerini deneysel sonuçlarla karşılaştırarak, düşük frekanslarda dielektrik özellikler ile farksal bağlaşım tekniği arasında bir ilişki ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada elde edilen dağıtık parametreli iletim hattı model parametreleri, literatüre katkı sağlamış ve yeni nesil teknolojilerin tasarımına referans olabilecek veriler sunmuştur. Elde edilen veriler sayesinde haberleşme kanalının davranışı frekansa bağlı olarak modellenebilir ve bu kapsamda giyilebilir sistemlerin tasarımları gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı ve benzer çalışmalarla karşılaştırılması, Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışma boyunca hesaplanan parametrelerin haberleşme kanal karakteristiğine ve alıcı tarafta algılanan sinyale etkileri ele alınmıştır. Literatürdeki çalışmalar bağlaşım yöntemi, çalışma frekansı, devre modeli ve sinyal yayılım karakteristiği açısından incelenmiştir. Söz konusu çalışmalarda özellikle çalışma frekansı ve devre modeli farklılık göstermektedir.

Tablo 2. Bu çalışmanın literatüre katkısı ve benzer çalışmalarla karşılaştırılması
(The contribution of this study to the literature and comparison with similar studies)

Yapılan Çalışmalar	Bağlaşım Yöntemi	Çalışma Frekansı	Devre Modeli	Sinyal Yayılım Karakteristiği
Callejón vd., (2011)	Yakın alan bağlaşımı	0 – 1 GHz	Dağıtık parametreli iletim hattı modeli	Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel gerilim yayılımı
Tomlinson vd., (2015)	Farksal bağlaşım	100 kHz – 1 MHz	İki kapılı devre modeli	Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel güç yayılımı
Wang vd., (2016)	Sığa bağlaşım	0 – 100 MHz	RC dağılımlı devre modeli	Zayıflama sabiti sayesinde güç kazancı
Lodi vd., (2020)	Sığa bağlaşım	1 kHz – 1 MHz	Sonlu periyodik iletim hattı modeli	Sinyal gürültü oranı sayesinde sinyal zayıflamasının hesaplanması ve sinyalin yayılımı
Bu çalışma	***Farksal bağlaşım***	***0 – 100 MHz***	***Dağıtık parametreli iletim hattı modeli***	***Zayıflama sabiti sayesinde elektriksel güç yayılımı***

Gelişen teknoloji, haberleşme sistemlerinin avantajlarını en üst düzeye çıkarırken potansiyel riskleri en aza indirme gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada sunulan ve biyoelektromanyetik prensiplere dayanan yaklaşım, disiplinler arası çalışmalarla daha da ileri taşınabilir. Vücut içi haberleşme teknolojileri, vücut alan ağlarını "vücutların interneti" kavramına dönüştürerek, modern cihazlarla daha entegre ve güçlü bir bağlantı sunmuştur. Bu çalışmada ele alınan yöntemin, gelecekte daha da geliştirilerek geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabileceği öngörülmektedir. İlerleyen çalışmalarda, vücut içi haberleşme kanalının farksal ve sığa bağlaşımlı yöntemlerle deneysel olarak incelenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, farklı tekniklerle bilgi sinyalinin modülasyonu sonucu vücut dokusu sayesinde veri haberleşmesinin gerçekleştirilmesi ve haberleşme kanal modeli davranışının ele alınması düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

TÜBİTAK 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı'na (Proje No: 1059B142201521) ve Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje No: FDK-2022-6051) destekleri için teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Alam, M.M., Ben Hamida, E., 2014. Surveying Wearable Human Assistive Technology for Life and Safety Critical Applications: Standards, Challenges and Opportunities. Sensors, 14 (5), 9153-9209.

Alper, F., Coşkun, Ö., 2020. ISM 2.45 GHz Mikroşerit İmplant Anten Tasarımı ve Doku İçi Ölçümleri. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi. 8 (2), 541-551.

Alper, F., Coskun, O., 2022. Design of a Microstrip Implant Antenna for Biotelemetry Applications. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications. 16 (9-10), 430-436.

Andreuccetti, D., Fossi, R. and Petrucci, C., 2012. An internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz. http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop [Son erişim tarihi: 09/10/2024].

Ateş, K., 2019. Vücut İçi Haberleşmenin İletim Hattı Modeli ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.

Ateş, K., 2024. Yeni Nesil Haberleşme Sistemleri İçin Vücut İçi Haberleşme Kanalının Modellenmesi ve İncelenmesi. Doktora Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Türkiye.

Ateş, K., İl, N., Savazzi, P., Dell'Acqua, F., Vizziello, A., Özen, Ş., 2024a. Comparison of Galvanic and Capacitive Coupled Intrabody Communication Channel by using Isolation Transformer. 2024 Medical Technologies Congress, 1-4.

Ateş, K., Marcucci, A., Savazzi, P., Özen, Ş., Dell'Acqua, F., Vizziello, A., 2024b. Channel Characterization of Implantable Intrabody Communication through Experimental Measurements. Proceedings of the 11th Annual ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication, 66-71.

Ates, K., Ozen, S., Carlak, H. F., 2017. The Freshness Analysis of an Apple and A Potato using Dielectric Properties at the Microwave Frequency Region. In 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 1688-1693.

Ateş, K., Özen, Ş., 2019. Modelling of Galvanic Coupled Intrabody Communication due to Finite Element Method. 2019 Medical Technologies Congress, 175-178.

Callejón, M.A., Roa, L. M., Reina-Tosina, J., Naranjo-Hernandez, D., 2011. Study of Attenuation and Dispersion Through the Skin in Intrabody Communications Systems. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 16 (1), 159-165.

Callejón, M.A., Naranjo-Hernández, D., Reina-Tosina, J., Roa, L.M., 2012. Distributed Circuit Modeling of Galvanic and Capacitive Coupling for Intrabody Communication. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 59 (11), 3263-3269.

Celik, A., Salama, N.S. and Eltawil, A.M., 2021. The Internet of Bodies: A Systematic Survey on Propagation Characterization and Channel Modeling. IEEE Internet of Things Journal, 9 (1), 321-345.

Chatterjee, B., Mohseni, P., Sen, S., 2023. Bioelectronic Sensor Nodes for the Internet of Bodies. Annual Review of Biomedical Engineering, 25, 101-129.

Chen, Z.Y., Gao, Y.M., Du, M., 2018. Multilayer Distributed Circuit Modeling for Galvanic Coupling Intrabody Communication. Journal of Sensors, 2018, 8096064, 1-8.

Cosoli, G., Spinsante, S., Scardulla, F., D'Acquisto, L., Scalise, L., 2021. Wireless ECG and Cardiac Monitoring Systems: State of the Art, Available Commercial Devices and Useful Electronic Components. Measurement, 177, 109243.

Drude, S., 2007. Requirements and Application Scenarios for Body Area Networks. 2007 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit. 1-5.

Ferikoğlu, A., Çerezci, O., Kahriman, M., Yener, Ş.Ç., 2014. Electromagnetic Absorption Rate in a Multilayer Human Tissue Model Exposed to Base-Station Radiation Using Transmission Line Analysis. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 13, 903-906.

Gabriel, S., Lau, R.W., Gabriel, C., 1996. The Dielectric Properties of Biological Tissues: III. Parametric Models for the Dielectric Spectrum of Tissues. Physics in Medicine & Biology, 41 (11), 2271

Gigena, C., Di Vincenzo, M., Toselli, L., Bellia-Munzon, G., Sanjurjo, D., Martinez, J., Vallee, M., Nazar-Peirano, M., Martinez-Ferro, M., 2022. Remote Treatment of Pectus Carinatum (Telepectus) During the COVID-19 Pandemic. Journal of Pediatric Surgery, 57 (8), 1609-1613.

Gözel, M., Kasar, Ö., Kahriman, M., 2019. 868 MHz UHF Bandında H-Şeklinde Katlanmış İmplant Mikroşerit Dipol Anten Tasarımı. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10 (3), 797-806.

IEEE, 2012. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.6: Wireless Body Area Networks. IEEE std., 802, (6), 2012.

Lodi, M. B., Curreli, N., Fanti, A., Cuccu, C., Pani, D., Sanginario, A., Spanu, A., Ross, P. M., Crepaldi, M., Demarchi, D., Mazzarella, G., 2020. A Periodic Transmission Line Model for Body Channel Communication. IEEE Access, 8, 160099-160115.

Mao, J., Yang, H., Lian Y., Zhao, B., 2018. A Five-Tissue-Layer Human Body Communication Circuit Model Tunable to Individual Characteristics. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 12 (2), 303-312.

Mishra, S., González-Briones, A., Bhoi, A.K., Mallick, P.K. Corchado, J.M., 2022. Connected E-Health: Integrated IoT and Cloud Computing. Cham: İsviçre: Springer Nature.

Nikita, K.S., 2014. Handbook of Biomedical Telemetry. Piscataway: NJ: IEEE.

Polat, T.G., Ateş, K., Bilgin, S., Duman, O., Özen, Ş., Tunç, S., 2019. Carbon Nanotube, Poly (3, 4-Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrenesulfonate) and Ag Nanoparticle Doped Gelatin Based Electro-Active Hydrogel Systems. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 580, 123751.

Pozar, D.M., 2011. Microwave Engineering. Hoboken: NJ: John Wiley & Sons.

Swaminathan, M., Cabrera, F.S., Pujol, J.S., Muncuk, U., Schirner, G., Chowdhury, K.R., 2016. Multi-Path Model and Sensitivity Analysis for Galvanic Coupled Intrabody Communication Through Layered Tissue. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 10 (2), 339-351.

Tomlinson, W.J., Abarca, F., Chowdhury, K.R., Stojanovic, M., Yu, C., 2015. Experimental Assessment of Human-Body-Like Tissue as a Communication Channel for Galvanic Coupling. 12th IEEE International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 1-6.

Troller-Renfree, S.V., Morales, S., Leach, S.C., Bowers, M.E., Debnath, R., Fifer, W.P., Fox, N.A. and Noble, K.G. 2021. Feasibility of Assessing Brain Activity Using Mobile, in-Home Collection of Electroencephalography: Methods and Analysis. Developmental Psychobiology, 63(6): e22128.

Vizziello, A., Galluccio, L., Magarini, M., Savazzi, P., Biglioli, F., Bolognesi, F., Magenes, G., 2022. An Implantable System for Neural Communication and Stimulation: Design and Implementation. IEEE Communication Magazine, 60 (8), 74-79.

Vizziello, A., Magarini, M., Savazzi, P., Galluccio, L., 2023. Intra-Body Communications for Nervous System Applications: Current Technologies and Future Directions, Comput. Networks, 227, 109718.

Wang, H., Tang, X., Choy, C.S., Sobelman, G.E., 2015. Cascaded Network Body Channel Model for İntrabody Communication. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 20 (4), 1044-1052.

Wegmüller, M.S., 2007. Intra-Body Communication for Biomedical Sensor Networks. Doktora Tezi. ETH Zurich, İsviçre.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 556-569, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1651965

Araştırma Makalesi

Research Article

ELMA SUYU, VİŞNE SUYU VE GÜL YAĞI İŞLEME ATIKLARINDAN SELÜLOZ LİFİ ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ece SÖĞÜT[1*]

[1] Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Tarımsal atıklar, Selüloz lifi, Atık değerlendirme.

Öz

Bu çalışmada, vişne ve elma suyu işleme atıkları ile gül yağı üretiminden elde edilen atıkların içerdiği lignoselülozik yapıdan selüloz lifi eldesi incelenmiştir. Bu kapsamda, posa önce 1:10 oranında su ile seyreltilmiş, 121°C'de 30 dakika işleme tabi tutularak kısmi çözünürlüğü sağlanmıştır. Daha sonra, filtre edilerek suda çözünen kısım ve lignoselülozik yapı olarak iki kısma ayrılmıştır. Elde edilen yapı, 121°C'de 30 dakika boyunca 1M NaOH ile alkali işleme tabi tutulmuş ve ardından %45 H_2SO_4 ile 50°C'de 45 dakika asit hidrolizi uygulanarak selüloz lifleri elde edilmiştir. Elde edilen ürünler, selüloz, lignin, pektin, şeker ve fenolik içerik bakımından analiz edilmiş; ayrıca ekstrakte edilen selüloz, morfolojik (SEM ve FTIR) ve termal olarak incelenmiştir. Sonuçlara göre, ön işlem sonrasında en yüksek selüloz oranı %50.20 ile elma posasında, en yüksek lignin oranı ise %50.63 ile vişne posasında tespit edilmiştir. FTIR analizi, elma posasından elde edilen liflerin daha belirgin bir selüloz yapısına sahip olduğunu ortaya koymuştur. SEM görüntüleri ise, elma posası liflerinin daha düzenli ve belirgin lif yapısı gösterdiğini; buna karşın vişne ve gül posası liflerinde çeşitli safsızlıkların bulunduğunu göstermiştir. TGA analizi elma posasından elde edilen liflerin termal kararlılığının daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, elma posasından elde edilen selüloz liflerinin biyobozunur ambalaj malzemeleri için incelenen diğer ürünlere göre daha uygun bir dolgu maddesi olduğunu göstermektedir.

EXTRACTION OF CELLULOSE FIBERS FROM APPLE JUICE, CHERRY JUICE, AND ROSE OIL PROCESSING WASTES AND ITS CHARACTERIZATION

Keywords

Agro-industrial waste, Cellulose fiber, Waste utilization.

Abstract

In this study, the production of cellulose fiber from lignocellulosic structure contained in cherry and apple juice processing wastes and wastes obtained from rose oil production was investigated. In this context, the pulp was first diluted with water at a ratio of 1:10 and partially solubilized by processing at 121°C for 30 minutes. Then, it was filtered and separated into two parts as water-soluble and lignocellulosic structure. The obtained structure was subjected to alkali treatment with 1M NaOH at 121°C for 30 minutes and then cellulose fibers were obtained by acid hydrolysis with 45% H_2SO_4 at 50°C for 45 minutes. The obtained products were analyzed in terms of cellulose, lignin, pectin, sugar and phenolic content; in addition, the extracted cellulose was examined morphologically (SEM and FTIR) and thermally. According to the results, the highest cellulose ratio after pretreatment was determined as 50.20% in apple pomace, and the highest lignin ratio was determined as 50.63% in cherry pomace. FTIR analysis revealed that the fibers obtained from apple pomace had a more distinct cellulose structure. SEM images showed that the apple pomace fibers showed a more regular and distinct fiber structure; nevertheless, it presented various impurities in cherry and rose pomace fibers. TGA analysis showed that the thermal stability of the fibers obtained from apple pomace was higher. These findings indicate that the cellulose fibers obtained from apple pomace are a more suitable filler for biodegradable packaging materials compared to the other products examined.

Alıntı / Cite

Söğüt, E., (2025). Elma Suyu, Vişne Suyu ve Gül Yağı İşleme Atıklarından Selüloz Lifi Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 556-569.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

E. Söğüt, 0000-0003-4052-993X

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	05.03.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	03.05.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: ececagdas@sdu.edu.tr, +90-246-211-1844

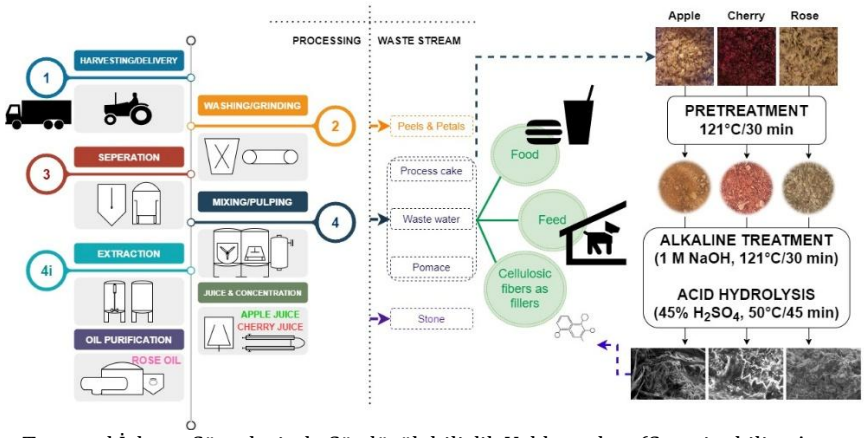
CELLULOSE FIBER EXTRACTION FROM AGRO-INDUSTRIAL WASTES AND CHARACTERIZATION

Ece Söğüt[1†]
Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Food Engineering Department, Isparta, Türkiye

Highlights

- Apple pomace yielded the highest cellulose purity (50.20%).
- Rose petal pomace exhibited moderate cellulose content and antioxidant potential.
- Cherry pomace showed the highest lignin content (50.63%).
- Apple cellulose fibers exhibited better morphological properties and thermal stability.

Graphical Abstract



Şekil./Figure. Tarımsal İşleme Süreçlerinde Sürdürülebilirlik Yaklaşımları (Sustainability Approaches in Agricultural Processing)

Purpose and Scope

The objective is to explore the potential of lignocellulosic by-products including cherry and apple juice processing residues and rose oil processing waste as potential fillers for packaging materials. The research addresses the global challenge of reducing agricultural waste and developing eco-friendly solutions by converting waste into value-added products.

Design/methodology/approach

1. Pre-treatment: The pomace is diluted with water at a 1:10 ratio and treated at 121°C for 30 minutes to achieve partial solubility by separating into water-soluble and lignocellulosic fractions.
2. Alkaline and Acid Hydrolysis: The pre-treated pomace undergoes alkaline treatment with NaOH (1M) at 121°C for 30 minutes, followed by acid hydrolysis (%45 H_2SO_4, 50°C/45 minutes) to extract cellulose fibers.
3. Characterization and Analysis: The pre-treated products are analyzed for cellulose, lignin, pectin, carbohydrate, and phenolic contents. For the extracted cellulose fiber, morphological characterization is performed using SEM and FTIR, and thermal properties are assessed using TGA.

Findings

The highest cellulose content was obtained from apple pomace (50.20%), whereas cherry pomace exhibited the highest lignin content (50.63%). FTIR analysis revealed a more distinct cellulose structure in fibers extracted from apple pomace, with a higher OH group density. SEM images showed that apple pomace fibers have a more homogeneous and fibrous structure, whereas cherry and rose pomace fibers contained more impurities. TGA analysis confirmed the thermal stability of cellulose fibers, with apple pomace fibers demonstrating higher thermal stability than other sources. These findings indicate that cellulose fibers obtained from apple pomace are more suitable as filler material for packaging materials compared to those extracted from cherry and rose pomace.

Originality

It provides novel insights into the structural characteristics of cellulose fibers by demonstrating the potential of agricultural waste as a valuable resource for the growing field of sustainable materials.

† Corresponding author: ececagdas@sdu.edu.tr, +90-246-211-1844

1. Giriş (Introduction)

Dünya genelinde, tarım sektöründen her yıl büyük miktarda kalıntı biyokütle (katı, sıvı ve gaz) üretilmektedir (Santana-Meridas vd., 2012). Aynı zamanda, bu atıkların çoğu, çevre dostu olarak geri dönüştürülmezlerse büyük çevresel problemlere yol açmaktadırlar (Liang vd., 2011). Kalıntı biyokütle, bir üretim sürecinde kasıtlı olarak üretilmeyen herhangi bir biyolojik malzeme olarak tanımlanır (Olofsson ve Börjesson, 2018). Biyokütlenin değerlendirilmesinde iki temel yöntem bulunmaktadır: biyoaktif bileşenlerin çıkarılması/geri kazanımı ve atıkların katma değerli başka ürünlere dönüştürülmesi. Bu bağlamda; tarım, gıda, tıbbi ve aromatik bitkiler gibi endüstrilerden geri kazanılan biyoaktif bileşenlerce zengin biyokütlenin verimli kullanımı ve geri dönüşümü, ekonomik kazanç, çevresel sürdürülebilirlik ve sosyal faydalar göz önünde bulundurulduğunda büyük önem taşımaktadır (Galanakis, 2015). Gıda endüstrilerinden, meyve ve sebze işleme prosesleri, hammaddenin yaklaşık %25-30'unu oluşturan önemli miktarlarda yan ürün/atık oluşturmaktadır (Sagar vd., 2018). Türkiye genelinde toplam biyoatık miktarının yaklaşık 61 milyon ton iken tahmini kullanılabilir biyoatık miktarının ise 15 milyon ton olduğu rapor edilmiştir (Anonim, 2020). Bu bağlamda, gıda işleme sonrası oluşan posalar ve tarımsal atıkların değerlendirilmesi için polifenollerin çıkarılması (Struck vd., 2016), fonksiyonel gıda bileşenleri olarak gıda ürünlerine dahil edilmesi (Jung vd., 2015), besin takviyesi olarak bakteriyel selüloz üretilmesi (Fan vd., 2016), katkı maddesi olarak seramik malzemelerle birleştirilmesi (Cotes-Palomino vd., 2016) ve yenilebilir filmler üretme (Park ve Zhao, 2006) gibi bazı girişimlerde bulunulmasına rağmen, üretilen posanın sadece yaklaşık % 20'si kullanılabilmiş ve çoğunluğu hayvan yemi olarak kullanılmış ya da organik madde kompostu haline getirilmiştir (Gouw vd., 2017). Ek olarak atıklardan elde edilen selülozun, ara difüzyon, mekanik kenetlenme, kapiler kuvvetler, Coulomb kuvvetleri, hidrojen bağı ve van der Waals kuvvetleri gibi adhezyon özellikleri sayesinde lif bazlı kompozit malzemelerde kullanılma potansiyeli yüksektir (Gardner vd., 2008; Hirn ve Schennach, 2015).

Elma posası, meyve suyu işleme atığı olup, elmanın başlıca kabuğu ve eti (%95), tohumları (%2-4) ve saplarından (%1) oluşur. Toplam işlenmiş meyve miktarının %25–35'i kadar posa/atık oluşturur (Melikoğlu vd., 2019). Bu tür atıkların geri dönüştürülmesine yönelik olasılıklardan biri, selülozun çıkarılması ve oldukça dayanıklı, geri dönüştürülebilir ve çevresel olarak sürdürülebilir ambalaj malzemelerinde katkı olarak kullanılmasıdır (Zhou vd., 2014). Atıklardan elde edilen selüloz lifleri, lignoselülozik bileşenler, biyokompozit ambalaj malzemeleri üretiminde, enerji, elektronik ve biyomedikal sektörlerinde kullanım potansiyeline sahiptir (Li vd., 2009; Xu vd., 2018; Fragal vd., 2016; Jackson vd., 2011; Wang vd., 2015; Xiong vd., 2016). Vişne posası da elma suyu üretiminde olduğu gibi, vişne suyu üretimi sonrasında elde edilen bir atık çeşidi olup pektin gibi polisakkaritlerce ve fenolik bileşenlerce zengin olduğu için çevresel problemlere neden olmaktadır (Domínguez-Rodríguez vd., 2021). Vişne posası gibi gıda işleme atıklarının değerlendirilmesinde tek bir bileşenin ekstraksiyonu üzerine yapılan çalışmalar yerini, bu posanın zengin içeriği nedeniyle tüm bileşenlerinin kademeli olarak ekstrakte edildiği çalışmalara bırakmaktadır (Hosseini vd., 2020). Taze gül çiçeklerinden elde edilen ana ürünler gül yağı, konkret, abzolüt ve gül suyu olup, parfümeri, eczane ve gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bulgaristan, Türkiye ve İran dünyanın en büyük üreticileri olup, aynı zamanda gül yağının %90'ından fazlasını tedarik etmektedir. Geleneksel gül yağı üretme yöntemi buhar damıtma işlemidir (işlenen bitki materyalinin yaklaşık %90'ı), ardından gül konkreti üretimi ve polar olmayan çözücü ekstraksiyonu (%5-6) ve kalan %3-4'ü de gül suyu yapmaktır (Slavov vd., 2017). Bir kilogram gül yağı üretimi için yaklaşık 4000 kg taze gül yaprağının damıtılması gereklidir ve ilk gül kütlesinin 1 kg'ından yaklaşık 2 kg ıslak atık üretilmektedir (Erbaş¸ ve Baydar 2016; Kovachevaet vd., 2010). Bu gerçeğe bağlı olarak, büyük miktarlarda atık üretilir ve damıtma tesislerinin çoğu, biyokütleyi yakındaki konumlara atar. Ancak bu yaklaşım, gül atığı biyokütlesinde bulunan biyolojik olarak aktif değerli maddelerin geri kazanılmasına izin vermez, ayrıca toprak ve suyun biyo-kontaminasyonuna neden olur. Bu atıkların değerlendirilmesi üzerine yapılan diğer yöntemler arasında polifenol ekstraksiyonu (Mollov vd., 2007) ve suda çözünür polisakkarit eldesi gibi yöntemler bulunmaktadır (Slavov vd., 2013, 2016; Galanakis, 2015).

Özellikle vişne ve elma suyu gibi meyve suyu işleme süreçlerinde oluşan tarımsal yan ürünlerden selüloz liflerinin ekstrakte edilmesi, atık malzemelerin sürdürülebilir kullanım potansiyeli nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Örneğin, Pham vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, lignoselülozik atığın selüloz üretimi için potansiyeli vurgulanarak, benzer metodolojilerin meyve suyu işlemeden elde edilen diğer tüm meyve artıklarına uygulanabileceğini öne sürülmüştür. Owonubi vd. (2021) tarafından yapılan bir başka çalışmada, nanoselüloz eldesi için odun türevi olmayan biyokütle kaynaklarından oluşan tarımsal artıkların çok yönlü kullanılabilirliği vurgulanmıştır. Bu durum, bitkisel lif atıklarından selülozun geri dönüşümünü tartışan Halis vd. (2019)'nın bulgularıyla uyumludur ve çeşitli ekstraksiyon yöntemlerinin meyve suyu işleme atıkları da dahil olmak üzere farklı biyokütle türleri için uyarlanabileceğini göstermektedir. Ek olarak, Salem vd. (2020) tarımsal atıkların selüloz eldesinde kullanılma potansiyelini incelemiş ve çeşitli yenilenebilir kaynaklardan lignoselülozik liflerin sürdürülebilir bir şekilde üretimini bulgularıyla desteklemiştir. Gül yağı üretim endüstrisinde, gül bitkisi kalıntılarından selüloz eldesi ile ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Ancak, Mazlan vd. (2020) tarafından palm yağı üretimi sonrasında oluşan atıklardan selüloz nanokristalleri elde edilmesi ile ilgili yapılan araştırma, gül

yağı ekstraksiyonundan elde edilenler de dahil olmak üzere yağlı bitki kalıntılarından selüloz ekstraksiyon potansiyelini göstermektedir. Benzer şekilde, doğal bitki atıklarının (örneğin kır kahvesi telvesi, yabani otlar, kamışgiller ve meyve kabukları gibi) sürdürülebilir selüloz üretimi için önemli hammaddeler olarak kullanılabileceği birçok çalışmada gösterilmiştir (Seki vd., 2022a; Keskin vd., 2022; Köktaş vd., 2022; Seki, 2025). Bu tür alternatif biyokütle kaynakları, geleneksel selüloz üretimine kıyasla daha düşük çevresel etki ve yüksek geri dönüşüm potansiyeli sunmaktadır.

Çeşitli atıklar ile birleştirilmiş gıda ambalajlarının geliştirilmesi, çevre dostu ve uygun maliyetli süreçlerin kullanılmasını önermekte ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerin sürdürülebilir gelişimine katkıda bulunan atıklara değer katmaktadır (Kim ve Seo, 2018; Wilson vd., 2018). Bu atıkların gıda ambalajlarında kullanımı umut vericidir ve çok fazla potansiyele sahiptir, ancak mevcut araştırmalar hala azdır ve toplu olarak kullanımlarını artırmak ve geleneksel ambalaj malzemelerine alternatif olarak güvenliğini ve ticari uygulamalarını göstermek için daha fazla araştırma gereklidir. Bu nedenle, bu çalışma, seçilen tarımsal atıklardan (elma posası, vişne posası, gül yaprağı posası) ambalaj malzemesi dolgu maddesi olarak kullanılabilecek selüloz liflerinin ekstraksiyonunu amaçlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma literatürde ayrı ayrı değerlendirilen meyve suyu ve aromatik bitki atıklarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Elma, vişne ve gül işleme atıklarının aynı metodolojiyle selüloz lifi elde etme açısından verimlilik, saflık ve yapısal özellikler bakımından değerlendirilmesi, çalışmaya kıyaslama perspektifi kazandırmaktadır. Ayrıca, elde edilen liflerin kimyasal (FTIR) ve morfolojik (SEM) verilerle birlikte yorumlanması, kaynak bazlı yapısal farklılıkların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, özellikle elma posasının biyobozunur ambalaj sistemlerinde dolgu maddesi olarak kullanım potansiyelini vurgulayan nitelikli bir ön değerlendirme sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Elma posası ve vişne posası Isparta-Eğirdir'de faaliyet gösteren yerel elma işleme ve vişne suyu işleme firmalarından Elma-Su A.Ş.- Elmataş A.Ş.'den temin edilmiştir. Gül yağı işleme sonrası elde edilen atık gül yaprağı posası, Isparta-Keçiborlu'da faaliyet gösteren gül yağı işleme firmalarından temin edilmiştir. Tüm kimyasal reaktifler analitik saflıkta ve tüm standartlar kromatografik saflıkta olacak şekilde Sigma Aldrich (St. Louis, Missouri, ABD)'den veya uygun diğer firmalardan temin edilmiştir.

2.2. Posanın karakterizasyonu (Characterization of raw materials)

Temin edilen atıklar lignoselülozik kompozisyonunu incelemek için ilk önce kurutulmuş (60°C/24-48 saat) ve öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütülmüş kuru ürünün nem (105°C'de etüvde) ve kül (525°C'de kül fırınında) içerikleri belirlenmiştir (AOAC, 1999). Ürünlerin lignin, hemiselüloz, selüloz ve pektin miktarları ise Gouw vd. (2017) ve Miranda vd. (2019) tarafından uygulanan yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

Hemiselüloz miktarı için 1 g katı örnek 150 mL 0.5 N NaOH ile muamele edilip 3.5 saat boyunca kaynatılmış ve daha sonra filtre edilen örnek nötr pH'ya gelene kadar yıkanmıştır. Kalıntı daha sonra 105°C'de kurutulup ağırlık farkından faydalanılarak hemiselüloz miktarı belirlenmiştir.

Lignin miktarı, ürünlerin 25°C'de 2 sa boyunca %72'lik H_2SO_4 ile muamele edildikten sonra %3 H_2SO_4 miktarına kadar seyreltilip 120°C'de 60 dakika reaksiyona sokulması ve filtrat miktarının 24 saat sonunda ölçülmesiyle belirlenmiştir.

Selüloz miktarı ise, toplam kütleden hemiselüloz, lignin, kül vb. diğer miktarların çıkarılması ile hesaplanmıştır.

Pektin miktarı için, 5 g örnek 250 mL sitrik asit (pH=2.5) çözeltisi ile karıştırılarak 95°C'de 30 dak boyunca inkübe edilip filtre edildikten sonra filtrat 4°C'de 12 sa bekletilmiş ve sonrasında %96'lık etanol ile (125 mL) 10 dak boyunca karıştırılmıştır. Elde edilen karışım oda sıcaklığında pektinin çökmesi için yaklaşık 12 sa dinlendirilmiş ve çöken pektin filtre kağıdından geçirilerek 55°C'de 24 sa boyunca kurutulmuştur. Pektin miktarı gravimetrik olarak belirlenmiştir.

Selüloz ve hemiselüloz türevi monosakkaritler (ramnoz, arabinoz, ksiloz, galaktoz, glukoz) sıvı kromatografik yöntemlerle belirlenmiştir (Manzanares vd., 2020). Bu bağlamda, şeker analizi için öncelikle her bir örnekten 1 g kuru posa, 10 mL ultra saf su ile karıştırılmış ve manyetik karıştırıcı eşliğinde 70 °C'de 30 dakika boyunca ekstrakte edilmiştir. Karışım süzgeç kâğıdından süzülerek HPLC enjeksiyonu için sıvı faz elde edilmiştir. Analizler, yüksek performans sıvı kromatografi (HPLC) (Shimadzu SCL-10A, Kyoto, Japonya) sistemi kullanılarak, refraktif indeks dedektörü (RID-20A) ile gerçekleştirilmiştir. Ayırma işlemi için Agilent Hi-Plex Na kolonu (300 × 7.7 mm,

8 µm; monomerik sodyum formunda katyon değişim kolonu) kullanılmıştır. Mobil faz olarak 0.015 M NaOH çözeltisi kullanılmış, analiz isokratik koşullarda, 70 °C kolon sıcaklığında ve 0.8 mL/dk akış hızında yürütülmüştür. Her bir örnekten 20 µL enjekte edilmiştir. Standart çözeltiler olarak ramnoz, arabinoz, ksiloz, galaktoz, glukoz ayrı ayrı enjekte edilmiş ve elde edilen pik alanlarına göre örneklerdeki şeker içerikleri, bilinen kalibrasyon eğrileri kullanılarak hesaplanmıştır.

2.3. Posaya ön işlem uygulanması ve karakterizasyonu (Pretreatment of pomace and their characterization)

Atıklardan selüloz ekstraksiyonu verimini arttırmak ve selülozun saflaştırılmasını kolaylaştırmak adına atıklarda bulunan hemiselüloz, lignin ve selüloz dışı diğer bileşenlerin uzaklaştırılması için sıcak su ile muamele (hidroliz) ön işlemi uygulanmıştır. Hidroliz için 1:10 (kuru posa/su) oranında seyreltilen posa, ön denemeler sonucu elde edilen veriler doğrultusunda 121°C'de 30 dak boyunca ısıtılmıştır. Elde edilen karışım filtre edilmiş ve katı faz saf su ile yıkandıktan sonra kurutulmuştur. Suda çözünen kısımda (sıvı) hemiselülozlar, pektik polisakkaritler ve fenolik bileşenler; katı kısımda ise lignoselülozik bileşikler incelenmiştir.

Suda çözünen kısımdaki hemiselüloz ve suda çözünmeyen kısımdaki lignin ve selüloz miktarları daha önce hammadde için anlatılan yöntemlerle belirlenmiştir (bkz. 2.2).

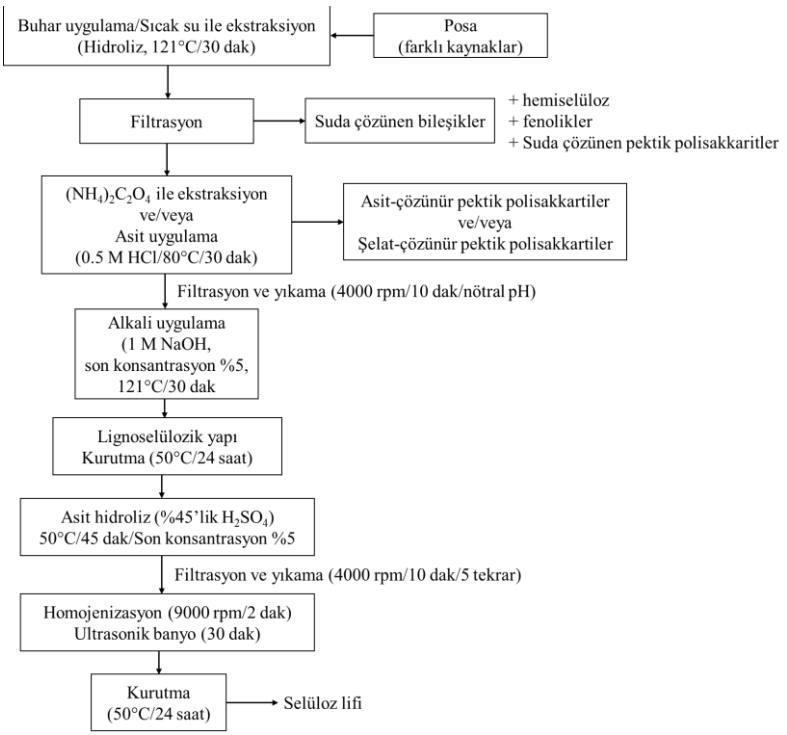
Suda çözünen kısımda bulunan bileşenler için toplam fenolik madde miktarı ve fenolik bileşen analizi sırasıyla spektrofotometrik ve kromatografik olarak belirlenmiştir. Fenolik bileşenlerin eldesi için, posaya asitle çöktürme (vişne için %1'lik HCl ve elma için 5 mL/L asetik asit) (Okur vd., 2019; Reis vd., 2012) ve organik çözücü (Vasileva vd., 2019) ile muamele etme gibi ön işlemler uygulanmış ve filtre edildikten sonra analizlerde kullanılmıştır.

Toplam fenolik madde miktarı Folin-Ciocalteu metodu kullanılarak belirlenmiştir (Singleton vd., 1999). Uygun oranlarda seyreltilen örnekten 1 mL alınarak 5 mL 0.2 N Folin reaktifi ve 4 mL Na_2CO_3 (%7.5, w/v) ile muamele edilmiş ve 2 saat karanlıkta inkübe edildikten sonra 765 nm dalga boyunda absorbansı ölçülmüştür (Schimadzu, UV-1601, Japonya). Sonuçlar gallik asit eşdeğeri (g GAE/100g) cinsinden verilmiştir.

Örneklerdeki fenolik bileşik içerikleri, HPLC cihazı (Shimadzu SCL-10A, Kyoto, Japonya) kullanılarak diyot dizi dedektörü (DAD, SPD-M20A Shimadzu) ile analiz edilmiştir. Ayırma işlemi, ters faz C18 kolonu (Inertsil ODS-4, GL Sciences, 250 × 4.6 mm, 5 µm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mobil faz olarak %15 (v/v) asetonitril içeren ve pH 4.5'e o-fosforik asit ile ayarlanmış saf su çözeltisi kullanılmıştır. Analizler izokratik koşullarda, 30 °C kolonda, 0.8 mL/dk akış hızıyla yürütülmüştür. Enjeksiyon hacmi 20 µL olarak belirlenmiştir. Standart çözeltiler (epikateşin, galik asit, kafeik asit, kateşin, klorojenik asit, kuersetin, p-kumarik asit) ayrı ayrı enjekte edilerek kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve analiz edilen örneklerdeki konsantrasyonlar bu eğrilerle hesaplanmıştır.

2.4. Ön işlem uygulanan posadan selüloz lifi eldesi ve karakterizasyonu (Extraction of cellulose fiber from pre-treated pomace and their characterization)

Posadan lif üretimi basamakları Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Farklı kaynaklardan temin edilen posaların değerlendirilmesi aşamaları (Title of Figure 1)

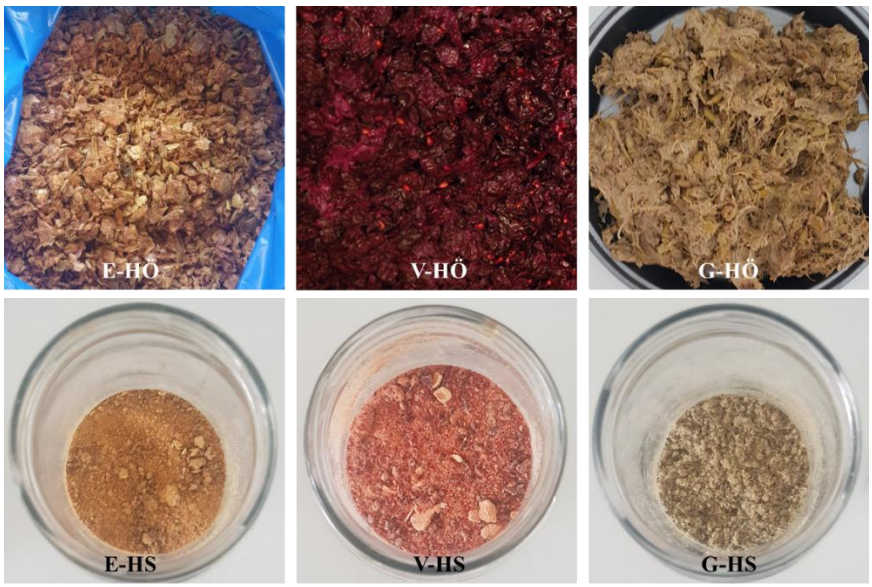
Hidroliz sonrası posada olması muhtemel kalıntı hemiselüloz, lignin ve diğer bileşenler çeşitli organik çözücüler, düşük konsantrasyonda asit ve baz kullanılarak uzaklaştırılmıştır. Amonyum okzalat (0.05M/50°C/1sa) (Slavov vd., 2017) ile ekstraksiyon işlemi gül yaprağı posasına uygulanırken, asit uygulama (0.5M HCl/80°C/30dak) (Melikoğlu vd., 2019) kısımları elma ve vişne posasına uygulanmıştır. Lif eldesi için uygulanan alkali uygulama aşaması %1 NaOH alkali konsantrasyonunda posanın %5 son konsantrasyona sahip olduğu ortamda 121°C'de 30 dak boyunca ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir (Filho vd., 2020). İşlem bitirildikten sonra filtrasyon ve nötral pH değerine ulaşana kadar yıkama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen son ürün lignoselülozik lif olup 50-60°C'de en az 24 saat boyunca kurutulmuştur. Selülozu daha saf halde elde etmek amacıyla son konsantrasyon %5 olacak şekilde 50°C'de %45'lik H_2SO_4 ile asit hidrolizi gerçekleştirilmiştir. Saf su ile yıkama işleminden sonra nötral pH'ya ulaşana kadar yıkama ve filtrasyon yapılmıştır. Elde edilen süspansiyon homojen hale getirilerek (9000 rpm/2 dak) ultrasonik banyoda 30 dak boyunca tutulmuş ve ardından kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen selüloz liflerinin spektrum profili, 25°C'de ve 400-4000 cm^{-1} aralığında kızılötesi absorpsiyon spektroskopi (FTIR) (Spectrum Two FTIR spectrometer, Perkin Elmer, ABD) kullanılarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra morfolojik özellikleri düşük vakum (10 kV) ve 1000 kat büyütme altında taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEI Quanta 250 FEG, ABD) ile incelenmiştir. Örneklerin ısıl stabiliteleri, örneklerin 25°C'den 650°C'ye kadar 30 mL/dak azot gazı altında 10°C/dak ısıtma hızı ile (Mettler – Toledo, DSC 1/700) termogravimetrik yöntem kullanılarak belirlenmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Experimental Results and Discussion)

3.1. Posanın ve ön işlem uygulanan posanın karakterizasyonu (Characterization of pomace and pre-treated pomace)

Elma ve vişne posaları, meyve suyu endüstrisinin ve gül posası gül yağı üretim fabrikalarının ürettiği atıklar olup değerlendirme yapılabilecek değerli ürünlerdendir. Tarımsal ürünlerden elde edilen atıklar önemli bir lignoselülozik kütle (lignin, selüloz ve hemiselüloz) olup, fenolikçe zengin sulu ekstrakt, antioksidan özelliklere sahip lignin ve fermente edilebilir şekerler içermektedir (Gomez-Cruz vd., 2021). Lignoselülozik kütleden değerlendirme yapmak için kullanılan ön işlemlerden birisi sıcak su ekstraksiyonudur (hidroliz). Bu uygulamalarda, sıcaklığın yükseltilmesi daha fazla hemiselüloz geri kazanımı sağlar (Zetzl vd., 2011). Bu şekilde yapılacak bir uygulama, daha sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek olan lignin ayrıştırılması işlemleri için lignin ekstraksiyon verimini arttırma potansiyeline sahiptir (Ingram ve ark., 2011). Belirtilen bu nedenlerden dolayı, posalardan hemiselüloz, lignin ile suda çözünen diğer bileşenleri almak üzere posalara sıcak su ekstraksiyonu/buhar uygulama işlemi yapılmıştır. Elma (E), vişne (V) ve gül atıklarına (G) (hammadde-atıklar, HÖ) ve hidroliz sonrası (HS) elde edilen örneklere ait resimler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elma (E), vişne (V) ve gül atıklarına (G) (hammadde-atıklar, HÖ) ve hidroliz sonrası (HS) elde edilen ürünler (Apple (E), cherry (V), and rose (G) waste before (HÖ) and after (HS) hydrolysis)

Hammaddeye ve hidroliz sonrası elde edilen katı kısma ait sonuçlar Tablo 1'de verildiği gibidir.

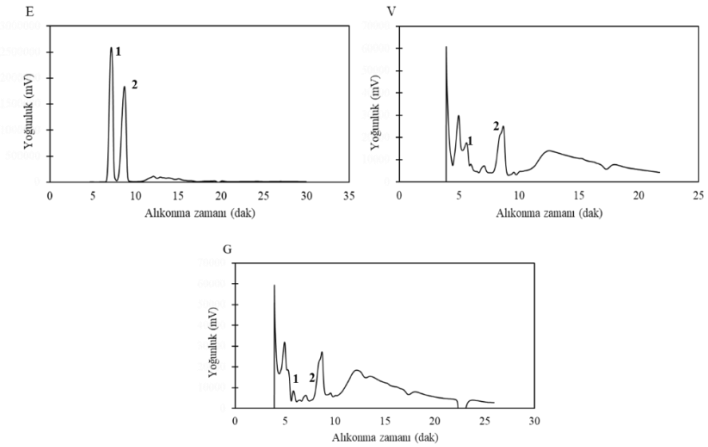
Tablo 1. Posa ve hidroliz sonrası elde edilen katı kısımda bulunan hemiselüloz, selüloz, lignin ve pektin miktarları ile örneklerin nem ve kül içerikleri (Hemicellulose, cellulose, lignin, and pectin contents found in pomace and solid part of pre-treated pomace)

İçerik (%)*	**Hammadde (HÖ)**			**Ön işlem sonrası (HS)**		
	Elma (E-HÖ)	Vişne (V-HÖ)	Gül (G-HÖ)	Elma (E-HS)	Vişne (V-HS)	Gül (G-HS)
Hemiselüloz	12.73±2.23	10.82±2.56	15.84±4.46	8.91±1.56	7.57±1.79	11.56±3.25
Selüloz	40.95±2.84	30.99±3.96	40.83±3.43	50.20±4.17	33.77±4.31	41.88±3.67
Lignin	25.33±1.32	46.46±1.51	14.94±0.61	32.30±2.20	50.63±1.64	24.95±1.02
Pektin	13.87±0.17	6.35±0.07	6.08±0.09	-	-	-
Nem	5.30±0.57	3.68±0.12	0.29±0.13	-	-	-
Kül	1.81±0.14	0.70±0.01	4.03±0.29	-	-	-

*değerler ortalama ± std sapma % (ağırlıkça) şeklinde verilmiştir (*values are given as mean standard deviation of weight (%))

Genel olarak kullanılan posalarda %0.29 – 5.30 nem, %0.70 – 4.03 kül, %10.82 – 15.84 hemiselüloz, %14.94 – 46.46 lignin, %30.99 – 57.83 selüloz ve %6.08 – 13.87 pektin belirlenmiştir. Benzer selüloz, lignin ve hemiselüloz değerleri elma, vişne ve gül posası için sırasıyla için Da Rosa vd. (2022), Melikoğlu vd. (2019), Nunez-Decap vd. (2021) ve Prithivivajan vd. (2019) tarafından rapor edilmiştir. Suda çözünmeyen kısımdaki hemiselüloz, lignin ve selüloz miktarları da sırasıyla %7.57 – 11.56, %33.77 – 41.88 ve %24.95 – 50.63 aralığında bulunmuştur (Tablo 1). Sonuç olarak, 121°C'de 30 dakikalık ön işlem sonrasında posalardaki lignin/selüloz oranının kısmen artış gösterdiği gözlenmiştir. Sıcak su ile yapılan ön işlem, hemiselülozun çözünerek sıvı faza geçmesine neden olmuş; buna bağlı olarak posada selüloz ve lignin oranlarında göreli bir artış gözlenmiştir. Farklı biyokütlelerin kullanıldığı çalışmalarda da benzer şekilde, sıcak su işlemi sonucu hemiselülozun önemli bir kısmının sıvı faza geçerek uzaklaştırıldığı; buna bağlı olarak toplam katı kütlenin azalması nedeniyle posada selüloz ve lignin oranlarının görece arttığı bildirilmektedir (Michelin ve Teixeira, 2016; Michelin vd., 2018; Manzanares vd., 2020; Gómez-Cruz vd., 2021).

Suda çözünen kısımda bulunan toplam fenolik madde miktarı ile selüloz/hemiselüloz türevi monosakkaritler ve fenolik bileşen analizi sırasıyla spektrofotometrik ve kromatografik olarak belirlenmiştir. Elma, vişne ve gül atıklarında belirlenen selüloz/hemiselüloz türevi monosakkaritlere ait kromatogramlar Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Elma, vişne ve gül atıklarında belirlenen selüloz/hemiselüloz türevi monosakkaritlere ait kromatogramlar (fruktoz alıkonma zamanı=7.2 dak (1 numaralı pik), glikoz alıkonma zamanı=9.2 dak (2 numaralı pik)) (G, gül; V, vişne; E, elma atıklarından elde edilen) (Chromatograms of cellulose/hemicellulose derivative monosaccharides of apple, cherry, and rose pomace (fructose retention time=7.2 min (peak 1), glucose retention time=9.2 min (peak 2)) (G, rose; V, cherry; E, apple pomaces))

Elma, vişne ve gül posasından hidroliz sonrasında elde edilen sıvı kısımda bulunan glikoz miktarı sırasıyla, %17.67±2.08, %2.66±0.25 ve %1.72±0.07 şeklindeyken früktoz miktarı ise sırasıyla %29.28±6.46, %2.79±0.08 ve %0.73±0.06 şeklinde belirlenmiştir. Şeker analizi sonucu elde edilen sonuçlar glikozun vişne ve gül posalarında bulunan baskın şeker olduğunu; elma posasında ise früktozun baskın olduğunu göstermektedir. Ön işlem sonrası glikozun yanı sıra fruktozun da çözünür hale geldiği görülmektedir. Sıcak su işlemi sonrasında vişne ve gül posalarında glikozun baskın çıkmasının, selülozun parçalanarak glikoza dönüşmesi ve fruktozun işlem sırasında parçalanmaya uğraması ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca fruktoz, ısıl işlemlere karşı daha duyarlı olup asidik koşullarda parçalanabilir; bu da örneklerde fruktoz seviyesinin görece düşük çıkmasına neden olmuş olabilir. Literatürde vişne gibi meyvelerin fruktoz açısından zengin olduğu belirtilmekle birlikte (Ficzek vd., 2015), uygulanan işleme bağlı olarak fruktoz miktarında kayıplar yaşanabileceği rapor edilmiştir (Verlinde vd., 2010). Ancak elma posasında, işlem sonrasında dahi fruktozun baskın kalması, başlangıçta bu posaların farklı fruktoz içeriğine sahip olmasından kaynaklanabilir ve/veya elma posasının pektin, lif ve yapısal karbonhidrat bakımından daha zengin olan yapısının fruktozu daha iyi koruma ihtimalinden kaynaklanabilir (Lyu vd., 2020). Ayrıca elma posasının pH yapısı da fruktozun ısıl parçalanmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamış olabilir. Benzer şekilde, 100°C'de 30 dk boyunca pirinaya sulu ekstraksiyon işlemi uygulayan Manzanares vd. (2020)'nin çalışmasında, toplam %12 şeker bulunurken, baskın şeker olarak glikoz (%8) belirlenmiş ve bunun yanı sıra fruktoz, arabinoz ve galaktoz da tespit edilmiştir.

Ön işlem sonrası elde edilen sıvı kısım için belirlenen fenolik bileşenlere ait değerler ve toplam fenolik madde miktarı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Hidroliz sonrası elde edilen ürünlere ait fenolik bileşenlerin miktarları (Phenolic contents obtained after hydrolysis)

İçerik*	**E-HS**	**V-HS**	**G-HS**
Epikateşin (ppm)	11.57±2.81	2.20±0.36	ND
Gallik asit (ppm)	ND	ND	2.50±0.10
Kafeik asit (ppm)	11.67±0.47	ND	ND
Kateşin (ppm)	5.70±0.56	ND	ND
Klorojenik asit (ppm)	12.80±1.09	0.18±0.03	ND
Kuersetin (ppm)	ND	ND	0.79±0.19
p-kumarik (ppm)	0.96±0.24	ND	5.30±1.47
Toplam fenolik madde miktarı (g GAE/100 g)	77.88±11.30	68.33±7.02	11.67±0.47

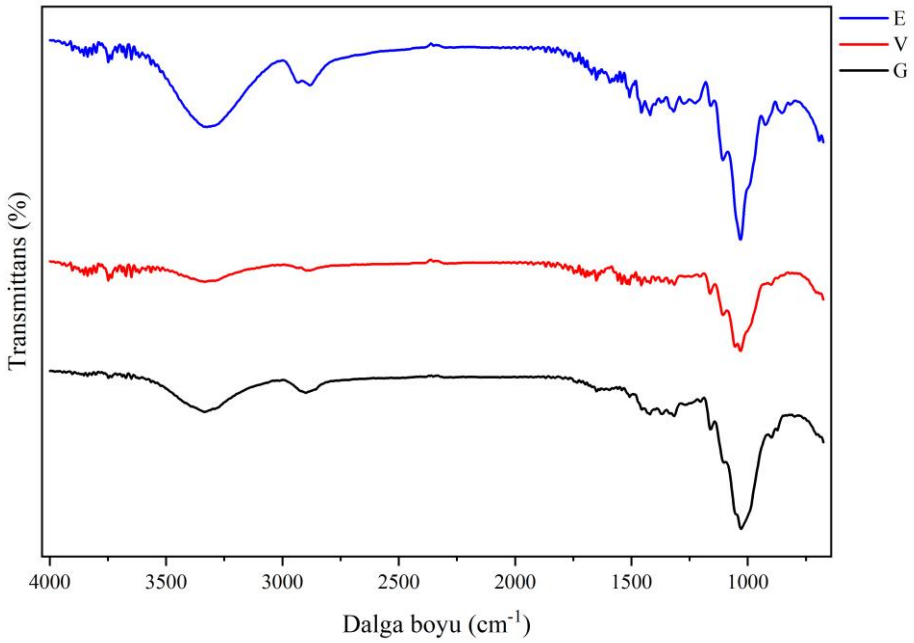
*değerler ortalama ± std sapma (ağırlıkça) şeklinde verilmiştir (*values are given as mean standard deviation of weight (%))

Ön işlem ile fenolikçe zengin sulu ekstrakt elde edilmiş ve bu ekstraktın toplam fenolik madde miktarı 11.67 – 77.88 g GAE/100g şeklinde bulunmuştur. Nunes vd. (2018), zeytin yağı işleme atıklarından pirinanın biyoaktif bileşenlerinin değerlendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada, sulu ekstraksiyon parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çözücü olarak sadece suyun kullanıldığı bu çalışmada, ekstraksiyon işlemi sonrası elde edilen ekstraktta, ekstraksiyon parametrelerine bağlı olarak 250-400 µg GAE/ml toplam fenolik madde miktarı belirlenmiştir.

3.2. Selüloz lifinin karakterizasyonu (Characterization of cellulose fiber)

3.2.1. Morfolojik özellikler (Morphological properties)

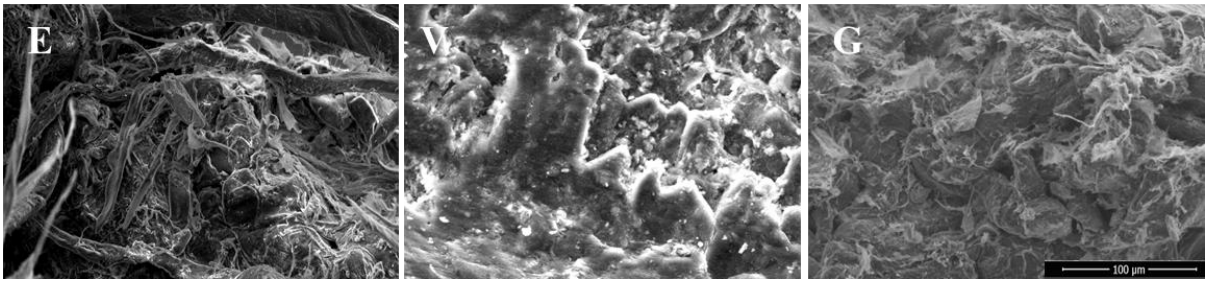
Selüloz liflerinin elde edilmesinde alkali uygulama ve alkali uygulama sonrası asitle çöktürme yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen liflerin morfolojik olarak incelemesi gerçekleştirilmiştir ve selüloz liflerine ait FTIR spektrumları Şekil 4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Selüloz liflerine ait FTIR spektrumları (G, gül selüloz lifi; V, vişne selüloz lifi; E, elma selüloz lifi) (FTIR spectrums of cellulose fibers (G, rose cellulose fiber; V, cherry cellulose fiber; E, apple cellulose fiber))

FTIR spektroskopisi, selüloz lifi ekstrakte etmek için kullanılan işlemlerin selülozik lifler üzerindeki fonksiyonel grupların varlığını belirlemek için uygulanmıştır. Tüm lif örnekleri için 3400 cm^{-1} civarında OH grubunun (H-bağı; –OH gruplarının gerilmesi) varlığını gösteren geniş bir pik elde edilmiş, ancak pik noktasının yoğunluğunun, elma posasından elde edilmiş lifler için daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Elma posasından elde edilen liflerde 3400 cm^{-1} civarındaki OH gerilme pikinin daha yüksek olması, bu örneklerde hem daha yüksek selüloz içeriğinin hem de şeker analizi sonuçlarının da gösterdiği üzere çözünür monosakkaritlerin katkısının etkili olabileceğini düşündürmektedir (Mannai vd., 2020). 2900 ve 2800 cm^{-1} aralığında gözlenen absorpsiyon pikleri, selüloz ve hemiselüloz komponentlerinde bulunan CH ve CH_2 grupları ile ilişkilendirilmekte olup elma posası liflerinde daha yüksek pik alanları vermiştir (Paiva vd., 2007; Reddy vd., 2009). 1700 cm^{-1} aralığında belirlenen absorpsiyon pikleri ise hemiselülozun üronik ester veya asetil grupları ya da lignin/hemiselülozun ferulik ve p-kumarik asit bileşenlerinde bulunan karboksil gruplarına ait ester bağları ile bağlantılıdır (Sgriccia vd., 2008). 1730 cm^{-1} bandı, genellikle C=O (karbonil) gerilme titreşimlerine karşılık gelir ve karbonil içerikli yapıların FTIR spektrumundaki karakteristik bölgesidir. Bu bağlamda, 1730 cm^{-1} civarında gözlenen küçük pikler, hemiselülozda bulunan asetil ester ve aldehit gruplarının yanı sıra (Reddy vd., 2009), elde edilen selülozik liflerde bulunan pektinlerin metil ester grupları veya serbest karboksil (COOH) grupları ile de ilişkili olabilir. 1600-1500 cm^{-1} aralığında gözlenen absorpsiyon bandı aromatik C=C halka gerilmesi ve ligninde bulunan metil, metilen ve metoksil gruplarının deformasyonu ile bağlantılıdır (Saravanakumar vd., 2013; Maheswari vd., 2012). 1630 cm^{-1}'de görülen pik ise absorbe edilen su varlığının işaretidir (Sain ve Panthapulakkal 2006). 1300 cm^{-1}, 1200 cm^{-1} ve 1160-850 cm^{-1} aralığında gözlenen pikler sırasıyla, C-H asimetrik deformasyonu, lignindeki aril grupları, polisakkaritlerdeki aromatik halkadaki C-O grupları ve hidroksil grupları, selüloz zincirindeki eter bağı [1,4 β-d glikozit] ve C-O gerilimini göstermektedir (Jonoobi vd., 2009; Golbaghi vd., 2017; Sun vd., 2005; Alemdar ve Sain, 2008). 1200 cm^{-1} aralığında görülen pikler hemiselüloza ait asetil gruplarındaki -COO bağları ile ilişkilidir (Reddy vd., 2009). Benzer FTIR spektrumları diğer araştırmacılar tarafından Opuntia (Cactaceae) bitkisinden elde edilen lifler için (Mannai vd., 2020) ve %5 NaOH ile 30°C'de 30:1 likör oranı korunarak muamele edilen incir yaprağı lifleri (Reddy vd., 2016) için de gözlenmiştir.

Elde edilen selüloz liflerine ait SEM görüntüleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

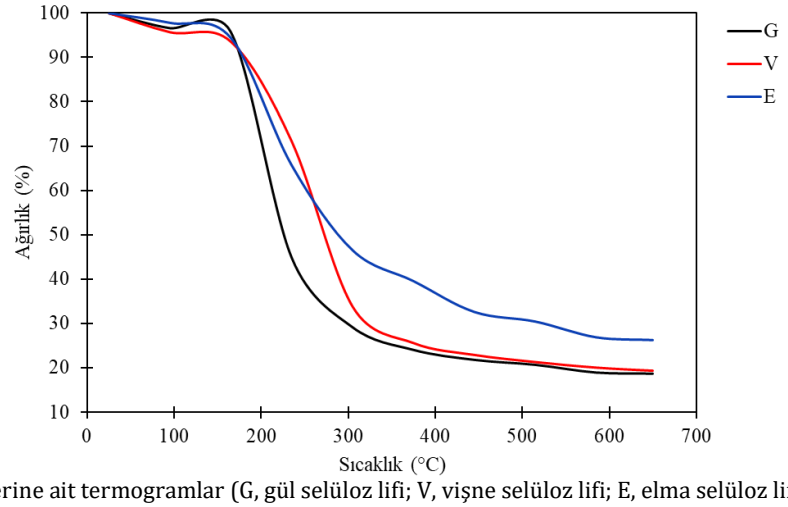


Şekil 5. Selüloz liflerine ait SEM görüntüleri (1000X büyütme) (G, gül selüloz lifi; V, vişne selüloz lifi; E, elma selüloz lifi) (SEM images of cellulose fibers (1000-5000X magnification) (G, rose cellulose fiber; V, cherry cellulose fiber; E, apple cellulose fiber))

Farklı posalardan elde edilen selüloz liflerinin yüzey morfolojilerinin belirgin şekilde farklılaştığı gözlenmiştir. SEM görüntülerinde, elma posasına ait liflerin düzenli, uzamış ve açık lif demetlerinden oluştuğu ve lifsi yapının büyük oranda korunduğu görülmektedir. Bu durum, FTIR analizinde elma liflerinde daha belirgin olarak gözlenen 3300 cm^{-1} (O–H gerilme) ve 1030 cm^{-1} (C–O–C gerilme) pikleriyle de örtüşmekte olup, yüksek selüloz içeriğini desteklemektedir. Buna karşın, vişne posasına ait lifler amorf bir yüzey görünümü sergilemiş; lifli yapıların parçalandığı veya bozulduğu izlenimi edinilmiştir. Bu mikroyapısal değişim, FTIR spektrumunda 1600 cm^{-1} civarında belirginleşen aromatik C=C gerilme pikleri ile ilişkilendirilebilir ve yüksek lignin içeriğine işaret etmektedir. Gül posasına ait liflerde ise genel olarak daha dağınık ve düzensiz bir yapı gözlenmiş; bu durum hem daha düşük selüloz kristalliği hem de yapısal bozulmalarla ilişkilendirilmiştir. Doğal selüloz lifleri, lignin ve hemiselülozun bir hücre demetini bağladığı çok hücreli bir yapıda bulunur (Reddy vd., 2012). Alkali uygulama sonrasında lignin ve hemiselülozun büyük bir kısmı uzaklaştırılır ve selüloz mikrofibrilleri birbirinden ayrılarak bireysel selüloz liflerini oluşturur. Elma posasından ekstrakte edilen selülozda daha lifimsi yapılar gözlenmiş ve belirlenen kısa yapılı, düzensiz şeritler ve yapılar alkali ile uygulama yapıldıktan sonra daha temiz bir yüzeye sahip selülozca zengin liflere dönüşmüştür. Benzer sonuçlar Ficus yapraklarından (incir ağacı yaprakları) (Reddy vd., 2013; Reddy vd., 2016), Lagenaria siceraria meyve pedikülünden (Asif vd., 2022) ve hurma ağacı liflerinden (Hachaichi vd., 2021) ekstrakte edilen selüloz lifleri için de gözlenmiştir. Farklı tarımsal atıklardan selüloz ekstraksiyonu üzerine yapılan başka bir çalışmada, selüloz liflerinin yapıları ve morfolojik özellikleri SEM kullanılarak incelenmiş ve benzer yapılar rapor edilmiştir (Vallejo vd., 2022).

3.2.2. Isıl özellikler (Thermal properties)

Elde edilen selüloz liflerine ait ısıl degradasyon grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Selüloz liflerine ait termogramlar (G, gül selüloz lifi; V, vişne selüloz lifi; E, elma selüloz lifi) (Thermograms of cellulose fibers (G, rose cellulose fiber; V, cherry cellulose fiber; E, apple cellulose fiber))

Tüm posalarda ilk ağırlık kaybı örneklerdeki suyun buharlaşması nedeniyle 120°C'nin altında gerçekleşmiştir (Dai ve Huang, 2017). Posalardan elde edilen liflerin dekompozisyonu iki ana ağırlık kaybı aşamasında gerçekleşmiştir: ilk aşama 150°C'den 350-450°C'ye kadar olan kısımda gerçekleşmiştir. İkinci aşama ise 350-550°C aralığında gerçekleşmiştir. Bunun nedeni posaların farklı sıcaklıklarda bozunan hemiselüloz, lignin ve selüloz gibi farklı kimyasal yapılardan oluşmasıdır. Hemiselüloz ve ligninin sırasıyla 220–315°C ve 315–400°C arasında ayrışmaya başladığı, ancak ligninin dekompozisyonunun geniş bir sıcaklık aralığında (100–900°C) meydana geldiği bildirilmektedir (Yang vd., 2007). Selüloz lifleri için, dekompozisyon sıcaklıklarının 220-250°C aralığında değiştiği

gözlenmiş ve 650°C'de elma selüloz liflerinin en az bozunma miktarına sahip olduğu görülmüştür. Torgbo vd. (2022) rambutan kabuklarından ekstrakte edilen ve ön işlem uygulanan selüloz örneklerinin ısıl dayanımlarının 240°C'ye kadar arttırıldığını göstermiştir. Benzer trend Vallejo vd. (2021) tarafından farklı atıklardan elde edilen selüloz kaynakları için gözlenmiş ancak elde edilen sonuçlardan farklı olarak selülozun dekompozisyon sıcaklığının 340°C'ye kadar arttırıldığı gösterilmiştir. Farklı ekstraksiyon yöntemlerinin (kimyasal, ultrasonik, vb.) muz ağacı kabuklarından selüloz ekstrakte etmek için kullanıldığı bir çalışmada, alkali uygulamanın selülozun kristallik derecesini arttırdığı ve böylece ısıl dayanımının geliştirildiği rapor edilmiştir (Arias vd., 2024). Benzer şekilde, Christwardana vd. (2020) da alkali uygulama ve ağartma işlemlerinin palm yağı üretim atıklarından elde edilen selülozun dekompozisyon sıcaklığını arttırdığını göstermiştir.

4. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma, elma posası, vişne posası ve gül yaprağı posası gibi tarımsal atıklardan selüloz lifleri ekstraksiyonu üzerinedir. Elde edilen sonuçlar, elma posasından elde edilen selüloz liflerinin daha yüksek saflık ve ısıl dayanım gösterdiğini, dolayısıyla biyo-bozunur ambalaj malzemelerinin özelliklerinin geliştirilmesi için daha uygun olduğunu ortaya koymuştur. Vişne ve gül posası liflerinin ise daha fazla safsızlık içermesi nedeniyle ilave arıtma ve modifikasyon işlemleri gerektirdiği belirlenmiştir. Uygulanan ön işlem ve alkali işlemlerinin, posalardaki lignin ve hemiselülozun etkili bir şekilde uzaklaştırılmasında başarılı olduğu gözlenmiştir. FTIR ve SEM analizleri, elde edilen selüloz liflerinin yapısal özelliklerini doğrulamış, TGA analizleri ise selüloz liflerinin uygun termal stabilite gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, tarımsal atıkların yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülmesi ve sürdürülebilir ambalaj malzemelerinin geliştirilmesi için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalarda, bu liflerin diğer biyopolimerlerle kombine edilerek mekanik ve bariyer özelliklerinin daha da iyileştirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FAB-2021-8255 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. This study was supported by Suleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit as a part of the Project numbered FAB-2021-8255.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynakça (References)

Alemdar, A., & Sain, M. 2008. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues–Wheat straw and soy hulls. Bioresource technology, 99(6), 1664-1671.

Anonim, 2020. https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/SUNULAR/T%C3%BCrkiye%20Biyoat%C4%B1k%20Potansiyeli%20ve%20De%C4%9Ferlendirmesi_Mustafa%20ACAR.pptx?Mobile=1&Source=%2FTAGEM%2F%5Flayouts%2F15%2Fmobile%2Fviewa%2Easpx%3FList%3D613f7565%2De673%2D4542%2Db8bc%2Da6717ac5d036%26View%3D7f47e11b%2D9181%2D487e%2D9373%2D633de696841b%26RootFolder%3D%252FTAGEM%252FBelgeler%252FSUNULAR%26ViewMode%3DDetail%26wdFCCState%3D1%26PageFirstRow%

AOAC. 1999. Official methods of analysis, 16th edn. Association of Official Analytical Chemists, Washington.

Arias, A., Arriola-Villaseñor, E., González, E., Guerrero, H., Hernández, J., Gutiérrez-Pineda, E., … Villa, C. 2024. Enhanced cellulose extraction from banana pseudostem waste: a comparative analysis using chemical methods assisted by conventional and focused ultrasound. Polymers, 16(19), 2785. https://doi.org/10.3390/polym16192785

Asif, M., Ahmed, D., Ahmad, N., Qamar, M., Alruwaili, N., Bukhari, S. 2022. Extraction and characterization of microcrystalline cellulose from lagenaria siceraria fruit pedicles. Polymers, 14(9), 1867. https://doi.org/10.3390/polym14091867

Christwardana, M., Handayani, A., Savetlana, S., Lumingkewas, R., & Chalid, M. 2020. Micro-fibrillated cellulose fabrication from empty fruit bunches of oil palm. Materials Science Forum, 1000, 272-277. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1000.272

Cotes-Palomino MT, Martínez-García C, Iglesias-Godino FJ, Eliche-Quesada D, Corpas-Iglesias FA. 2016. Study of the wet pomace as an additive in ceramic material. Desalination Water Treat, 57, 2712–8.

Da Rosa, S. T., Trianoski, R., Michaud, F., Belloncle, C., Iwakiri, S. 2022. Efficiency of different acetylation methods applied to cellulose fibers waste from pulp and paper mill sludge. Journal of Natural Fibers, 19(1), 185-198.

Dai, H., Huang, H. 2017. Synthesis, characterization and properties of pineapple peel cellulose-G-acrylic acid hydrogel loaded with kaolin and sepia ink. Cellulose, 24, 69–84.

Domínguez-Rodríguez G., Marina M.L., Plaza M. 2019. Enzyme-assisted extraction of bioactive non-extractable polyphenols from sweet cherry (Prunus avium L.) pomace. Food Chemistry, 339, 128086.

Erbas¸ S., Baydar, H. 2016. Variation in scent compounds of oilbearing rose (Rosa damascena Mill.) produced by headspace solid phase microextraction, hydrodistillation and solvent extraction. Records of Natural Products, 10(5), 555–565

Fan, X., Gao, Y., He, W., Hu, H., Tian, M., Wang, K., et al. 2016. Production of nano bacterial cellulose from beverage industrial waste of citrus peel and pomace using Komagataeibacter xylinus. Carbohydrate Polymers, 151, 1068–72.

Ficzek, G., Ladányi, M., Végvári, G., & Tóth, M. (2015). Mathematical modelling of the accumulation of carbohydrates and organic acids throughout the ripening process of Hungarian sour cherry cultivars. Trees, 29, 797-807.

Filho, P.F.S., Zamani, A., Ferreira, J.A. 2020. Valorization of Wheat Byproducts for the Co-Production of Packaging Material and Enzymes. Energies, 13, 1300; doi:10.3390/en13061300.

Fragal, E. H., Cellet, T. S. P., Fragal, V. H., Companhoni, M. V. P., Ueda-Nakamura, T., Muniz, E. C., et al. 2016. Hybrid materials for bone tissue engineering from biomimetic growth ofhydroxiapatite on cellulose nanowhiskers. Carbohydrate Polymers, 152, 734–746.

Galanakis, C., 2015. Food Waste Recovery. Academic Press-Elsevier Inc., London.

Gardner, D.J., Oporto, G.S., Mills, R., Samir, M.A.S.A. 2008. Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. Journal of Adhesion Science and Technology, 22:545–67.

Golbaghi, L., Khamforoush, M., Hatami, T. 2017. Carboxymethyl cellulose production from sugarcane bagasse with steam explosion pulping: Experimental, modeling, and optimization. Carbohydrate Polymers, 174, 780-788.

Gómez-Cruz, I., del Mar Contreras, M., Romero, I., & Castro, E. (2021). A biorefinery approach to obtain antioxidants, lignin and sugars from exhausted olive pomace. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 96, 356-363.

Gómez-Cruz, I., del Mar Contreras, M., Romero, I., Castro, E. 2021. A biorefinery approach to obtain antioxidants, lignin and sugars from exhausted olive pomace. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 96, 356-363.

Gouw, V.P., Jung, J., Simonsen, J., Zhao, Y. 2017a. Fruit pomace as a source of alternative fibers and cellulose nanofiber as reinforcement agent to create molded pulp packaging boards. Composites: Part A, 99, 48–57.

Hachaichi, A., Kouini, B., Kian, L., Asim, M., Jawaid, M. 2021. Extraction and characterization of microcrystalline cellulose from date palm fibers using successive chemical treatments. Journal of Polymers and the Environment, 29(6), 1990-1999. https://doi.org/10.1007/s10924-020-02012-2

Halis, E., HICRAN, D., Selli, F. 2019. Recycling of cellulose from vegetable fiber waste for sustainable industrial applications. Industria Textila, 70(01), 37-41. https://doi.org/10.35530/it.070.01.1553

Hirn, U., Schennach, R. 2015. Comprehensive analysis of individual pulp fiber bonds quantifies the mechanisms of fiber bonding in paper. Scientific Reports, 5, 10503.

Hosseini, S., Parastouei, K., Khodaiyan, F. 2020. Simultaneous extraction optimization and characterization of pectin and phenolics from sour cherry pomace. International Journal of Biological Macromolecules, 158, 911-921

Ingram, T., Wörmeyer, K., Lima, J. C. I., Bockemühl, V., Antranikian, G., Brunner, G., Smirnova, I. 2011. Comparison of different pretreatment methods for lignocellulosic materials. Part I: Conversion of rye straw to valuable products. Bioresource technology, 102(8), 5221-5228.

Jackson, J. K., Letchford, K., Wasserman, B. Z., Ye, L., Hamad, W. Y., Burt, H. M., et al. 2011. The use of nanocrystalline cellulose for the binding and controlled release of drugs. International Journal of Nanomedicine, 6, 321–330.

Jonoobi, M., Harun, J., Mishra, M., Oksman, K. 2009. Chemical composition, crystallinity and thermal degradation of bleached and unbleached kenaf bast (Hibiscus cannabinus) pulp and nanofiber. BioResources, 4(2), 626-639.

Jung, J. 2020. Value-added utilization of fruit and vegetable pomace in food packaging. In: FOOD PACKAGING Innovations and Shelf-Life, Ed. R.M.S. Cruz, CRC Press, Boca Raton, pp: 87-107.

Keskin, O. Y., Koktas, S., Seki, Y., Dalmis, R., Kilic, G. B., & Albayrak, D. (2022). *Natural cellulosic fiber from Carex panicea stem for polymer composites: extraction and characterization. Biomass Convers Biorefin*.

Kim, D., Seo, J. 2018. A review: Breathable films for packaging applications. Trends in Food Science and Technology, 76, 15–27.

Köktaş, S., Keskin, Ö. Y., Dalmiş, R., Seki, Y., & Balci Kiliç, G. (2022). Extraction and characterization of natural cellulosic fiber from Taraxacum sect. ruderalia. Journal of Natural Fibers, 19(16), 14328-14336.

Kovacheva, N., Rusanov, K., Atanassov, I. 2010. Industrial cultivation of oil bearingrose and rose oil production in bulgaria during 21st century, directions and challenges. Biotechnology and Biotechnological Equipment, 24, 1793–1798, http://dx.doi.org/10.2478/V10133-010-0032-4.

Li, Q., Zhou, J., Zhang, L. 2009. Structure and properties of the nanocomposite films of chitosan reinforced with cellulose whiskers. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 47(11), 1069–1077.

Liang, J., Lu, Q., Lerner, R., Sun, X., Zeng, H., Liu, Y. 2011. Agricultural wastes. Water Environment Research, 83, 1439–1466.

Lyu, F., Luiz, S. F., Azeredo, D. R. P., Cruz, A. G., Ajlouni, S., & Ranadheera, C. S. (2020). Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. Processes, 8(3), 319.

Maheswari, C.U., Reddy, K.O., Muzenda, E., Rajulu, A.V. 2012. Tensile and thermal Properties of polycarbonate-coated tamarind fruit fibers. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 17: 578–589.

Mannai, F., Elhleli, H., Dufresne, A., Elaloui, E., Moussaoui, Y. 2020. Opuntia (Cactaceae) fibrous network-reinforced composites: Thermal, viscoelastic, interfacial adhesion and biodegradation behavior. Fibers and Polymers, 21(10), 2353-2363.

Manzanares, P., Ballesteros, I., Negro, M.J., Gonzalez, A., Oliva, J.M., Ballesteros, M. 2020. Processing of extracted olive oil pomace residue by hydrothermal or dilute acid pretreatment and enzymatic hydrolysis in a biorefinery context. Renewable Energy, 145, 1235-1245.

Mazlan, D., Krishnan, S., Din, M., Tokoro, C., Khalid, N., Ibrahim, I., … Komori, D. 2020. Effect of cellulose nanocrystals extracted from oil palm empty fruit bunch as green admixture for mortar. Scientific Reports, 10(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-63575-7

Melikoğlu, A.Y., Bilek, S.E., Cesur, S. 2019. Optimum alkaline treatment parameters for the extraction of cellulose and production of cellulose nanocrystals from apple pomace. Carbohydrate Polymers, 215, 330–337.

Michelin, M., & Teixeira, J. A. (2016). Liquid hot water pretreatment of multi feedstocks and enzymatic hydrolysis of solids obtained thereof. Bioresource technology, 216, 862-869.

Michelin, M., Liebentritt, S., Vicente, A. A., & Teixeira, J. A. (2018). Lignin from an integrated process consisting of liquid hot water and ethanol organosolv: Physicochemical and antioxidant properties. International journal of biological macromolecules, 120, 159-169.

Miranda, I., Simões, R., Medeiros, B., Nampoothiri, K.M., Sukumaran, R.K., Rajan, D., Pereira, H., Ferreira-Dias, S. 2019. Valorization of lignocellulosic residues from the olive oil industry by production of lignin, glucose and functional sugars. Bioresource Technology, 292, 121936.

Mollov, P., Mihalev, K., Shikov, V., Yoncheva, N., Karagyozov, V. 2007. Colourstability improvement of strawberry beverage by fortification withpolyphenolic copigments naturally occurring in rose petals. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 8, 318–321, http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2007.03.004.

Nunes, M.A., Costa, A.S., Bessada, S., Santos, J., Puga, H., Alves, R.C., ... Oliveira, M.B.P. 2018. Olive pomace as a valuable source of bioactive compounds: A study regarding its lipid-and water-soluble components. Science of the total environment, 644, 229-236.

Núñez-Decap, M., Wechsler-Pizarro, A., Vidal-Vega, M. 2021. Mechanical, physical, thermal and morphological properties of polypropylene composite materials developed with particles of peach and cherry stones. Sustainable Materials and Technologies, 29, e00300.

Okur, İ., Baltacıoğlu, C., Ağçam, E. et al. 2019. Evaluation of the Effect of Different Extraction Techniques on Sour Cherry Pomace Phenolic Content and Antioxidant Activity and Determination of Phenolic Compounds by FTIR and HPLC. Waste and Biomass Valorization, 10, 3545–3555. https://doi.org/10.1007/s12649-019-00771-1

Olofsson, J., Börjesson, P. 2018. Residual biomass as resource–Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. Journal of Cleaner Production, 196, 997–1006.

Owonubi, S., Agwuncha, S., Malima, N., Shombe, G., Makhatha, M., Revaprasadu, N. 2021. Non-woody biomass as sources of nanocellulose particles: a review of extraction procedures. Frontiers in Energy Research, 9. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.608825

Paiva, M.C., Ammar, I., Campos, A.R., Cheikh, R.B., Cunha, A.M. 2007. Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization. Composites Science and Technology, 67(6), 1132-1138.

Park, S.I., Zhao, Y. 2006. Development and characterization of edible films from cranberry pomace extracts. Journal of Food Science, 71, E95–E101.

Pham, V., Kim, J., Shim, J., Chang, S., Chung, W. 2022. Coconut mesocarp-based lignocellulosic waste as a substrate for cellulase production from high promising multienzyme-producing bacillus amyloliquefaciens fw2 without pretreatments. Microorganisms, 10(2), 327. https://doi.org/10.3390/microorganisms10020327

Prithivirajan, R., Narayanasamy, P., Al-Dhabi, N. A., Balasundar, P., Shyam Kumar, R., Ponmurugan, K., ... Senthil, S. 2020. Characterization of Musa paradisiaca L. cellulosic natural fibers from agro-discarded blossom petal waste. Journal of Natural Fibers, 17(11), 1640-1653.

Reddy, K.O., Guduri, B.R., Rajulu, A.V. 2009. Structural characterization and tensile properties of borassus fruit fibers. Journal of Applied polymer science, 114(1), 603-611.

Reddy, K.O., Maheswari, C.U., Shukla, M. 2013. Physico-chemical characterization of cellulose extracted from ficus leaves. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 7(4), 496-499.

Reddy, K.O., Maheswari, C.U., Shukla, M., Rajulu, A.V. 2012. Chemical composition and structural characterization of Napier grass fibers. Materials letters, 67(1), 35-38.

Reddy, K.O., Uma Maheswari, C., Muzenda, E., Shukla, M., Rajulu, A.V. 2016. Extraction and characterization of cellulose from pretreated ficus (peepal tree) leaf fibers. Journal of Natural Fibers, 13(1), 54-64.

Reis, S.F., Rai, D.K., Abu-Ghannam, N. 2012. Water at room temperature as a solvent for the extraction of apple pomace phenolic compounds. Food Chemistry, 135(3), 1991-1998.

Sagar, N.A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E.M., Lobo, M.G. 2018 Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17, 512–531.

Sain, M., Panthapulakkal, S. 2006. Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. Industrial crops and products, 23(1), 1-8.

Salem, K., Naithani, V., Jameel, H., Lucia, L., Pal, L. 2020. Lignocellulosic fibers from renewable resources using green chemistry for a circular economy. Global Challenges, 5(2). https://doi.org/10.1002/gch2.202000065

Santana-Meridas, O., Gonzalez-Coloma, A., Sanchez-Vioque, R. 2012. Agricultural residues as a source of bioactive natural products. Phytochemistry Reviews, 11, 447–466.

Saravanakumar, S.S., Kumaravel, A., Nagarajan, T., Sudhakar, P., Baskaran, R. 2013. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from Prosopis juliflora bark. Carbohydrate polymers, 92(2), 1928-1933.

Seki, Y., Selli, F., Erdoğan, Ü. H., Atagür, M., & Seydibeyoğlu, M. Ö. (2022). A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers. *Cellulose*, *29*(9), 4877-4918.

Sgriccia, N., Hawley, M., Misra, M. 2008. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 39, 1632–1637.

Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in enzymology, 299,152–178.

Slavov, A., Denev, P., Panchev, I., Shikov, V., Nenov, N., Yantcheva, N., Vasilev, I. 2017. Combined recovery of polysaccharides and polyphenols from Rosadamascena wastes. Industrial Crops and Products, 100, 85–94

Slavov, A., Kiyohara, H., Yamada, H., Immunomodulating pecticpolysaccharides from waste rose petals of Rosa damascena Mill. 2013. International Journal of Biological Macromolecules, 59, 192–200, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.054.

Slavov, A., Panchev, I., Kovacheva, D., Vasileva, I. 2016. Physico-chemicalcharacterization of water-soluble pectic extracts from Rosa damascena,Calendula officinalis and Matricaria chamomilla wastes. Food Hydrocolloids, 61, 469–476, http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.006.

Struck, S., Plaza, M., Turner, C., Rohm, H. 2016. Berry pomace – a review of processing and chemical analysis of its polyphenols. International Journal of Food Science and Technology, 51, 1305–18.

Sun, X.F., Xu, F., Sun, R.C., Fowler, P., Baird, M.S. 2005. Characteristics of degraded cellulose obtained from steam-exploded wheat straw. Carbohydrate research, 340(1), 97-106.

Torgbo, S., Sukyai, P., Khantayanuwong, S., Puangsin, B., Srichola, P., Sukatta, U., … Rosenau, T. 2022. Assessment of electrothermal pretreatment of rambutan (nephelium lappaceum l.) peels for producing cellulose fibers. Acs Omega, 7(44), 39975-39984. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04551

Valdés, A., A.C. Mellinas, M. Ramos, M.C. Garrigós A. Jiménez. 2014. Natural additives and agricultural wastes in biopolymer formulations for food packaging. Frontiers in Chemistry, 2.

Vallejo, M., Cordeiro, R., Dias, P., Moura, C., Henriques, M., Seabra, I., … Morouço, P. 2021. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava. Bioresources and Bioprocessing, 8(1). https://doi.org/10.1186/s40643-021-00377-3

Vasileva, I., Krastev, L., Petkova, N., Yantcheva, N., Nenov, N., Krachmarov, A., Atanasova, A., Slavov, A. 2019. Valorization of cacao and rose waste for preparation of liqueurs. Food Science and Applied Biotechnology, 2(1), 8-17.

Verlinde, P. H., Oey, I., Lemmens, L., Deborggraeve, W. M., Hendrickx, M. E., & Van Loey, A. M. (2010). Influence of reducing carbohydrates on (6 S)-5-methyltetrahydrofolic acid degradation during thermal treatments. Journal of agricultural and food chemistry, 58(10), 6190-6199.

Wang, C.Y., Fuentes-Hernandez, C., Liu, J.C., Dindar, A., Choi, S., Youngblood, J.P., et al. 2015. Stable low-voltage operation top-gate organic field-effect transistors on cellulose nanocrystal substrates. ACS Applied Materials & Interfaces, (2015), 7, 4804–4808.

Wilson, C.T., Harte, J., Almenar, E. 2018. Effects of sachet presence on consumer product perception and active packaging acceptability—A study of fresh-cut cantaloupe, LWT –Food Science and Technology, 92, 531–539.

Xiong, R., Hu, K., Grant, A. M., Ma, R., Xu, W., Lu, C., et al. 2016. Ultrarobust transparent cellulosenanocrystal-graphene membranes with high electrical conductivity. Advanced Materials, 28, 1501–1509.

Xu, K., Liu, C., Kang, K., Zheng, Z., Wang, S., Tang, Z., et al. 2018. Isolation of nanocrystalline cellulose from rice straw and preparation of its biocomposites with chitosan: Physicochemical characterization and evaluation of interfacial compatibility. Composite Science and Technology, 154, 8–17.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Zheng, C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86, 1781–1788.

Yasemin, Seki. (2025). Isolation and characterization of cellulose from spent ground coffee (Coffea Arabica L.): A comparative study. *Waste Management*, *193*, 54-61.

Zetzl, C., Gairola, K., Kirsch, C., Perez-Cantu, L., Smirnova, I. 2011. High pressure processes in biorefineries. Chemie Ingenieur Technik, 83(7), 1016-1025.

Zhou, L., He, H., Jiang, C., Ma, L., Yu, P. 2014. Cellulose nanocrystals from cotton stalk for reinforcement of poly(vinyl alcohol) composites. Cellulose Chemistry and Technology, 51(1–2), 109–119.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 570-581, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1645136

Araştırma Makalesi

Research Article

HASTANELERDE SÜRTÜNMELİ SARKAÇ TİPİ İZOLATÖRLERİN TAŞIYICI SİSTEME ETKİSİ

Mehdi ÖZTÜRK*

İstanbul Arel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Deprem, TBDY-2018, Sismik İzolatör, Sürtünmeli Sarkaç, Yapısal Deformasyon.

Özet

Depremler, hem tarihi hem de modern betonarme ve çelik yapılar için büyük risk oluşturan doğal afetlerdir. Türkiye gibi aktif deprem kuşağında yer alan ülkelerde yapı güvenliğinin sağlanması kritik bir öneme sahiptir. Deprem hasarlarını minimize etmek amacıyla geliştirilen sismik izolasyon sistemleri, yapıların deprem yüklerine karşı dayanıklılığını artıran etkili mühendislik çözümlerindendir. Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'e göre, sürtünmeli sarkaç izolatörlerin sismik performans üzerindeki etkisi konu alınmıştır. Çalışma kapsamında bir hastane binası, geleneksel yaklaşım ve sismik izolatörlü olarak hedef sismik performansı sağlayacak şekilde ayrı ayrı tasarlanmıştır. Sayısal analizler sonucunda, sismik izolasyonun yapı periyodunu uzatarak deprem kuvvetlerini azalttığı, göreli kat ötelemelerini düşürdüğü ve yapısal deformasyonları minimize ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, izolasyon sisteminin maliyet analizi yapılmış ve izolatörlü bina maliyetinin geleneksel betonarme binaya kıyasla %20 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ancak sonuç olarak, sürtünmeli sarkaç izolatör sistemlerinin, hastane gibi kritik yapıların sismik dayanıklılığını artırmada önemli bir mühendislik çözümü olduğu vurgulanmıştır.

THE EFFECT OF FRICTION PENDULUM TYPE ISOLATORS ON THE STRUCTURAL SYSTEMS OF HOSPITALS

Keywords

Earthquake, TBDY-2018, Seismic Isolators, Friction Pendulum, Structural Deformation.

Abstract

Earthquakes are natural disasters that pose significant risks to both historical and modern reinforced concrete and steel structures. In countries like Turkey, which are located in active seismic zones, ensuring the safety of structures is of critical importance. Seismic isolation systems, developed to minimize earthquake-induced damage, are effective engineering solutions that enhance the resilience of structures against seismic loads. In this study, the impact of friction pendulum isolators on seismic performance is investigated in accordance with the Turkish Building Earthquake Code (TBEC) 2018. A hospital building was designed using both the conventional approach and with seismic isolation, with the goal of achieving the target seismic performance level in each case. Numerical analyses revealed that seismic isolation increases the structural period, thereby reducing seismic forces, decreasing inter-story drifts, and minimizing structural deformations. Furthermore, a cost analysis of the isolation system was conducted, indicating that the cost of the isolated building is approximately 20% higher compared to a conventional reinforced concrete structure. Nevertheless, the study concludes that friction pendulum isolator systems represent a significant engineering solution for enhancing the seismic resilience of critical structures such as hospitals.

Alıntı / Cite

Öztürk, M., (2025). Sürtünmeli Sarkaç Tipi İzolatörlerin Hastanelerin Taşıyıcı Sistemine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 570-581.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
M. Öztürk, 0000-0003-4147-0431

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	22.02.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	14.05.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	20.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: mehdiozturk@arel.edu.tr, +90 535 819 4080

THE EFFECT OF FRICTION PENDULUM TYPE ISOLATORS ON THE STRUCTURAL SYSTEMS OF HOSPITALS

Mehdi Öztürk†,
İstanbul Arel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Highlights

- Isolators increase the total construction cost by only 20%.
- Thanks to isolators, hospitals continue to provide patient care without interruption.
- Since the relative drifts and accelerations are lower in the seismically isolated model, the earthquake effect is felt less by those living in the building.

Graphical Abstract

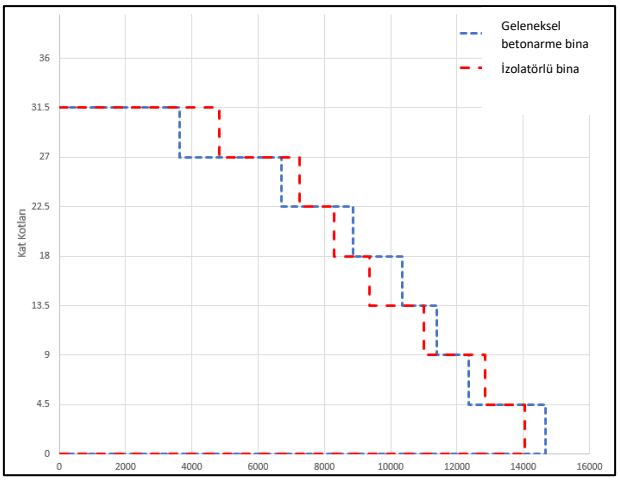


Figure. Change in shear forces on floors in buildings with and without seismic isolators

Purpose and Scope

In this study, which was carried out to demonstrate the energy absorption capacity of friction pendulum type isolators and their effect on the structural system, a cost analysis was made for a hospital building aimed to provide the immediate occupancy performance level.

Design/methodology/approach

As a methodology, earthquake parameters were calculated according to TBDY 2018 regulation in the first stage of the study. A sample hospital structure was selected and modeled and analyzed with ETABS software using the finite element method. According to the results, the quantity survey was prepared and the effect of the construction cost of the isolators was calculated.

Findings

As a result of numerical analysis, it was determined that seismic isolation reduces earthquake forces by extending the building period, reduces relative storey drifts and minimizes structural deformations. It has been observed that isolators increase the construction cost by an average of 10% .

Originality

There is a general mistake in calculating the cost of buildings with isolators. When calculating, the cost of the isolators itself is added to the building cost. However, in the design with isolators, there are structural elements that will be missing from the structure. For this reason, there will be a decrease in the cost of the structure itself. From this perspective, scientifically revealing the amount reduced in the total structure cost due to the structural elements that friction pendulum type isolators will remove from the structure distinguishes this study from others and makes it original.

† Corresponding author: mehdiozturk@arel.edu.tr , +905358194080

1. Giriş (Introduction)

Depremler, ülkemizin gerçeği olan kaçınılamaz tektonik olaylardır. Çok eski zamanlardan günümüze kadar birçok coğrafi bölgemizde büyük depremler görülmüştür ve bu depremlerin sonucunda çok fazla can ve mal kaybı yaşanmıştır. Sismik olarak aktif bir kuşak üzerinde konumlanmamız sebebiyle büyük depremlerin gelecek yıllarda da oluşacağı açıktır. Mevcut yapıların değerlendirilmesi veya yeni yapılacak binaların tasarımlarında depreme dayanıklı yapı tasarımı ilkeleri izlenmektedir. Bu prosedürlerde konu alınan yapıların, hedef bir sismik performansı sağladığı öngörülmektedir ve hesaplamalar bu doğrultuda yapılmaktadır. Depremlerde yaşanan yer sarsıntısı ile yapının kendi ataletine bağlı olarak, büyük göreli ötelenmeler ve önemli kesit tesirleri oluşabilmektedir. Bu durumda yapının, maruz kaldığı kuvvet ve momentlerin taşıyıcı sistem tarafından taşınması gerekmektedir. Bu aşamada yapı, tasarım yaklaşımına da bağlı olarak belli bir miktar hasar alma yoluyla enerjiyi sönümleme imkanına da sahiptir. Ancak, sismik izolasyon yöntemlerinin kullanılmasıyla, yapıya aktarılan deprem ivmelerini düşürerek yapının taşımak zorunda kalacağı etkilerin azaltılması da mümkündür (Lee vd., 2001;Wu ve Samali, 2002; Türker, 2003). Sismik izolasyon uygulamasında, yer değiştirmeler yanal rijitliği düşük olan izolasyon sisteminde toplanarak deprem ivmeleri sönümlenmektedir ve böylece üst yapının göreli ötelenme değerleri azaltılarak rijit bir davranış sergilemesi sağlanmaktadır. Böylece yapı, depremden izole edilmiş olmaktadır (Tsai vd., 2006; Tokuç, 2008).

Sismik izolasyon yöntemleri, sismik performansı arttırılmak istenen veya yeni tasarlanacak yapılarda kullanılabilmektedir. Özellikle deprem sonrasında hemen kullanımı gereken, yani depremlerde ağır hasarlar alarak fonksiyonelliğini kaybetmemesi gereken hastane gibi binalarda sismik izolasyon sistemleri büyük avantajlar sağlamaktadır. Ekonomik açıdan, geleneksel ankastre sistemlere kıyasla daha maliyetli olmaları ve kullanım koşullarında da bazı değişiklikler gerektirmeleri sebebiyle sismik izolasyon yöntemlerinin kullanımı günümüzde ankastre sistemlerden çok daha azdır. Ancak bu sistemlerin, sismik performans anlamında oldukça başarılı sonuçlar sağladığı hem mevcut izolasyonlu binaların yaşanan değremler sonrasındaki durumlarının incelenmesi ile hem de çeşitli akademik çalışmalarla ortaya konmaktadır (Spyrakos vd., 2009; Şirin ve Boduroğlu, 2010; Şahin, 2020).

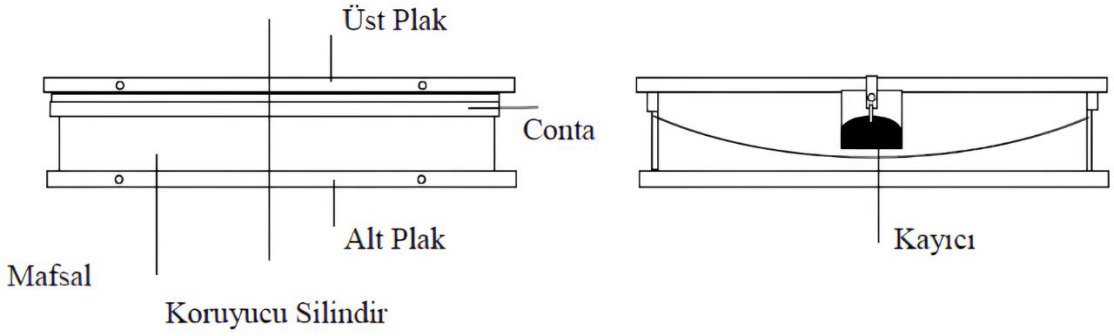
Toprak (2012), %5, %10 ve %20 mertebelerinde burulma oranı olan ve burulma davranışı göstermeten 3, 5 ve 10 katlı binaları konu alarak, burulma düzensizliklerinin sismik izolatör kullanımı ile giderilmesi üzerine çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada yüksek sönümlü ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılmıştır. Sonuç olarak, sismik yalıtım sistemleri ile burulma etkilerinin ortadan kaldırılabileceği görülmüştür. Nasery vd., (2015) ise bir hastane binasını izolatörlü ve ankastre şeklinde modelleyerek sonuçları kıyaslamıştır. İzolasyonlu sistemde kauçuk mesnetler ile taban yalıtımı yapılmıştır. Zaman tanım alanında analiz yöntemi uygulanmıştır ve yatay ötelenmeler, hakim periyotlar ve iç kuvvetler karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre izolatörlü sistemde sismik performans önemli ölçüde iyileşmiştir ve böylece muhtemel deprem hasarlarının önlenmesinde sismik izolatörlerin faydaları vurgulamıştır. Sevim (2016), bir hastane yapısını perde ve çerçeve sistem olarak analiz etmiştir. Çalışmada, deprem perdeleri kaldırılarak farklı izolatör sistemleri UBC 1997'deki yük kombinasyonları kullanılarak test edilmiştir ve kıyaslamalar yapılmıştır. İzolatörlü durumun ankastre mesnetli duruma göre, göreli kat ötelemeleri ve yapı periyodu açısından yapıya çok önemli katkılarda bulunduğu belirtilmiştir. Al-Ameeri, (2017), kurşun çekirdekli izolatörlerin orta ve yüksek katlı binalardaki etkisini incelemek amacıyla 5, 10 ve 15 katlı çelik yapılarda zaman tanım alanında analizler uygulamıştır. Analiz sonuçlarına göre, sismik izolatörlü binalar, izolatörsüz duruma göre çok daha az sismik etkiye maruz kalmıştır. Yıldız (2020), Sap2000 ile bir hastane binasını modelleyerek, kolonların alt ve üst ucuna yerleştirdiği izolatörlerin konum etkisini incelemiştir. Bu çalışmada araştırmacılar, yüksek sönümlü kauçuk izolatör kullanılan bu iki farklı konumun yanı sıra binayı izolatörsüz olarak da analiz etmiştir. Sonuç olarak, farklı izolasyon yerleşimlerinin ve izolatörsüz modelin karşılaştırmalı analizleri sunulmuş; izolatörlerin üst uca yerleştirilmesinin daha verimli sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. Zulfakar (2021), tek, çift ve üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç izolatörlerle sismik yalıtımı yapılmış beş katlı bir yapının zaman tanım alanında analizlerini gerçekleştirmiştir. ABAQUS programı ile yapılan modellemelerde, üç eğrilikli izolatör sistemi için farklı sürtünme katsayıları ve eğrilik yarıçapları da göz önüne alınmıştır. Elde edilen bulgular, farklı sürtünme yüzeylerine ve katsayılarına sahip izolatörlerin, ankastre modellere kıyasla depreme karşı daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Sismik izolatörlerin genel olarak yapı periyodunu uzatarak deprem kuvvetlerini azalttığı, göreli kat ötelemelerini düşürdüğü ve yapısal deformasyonları minimize ettiği görülmektedir (Asher vd.,2001;Ateş ve Dumanoğlu,2003; Castaldo vd.,2015; Hong ve Kim, 2004; Shrimali vd., 2014). Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda, sismik izolasyon yöntemlerinden olan ve son yıllarda hızla gelişen sürtünmeli sarkaç tipi izolatörler daha az konu alınmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi izolatörlerin enerji yutma kapasitesi ve taşıyıcı sisteme etkisini göstermek amacıyla planlanan bu çalışmada, hemen kullanım performans seviyesini sağlaması hedeflenen bir hastane binası ele alınmıştır. Bursa ilindeki bu hastane binası 7 katlı olup sismik izolatöre sahip değildir. Yapı ETABS programıyla hem izolatörlü hemde izolatörsüz olarak analiz edilmiş periyot, ivme , göreli kat ötelemesi ve, modal kütle katılım parametreleri kıyaslanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada izolatörlü ve izolatörsüz tasarlanan sistemlerin maliyet kıyaslaması da yapılarak, sürtünmeli sarkaç tipi izolatör uygulamasının yapı maliyetine etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1.Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (Friction Pendulum Type Isolators)

Sürtünmeli sarkaç sistemi (Friction Pandulum System- FPS), kayma hareketini ve geri dönüş kuvvetlerini bir araya getiren yenilikçi bir izolasyon tekniğidir. Bu sistem, sürtünmeli sarkaç izolasyonu mantığını kullanarak yapının doğal titreşim sürelerini uzatır ve bu sayede büyük depremler karşısında etkili bir koruma sağlar. Sarkaçların döngüsel hareketleri, yapısal hareketleri kontrol etmeye yardımcı olur, böylece deprem anında binaların stabilitesini artırır. Bu sistem, yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde inşa edilen yapılar için, deprem enerjisinin sönümlenmesi ve yapısal hasarların azaltılması sebebiyle oldukça etkili bir çözümdür. Sürtünmeli sarkaç izolatörler, paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde hareket eden özel kayıcı elemanlardan teşkil edilir. Bu elemanlar sayesinde deprem etkileri absorbe edilir. İzolatörlerin bu özellikleri, yapının yatay hareketlerini kontrol altında tutar. FPS, yapının bütünlüğünü korur ve esnek bir hareket kabiliyeti sağlar. Böylece, deprem ivmelerinin hasar verici ve yıkıcı etkileri azaltılmış olur. Bu tür izolasyon sistemleri, özellikle sismik aktivitesi yüksek olan lokasyonlarda yer alan önemli kullanım amacındaki yapıların korunması için ideal bir yoldur. Kayıcı elemanlar, düşük sürtünme özellikleri olan özel bir malzeme ile kaplanmış olup, bu sayede istenen düşük sürtünme katsayıları elde edilir. İzolatörlerin periyodu, konkav yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlı olarak ayarlanır ve bu düzenleme yapının ağırlığından bağımsızdır. Sistem, izolatörlerin rijitlik merkezini yapının kütle merkeziyle otomatik şekilde senkronize ederek, yapının burulma davranışını en aza indirir. FPS, farklı büyüklükteki deprem etkilerinde de oldukça başarılı bir performans sağlayabilir çünkü sürtünme katsayıları ve rijitlik parametreleri değişkendir. Bunun yanı sıra, sürtünme katsayısı ve kayma periyodu, sismik performansı optimize etmek için ayarlanabilir. Örneğin, sürtünme katsayısının düşürülmesi veya kayma periyodunun artırılması, taban kesme kuvvetlerini azaltarak yapının yatay deplasmanını artırabilir. Bu tür sistemlerle yalıtımı sağlanmış yapılarda, bir eşik seviyesine kadar ankastre mesnetli sistem davranışına benzer davranış görülür ancak bu eşik aşıldığında ise dinamik bir davranış ortaya çıkar. İzolatör sisteminin parametrelerine bağlı olarak sismik etkiler sönümlenir. Bu durum, sürtünmeli sarkaç sistemlerin değişken deprem etkisi altında esnek ve adaptif bir davranış geliştirdiğini ortaya koymaktadır (Eniş, 2024). Bu sistemlerin çalışma mekanizmasına ve sistem elemanlarına bir örnek Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Örnek bir sürtünmeli sarkaç izolatör kesiti (Cross-sectional view of a friction pendulum isolator) (Sevim, 2016)

2.2. TBDY 2018'e Göre Sismik İzolasyon (Seismic Isolation According to TBDY 2018)

Sismik izolasyonlu bina tasarımı veya sismik yalıtım uygulamaları ile güçlendirme konularına ilişkin kurallar TBDY-2018 (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) Bölüm 14'de verilmektedir. TBDY-2018'e göre, sismik izolasyon uygulanan binalarda Bina Önem Katsayısı I=1 alınmaktadır. Tasarımda DD1 (50 yılda aşılma olasılığı %2 olan 2475 yıl tekrarlanma periyotlu deprem) ve DD2 (50 yılda aşılma olasılığı %10 olan 475 yıl tekrarlanma periyotlu deprem) düzeyleri kullanılmaktadır. Burulma davranışının ortaya çıkmaması ve etkilerinin minimize edilebilmesi adına, izolasyon sisteminin rijitlik merkezinin, üstyapı kütle merkezi ile mümkün mertebe çakıştırılabilmesi önerilmektedir.

İzolasyon sistemindeki en büyük yerdeğiştirme değerlerinin hesabında, izolasyon birimlerinin parametrelerinin alt sınır değerleri kullanılırken üstyapıya aktarılacak maksimum kuvvetin hesabında izolasyon birimlerinin parametrelerinin üst sınır değerleri kullanılmaktadır. İzolasyon sistemindeki maksimum yerdeğiştirme hesabı DD1 ile, üstyapıya gelecek maksimum yatay kuvvet hesabı ise DD2 ile yapılmaktadır. Deprem yalıtım sistemi, DD-1 deprem yer hareketi sırasında meydana gelen en yüksek yer değiştirme ile bunun %50'sine karşılık gelen durumda oluşan iç kuvvetler arasında en az 0.025W fark olacak şekilde planlanmalıdır. Bu ifadede W terimi, binanın toplam deprem kütlesine ilişkin ağırlığıdır. Ayrıca, sistem her bir D yer değiştirmesinde yatayda merkezleme kuvveti sağlayacak biçimde tasarlanacak ve elastik sınırın ötesine geçen rijitlik esas alınarak hesaplanan titreşim periyodu 6 saniyeyi aşmayacaktır. Merkezleme kuvveti ve teğetsel rijitlik şartları sağlanırken, yer değiştirmeden bağımsız olan kuvvetler hesaba katılmamalıdır. İzolasyon sisteminin en büyük yerdeğiştirme

değeri kadar hareket serbestliğini sağlamak amacıyla yeterli engellenmemiş alana sahip olması gerekmektedir. TBDY-2018'de, izolasyon sistem birimlerinin artan yatay yerdeğiştirmelere göre artan bir dayanıma sahip olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca, izolasyon birimlerinin tasarımında deprem etkilerinden farklı olarak, rüzgar, sıcaklık, yaşlanma, yorulma, sünme ve nem gibi diğer faktörlerin de hesaba alınması gerektiği ve bu tür etkiler için önlem alınması gerektiği ifade edilmektedir. Yalıtım birimlerinde hiçbir deprem düzeyi için çekme kuvvetlerinin oluşmasına izin verilmemesi açık bir şekilde belirtilmiştir ancak özel durumlarda çekme etkilerinin oluşumuna ve bunların özel izolasyon birimleri ile karşılanmasına, bu sistemin deneylerle doğrulanması şartı ile izin verilmektedir. Yalıtım sistemindeki tüm bileşenler, en büyük yer değiştirme koşulunda eksenel kuvvetleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek dayanıklılığa sahip olmalıdır. Binanın yalıtım sistemi, DD-1 deprem yer hareketi altında devrilmeye karşı en az 1.0 güvenlik katsayısına sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu güvenlik katsayısı hesaplanırken, depremli ve depremsiz tüm yük birleşimleri göz önünde bulundurulacaktır. Yalıtım sistemindeki herhangi bir elemanda kalkma ya da çekme meydana gelmesi durumunda ise binanın kararlılığının korunabildiği hesaplarla kanıtlanmalıdır. İzolasyon arayüzü ve altındaki elemanlar, üstyapı elemanları ve yalıtım birimi deneyleri için kullanılması gereken yük kombinasyonları TBDY-2018'de ayrı olarak verilmiştir. Bu yük birleşimleri Tablo 1.'de derlenmiştir.

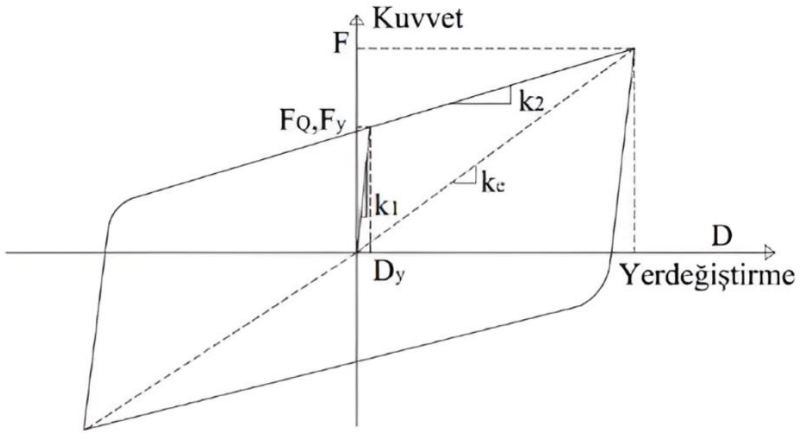
Tablo 1. Yük birleşimleri (Design load combinations) (TBDY-2018)

Konu	**Yük Birleşimleri**
Yalıtım arayüzü ve altındaki elemanlar	1.4G + 1.6Q
	1.2G + Q ± Ed
	0.9G ± Ed
Üstyapı elemanları	$G + Q + 0.2S + Ed^{(H)} + 0.3Ed^{(Z)}$
	$0.9G + H + Ed^{(H)} - 0.3Ed^{(Z)}$
Yalıtım birimi deneyleri	1.4G + 1.6Q
	G + 0.5Q
	1.2G + 0.5Q ± Ed
	1.2G + Q ± Ed
	0.9G ± Ed

TBDY-2018'e göre, yalıtım birimlerinin kapasitesinin, DD1 düzeyindeki zaman tanım alanında, sistemin doğrusal olmayan davranışında oluşan yerdeğiştirme ve eksenel yükleri karşılayabilecek dayanıma sahip olması gerekmektedir.

2.3. Matematiksel Model (Mathematical Model)

TBDY-2018 Ek 14B'de, eğri yüzeyli sürtünmeli izolasyon birimlerinin tanımı yapılmaktadır ve bu tip sistemlerde kabul edilecek basitleştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü Şekil 2'deki gibi verilmektedir. Burada F_Q ve F_y terimleri karakteristik veya etkin akma dayanımını, k_1 terimi başlangıç rijitliğini, k_2 terimi ikincil rijitliği, k_e terimi D yerdeğiştirmesi durumundaki etkin rijitliği, F terimi yine D yerdeğiştirmesindeki kuvveti, D_y terimi ise akma yerdeğiştirmesini ifade etmektedir.



Şekil 2. Eğri yüzeyli sürtünmeli yalıtım birimlerinde kuvvet-yerdeğiştirme döngüsü (Hysteretic behavior of curved surface friction pendulum isolators) (TBDY-2018)

F_Q veya F_y değerleri, izolasyon birimine gelen düşey kuvvetin, etkin sürtünme katsayısı (μ_e) ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. k_1 başlangıç rijitliği değeri, oldukça büyük bir değer olarak alınır. İkincil rijitlik ise Denklem 1'e göre hesaplanır. Burada P terimi düşey kuvveti, R_c terimi ise yalıtım birimi kayma yüzeylerinin etkin eğrilik yarıçapını ifade etmektedir.

$$k_2 = P / R_c \quad (1)$$

Etkin rijitlik k_e parametresi oldukça önemli bir terim olup, döngüdeki en büyük yatay kuvvetin en büyük yatay yerdeğiştirmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir (Denklem 2). Etkin sönüm oranı β_e, döngüde tüketilen W_d enerjisinin $2\pi FD$ değerine oranıdır (Denklem 3).

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{P}{R_c} + \frac{\mu_e P}{D} \quad (2)$$

$$\beta_e = \frac{W_d}{2\pi FD} = \frac{2}{\pi}\left[\frac{\mu_e}{\mu_e + \frac{D}{R_c}}\right] \quad (3)$$

3. Sayısal Analiz (Nümerical Analysis)

3.1. Deprem Parametreleri (Earthquake Parameters)

Örnek olarak seçilen betonarme hastane binası Bursa ilinde yer almaktadır. Bodrum kat, izolatör katı, zemin kat ve 5 normal kat olmak üzere toplamda 7 kata sahip olan binanın plan boyutları 59 m x 33 m'dir. Beton sınıfı C30 olup, kullanılan donatı çeliği minimum akma dayanımı 420 Mpa olan B420C çeliğidir. Malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.Yapılan zemin etüd incelemeleri sonucunda, yerel zemin sınıfı TBDY-2018'e göre ZD olarak tespit edilmiştir.

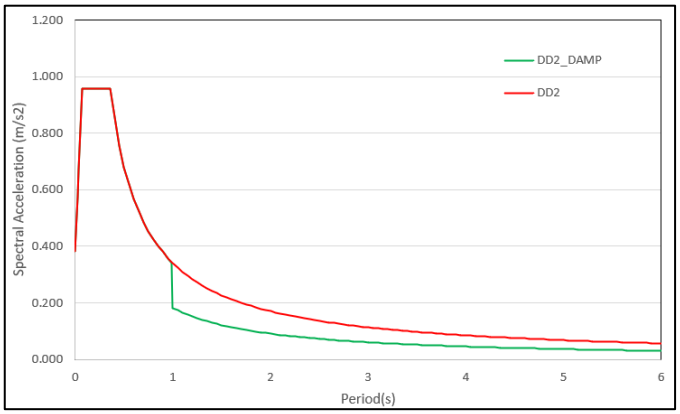
Tablo 2. Malzeme ve Zemin parametreleri (Material and Soil Parameters)

Beton 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck}): 30 Mpa	Çelik kararkteristik akma dayanımı (fyk) :420 Mpa
Beton Karakteristik çekme dayanımı ($f_{ctk)}$: = $0.35\sqrt{f_{ck}} = 1.92\ MPa$	ÇelikElastisite modülü (Es) = $2x10^5$ Mpa
Beton Elastisite modülü (E_c) = $3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \cong 31800\ MPa$	Tasarım akma dayanımı (fyd) = 420/1.15 = 365 Mpa
Tasarım basınç dayanımı (f_{cd}) = 30/1.5 = 20 Mpa	ZD Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
Tasarım çekme dayanımı (f_{ctd}) = 1.92/1.5 = 1.28 MPa	$(V_s)_{30}$: 180-360 m/sn, $(N_{60})_{30}$ [darbe/30cm]: 15-50, $(c_u)_{30}$ [kPa] :70-250

Tasarımı yapılacak olan yapının analizlerinde kullanılacak deprem yüklemesine ait veriler için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esaslarından yararlanılmıştır. Öncelikli olarak binaların bulunduğu yerin enlem ve boylamı göz önüne alınarak deprem tehlike haritalarından ilgili deprem yer hareketi düzeyine karşı gelen ivme büyüklükleri elde edilmiş ve tasarım ivme spektrumu tanımlanmıştır (Şekil 3).

Harita Spektral İvme Katsayısı (Kısa Periyod)	SS = 0.920
Harita Spektral İvme Katsayısı: (1.Sn. Periyod)	S1 = 0.240
En Büyük Yer İvmesi	PGA = 0.387 g
Kısa Periyot Bölgesi için	FS = 1.132
1.0 Saniye Periyot Bölgesi	F1 = 2.120

$S_{DS} = S_S \times F_S = 0.920 \times 1.132 = 1.041$
$S_{D1} = S_1 \times F_1 = 0.240 \times 2.120 = 0.509$
$T_A = 0.098$ s, $T_B = 0.498$

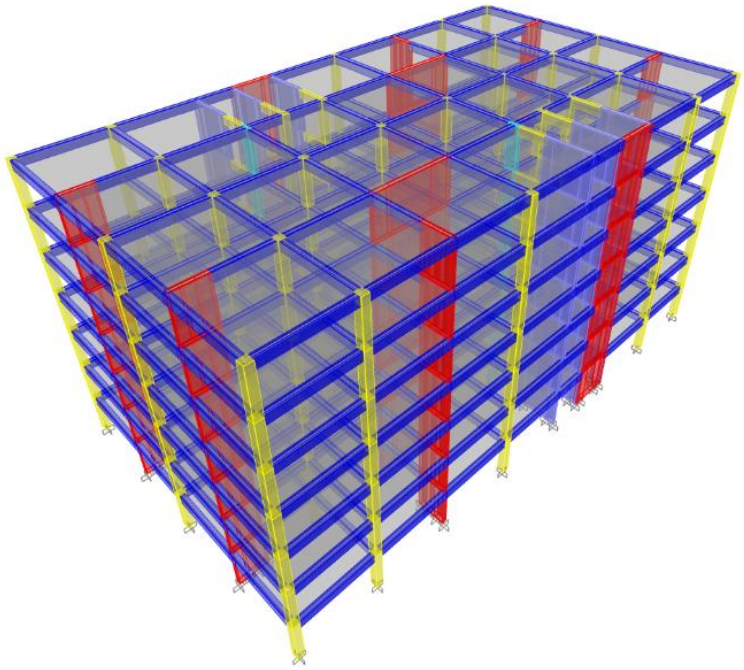


Şekil 3. Hastane binası lokasyonu için tanımlanan tasarım spektrumu (Defined seismic design spectrum at the hospital site)

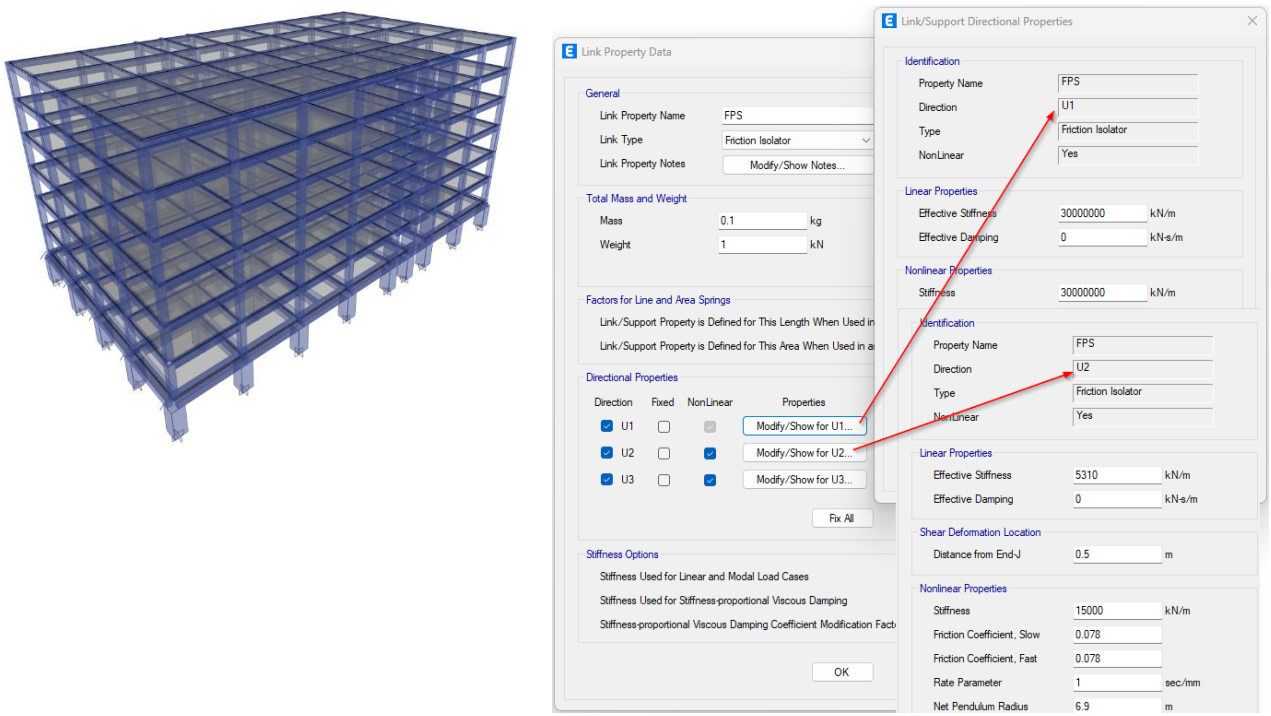
Geleneksel betonarme binada taşıyıcı sistem davranış katsayıları TBDY-2018 Tablo4.1'den belirlenmiş, deprem yükü azaltma katsayısı R=7 ve dayanım fazlalığı katsayısı D=2.5 olarak seçilmiştir. Bina önem katsayısı yapının hastane olmasından dolayı I=1.5 olarak alınmıştır.
İzolatörlü yapıda taşıyıcı sistem davranış katsayıları TBDY-2018 Tablo 4.2'ye göre belirlenmiş ve deprem yükü azaltma katsayısı R=1.2 ve dayanım fazlalığı katsayısı D=1.2 alınmıştır. İzolatörlü yapı olduğu için bina önem katsayısı ise I=1 olarak alınmıştır.

3.2. Sayısal Model (Numerical Model)

Geleneksel betonarme bina ve deprem izolatörlü bina tasarımı için ETABS V20.3 yazılımı kullanılmıştır. Öncelikle geleneksel betonarme bina sistemi modellenerek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapıda 40cmx120cm ve 70x70cm olmak üzere iki farklı tip kolon kullanılmıştır. Kirişler ise 40cmx80cm ve 50cmx80cm şeklinde iki farklı tip olarak tasarlanmıştır. Döşeme kalınlıkları 20cm olup perde kalınlıkları ise 40cm ve 50 cm olarak seçilmiştir.Döşemelerde yapı hareketli yükleri 5 kN/m^2 alınmıştır. Kaplama yükleri için 2kN/m^2, duvar yükleri için ise 2.2 kN/m^2 yayılı yük kabulü yapılmıştır. Ayrıca kirişler üzerinde de 7 kN/m duvar yükü alınmıştır. Yapısal elemanların zati ağırlıkları Etabs programındaki 'Dead' yük etiketi ile dikkate alınmıştır. Taşıyıcı sisteme ait ETABS model görseli Şekil 4'de gösterilmiştir.
İzolasyon sistemi tasarımında sürtünmeli sarkaç izolatörler (Friction Pandulum System- FPS) kullanılmıştır. Yapılan deneyler ve izolatör sistemine ait üretimsel veriler ile tasarımsal koşullara göre, modellemede ve davranışta dikkate alınacak parametreler ETABS modelinde link elemanlarla modellenmiştir. Deprem izolasyonu uygulanan sistemde izolatör yerleşimi yapılacak olan düşey taşıyıcıların kesit ebatları 150cmx150cm olarak seçilmiştir. İzolatör düzleminde yer alan kirişler ise 150cm genişliğinde ve 80cm derinliğindedir. İzolatör katında döşeme kalınlıkları 25 cm alınmıştır. İzolatörlü sisteme ait üç boyutlu görünüş, yay rijitlikleri ve doğrusal olmayan parametreler Şekil 5'de verilmiştir. İzolatörler için seçilen değerler, üretici firma tarafından sağlanan bilgiler ışığında seçilmiştir. Bu değerler, uygulamada benzer bir yapıda kullanılan ve testlerle onaylanmış, seçilen sarkaç tipi izolatör özelliklerine uygun gerçek değerlerdir.



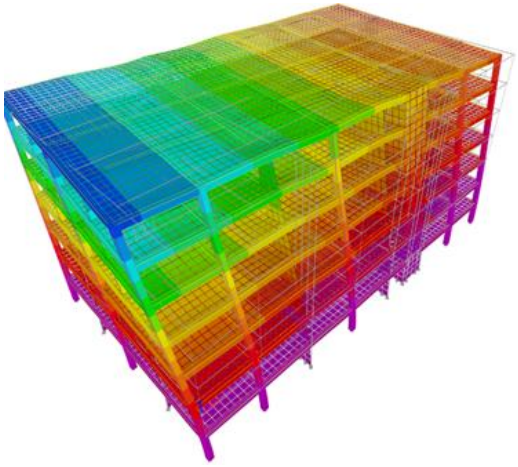
Şekil 4. Geleneksel betonarme bina modeli (Typical RC frame structure model)



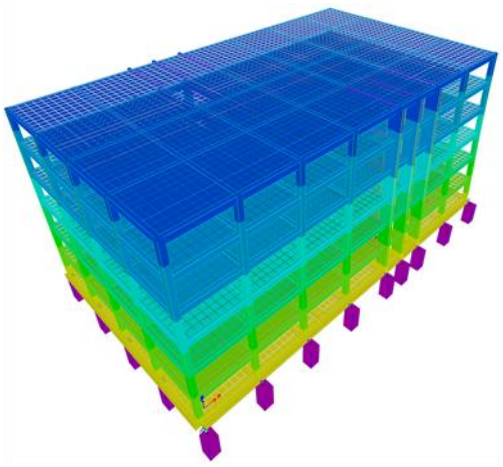
Şekil 5. Deprem izolatörlü bina modeli ve izolatör özellikleri (Building with seismic Isolators and parameters)

3.3. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

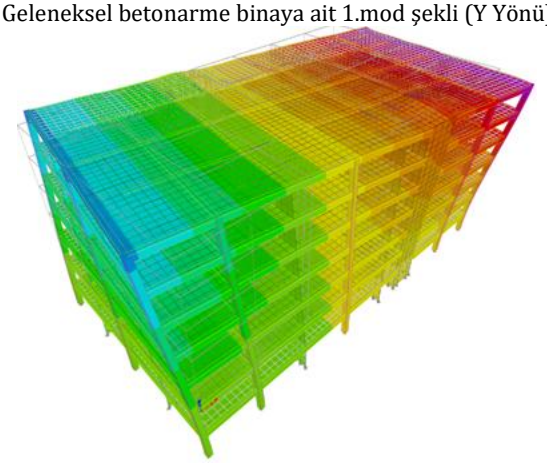
Geleneksel betonarme bina sistemi ve deprem izolatörlü sistemde hakim ilk üç moda ait görseller Şekil 6'da sunulmuştur. Modal analiz sonuçlarından elde edilen modal parametrelere ait sayısal sonuçlar ise Tablo 3'de verilmiştir.

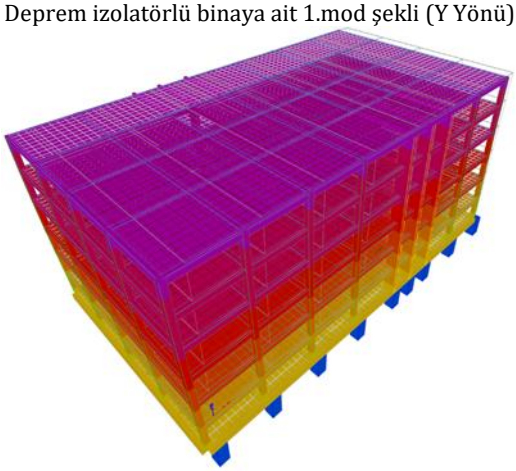


Geleneksel betonarme binaya ait 1.mod şekli (Y Yönü)

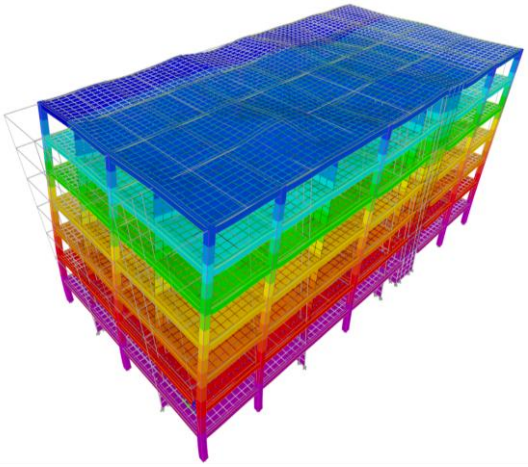


Deprem izolatörlü binaya ait 1.mod şekli (Y Yönü)

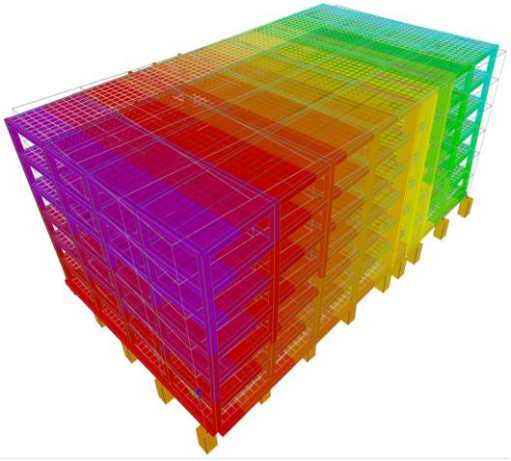




Geleneksel betonarme binaya ait 2.mod şekli (Burulma)



Deprem izolatörlü binaya ait 2.mod şekli (X Yönü)



Geleneksel betonarme binaya ait 3.mod şekli (X Yönü)

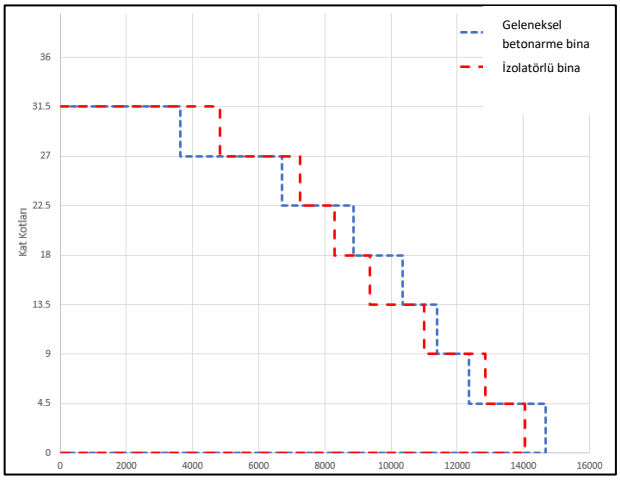
Deprem izolatörlü binaya ait 3.mod şekli (Burulma)

Şekil 6. Geleneksel ve izolatörlü bina hakim modları (Fundamental Modes of Typical and Base-Isolated Buildings)

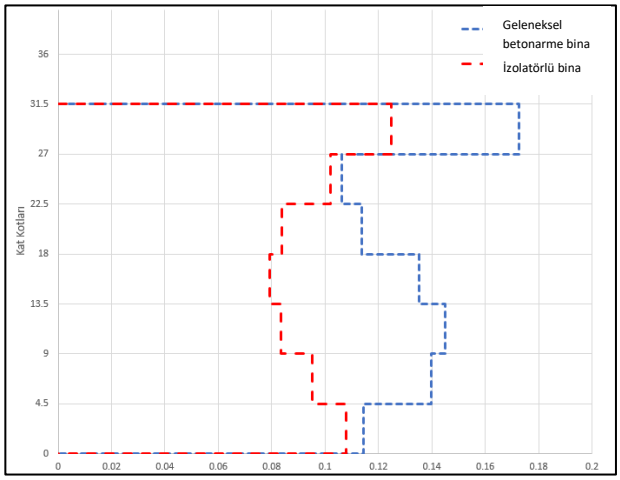
Tablo 3. Modal bilgiler (Modal analysis results)

Geleneksel Yapı						Geleneksel Yapı					
Mod	Periyot	Kütle Katılım Oranı (X)	Kütle Katılım Oranı (Y)	Toplam Kütle Katılım (X)	Toplam Kütle Katılım (Y)	Mod	Periyot	Kütle Katılım Oranı (X)	Kütle Katılım Oranı (Y)	Toplam Kütle Katılım (X)	Toplam Kütle Katılım (Y)
1	1.225	0.001	0.6142	0.001	0.6142	1	2.359	0	0.9648	0	0.9648
2	1.216	0	0.1032	0.001	0.7174	2	2.352	0.9668	0	0.9668	0.9648
3	1.032	0.7083	0.0009	0.7093	0.7183	3	2.176	0	0.0001	0.9668	0.9648
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	0.034	0.0001	0.0001	0.9978	0.9975	300	0.013	0	0	1	1

Modal hesap yöntemlerinde, hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı, TBDY-18 EK 4B'ye göre (X) ve (Y) deprem doğrultularında her bir mod için hesaplanan taban kesme kuvveti modal etkin kütlelerinin toplamının bina toplam kütlesinin %95'inden daha az olmaması kuralına göre belirlenmelidir ancak mod katkısı %3'ü aşan modlar da dikkate alınmalıdır. Bu kurala uyularak, analiz sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvvetleri ve kat dağılımlarının yanı sıra kat ivmeleri, hem geleneksel betonarme bina sistemi, hem de deprem izolatörlü sistem için karşılaştırmalı olarak Şekil 7'de verilmiştir.



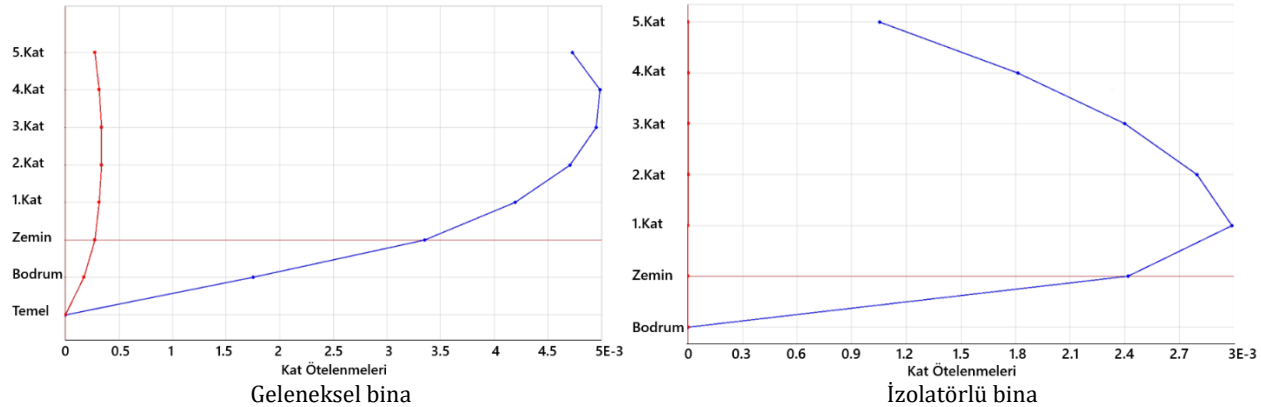
Kat kesme kuvvetleri



Kat ivmeleri

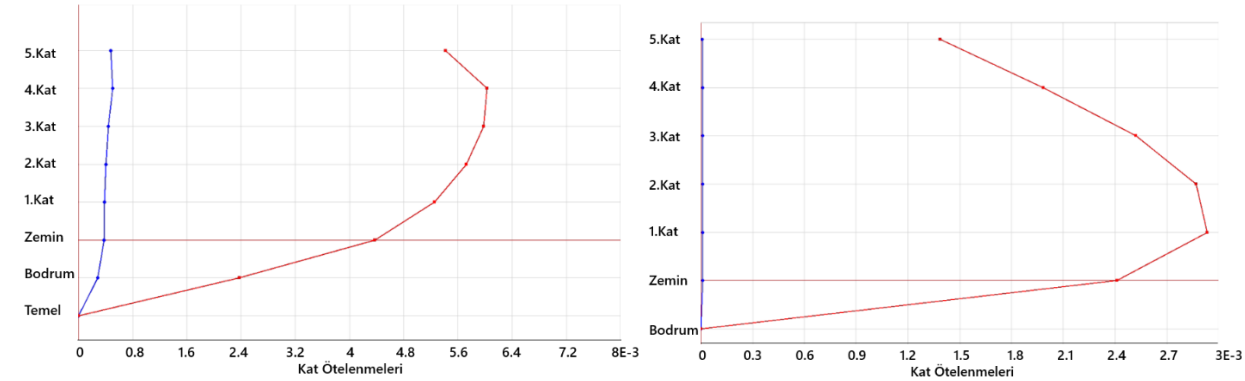
Şekil 7. Geleneksel betonarme bina ve izolatörlü bina için kat kesme kuvvetleri ve kat ivmeleri kıyaslaması (Seismic response comparison of typical and isolated RC structures)

TBDY 14.14.5.1'e göre üst yapıdaki göreli kat ötelemeleri, Kesintisiz Kullanım (KK) performans seviyesi için $0.005h_i$, Sınırlı Hasar (SH) performans seviyesi için $0.01h_i$, Kontrollü Hasar (KH) performans seviyesi için $0.015h_i$ değerini aşmamalıdır. Geleneksel betonarme bina ve deprem izolatörlü binada oluşan göreli kat ötelemenmeleri, kıyaslamalı olarak Şekil 8'de X doğrultusu, Şekil 9'da ise Y doğrultusu için verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, analiz sonuçlarından elde edilen değerler limit değerlerin altında kalmıştır.



Geleneksel bina İzolatörlü bina

Şekil 8. X Doğrultusu göreli kat ötelenmelerinin geleneksel ve izolatörlü bina için karşılaştırılması (Comparison of X-direction interstory drifts between typical and base-isolated buildings)



Geleneksel bina İzolatörlü bina

Şekil 9. Y Doğrultusu göreli kat ötelenmelerinin geleneksel ve izolatörlü bina için karşılaştırılması (Comparison of Y-direction interstory drifts between typical and base-isolated buildings)

3.4. Maliyet Karşılaştırması (Cost Comparision)

Geleneksel betonarme bina yaklaşımı ve deprem izolatörlü olarak tasarlanan hastane binasının metraj hesapları Sta4CAD programı yardımıyla yapılmıştır. Her iki durum için de, ETABS ile belirlenen tasarım donatıları Sta4CAD programında oluşturulan hesap modeli elemanlarına atanmıştır ve bu yolla metraj özeti Sta4Cad çıktısı olarak alınmıştır. Alınan bu sonuçlar üzerinden maliyet kıyaslaması yapılmıştır. Metraj kıyaslamaları, beton, kalıp ve donatılar için ayrı ayrı sırasıyla Tablo 4' de verilmiştir. Deprem izolatörlü binada 44 adet izolatör kullanılmıştır. İzolatörler için 5000 $ / 1 adet kabulü yapılarak hesaplanan toplam maliyet kıyaslamalı olarak Tablo 5'de verilmiştir. İzolatörlerin adet fiyatı, uygulamada yaygın kullanılan markalardan biri referans alınarak ortalama bir değer olarak seçilmiştir. Burada yapılan maliyet kıyaslamasında taşıyıcı sistem özellikleri, eleman ebatlarının optimizasyonu, izolatör adet ve tipinin seçimi gibi değişkenler açısından detaylandırmalar yapılmamıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda genel bir sonuç elde etmek amaçlandığı için, yapısal ve tasarımsal detayların proje özelinde çok fazla değişkenlik gösterebileceği dikkate alınarak maliyet hesaplarında bu tür detaylandırmalardan kaçınılmıştır.

Tablo 4. Metraj ve maliyet hesapları (Cost assesment)

HASTANE YAPISI	Beton				Kalıp				Demir (Poz: 15.160.1004)			
	Miktar (m^3)	*Birim Fiyat (2024)*	Tutar (₺)	Oran	*Miktar (m^2)*	*Birim Fiyat (2024)*	Tutar (₺)	Oran	*Miktar (ton)*	Birim Fiyat (2024)	Tutar (₺)	Oran
İZOLATÖRLÜ	6781	2842.8	19.277	1.03	20707	634.51	13.138	0.93	935.7	32514.4	30.423	1.17
GELENEKSEL BETONARME	6585		18.719		22240		14.111		796.4		25.894	

Tablo 5. İzolatör maliyeti hesapları (Seismic isolator cost assesment)

HASTANE YAPISI	İzolatör Maliyeti		Toplam	
	Miktar (adet)	Birim Fiyat (2024)	**Fiyat**	**Oran**
İZOLATÖRLÜ	44	$5,000 ₺ 7,590,000	₺ 70,429,660	1.199
GELENEKSEL BETONARME			₺ 58,725,848	

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Çalışma kapsamında konu alınan bir hastane yapısı, ankastre mesnetli geleneksel betonarme sistem ve sürtünmeli sarkaç izolatörlü sistem olarak tasarlanmıştır. Yapısal davranış ile ilgili göstergeler olan, modal analiz verileri, taban ve kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, göreli kat ötelemeleri gibi parametreler karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, iki yönteme ait metrajlar da hesaplanarak sismik izolasyon uygulamasının maliyet açısından sonuçları görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgulara göre;

- Deprem izolatörlü sistemde hakim X ve Y yönü periyot değerleri 1 – 1.2s mertebelerinden 2.4 s mertebelerine uzamıştır. Tasarım spektrumu dikkate alındığında, bu durumun binaya aktarılacak olan deprem ivmelerini azalttığı sonucuna varılmaktadır.
- Modal sonuçlara göre, deprem izolatörlü sistemin hakim X ve Y yönü modlarına ait kütle katılım değerleri 0.97 mertebelerine ulaşmaktadır ki bu yapı davranışı açısından oldukça önemli bir durumdur. Geleneksel betonarme bina sisteminde hakim mod kütle katılımları 0.61-0.71 mertebelerindedir.
- Taban kesme kuvvetleri kıyaslandığında özellikle binanın alt katlarında geleneksel betonarme binanın kat kesme kuvvetlerinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- Geleneksel betonarme bina sistemi ile izolatörlü sistem kat ivmeleri kıyaslandığında, izolatörlü sistemdeki kat ivmelerinin beklenildiği üzere daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür.
- Göreli kat ötelemelerine bakılacak olursa, deprem izolatörlü sistemde göreli kat ötelemelerinin daha düşük olduğu görülmektedir ve dolayısıyla izin verilen limitlerin altında kalmak bu durumda daha kolay olmuştur. Geleneksel betonarme bina sisteminde göreli öteleme değerleri daha yüksektir. İzin verilen 0.008 değerinin altında kalınabilmesi için sistemde oldukça fazla miktarda ve uygun yerleşimde deprem perdelerinin kullanımı gerektiği açıktır.
- Sismik izolasyonlu modelde göreli kat ötemeleri ve kat ivmeleri daha düşük olduğundan, deprem etkisi bina tarafından daha az hissedilmekte, deprem izolasyon katı tarafından sönümlenmektedir. Geleneksel betonarme bina sisteminde, binaya aktarılan ivmeler bina taşıyıcı sistemi tarafından taşınmak durumundadır ki bu durum eleman kesit tesirlerinin artışına sebep olmaktadır.
- Kalıp metrajı kıyaslaması yapıldığında, her iki sistem için mertebelerin yine yakın olduğu görülmektedir ancak geleneksel betonarme bina sisteminde kalıp ihtiyacı %7 mertebelerinde daha fazladır.
- Donatı metrajlarına göre izolasyonlu sistemde donatı sarfiyatı %17 civarlarında daha fazla olmuştur. Bu durumun oluşmasında, bodrum ve zemin katlarda daha büyük kesitler kullanılması etkilidir.
- Maliyet açısından geleneksel betonarme bina sistemi ve izolatörlü sistemler beton, donatı, kalıp ve izolatör elemanlarının toplam maliyeti üzerinden kıyaslanırsa izolasyon uygulanan sistemin, geleneksel betonarme bina sistemine göre %20 oranında daha maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır.
- Sonuç olarak %20 mertebelerindeki bir maliyet artışına yol açsa da, izolasyon uygulaması yapılan hastane binasının olası tasarım depreminde hedeflenen sismik performansı sağlayacak şekilde tasarlanmasının yapısal davranış açısından oldukça olumlu katkılar sağladığı görülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Lee, PL., Mazeika, A., Hartman, C., Whittaker, A. ve Constantinou, MC. (2001). Seismic Isolation of an Internet Service Exchange Facility: Abovenet ISX-SF1. Structural Engineers Association of California 70 Annual Convention Proceedings, California, 67-86..

Wu, YM. ve Samali, B. (2002). Shake Table Testing of a Base Isolated Model. Engineering Structures, 24(9): 203-1215Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston: MA: Addison-Wesley Professional.

Türker, H. (2005). Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi. Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 65-87..

Tsai, C.S., Chen, W.S., Chen, B.J. ve Pong, W.S. (2006). Vertical Distributions of Lateral Forces on Base İsolated Structures Considering Higher Mode Effects. Structural Engineering and Mechanics, 23(5): 543-56.

Tokuç, M. (2008). Mevcut Betonarme Bir Okul Binasının Performasının Değerlendirilmesi ve Sismik İzolasyon Kullanılarak Güçlendirilmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Spyrakos, C.C., Maniatakis, C.A. ve Koutromanos, I.A. (2009). Soil-Structure Interaction Effects on Base Isolated Buildings Founded on Soil Stratum. Elsevier-Engineering Structures, 31: 729-737

Şirin, S. ve Boduroğlu, H. (2010). Sürtünme sönümlü elemanlı betonarme sistemlerin sismik performansı. İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi, İstanbul, 9(6), 169-177.

Şahin, M. (2020). Kauçuk İzolatörlü Bir Yapının Soğuk Hava Koşulları Etkisi Altındaki Modal Davranışının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. Erzurum: Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Toprak, T. (2012). Burulma Düzensizliği Olan Yapılarda Sismik İzolasyon Kullanımının Deprem Yükleri Altındaki Davranışa Olan Etkisi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Nasery, M. M., Ergün, M., Ateş, Ş. Ve Husem, M. (2015). Süneklik Düzeyi Yüksek Bir Binanın Dinamik Davranışına Deprem İzolatörlerinin Etkisinin Araştırılması. Conference: Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Mayıs.Wu, YM. ve Samali, B. (2002). Shake Table Testing of a Base Isolated Model. Engineering Structures, 24(9): 203-1215Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, Boston: MA: Addison-Wesley Professional.

Sevim, E. (2016). Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

UBC 97, (1997). Uniform Building Code 97. International Code Council, I. Baskı, Amerika Birleşik DevletleriSpyrakos, C.C., Maniatakis, C.A. ve Koutromanos, I.A. (2009). Soil-Structure Interaction Effects on Base Isolated Buildings Founded on Soil Stratum. Elsevier-Engineering Structures, 31: 729-737

Al-Ameeri, A. (2017). Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlü Çelik Binaların Deprem Analizi. Gaziantep: Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Zulfakar, M. (2021). Farklı Sürtünme Yüzeyli Sarkaç İzolatörlerin Yapı Deprem Davranışı Üzerındeki Etkilerinin İncelenmesi. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Yıldız, M. B. (2020). Sismik İzolatörlerin Farklı Konumlarının Binaların Dinamik Davranışlarına Etkisi. Bayburt: Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi

Asher, JW., Young, RP. Ve Ewing, RD. (2001). Seismic Isolation Design of the Arrowhead Regional Medical Center. Structural Design of Tall Buildings, 10(5): 321-334.

Ateş, Ş. ve Dumanoğlu, A. A. (2003). Kauçuk Mesnetli Binaların Dinamik Analizi. Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, İstanbul.

Castaldo, P., Palazzo, B. ve Vecciha, P.D. (2015). Seismic reliability of base-isolated structures with friction pendulum bearings. Dept. of Civil Engineering University of Salerno via Giovanni Paolo II, 80-93.

Hong, W.K. ve Kim, H.C. (2004). Performance of a Multi-Story Structure with a Resilient-Friction Base Isolation System. Elsevier-Computer and Structures, 82: 2271 228.

Shrimali, M.K., Bharti, S.D. ve Dumne, S.M. (2014). Seismic Response Analysis of Coupled Building Involving MR Damper and Elastomeric Base Isolation. Ain Shams Engineering Journal, 2(6): 457-470

Eniş, A. (2024). Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolatör Kullanımı ve Kullanıcı Tercihine Etkisi. İstanbul: Haliç Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, AFAD, İçişleri Bakanlığı, 2018, Ankara, Türkiye

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 582-593, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1645533

Araştırma Makalesi Research Article

IMPACT OF LOW-SEVERITY WILDFIRE ON LARGE WATER BODIES: WATER QUALITY AND DISINFECTION BY-PRODUCT PRECURSORS

Habibullah UZUN*

Department of Environmental Engineering, Istanbul Technical University, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Low-severity Fire, Water Quality, DBP, Chlorination, Chloramination.

Abstract

Most studies have focused on evaluating the impact of moderate-to-high-severity wildfires on various water quality (WQ) parameters in riverine systems. In contrast, this study investigates the effects of low-severity wildfires on selected WQ parameters and the formation potentials of selected disinfection by-products (DBPs) in a reservoir characterized by relatively low dissolved organic carbon (DOC) content in its water located downstream of a fire-impacted watershed. The results showed that post-fire initial flushes had a detrimental effect (i.e., increased turbidity [up to 150%], aromatic DOC [up to 98%], ammonia [up to 10 times] and reactive phosphorus [up to 113%], concentrations) in the headwater collecting the post-fire runoff across the burned watershed. The concentrations of DBP FPs (Trihalomethanes [THMs], haloacetic acids [HAAs] and Halonitromethanes [HANs]) were governed mainly by the DOC content of the water samples, except for N-nitrosodimethylamine (NDMA), regardless of the sample collection point. However, the impact of the fire was limited or had no effect on the water quality parameters at the drainage point of the reservoir, which was located on the opposite side of the headwaters. Moreover, the deterioration in the WQ of the headwaters significantly improved over 2-3 months, eventually reaching levels like those observed at the reservoir drainage point. Consequently, the findings of this study demonstrate that watersheds subjected to low-severity burns do not present significant or long-term water quality degradation in large downstream water bodies adjacent to the affected areas.

DÜŞÜK ŞİDDETLİ ORMAN YANGINLARININ BÜYÜK SU KÜTLELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: SU KALİTESİ VE DEZENFEKSİYON YAN ÜRÜNÜ ÖNCÜLLERİ

Anahtar Kelimeler

Düşük şiddetli yangınlar, Su kalitesi, DYU, Klorlama, Kloraminleme.

Öz

Literatürdeki çalışmalar, orta ve yüksek şiddetli orman yangınlarının akarsu sistemlerindeki çeşitli su kalitesi (SQ) parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeye odaklanmıştır. Buna karşılık, bu çalışma, yangından etkilenmiş bir havzanın aşağısında bulunan, nispeten düşük çözünmüş organik karbon (ÇOK) içeriğine sahip bir rezervuarda, düşük şiddetli orman yangınlarının seçili SQ parametreleri ve belirli dezenfeksiyon yan ürünleri (DYU) oluşum potansiyelleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Sonuçlar, yangın sonrası ilk yüzey suyu akışlarının, yanmış su toplama havzası boyunca gelen yüzey akışını toplayan derelerde su kalitesine olumsuz etki yaptığını göstermiştir. Özellikle bulanıklık (%150'ye kadar), aromatik ÇOK (%98'e kadar), amonyak (10 kata kadar) ve reaktif fosfor (%113'e kadar) konsantrasyonlarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Çalışmada değerlendirilen DBP oluşum potansiyellerinin (trihalometanlar [THM'ler], haloasetik asitler [HAA'lar] ve halonitrometanlar [HAN'lar]) konsantrasyonlarının, numune toplama noktalarından bağımsız olarak, temel olarak su numunelerinin ÇOK içeriği tarafından kontrol edildiği tespit edilmiştir. Ancak N-nitrosaminler (NDMA) için farklı bir eğilim gözlenmiştir. Bununla birlikte, düşük şiddetli yangının etkisinin rezervuarın çıkış noktasında sınırlı olduğu ya da SQ parametreleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, su kaynağındaki su kalitesinde meydana gelen bozulmanın, 2-3 ay içinde önemli ölçüde iyileşerek nihayetinde rezervuarın tahliye noktasında gözlemlenen seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmanın bulguları, düşük şiddetli yangınlara maruz kalan su toplama havzalarının, su sağladığı büyük su kütleli su toplama göletlerinde önemli bir su kalitesi değişimine yol açmadığını göstermiştir.

Alıntı / Cite

Uzun H., (2025). Impact Of Low-Severity Wildfire On Large Water Bodies: Water Quality And Disinfection By-Product Precursors, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 582-593.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
H. Uzun, 0000-0001-7675-0885	**Başvuru Tarihi / Submission Date**	23.02.2025
	Revizyon Tarihi / Revision Date	28.04.2025
	Kabul Tarihi / Accepted Date	20.05.2025
	Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili Yazar/Corresponding Author: uzunh@itu.edu.tr, +90 541 370 7748

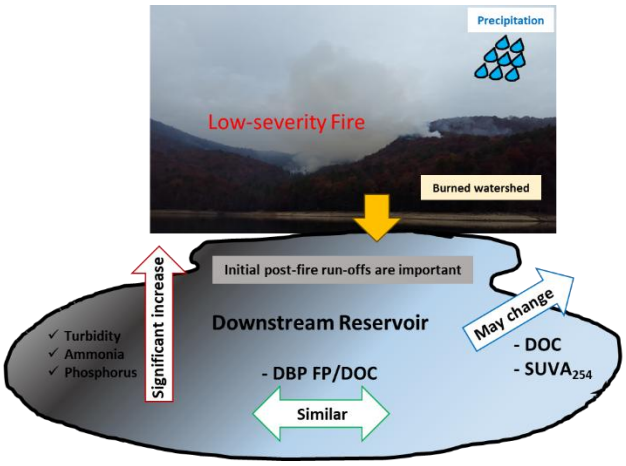
IMPACT OF LOW-SEVERITY WILDFIRE ON LARGE WATER BODIES: WATER QUALITY AND DISINFECTION BY-PRODUCT PRECURSORS

Habibullah UZUN †,
Department of Environmental Engineering, Istanbul Technical University, Türkiye

Highlights (At least three and a maximum of four sentences)

- Low-severity wildfires may affect water quality in streams, but the effects diminish quickly
- DOC mainly governs C-DBP precursor concentration fire-impacted water
- The release of ammonia, phosphorus and HAN precursors needs attention after wildfires
- Low-severity wildfires do not significantly affect water quality in large water reservoirs

Graphical Abstract (If applicable)



Purpose and Scope

The paper aims to enhance the understanding the responses of low-severity wildfires in large water bodies on water quality (WQ) and the precursors of DBPs.

Design/methodology/approach

The study effectively achieves its objectives by field sampling and laboratory analysis, considering both immediate and long-term impacts of water quality and DBP precursor concentration levels.

Findings

The findings suggest low-fire intensity fires may temporarily increase turbidity, DOC, ammonia and phosphorus in water bodies. However, such effects were short-lived and did not lead to a long-term deterioration of WQ in the larger reservoirs downstream. THMs, HAAs and HAN precursors are mainly driven by changes in DOC.

Research limitations/implications (if applicable)

Although the study contributed significantly to understanding the effects of low-severity fires on WQ and DBP precursors in large reservoirs, the results suggested further studies to improve knowledge in this critical field.

Practical implications (if applicable)

Research points to the need for adaptive water management practices, considering the temporary effects of low fire frequency on water quality.

Social Implications (if applicable)

This research can significantly impact society by shaping public attitudes toward fire management (i.e., prescribed [Rx] fires), informing policy decisions.

Originality

This paper provides new insights into the impacts of low-severity wildfires (LSWF) on WQ and DBP precursors`s concentration levels in large water bodies downstream. It gives valuable information to water managers, policymakers, and researchers.

† Corresponding author: uzunh@itu.edu.tr, +90 541 370 7748

1. Introduction

Forests cover over 30% of land worldwide (Perry et al., 1999; Shah et al., 2022). In addition to other benefits (i.e., biodiversity conservation, mitigating climate change, socioeconomic benefits), forested catchments, or forested watersheds, play a significant role in regulating water yield while maintaining its quality (Hampton et al., 2022; Matteo et al., 2006). Forest soil can filter pollutants, balance nutrient formation, and release from the system. Forested watersheds have been shown to reduce turbidity and suspended solids, nitrogen forms, and pathogens (Kalita and Harner, 1999; Mazumder et al., 2015; Singer and Brown, 2018). Consequently, keeping low turbidity and sediment and nutrient load can decrease the operational costs for water treatment. However, wildfires threaten forested catchments by altering land cover, hydrological balance and water quality (Chen and Chang, 2023; Hohner et al., 2019; Paul et al., 2022).

Wildfires can increase sediment transport and solids to nearby water sources. Additionally, wildfires can alter water quality (i.e., higher DOC, changing nitrogen balance, transport of PAHs, ash and mercury (Becker et al., 2018; Hohner et al., 2019; Ku et al., 2024; Rodríguez-Cardona et al., 2020; Uzun et al., 2020a), etc.) in streams impacted by wildfire. Furthermore, post-fire runoff events can enhance the transport of DBP precursors (THMs [Trihalomethanes], Haloacetic acids [HAAs], and haloacetonitriles [HANs]) from burned areas to regions downstream of the affected lands (Chen et al., 2021; Rodríguez et al., 2009; Uzun et al., 2020a). Such degradation can be more pronounced when the severity of fire is high, primarily due to loss of humus layer and ash formation during fires (McCullough et al., 2023; Schulze and Fischer, 2021).

Most studies examine wildfires' impact on water quality, and DBP precursors focus on moderate to high-severity fires, with samples collected from mostly river systems (Becker et al., 2018; Ferrer et al., 2021; Hauer and Spencer, 1998; Hickenbottom et al., 2023; Hohner et al., 2019, 2017, 2016; Uzun et al., 2020a; Writer et al., 2014). Consequently, to the best of my knowledge, research is needed about the effects of low-severity wildfires on both river systems and large water bodies that receive water from rivers flowing through affected areas. Therefore, the objectives of the study were (i) to evaluate the effect of low-severity wildfire on the post-fire runoff water (streams collecting runoff) and (ii) to assess the impact of runoff events on the water quality of a large reservoir located downstream of the burned areas.

Consequently, this study collected water samples from rivers and the large water bodies downstream following a low-severity wildfire that affected a part of the forested watershed—considering the limited and short-term detrimental impact of low-severity fires (i.e., prescribed (Rx) fires) on water quality (Battle and Golladay, 2003; Coates et al., 2017; Olivares et al., 2021, 2019; Orlova et al., 2020; Sakulich et al., 2022; Uzun et al., 2020; Wu et al., 2023). This study can guide water treatment plants, especially those using large water bodies as a source following low-intensity wildfires.

2. Materials and Methods

2.1. Wildfire Description. The study area is within the southern Appalachian Mountains, a physiographic province characterized by its remarkable biodiversity and vegetation (Lafon et al., 2017; Robbins et al., 2024). This area is characterized by a humid subtropical climate, receiving an average annual precipitation ranging from approximately 120 to 150 cm. This rainfall is relatively evenly distributed throughout the year, with peak amounts occurring in the spring and late summer (South Carolina Forestry Commission (SCFC), 2017; South Carolina State Climatology Office (SCSCO), 2017a). The elevation ranges from 300 to 1,000 meters above sea level, affecting orographic precipitation and resulting in complex hydrological patterns across the terrain (Reilly et al., 2022). In the early Fall of 2016, the combination of low humidity, strong winds, falling leaves, and abundant leaf litter created ideal conditions for the development of wildfires. On November 9, 2016, an escaped campfire became a wildfire called the Pinnacle Mountain Fire (Figure 1a). By November 12, the fire-affected area had exceeded 40 km². It continued to expand, ultimately encroaching upon Table Rock Reservoir—a primary drinking water source for one of the largest utilities in the southeastern United States (US). The authorities successfully contained the blaze on December 5, 2016 (SCFC, 2017). Following a post-fire assessment, it was observed that the areas affected by the fire were localized, influenced by varying wind directions and topographical features. Field observations and spatial analysis indicated that the fire predominantly exhibited low severity, primarily consuming surface litter and understory vegetation, while most overstory canopies remained largely unaffected (Lafon et al., 2017; Reilly et al., 2022). In areas subjected to more severe burning, there was a marked reduction in live vegetative cover and dead organic layers, particularly on exposed ridges and south-facing slopes, where fire intensity was locally intensified. In contrast, moist coves and north-facing slopes retained a significant amount of pre-fire litter and shrub structure. The burn coverage within the watershed was heterogeneous: approximately 70–80% of the northern watershed and 40–50% ([fire-affected area]/[total area] × 100) of the southern portion were burned, resulting in an average watershed burn coverage of 61%. This affected a 19 km² area, which experienced low-severity burning within the 31 km² watershed (Figure 2a)(Lafon et al., 2017; Reilly et al., 2022; Robbins et al., 2024; South Carolina Forestry Commission (SCFC), 2017; Trickett, 2018).

2.2. Water Sample Collection and Reservoir Evaluation. Sampling sites were carefully selected to investigate the streams that supply the reservoir and traverse regions impacted by wildfire. This methodology facilitates the comparison of water quality at the reservoir's opposite end, where the intake location of drinking water was operated. Therefore, three sampling locations were determined (Figure 2a) to assess the effects of the Pinnacle Mountain Fire on the reservoir's water quality. Following the containment of the fire, water samples were collected for six months from the mixing point of the reservoir, with two main headwaters (the South Saluda River [SSR] and Slicking Creek [SC]) receiving water from tributaries traversing the burned watershed. Coordinates of sampling points and the long-term flow conditions of streams are as follows: SSR: 35°03'41.3"N; 82°42'06.8" W (mean flow:1.03 m^3/s) and SC: 35°03'58.9"N: 82°41'51.1"W (mean flow: 0.34 m^3/s). In addition, another set of water samples was collected from the outlet of the reservoir (35°03'54.4"N 82°40'20.8" W), where the intake construction of the utility is located (Plant Intake [PI]). Water Evaluation and Planning (WEAP) software was used for watershed evaluation (Figure 1b). According to the assessment, the reservoir covers an area of approximately 40 km^2, reaches a depth of 38 m, and holds up to 36 million m^3 of water. Considering the headwater's average mean flows and the reservoir volume and neglecting all other hydrological factors, this reservoir can be filled by these two headwaters for 6–8 months.

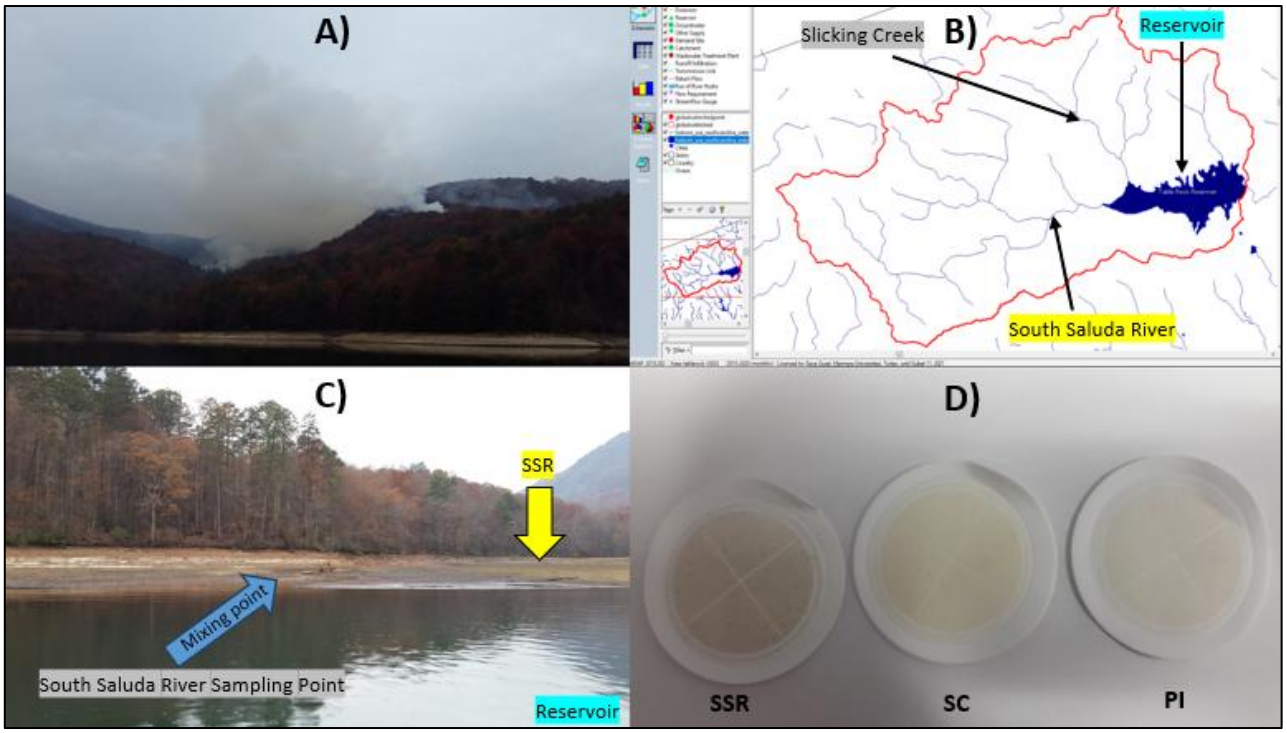


Figure 1. Image of the Watershed during a Fire Event (a), Image of the Reservoir Generated by Water Evaluation and Planning (WEAP) Software) (b) The sample collection point of South Saluda River (SSR) (c) and 0.45 µm PES filters were used to process initial flush samples obtained from SSR, Slicking Creek (SC) and Plant Intake (PI) (d).

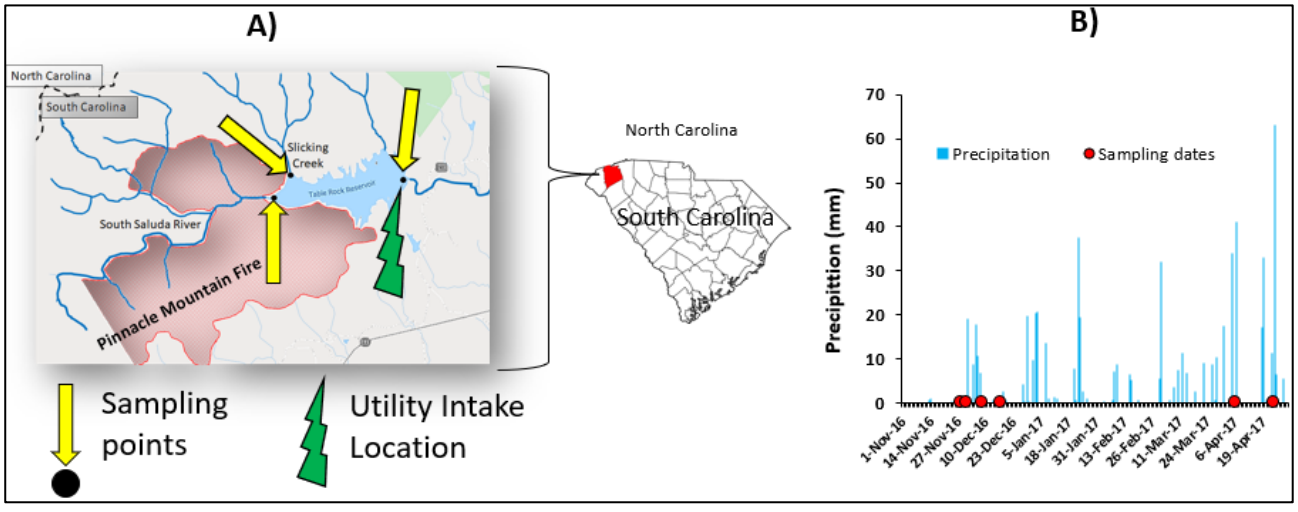


Figure 2. Pinnacle Mountain Fire boundaries (demarcated by reddish-colored areas) and location of Table Rock Reservoir South Carolina Map (a), and daily precipitation recorded in the area after the fire event and sampling dates (b).

The impact of the fire at the designated sampling points was compared with water samples collected (November 28, 2016) from the same sampling points (non-impacted reference samples under base-flow conditions) before the first major post-fire storm event. Recently, Uzun and colleagues (2020) indicated that wildfires could generate more aromatic and mobile organic carbon, which drained from burned areas for a relatively short period (<1 year), and that initial flushes are critical for evaluating such water quality changes in fire-impacted water sources. Therefore, grab water samples were collected over six months, encompassing the consecutive winter and spring seasons of 2016-2017. The total precipitation in the region was 2, 92, 137, 29, 116, and 213 mm in November 2016, December 2016, January 2017, February 2017, and March and April 2017, respectively (Figure 2b)(National Weather Service (NWS), 2017b). Samples were collected via boat (please refer to Figure 1c for a representative image of the SSR sample collection site) from pre-determined points after five rainfall events (three initial flushes [December 1, 8, and 17, 2016] and two delayed flushes [April 6 and 24, 2017]) in addition to base flow samples (Figure 2b)(National Weather Service (NWS), 2017b).

2.3. Water Quality Analysis. Duplicate grab water samples were collected in 1000 mL of pre-washed amber glass bottles and delivered to the laboratory in an ice-filled cooler. Immediately after arrival in the laboratory, samples were filtered with 0.45 µm polyethersulfone (PES) membranes (please refer to Figure 1d for illustrative example an illustrative image of PES filters after filtration of initial flushes from selected sampling locations) (all membranes were cleaned by passing ≥500 mL of distilled and deionized water [DDW] before use) except turbidity samples and stored in the refrigerator below 4 °C in the dark until analysis and then, selected water quality (WQ) parameters: turbidity, conductivity, apparent color, pH, reactive phosphorus, dissolved organic carbon (DOC), and specific ultraviolet absorbance ($SUVA_{254,}$ which is used to describe the aromaticity of dissolved organic matter [DOM] were calculated using the following formula: UV_{254}/DOC × 100 [L/mg-m]), total nitrogen [DN], inorganic nitrogen forms [ammonia, nitrate, nitrite], and dissolved organic nitrogen [DON][calculated]). All these WQ parameters, bromide ion and selected elements were quantified by using the same methods that have already been published elsewhere (Majidzadeh et al., 2020, 2019a, 2019b, 2017; Olivares et al., 2021; Uzun et al., 2019, 2018). Dissolved organic nitrogen (DON) was calculated using the following formula: DN - (Ammonia-N + Nitrate-N + Nitrite-N), and only the samples were used where DON/DN was ≥40% (Lee and Westerhoff, 2005; Majidzadeh et al., 2020, 2017; Ruecker et al., 2017; Uzun et al., 2019).

2.4. DBP Formation Potential (FP) Tests. Formation potentials of selected disinfection by-products (DBP FPs) (regulated carbonaceous [C-DBPs]: THMs and HAAs, unregulated DBPs: haloacetonitriles [HANs], and N-nitrosodimethylamine [NDMA]) were determined for each sample as described in our previously published studies elsewhere (Chen et al., 2023; Majidzadeh et al., 2017; Olivares et al., 2021; Uzun et al., 2017, 2015). C-DBPs were quantified following excess chlorine addition, while nitrogenous-DBPs (N-DBPs) and THMs were quantified after excess chloramine addition to the 0.45 µm PES membrane-filtered samples. After a pre-determined oxidation period, the residual oxidants in the samples were quenched with slightly more ascorbic acid than the stoichiometric amount needed. Then, liquid-liquid extractions were performed following USEPA method 552.2 and USEPA method 551.1 for HAAs and other volatile DBPs, respectively. Subsequently, the DBPs were quantified using an Agilent GC-ECD. To analyze NDMAs, a predetermined amount of sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) (slightly higher than the $Na_2S_2O_3/NH_2Cl$ molar ratio of 4:1) was added to the samples to quench residual chloramine. After quenching, the samples were subjected to a solid phase extraction (SPE) process following the USEPA Method 521. Subsequently, an Agilent GC-MS/MS system was used to measure and quantify the target DBP.

3. Results and Discussions

3.1 Release of Suspended Solids and Aromatic Carbon. Before the rainy season after the fire (baseline or reference water [RW] sample), the turbidity and apparent color values at all sampling sites were ≤1.7 NTU and ≤30 Pt-Co (Figure 3a). Because SC was collecting water from mostly unburned or slightly burned portions of the watershed, the effect of fire was limited (turbidity = 2.2 NTU and color 45 Pt-Co) compared to PI (turbidity = 1.6 NTU and color 39 Pt-Co) and RW samples. However, the impact of fire was apparent in the SSR samples, which drain water from more extensively burned areas. During the first post-fire flush, higher values were measured in the SSR samples (turbidity = 4.8 NTU and color 71 Pt-Co). These higher values show that the first post-fire surface runoff started the release of more suspended eroded particles from the barren soils of the burned areas. This finding was consistent with those of other fire studies that showed substantial flushing of sediments during the first storm events following wildfires in riverine systems (Hohner et al., 2019; Paul et al., 2022; Raoelison et al., 2023; Tran et al., 2021). Nevertheless, these parameters did not show significant alterations during the later flushes at any sample collection point, and the low-severity fire (LSWF) did not significantly affect the water quality of the large reservoir located downstream of the fire-affected river.

In the RW sample, DOC concentrations were comparable in all samples (1.55±0.05 mg/L, Figure 3b). As with the solid releasing trends, the SSR sample had a 55% higher DOC content with 40% higher aromaticity during the first post-fire runoff. Except for the third flush (January 17, 2017), DOC concentrations and $SUVA_{254}$ values were not significantly different in any sample (SSR, SC vs. PI or SW) during the later flushes. This could be related to the delayed transport of DOC from the fire-impacted parts of the watershed. These observations confirm that fires can increase the release of more aromatic pyrogenic DOC (PyC), but this effect diminishes rapidly depending on the severity of the fire and hydrological

conditions (Hickenbottom et al., 2023; Hohner et al., 2016; Li et al., 2023; Uzun et al., 2020a). The higher aromaticity in SSR water during the first flush of sampling may be related to the formation of newly generated aromatic/hydrophobic compounds during a fire (Jin et al., 2023; Kieta et al., 2023), the rapid removal of such compounds by erosion/leaching processes, or the mobilization of carbon pools in the system. This might be related to increased soil erosion, primarily due to the reduction of vegetation cover and alterations in soil composition (Girona-García, 2024). It is known that the movement of pyrogenic carbon (PyC) through erosion and leaching is important for spreading carbon across landscapes. This also affects how these new aromatic compounds move into water systems (Abney and Berhe, 2018). As this study does not aim to investigate aromatic PyC compounds directly, their presence can only be inferred through specific indicators such as turbidity and $SUVA_{254}$. Consequently, the findings suggest that the effects of low-severity wildfires diminished over time due to dilution within a large reservoir.

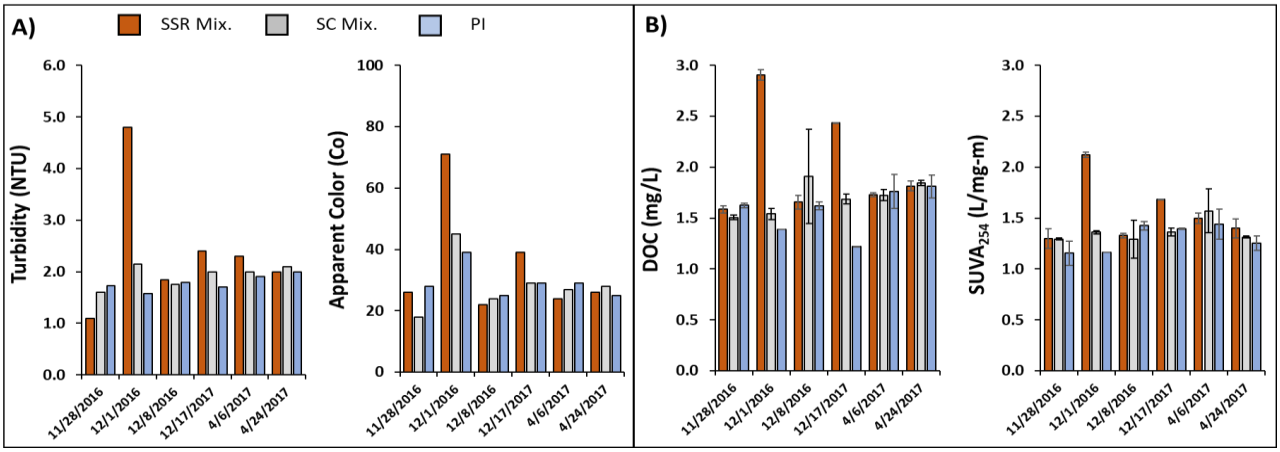


Figure 3. Changes in turbidity and apparent color (a), DOC and $SUVA_{254}$ (b) in SSR, SC, and PI point samples. Samples collected on 11/28, 2016, were used as a Reference Water (RW). The samples' turbidity and apparent color values were measured only once to conserve water for further DBP and WQ analysis, preventing standard deviation calculation.

3.2. Nitrogen Forms and Phosphorus. Studies have shown that DN and DON concentrations can decrease ash- and fire-affected soil leachates. This decrease can be attributed to several factors associated with the chemical and physical alterations in soils post-fire. These alterations include changes in soil pH (Buts et al., 2023), nutrient availability (Agbeshie et al., 2022), and the presence of adsorptive materials such as charcoal and ash (Faridullah et al., 2017; Fernandez-Marcos, 2022), which can influence the leaching behavior of nitrogen compounds. The interaction of these factors diminishes the leachability of nitrogen, resulting in lower DN and DON concentrations in soil leachates. However, other studies have reported higher DN, DON, and NH_4^+ concentrations in stream water following wildfires (Bladon et al., 2008; Hickenbottom et al., 2023; Paul et al., 2022; Rodríguez et al., 2009; Uzun et al., 2020). In this study, TDN concentrations were comparable (0.19-0.23 ±0.04 mg/L) (Figure 4a) and consisted of DON (DON/DN ratio was 0.64-0.77 mg/mg) in RW samples (DON =0.12-0.17 mg/L) (Figure 4a and b). Concentrations of other inorganic nitrogen were also comparable (nitrate [NO_3^- = 0.03 ±0.01 mg/L as nitrogen] and nitrite [NO_2^- =0.005 ±0.001 mg/L as nitrogen]) (data not shown), showing similar nitrogen content in RW samples. As shown in previous studies, the DON/DN ratio decreased due to an increase in organic nitrogen concentration in samples (Näthe et al., 2018; Rodríguez-Cardona et al., 2020); in this study, the higher DON concentration was observed during the initial flush, exclusively in SSR samples. However, there was no clear trend in the content of DON during the later flushes. Similarly, during the post-fire initial flushes, the DN value (0.41 mg/L vs. 0.19 mg/L and 0.18 mg/L for SSR, SC and PI, respectively) increased significantly; however, this was primarily due to a substantial increase in ammonia-N concentration in SSR samples only (0.18 vs. 0.015 and 0.010 mg/L for SSR, SC and PI, respectively) (Figure 4c) rather than DON change. Nonetheless, the effect of fire on the different forms of nitrogen diminished rapidly and the nitrogen content of the samples was comparable, with a couple of exceptions in all samples during later flushes. These results further confirm that NH_4^+ accumulates in ashy materials following fires, is quickly mobilized, and is transported via surface run-off/erosion (Bladon et al., 2008; Paul et al., 2022; Raoelison et al., 2023; Uzun et al., 2020). In addition, DON concentration was comparable in RW samples (0.12-0.17 mg/L). Therefore, nitrogen content can increase due to ammonia in fire-impacted waters. However, the degree of increase and its effect are related to the severity of the fire. Finally, concentrations of reactive phosphorus exhibited an increase exceeding 100% during initial flushes (Figure 4d) exclusively in SSR samples, indicating that fire events can facilitate phosphorus release during post-fire runoff (Emelko et al., 2016; Ijaz et al., 2022; McCullough et al., 2023). Due to the evidence of the rise in ammonia and reactive phosphorus during post-fire runoff, possible algal blooms and oxygen depletion may impact aquatic life and water quality (Bertani et al., 2016; Ho and Michalak, 2017). Therefore, it is essential to understand these dynamics to create efficient water management plans, particularly after high-severity wildfires impact water sources.

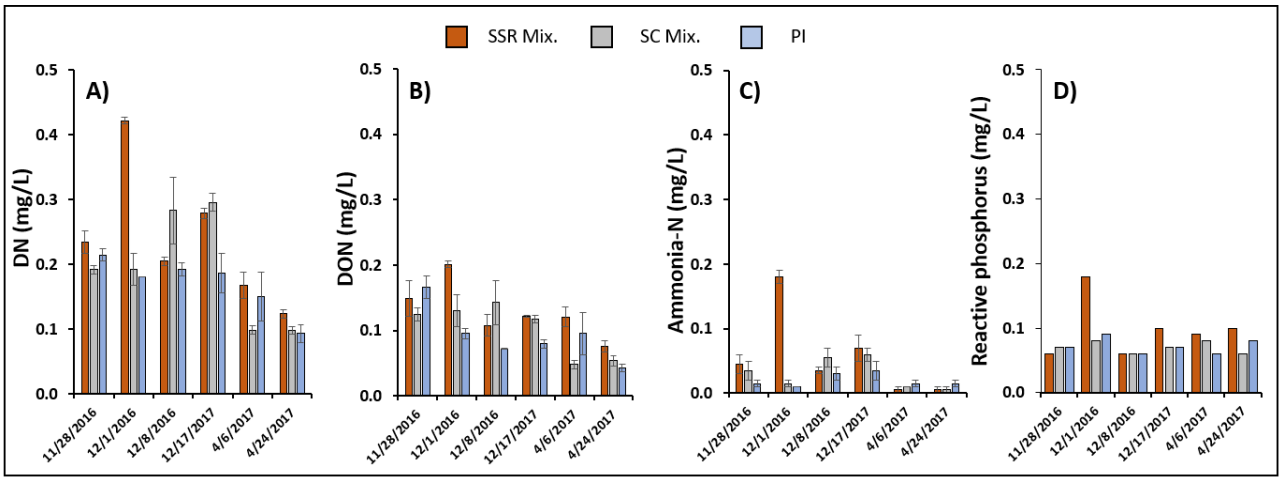


Figure 4. Changes in TDN (a), DON (b), ammonia as N (c) and reactive phosphorus (d) in SSR, SC, and PI point samples. Samples collected on 11/28, 2016, were used as a RW.

3.3. Regulated emerging DBP FPs under Chlorination and Chloramination. THM FP and HAA FPs were investigated under chlorination conditions. The results showed that THM and HAA precursor concentrations were 49, 46, and 51 µg/L and 38, 41, and 44 µg/L SSR, SC, and PI, respectively. The average THM and HAA concentrations in the SC and PI samples were comparable during the first flush. However, the SSR samples had higher average THM and HAA FP values (102 and 97 µg/L, respectively) (Figure 5a and b). THM FP and HAA FP values were not significantly different in any sample ($p>0.05$) (SSR, SC vs. PI or SW) during the later flushes except for the third flush. Furthermore, DOC vs. THM FP and HAA FP correlations were strongly positive ($R^2 \geq 0.7$), particularly in SSR samples (data not shown). Therefore, increased THM FP and HAA FP were associated with higher DOC concentrations in the SSR samples. DOC normalized concentrations were calculated to examine the reactivity of DBP precursors per unit of carbon (Figure 5c and d). The results showed that the carbon-normalized average reactivity and variability of the THM and HAA precursors were within a similar range for all samples except for the third flush. As shown previously, this can be related to the delayed transport of DOC from more extensively burned areas. These data are consistent with earlier studies showing that low to medium-severity wildfires do not significantly affect the carbon-normalized reactivity of C-DBP precursors. Therefore, the increase in THM and HAA precursor concentrations was due to the enhanced mobility of DOC, particularly during the first post-fire runoff event (Hickenbottom et al., 2023; Hohner et al., 2016; Uzun et al., 2020; Writer et al., 2014).

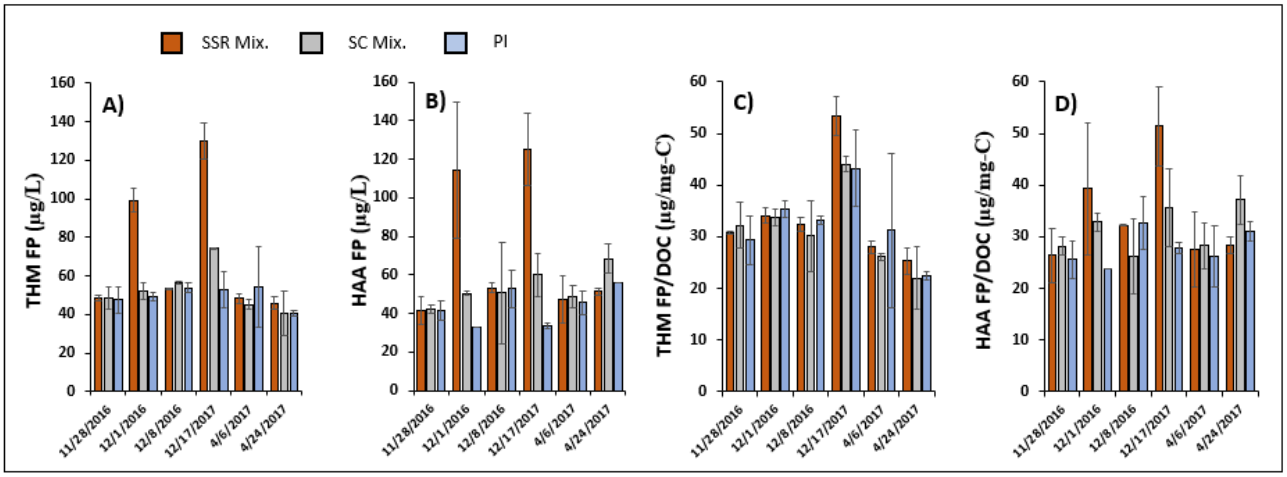


Figure 5. Changes in regulated DBPs (THM FP [a] and HAA FP [b]) and carbon-normalized THM FPs (c) and THM FPs (d) values for SSR, SC and PI point samples under chlorination.

THMs FP, HANs FP and NDMA FPs were also investigated under chloramination conditions (Figure 6). In general, the results showed: i) the THM FP levels were significantly lower than the chlorination THM FP levels (chloramination THM FP/ chlorination THM FP were between 5-16 %), ii) the DOC concentration mainly governed the precursor concentration levels of THM FP and HANs (Figure 6a and b), and iii) carbon-normalized values were generally comparable for all types of tested DBPs (Figure 6d and e). Therefore, given the significantly lower THM FP, chloramination is a practical choice for treating fire-impacted waters. However, considering the possible formation of HANs and significantly higher

cytotoxicity of HANs compared to THMs (Lau et al., 2020; Liu et al., 2022; Richardson et al., 2007; Wagner and Plewa, 2017). These findings suggest that when fire-impacted water undergoes treatment for potable use under chloramination conditions, further optimization of oxidation conditions may be needed to minimize HAN formation in treated waters (Chen et al., 2020).

A recently published study showed that NDMA FP levels could be higher in fire-impacted samples, and this increase may be explained by using anthropogenic fire suppressants during the fire (Uzun et al., 2020). Moreover, it is well known that NDMA FP does not correlate with DOC or DON (Uzun et al., 2015; Yang et al., 2015) and several known precursors are anthropogenically derived (Ruecker et al., 2017). In this study, NDMA FP values (Figure 6c) were comparable in all samples and did not correlate strongly with water quality parameters, including DOC and DON. This finding also proves that low-severity fires do not induce significant alterations in DBP precursors (Majidzadeh et al., 2015a, 2015b; Olivares et al., 2019; Uzun et al., 2020).

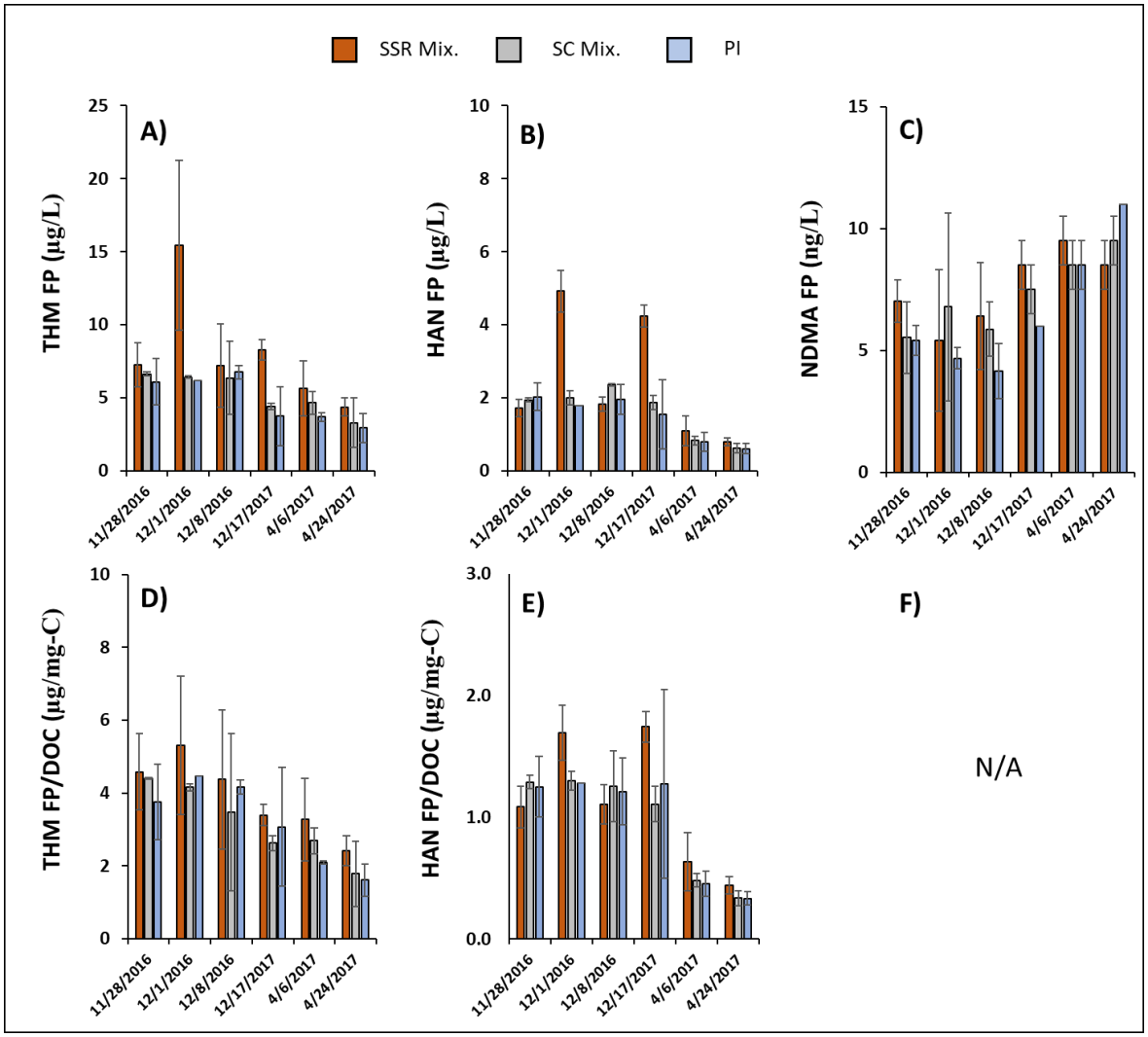


Figure 6. Changes in DBPs (THM FP [a] and HAN FP [b]), NDMA FP (c) and carbon-normalized THM FPs (d), HAN FPs (e) values for SSR, SC and PI point samples under chloramination. N/A= Not applicable.

4. Conclusion and Implications

Wildlife is among the most noteworthy events that can alter the water quality of forested watersheds. Increased fire severity and proportion of affected watersheds can adversely impact downstream aquatic ecosystems. Consequently, changes in water quality are a substantial concern for most water utilities. This study showed that LSWF can cause short-term increases in turbidity, DOC, ammonia and phosphorus levels in fire-impacted waters. Consequently, it can be inferred that there is a short-term risk of eutrophication due to promoted algae development and reduced light penetration in the lake (Ginger et al., 2017; Hauer and Spencer, 1998; Son et al., 2015; Wang et al., 2020). However, this depends on the lake's size and water temperature. Therefore, lake users must remain vigilant regarding the potential for algal proliferation, notoriously following the initial wet period of spring months. The study does not address sediment accumulation and the potential consequences of deposited sediments, as these aspects fall outside its scope. Nonetheless,

the WQ results above can be ascribed to large water bodies capable of mitigating the detrimental effects of low-severity fires. Regarding DBP precursors, post-fire runoff can increase the concentration of THM, HAA, and HAN precursors, which are primarily governed by DOC changes with insignificant changes in DOC-normalized DBP FP values. Nevertheless, water utilities must be prepared for elevated levels of suspended solids, higher DOC, altered nitrogen forms, and treatability challenges if the proportion of burned watersheds is high and the severity of the fire is medium to high. Considering these observations and potential additional benefits of prescribed (Rx) fires (such as increased watershed resilience against wildfires, lower DOC and DN concentrations in source waters [Battle and Golladay, 2003; Clay et al., 2010; Coates et al., 2017; Olivares et al., 2021, 2019; Orlova et al., 2020; Uzun et al., 2020]), water utilities may consider implementing low-severity Rx fires to manage fuel accumulation in their watersheds without changing their water quality significantly.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

No conflict of interest was declared by the authors.

References

Abney, R.B., Berhe, A.A., 2018. Pyrogenic carbon erosion: Implications for stock and persistence of pyrogenic carbon in soil. Front Earth Sci (Lausanne). https://doi.org/10.3389/feart.2018.00026

Agbeshie, A.A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., Awuah, R., 2022. A review of the effects of forest fire on soil properties. J For Res (Harbin). https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4

Battle, J., Golladay, S.W., 2003. Prescribed fire's impact on water quality of depressional wetlands in southwestern Georgia. American Midland Naturalist 150, 15–25. https://doi.org/10.1674/0003-0031(2003)150[0015:PFIOWQ]2.0.CO;2

Becker, W.C., Hohner, A., Rosario-Ortiz, F., DeWolfe, J., 2018. Preparing for Wildfires and Extreme Weather: Plant Design and Operation Recommendations. J Am Water Works Assoc 110, 32–40. https://doi.org/10.1002/awwa.1113

Beita-Sandí, W., Ersan, M.S., Uzun, H., Karanfil, T., 2016. Removal of N-nitrosodimethylamine precursors with powdered activated carbon adsorption. Water Res 88. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.062

Bertani, I., Obenour, D.R., Steger, C.E., Stow, C.A., Gronewold, A.D., Scavia, D., 2016. Probabilistically assessing the role of nutrient loading in harmful algal bloom formation in western Lake Erie. J Great Lakes Res 42. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.04.002

Bladon, K.D., Silins, U., Wagner, M.J., Stone, M., Emelko, M.B., Mendoza, C.A., Devito, K.J., Boon, S., 2008. Wildfire impacts on nitrogen concentration and production from headwater streams in southern Alberta's Rocky Mountains. Canadian Journal of Forest Research 38, 2359–2371. https://doi.org/10.1139/X08-071

Buts, Y., Kraynyuk, O., Senchykhin, Y., 2023. HEAVY METALS IN SOILS OF PINE FORESTS AFTER PYROGEN INFLUENCE. Sloboda Scientific Journal. Natural Sciences. https://doi.org/10.32782/naturalspu/2023.1.1

Chen, H., Tsai, K.P., Liu, Y., Tolić, N., Burton, S.D., Chu, R., Karanfil, T., Chow, A.T., 2021. Characterization of Dissolved Organic Matter from Wildfire-induced Microcystis aeruginosa Blooms controlled by Copper Sulfate as Disinfection Byproduct Precursors Using APPI(-) and ESI(-) FT-ICR MS. Water Res 189. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116640

Chen, H., Uzun, H., Chow, A.T., Karanfil, T., 2020. Low water treatability efficiency of wildfire-induced dissolved organic matter and disinfection by-product precursors. Water Res 184. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116111

Chen, H., Uzun, H., Tolić, N., Chu, R., Karanfil, T., Chow, A.T., 2023. Molecular Transformation of Dissolved Organic Matter during the Processes of Wildfire, Alum Coagulation, and Disinfection Using ESI(−) and ESI(+) FT-ICR MS. ACS ES and T Water 3. https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00135

Chen, J., Chang, H., 2023. A review of wildfire impacts on stream temperature and turbidity across scales. Prog Phys Geogr 47. https://doi.org/10.1177/03091333221118363

Clay, G.D., Worrall, F., Rose, R., 2010. Carbon budgets of an upland blanket bog managed by prescribed fire. J Geophys Res Biogeosci 115. https://doi.org/10.1029/2010JG001331

Coates, T.A., Chow, A.T., Hagan, D.L., Wang, G.G., Bridges, W.C., Dozier, J.H., 2017. Frequent Prescribed Burning as a Long-term Practice in Longleaf Pine Forests Does Not Affect Detrital Chemical Composition. J Environ Qual 46, 1020–1027. https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0112

Emelko, M.B., Stone, M., Silins, U., Allin, D., Collins, A.L., Williams, C.H.S., Martens, A.M., Bladon, K.D., 2016. Sediment-phosphorus dynamics can shift aquatic ecology and cause downstream legacy effects after wildfire in large river systems. Glob Chang Biol 22, 1168–1184. https://doi.org/10.1111/gcb.13073

Faridullah, Malik, N., Fareed, I., Irshad, M., 2017. Reducing the leachability of nitrate, phosphorus and heavy metals from soil using waste material. Brazilian Journal of Chemical Engineering 34. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150617

Fernandez-Marcos, M.L., 2022. Potentially Toxic Substances and Associated Risks in Soils Affected by Wildfires: A Review. Toxics. https://doi.org/10.3390/toxics10010031

Ferrer, I., Thurman, E.M., Zweigenbaum, J.A., Murphy, S.F., Webster, J.P., Rosario-Ortiz, F.L., 2021. Wildfires: Identification of a new suite of aromatic polycarboxylic acids in ash and surface water. Science of the Total Environment 770. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144661

Ginger, L.J., Zimmer, K.D., Herwig, B.R., Hanson, M.A., Hobbs, W.O., Small, G.E., Cotner, J.B., 2017. Watershed vs. within-lake drivers of nitrogen: Phosphorus dynamics in shallow lakes: Phosphorus. Ecological Applications 27. https://doi.org/10.1002/eap.1599

Girona-García, A., V.D., D.S., P.P., and S.C., 2024. Into the unknown: The role of post-fire soil erosion in the carbon cycle. Glob Chang Biol 30.

Hampton, T.B., Lin, S., Basu, N.B., 2022. Forest fire effects on stream water quality at continental scales: A meta-analysis. Environmental Research Letters 17. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6a6c
Hauer, F.R., Spencer, C.N., 1998. Phosphorus and nitrogen dynamics in streams associated with wildfire: A study of immediate and longterm effects. Int J Wildland Fire 8. https://doi.org/10.1071/WF9980183
Hickenbottom, K., Pagilla, K., Hanigan, D., 2023. Wildfire impact on disinfection byproduct precursor loading in mountain streams and rivers. Water Res 244. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120474
Ho, J.C., Michalak, A.M., 2017. Phytoplankton blooms in Lake Erie impacted by both long-term and springtime phosphorus loading. J Great Lakes Res 43. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.04.001
Hohner, A., 2024. Wildfire Impacts on Water Quality & Treatment Rogue River Basin. Source Water Protection Workshop.
Hohner, A.K., Cawley, K., Oropeza, J., Summers, R.S., Rosario-Ortiz, F.L., 2016. Drinking water treatment response following a Colorado wildfire. Water Res 105, 187–198. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.034
Hohner, A.K., Rhoades, C.C., Wilkerson, P., Rosario-Ortiz, F.L., 2019. Wildfires Alter Forest Watersheds and Threaten Drinking Water Quality. Acc Chem Res 52, 1234–1244. https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00670
Hohner, A.K., Terry, L.G., Townsend, E.B., Summers, R.S., Rosario-Ortiz, F.L., 2017. Water treatment process evaluation of wildfire-affected sediment leachates. Environ Sci (Camb) 3, 352–365. https://doi.org/10.1039/c6ew00247a
Ijaz, A., Kew, W., China, S., Schum, S.K., Mazzoleni, L.R., 2022. Molecular Characterization of Organophosphorus Compounds in Wildfire Smoke Using 21-T Fourier Transform-Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. Anal Chem 94. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c00916
Jin, H., Yuan, W., Li, W., Yang, J., Zhou, Z., Zhao, L., Li, Y., Qi, F., 2023. Combustion chemistry of aromatic hydrocarbons. Prog Energy Combust Sci. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101076
Kalita, P.K., Harner, J.P., 1999. Vegetative filters for improving environmental quality (1999). Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports. https://doi.org/10.4148/2378-5977.1841
Kieta, K.A., Owens, P.N., Petticrew, E.L., French, T.D., Koiter, A.J., Rutherford, P.M., 2023. Polycyclic aromatic hydrocarbons in terrestrial and aquatic environments following wildfire: a review. Environmental Reviews. https://doi.org/10.1139/er-2022-0055
Ku, P., Tsui, M.T.K., Uzun, H., Chen, H., Dahlgren, R.A., Hoang, T.C., Karanfil, T., Zhong, H., Miao, A.J., Pan, K., Coleman, J.S., Chow, A.T.S., 2024. Dominance of Particulate Mercury in Stream Transport and Rapid Watershed Recovery from Wildfires in Northern California, USA. Environ Sci Technol. https://doi.org/10.1021/acs.est.4c09364
Lafon, C.W., Naito, A.T., Grissino-Mayer, H.D., Horn, S.P., Waldrop, T.A., 2017. Fire History of the Appalachian Region: A REVIEW AND SYNTHESIS.
Lau, S.S., Wei, X., Bokenkamp, K., Wagner, E.D., Plewa, M.J., Mitch, W.A., 2020. Assessing Additivity of Cytotoxicity Associated with Disinfection Byproducts in Potable Reuse and Conventional Drinking Waters. Environ Sci Technol 54, 5729–5736. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00958
Lee, W., Westerhoff, P., 2005. Dissolved organic nitrogen measurement using dialysis pretreatment. Environ Sci Technol 39. https://doi.org/10.1021/es048818y
Li, Z., Samonte, P.R. V., Cao, H., Miesel, J.R., Xu, W., 2023. Assess the formation of disinfection by-products from pyrogenic dissolved organic matter (pyDOM): impact of wildfire on the water quality of forest watershed. Science of the Total Environment 898. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165496
Liu, J., Ling, L., Hu, Q., Wang, C., Shang, C., 2022. Effects of operating conditions on disinfection by-product formation, calculated toxicity, and changes in organic matter structures during seawater chlorination. Water Res 220. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118631
Majidzadeh, H., Chen, H., Coates, T.A., Tsai, K.-P., Olivares, C.I., Trettin, C., Uzun, H., Karanfil, T., Chow, A.T., 2019a. Long-term watershed management is an effective strategy to reduce organic matter export and disinfection by-product precursors in source water. Int J Wildland Fire. https://doi.org/10.1071/WF18174
Majidzadeh, H., Chen, H., Coates, T.A., Tsai, K.-P., Olivares, C.I., Trettin, C., Uzun, H., Karanfil, T., Chow, A.T., 2019b. Corrigendum: Long-term watershed management is an effective strategy to reduce organic matter export and disinfection by-product precursors in source water (International Journal of Wildland Fire (2019) 28 (804-813) DOI: 10.1071/WF18174). Int J Wildland Fire 28. https://doi.org/10.1071/WF18174_CO
Majidzadeh, H., Uzun, H., Chen, H., Bao, S., Tsui, M.T.-K., Karanfil, T., Chow, A.T., 2020. Hurricane resulted in releasing more nitrogenous than carbonaceous disinfection byproduct precursors in coastal watersheds. Science of the Total Environment 705. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135785
Majidzadeh, H., Uzun, H., Ruecker, A., Miller, D., Vernon, J., Zhang, H., Bao, S., Tsui, M.T.K., Karanfil, T., Chow, A.T., 2017. Extreme flooding mobilized dissolved organic matter from coastal forested wetlands. Biogeochemistry 136. https://doi.org/10.1007/s10533-017-0394-x
Majidzadeh, H., Wang, J.-J., Chow, A.T., 2015a. Prescribed Fire Alters Dissolved Organic Matter and Disinfection By-Product Precursors in Forested Watersheds-Part I. A Controlled Laboratory Study.
Majidzadeh, H., Wang, J.-J., Chow, A.T., 2015b. Prescribed Fire Alters Dissolved Organic Matter and Disinfection By-Product Precursors in Forested Watersheds-Part I. A Controlled Laboratory Study.
Matteo, M., Randhir, T., Bloniarz, D., 2006. Watershed-Scale Impacts of Forest Buffers on Water Quality and Runoff in Urbanizing Environment. J Water Resour Plan Manag 132. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2006)132:3(144)
MAZUMDER, A., CHATTERJEE, D., BISWAS, M., KUMAR, P., 2015. Impact of Forest Intervention on Water and Soil Quality Case Studies. https://doi.org/10.15224/978-1-63248-084-2-38
McCullough, I.M., Brentrup, J.A., Wagner, T., Lapierre, J.F., Henneck, J., Paul, A.M., Belair, M., Moritz, M.A., Filstrup, C.T., 2023. Fire Characteristics and Hydrologic Connectivity Influence Short-Term Responses of North Temperate Lakes to Wildfire. Geophys Res Lett 50. https://doi.org/10.1029/2023GL103953
Näthe, K., Levia, D.F., Tischer, A., Michalzik, B., 2018. Low-intensity surface fire effects on carbon and nitrogen cycling in soil and soil solution of a Scots pine forest in central Germany. Catena (Amst) 162. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.026

South Carolina State Climatology Office (SCSCO), 2017a. WEEKLY SOUTH CAROLINA WEATHER 2017 [WWW Document]. URL https://dnr.sc.gov/climate/sco/ClimateData/weekly/wk010117.php (accessed 4.19.25).
National Weather Service (NWS), 2017b. National Oceanic and Atmospheric Administration [WWW Document]. Climatological Data, SC. URL https://www.weather.gov/ (accessed 4.21.25).
Olivares, C.I., Uzun, H., Erdem, C.U., Zhang, W., Trettin, C., Liu, Y., Burton, S.D., Robinson, E.W., Karanfil, T., Chow, A.T., 2021. Increased Organohalogen Diversity after Disinfection of Water from a Prescribed Burned Watershed. ACS ES and T Water 1. https://doi.org/10.1021/acsestwater.1c00015
Olivares, C.I., Zhang, W., Uzun, H., Erdem, C.U., Majidzadeh, H., Trettin, C., Karanfil, T., Chow, A., 2019. Optical in-situ sensors capture dissolved organic carbon (DOC) dynamics after prescribed fire in high-DOC forest watersheds. Int J Wildland Fire 28. https://doi.org/10.1071/WF18175
Orlova, J., Olefeldt, D., Yasinski, J.H., Anderson, A.E., 2020. Effects of prescribed burn on nutrient and dissolved organic matter characteristics in peatland shallow groundwater. Fire. https://doi.org/10.3390/fire3030053
Paul, M.J., LeDuc, S.D., Lassiter, M.G., Moorhead, L.C., Noyes, P.D., Leibowitz, S.G., 2022. Wildfire Induces Changes in Receiving Waters: A Review With Considerations for Water Quality Management. Water Resour Res. https://doi.org/10.1029/2021WR030699
Perry, C.D., Vellidis, G., Lowrance, R., Thomas, D.L., 1999. Watershed-Scale Water Quality Impacts of Riparian Forest Management. J Water Resour Plan Manag 125. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1999)125:3(117)
Raoelison, O.D., Valenca, R., Lee, A., Karim, S., Webster, J.P., Poulin, B.A., Mohanty, S.K., 2023. Wildfire impacts on surface water quality parameters: Cause of data variability and reporting needs. Environmental Pollution. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120713
Reilly, M.J., Norman, S.P., O'Brien, J.J., Loudermilk, E.L., 2022. Drivers and ecological impacts of a wildfire outbreak in the southern Appalachian Mountains after decades of fire exclusion. For Ecol Manage. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120500
Richardson, S.D., Plewa, M.J., Wagner, E.D., Schoeny, R., DeMarini, D.M., 2007. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and roadmap for research. Mutat Res Rev Mutat Res. https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001
Robbins, Z.J., Loudermilk, E.L., Mozelewski, T.G., Jones, K., Scheller, R.M., 2024. Fire regimes of the Southern Appalachians may radically shift under climate change. Fire Ecology 20. https://doi.org/10.1186/s42408-023-00231-1
Rodríguez, A., Durán, J., Fernández-Palacios, J.M., Gallardo, A., 2009. Short-term wildfire effects on the spatial pattern and scale of labile organic-N and inorganic-N and P pools. For Ecol Manage 257, 739–746. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.006
Rodríguez-Cardona, B.M., Coble, A.A., Wymore, A.S., Kolosov, R., Podgorski, D.C., Zito, P., Spencer, R.G.M., Prokushkin, A.S., McDowell, W.H., 2020. Wildfires lead to decreased carbon and increased nitrogen concentrations in upland arctic streams. Sci Rep 10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65520-0
Ruecker, A., Uzun, H., Karanfil, T., Tsui, M.T.K., Chow, A.T., 2017. Disinfection byproduct precursor dynamics and water treatability during an extreme flooding event in a coastal blackwater river in southeastern United States. Chemosphere 188. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.122
Sakulich, J., Poulos, H.M., Gatewood, R.G., Wogan, K.A., Marks, C., Taylor, A.H., 2022. Low-Severity Wildfire Shifts Mixed Conifer Forests toward Historical Stand Structure in Guadalupe Mountains National Park, Texas, USA. Fire 5. https://doi.org/10.3390/fire5040119
Schulze, S.S., Fischer, E.C., 2021. Prediction of Water Distribution System Contamination Based on Wildfire Burn Severity in Wildland Urban Interface Communities. ACS ES and T Water 1, 291–299. https://doi.org/10.1021/ACSESTWATER.0C00073
Shah, N.W., Baillie, B.R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L., Nettles, J., 2022. The effects of forest management on water quality. For Ecol Manage. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397
Singer, R., Brown, S., 2018. Impact of Soil Filtration on Metals, Nutrients, and Estrogenic Activity of Reclaimed Water. J Environ Qual 47. https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0109
Son, J.H., Kim, S., Carlson, K.H., 2015. Effects of wildfire on river water quality and riverbed sediment phosphorus. Water Air Soil Pollut 226. https://doi.org/10.1007/s11270-014-2269-2
South Carolina Forestry Commission (SCFC), 2017. PINNACLE MOUNTAIN FIRE A FIVE-YEAR RETROSPECTIVE OF THE LARGEST WILDFIRE IN UPSTATE HISTORY-Photo courtesy of John Gunther.
Trickett, T.C., 2018. Fire and Vegetation Dynamics in the Southern Appalachian Fire and Vegetation Dynamics in the Southern Appalachian Mountains Mountains.
Tran, T., Baribeau, H., Sullivan, L., 2021. Mitigate Wildfire Impacts on Drinking Water Quality and Operations. Opflow 47, 10–15. https://doi.org/10.1002/opfl.1543
Uzun, H., Dahlgren, R.A., Olivares, C., Erdem, C.U., Karanfil, T., Chow, A.T., 2020a. Two years of post-wildfire impacts on dissolved organic matter, nitrogen, and precursors of disinfection by-products in California stream waters. Water Res 181. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115891
Uzun, H., Kim, D., Karanfil, T., 2019. Removal of wastewater and polymer derived N-nitrosodimethylamine precursors with integrated use of chlorine and chlorine dioxide. Chemosphere 216. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.088
Uzun, H., Kim, D., Karanfil, T., 2018. Deactivation of wastewater-derived N-nitrosodimethylamine precursors with chlorine dioxide oxidation and the effect of pH. Science of the Total Environment 635. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.148
Uzun, H., Kim, D., Karanfil, T., 2017. The removal of n-nitrosodimethylamine formation potential in drinking water treatment plants. J Am Water Works Assoc 109. https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0047
Uzun, H., Kim, D., Karanfil, T., 2015. Seasonal and temporal patterns of NDMA formation potentials in surface waters. Water Res 69. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.017

Uzun, H., Zhang, W., Olivares, C.I., Erdem, C.U., Coates, T.A., Karanfil, T., Chow, A.T., 2020b. Effect of prescribed fires on the export of dissolved organic matter, precursors of disinfection by-products, and water treatability. Water Res 187. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116385

Wagner, E.D., Plewa, M.J., 2017. CHO cell cytotoxicity and genotoxicity analyses of disinfection by-products: An updated review. J Environ Sci (China). https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.021

Wang, S., Wang, W., Chen, J., Zhang, B., Zhao, L., Jiang, X., 2020. Characteristics of dissolved organic matter and its role in lake eutrophication at the early stage of algal blooms-A case study of Lake Taihu, China. Water (Switzerland) 12. https://doi.org/10.3390/w12082278

Writer, J.H., Hohner, A., Oropeza, J., Schmidt, A., Cawley, K., Rosario-Ortiz, F.L., 2014. Water treatment implications after the High Park Wildfire in Colorado. J Am Water Works Assoc 106, 85–86. https://doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0055

Wu, X., Sverdrup, E., Mastrandrea, M.D., Wara, M.W., Wager, S., 2023. Low-intensity fires mitigate the risk of high-intensity wildfires in California's forests. Sci Adv 9. https://doi.org/10.1126/sciadv.adi4123

Yang, L., Kim, D., Uzun, H., Karanfil, T., Hur, J., 2015. Assessing trihalomethanes (THMs) and N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potentials in drinking water treatment plants using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis. Chemosphere 121. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.033

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 594-612, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1619040

Araştırma Makalesi Research Article

INVESTIGATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PERCEPTIONS OF PRIVATE SECTOR EMPLOYEES AND AWARENESS OF PARTICULARLY RADIATION EXPOSURE ISSUE

Umarettin UÇAK[1], Kenan ŞENTÜRK[2*]

[1]Istanbul Gelisim University, Institute of Science and Engineering, Occupational Health and Safety Master Program with Thesis, Istanbul, Türkiye

[2]Istanbul Gelisim University, Engineering and Architecture Faculty, Mechatronics Engineering Department, Istanbul, Türkiye

Keywords

Kruskal-Wallis test,
Mann-Whitney U test,
Occupational health and safety,
Radiation,
Radiation awareness.

Abstract

The frequency of radiation exposure and occupational health and safety awareness of private sector employees working in plastic injection, electrical contracting, construction, and textile sectors were studied according to their gender, age, sector, and education level. The data were examined using the SPSS 25 program with validity, reliability, frequency distribution, arithmetic mean, standard deviation, factor, independent sample t-test, Chi-square, Mann-Whitney U and Kruskal Wallis tests. The perception of knowing the impact on life, one of the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale, was found to be higher in female employees but knowing the risks was higher in male employees. The level of perception of knowing the rules in plastic injection sector employees was higher but knowing the risks in metal works sector employees was higher than the others. The age of the employees didn't affect the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale but the level of perception of knowing the rules was found to be high among high school graduates. Outcomes say that the employees must be forced to participate in Occupational Health and Safety meetings so that both their own health and safety at work and that of other employees around them will benefit.

ÖZEL SEKTÖR ÇALIŞANLARINDA İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALGILARI İLE ÖZELLİKLE RADYASYONA MARUZ KALMA KONUSUNDAKİ BİLİNÇ DURUMLARININ İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

Kruskal-Wallis testi,
Mann-Whitney U testi,
İş sağlığı ve güvenliği,
Radyasyon,
Radyasyon bilinci.

Öz

Bu araştırmada plastik enjeksiyon, elektrik taahhüt, inşaat, tekstil gibi farklı sektörlerde çalışan özel sektör çalışanlarının radyasyona maruz kalma sıklıkları ile iş sağlığı ve güvenliği konusundaki bilinçleri katılımcıların cinsiyet, yaş, sektör, eğitim durumlarına göre incelemek amaçlanmıştır. Veriler SPSS 25 paket programı kullanılarak geçerlilik, güvenilirlik, frekans dağılımı, aritmetik ortalama, standart sapma, faktör, bağımsız örneklem t testi, Ki-kare, Mann-Whitney U ve Kruskal Wallis testleri ile incelenmiştir. Çıkan sonuçlardan İş Sağlığı ve Güvenliği Algı Ölçeği alt boyutlarından Hayata Etkisini Bilme Algısı düzeyinin kadın çalışanlarda Riskleri Bilme Algı düzeylerinin erkek çalışanlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Plastik enjeksiyon sektörü çalışanlarının Kuralları Bilme Algısı düzeyinin diğer sektör çalışanlarından daha yüksek olduğu gözlemlenirken metal işleri sektörü çalışanlarının Riskleri Bilme Algı düzeylerinin diğer sektörlerdeki çalışanlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. İş Sağlığı ve Güvenliği Algı Ölçeği alt boyutları için çalışanların yaşlarına bağlı olarak anlamlı bir fark ortaya çıkmazken lise mezunu çalışanlarda İş Sağlığı ve Güvenliği Algı Ölçeği alt boyutlarından Kuralları Bilme Algı düzeyi yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar İş Sağlığı ve Güvenliği bilgilendirme toplantılarına katılımlarının zorunlu hale getirilerek çalışanların bilinçlendirilmesinin sağlanmasının gerektiğini bu şekilde hem kendileri hem etrafındaki diğer çalışanların işteki sağlık ve güvenliklerine olumlu etkileneceğini göstermektedir.

Alıntı / Cite

Uçak, U., Şentürk, K., (2025). Investigation of Occupational Health and Safety Perceptions of Private Sector Employees and Awareness of Particularly Radiation Exposure Issue, Journal of Engineering Sciences and Design, 13(2), 594-612.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

U. Uçak, 0009-0005-2202-6740
K. Şentürk, 0000-0001-8413-7570

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	13.01.2025
Revizyon Tarihi / Revision Date	11.05.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	27.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar/Corresponding author: ksenturk@gelisim.edu.tr, +90 505 583 8779

INVESTIGATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY PERCEPTIONS OF PRIVATE SECTOR EMPLOYEES AND AWARENESS OF PARTICULARLY RADIATION EXPOSURE ISSUE

Umarettin Uçak[1], Kenan Şentürk[2,†],

[1]Istanbul Gelisim University, Institute of Science and Engineering, Occupational Health and Safety Master Program with Thesis, Istanbul, Türkiye
[2]Istanbul Gelisim University, Engineering and Architecture Faculty, Mechatronics Engineering Department, Istanbul, Türkiye

Highlights (At least 3 and maxium 4 sentences)

- The radiation exposure frequency of workers due to job changes and their awareness were investigated.
- A pioneering research was done in the scope of the Occupational Health and Safety Perception Scale.
- The perception of knowing risks level of metal workers is found higher than the workers in other sectors.
- The Perception of Knowing the Rules for employees of the plastic injection industry was found higher.

Purpose and Scope

It is aimed to examine the radiation exposure frequencies and occupational health and safety awareness of employees working in different sectors such as plastic injection, electrical contracting, construction, and textile, according to their gender, age, sector, and educational level.

Design/methodology/approach

The data were examined with validity, reliability, frequency distribution, arithmetic mean, standard deviation, factor, independent sample t-test, Chi-square, Mann-Whitney U, and Kruskal Wallis tests using the SPSS 25 package program.

Findings

The level of perception of Knowing the Impact on Life one of the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale, was higher in female employees, while the level of Perception of Knowing the Risks of male employees was found to be higher. The Perception of Knowing the Rules level of employees in the plastic injection industry was higher than that of employees in other sectors when the Perception of Knowing the Risks levels of metalwork employees was found to be higher. There was no significant difference between the scores in the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale, depending on their age, but the level of Knowing the Rules was found to be high in high school graduate employees.

Originality

This article is one of the pioneering studies in the literature that attempts to determine the frequency of radiation exposure of workers working in various business sectors in Türkiye, depending on the analyses generally requested due to job changes, and examines the approaches of the same workers to the sub-dimensions of occupational health and safety in terms of different parameters such as gender, age, educational status, etc.

† Corresponding author: ksenturk@gelisim.edu.tr, +90 505 583 8779

1.Introduction

People as social beings have to work in order to survive and have a standard of living that befits human dignity. In parallel with industrialization, reasons such as people's working environments, working hours, and the increase in mechanization and competition have caused changes in production methods, and as a result, many health and safety threats have emerged. Since the industrialization processes and rates of countries may differ from each other, the degree of impact of each country on occupational health and safety may vary depending on its own characteristics (Akarsu et al., 2013). The health and safety of workers, who are the most important subjects in all production processes that continue until today, are one of the most fundamental issues of working life. While the concept of "health" is sometimes defined as "not being sick or disabled" and sometimes "not having pain" by Özabacı (1990), the World Health Organization (WHO) used a more comprehensive definition as "not only the absence of disease and disability, but also a state of complete physical, spiritual and social well-being." (Durgut, 1999). Another important concept which is “Occupational safety" can be expressed as minimizing work accidents and occupational diseases by creating healthy and safe working conditions in the work environment; thereby increasing productivity by preventing material and moral losses (Ceylan, 2011). Many studies have been carried out and regulations have been issued in Türkiye on occupational health and safety, which is a very important component of working life and labor law today, and these are given in Table 1 as date and Official Newspaper Number (ONN).

Table 1. Some Regulations on Occupational Health and Safety.

Regulation	Date	ONN
Regulation on Labor Law	06.04.2004	25425
Health and Safety Precautions in Working with Asbestos	25.01.2013	28539
Pressure Equipment Regulation	03.03.2018	30349
First Aid Regulation	29.07.2015	29429
Regulation on Health and Safety Conditions in the Use of Work Equipment	25.04.2013	28628
Regulation on Duties, Authorities, Responsibilities and Training of Occupational Safety Experts	29.12.2012	28512
Regulation on Occupational Hygiene Measurement, Test and Analysis Laboratories	24.01.2017	29958
Labor Force Regulation	11.10.2008	2701
Personal Protective Equipment Regulation	29.11.2006	26361
Health and Safety Signs Regulation	11.09.2013	28762

In professions where manpower is used intensively, occupational accidents continue to be a problem in addition to occupational diseases both in our country and globally. Occupational disease can be defined as a temporary or permanent illness, physical or mental disability suffered by the insured due to a recurring reason due to the nature of the job he/she works or performs or the conditions of work (Akarsu et al., 2013). The concept of work accidents can be defined as unplanned events that arise from unsafe actions and conditions, endanger the life safety of employees, often lead to injuries, damage to machinery and equipment, or production to stop for a while (Ceylan, 2011). It can be thought that with the rapid development of technology, occupational safety measures can be taken more easily for employees and occupational diseases can be reduced. However, the emergence of new machinery, equipment, chemicals, etc. has brought with it new problems. In addition, it has been determined that most of the occupational accidents that occur unfortunately arise from the faulty behavior of employees, that is, from human factors (Nişancı and Demirören, 2020). Although it is quite difficult to determine the accident percentage in this regard, there are studies stating that the majority of accidents, even approximately 85%, are caused by human errors, albeit in different sectors (Akbıyıklı and Dikmen, 2018; Patterson and Shappell, 2010; Suhma et al., 2021; Kumar et al., 2016; Yuliana and Ardhyaksa, 2019; Liu et al., 2019). The International Labour Organization (ILO) estimates that 2.78 million deaths are recorded worldwide each year due to work-related causes, and as a result of these incidents, approximately 3.94% of global GDP is spent on assistance for the injured people and their families, medical assistance, some training processes and procedures to reduce new accidents, days off and reduced productivity of organizations, which has a significant impact on various aspects of society (Reis et al., 2024). It is clear that occupational accidents also cause serious losses for countries. According to the ILO, the cost of occupational accidents and diseases to countries is estimated to be between 1% and 6% of a country's gross domestic product. This rate is around 6% in countries where the system does not work properly (ILO, 2019). It can be said that the financial loss caused by occupational accidents and diseases for Türkiye is over 4%. This reveals that the financial loss for 2022 is over 600 billion TL (Ceylan and Kaplan, 2024). In Türkiye, 2590007 workplace accidents occurred between 2019 and 2023, and 7275 employees lost their lives. Considering 2023, when only 681655 workplace accidents were recorded and 1972 fatal accidents occurred a workplace accident occurs approximately every 46 seconds in Türkiye, and five employees lose their lives due to workplace accidents every day (Özdemir, 2024).

When the attention is turned on the fight against accidents, it can be seen that technical practices are given importance. In such a case, employees must believe in and implement these measures. Another method that may be effective in reducing occupational accidents is to have employee representatives determined among the employees to ensure coordination between the employees and the employer, thus increasing the dialogue and taking precautions against accidents in advance (Orhan and Uysal, 2019). Risk assessment has become essential in order to reduce the occurrence of accidents increase safety and improve results which are the natural result of many factors brought together such as developing technology, increasing system integration and competition to gain an advantage in the market. The definition of hazard should also be taken into consideration in these evaluations. Hazard is the potential for harm or damage that exists in the workplace or may come from outside and may affect the employee or the workplace. Risk is the possibility of loss, injury, or other harmful outcomes resulting from the hazard (Ergun et al., 2019). In some cases, risk assessment begins with the identification of the hazard, even if it is difficult to define or is unpredictable. The following situation can be described as an example of one of the unpredictable hazards. In Article 15 of the Occupational Health and Safety Law No. 6331, the employer's responsibilities within the scope of health surveillance include performing a health examination according to the danger level of the workplace at periodic intervals prescribed by the ministry, upon first entry to work, job changes, and upon return to work after absences from work. Accordingly, a chest radiography can be taken. During the shooting of these graphs, photons with high energy lose some of their energy as they pass through the body. This lost energy is mostly absorbed by the breasts. Photons that pass through the breast tissue while preserving their energy reach the film cassette. Some photons scatter back from the film cassette, causing the organs to be exposed to radiation again. Radiation can cause damage to the Deoxyribo Nucleic Acid (DNA) molecule. In addition, if the damage caused by radiation to DNA is not repaired by Breast Cancer gene 1 (BRCA1) and Breast Cancer gene 2 (BRCA2), cancer cells will form. Damages that may occur in the BRCA1 and BRCA2 genes may also cause mutations in future generations. If the damaged BRCA gene is transferred from mother or father to children, the risk of children developing breast cancer in later ages may be 85%, the risk of developing ovarian cancer may be around 50%, and the risk of contracting these diseases under the age of forty may be around 75% (Uçak, 2021). DNA can be seriously damaged by ionizing radiation. Ionizing radiation is radiation whose energy is high enough to remove electrons from an atom. The interaction of ionizing radiation with the cell and causing DNA damage is shown in Figure 1 and Figure 2, respectively.

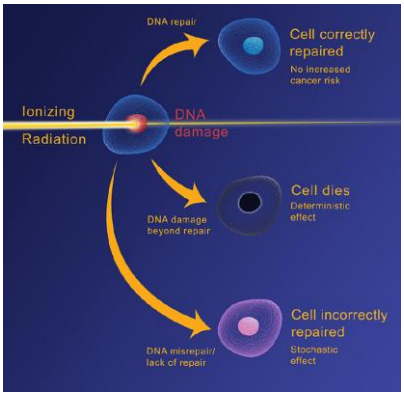


Figure 1. Interaction of Ionizing Radiation With a Cell
(Radiation Health Effects - Canadian Nuclear Safety Commission, 2019).

Figure 2. DNA Damage Caused by Radiation Breaking the Double Helix of the DNA Strand
(Radiation Health Effects - Canadian Nuclear Safety Commission, 2019).

Radiation may have direct or indirect effects (See Figure 3). In the direct effect, the incoming radiation hits the atom or molecule, causing ionization there. This results in two adjacent chemically reactive fragments. If the two parts in this separation immediately combine to form the same original molecule, no damage occurs, but in a large macromolecule such as DNA, the single or double helix of DNA can be broken by direct impact. In the indirect effect, free radicals are formed as a result of energy transfer to the atom, and these cause the molecule to break down. A free radical is an extremely reactive and electrically neutral atom with an unshared electron in its orbit (Akyolcu et al., 2010; Yeyin, 2015).

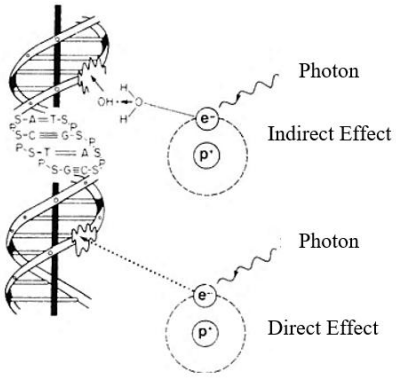


Figure 3. Demonstration of Direct and Indirect Effects of Radiation (Akyolcu et al., 2010).

Direct and indirect radiation can lead to consequences that can lead to the destruction of the structural integrity of the entire DNA macromolecule. Radiation, which can cause the breakdown of bases and sugars in the DNA molecule, can also be responsible for the breakdown of hydrogen and sugar-phosphate bonds. Radiation can cause damage to the cell, a decrease in the rate of cell division, and the formation of substances that are not normally found in the cell and can cause cell disintegration upon receiving ionizing radiation. Cells exposed to serious amounts of radiation may die (Akyolcu et al., 2010; Yeyin, 2015). An example of the interaction of radiation with the cell is given in Figure 4, and the division process for cells affected by radiation is given in Figure 5.

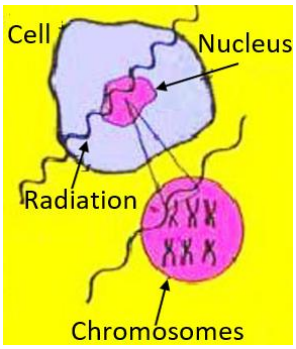


Figure 4. Demonstration of the Interaction of Radiation With the Cell (Coşkun, 2011).

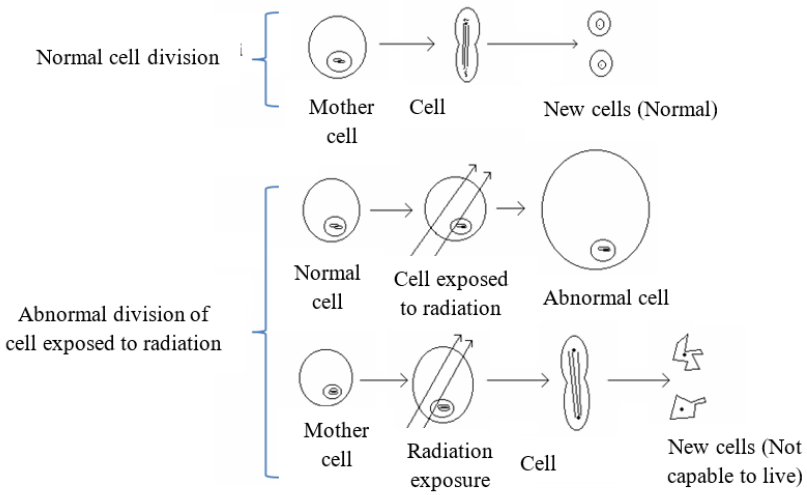


Figure 5. Schemes of Division Processes for Normal and Radiation-Affected Cells (Coşkun, 2011).

Radioactivity can be described as the disintegration or decay of a radioactive atomic nucleus. There are different units used for different physical concepts in radioactivity but there are also units that can be used for the same concept and they can be converted to each other. The unit of radioactivity is Becquerel, symbolized as Bq, and represents the number of nuclei that decay per second. There is also Curie (Ci) as a similar unit for the same concept, and there is a conversion between them and Bq as 1 Ci = $3.7x10^{10}$ Bq. The concept of energy dose, which is related to radiation, is defined as the radiation absorption dose of a substance, or in other words, it is the amount of energy stored by radiation in 1 kg of air, water, tissue, or any material. The unit of this energy dose is Gray (Gy) and corresponds to 1 Joule of energy accumulation in 1 kg of material. Gray describes the physical effect of radiation but does not provide information about the biological consequences of this energy accumulation in tissue. This means that equal doses of the same amount of radiation from different sources (such as α, β, γ) produce unequal biological effects. It is possible to explain this by the fact that a certain amount of energy accumulation of α radiation per tissue causes more biological damage than the same amount of energy of γ radiation. This is because the body can repair damage from radiation spread over a large area more easily than from radiation concentrated in a small area. At this point, it is inevitable to talk about the quality coefficient. Quality coefficients or quality factors are used to compare the biological effects of different types of radiation (See Table 2). For example, α radiation is considered to be 20 times more harmful in terms of its biological effects than the biological effects of χ rays or γ rays. Equivalent Dose (H) is the unit used to express biological activity and is found by multiplying Energy Dose and Quality Factor. The mathematical expression is given as in Equation 1.

$$\mathrm{H(Sv)} = \text{Energy Dose(Gy)}.\,\text{Quality Factor(Q)} \tag{1}$$

The unit of equivalent dose is Sievert (Sv). Sievert is the unit frequently used because it is the unit that is meaningful in terms of biological damage. If the simultaneous effect of several types of radiation is to be calculated as an equivalent dose, all measurements are converted to Sv units and summed.

Table 2. Radiation Type and Quality Factor Table (Radiation Measurement Units and Conversions, 2022).

Radiation type	Quality factor (Q)
χ rays	1
γ rays	1
β rays	1
α radiation	20
Electrons	1
Protons	2
Neutrons	5-20

Different tissues and organs exposed to the same amount of radiation are affected differently by radiation. Accordingly, weight factors (W_T) for tissues and organs are also defined (See Table 3).

Table 3. Table of Weight Factors (W_T) by Tissue or Organs (Radiation Measurement Units and Conversions, 2022).

Tissue or Organ	Weight Factor (W_T)
Testes	0.20
Colon	0.12
Bone marrow	0.12
Lung	0.12
Stomach	0.12
Bladder	0.05
Breast	0.05
Thyroid	0.05
Liver	0.05
Skin	0.01

It is possible to receive radiation, albeit at relatively low levels, from electronic devices such as mobile phones, computers, etc. that are frequently used in daily life. In addition, studies estimate that approximately 1-2% of all cancer cases in the world may be a result of radiological examinations. While the radiation exposure during one-way chest radiography is 0.02mSv, this value increases to 5-7 mSv in lung tomography. Even though a threshold radiation value at which the risk of cancer increases has not been defined, it can be said that there is a direct proportion between this risk and the radiation dose received (Lung Computerized Tomography and Radiation Safety, 2016). Radiation, which is mentioned above and whose negative consequences are clearly stated, penetrates the human body in every chest X-ray, even though it is in low doses. For people who change jobs several times during the year, this practice naturally results in taking more doses.

In this study, regarding a very important issue such as radiation, the frequency of radiation exposure of private sector employees due to the examinations carried out during their employment, occupational health and safety awareness on this subject, and also occupational health and safety subscales were examined in the light of different parameters. The work here which investigates the frequency of radiation exposure and occupational health and safety awareness of employees in different working sectors according to their gender, age group, sector and education level, is one of the pioneering studies in this field.
In this research, the employment/periodic examination forms of private sector employees working under the Occupational Health and Safety Law No. 6331 published on 30.06.2012 were examined by obtaining the permission of the employees in accordance with the Personal Data Protection (KVKK) law. In parallel with the periodic inspection information, survey questions were prepared and a survey was conducted among field employees in plastic injection, electrical contracting, construction, textile and other business lines in the private sector. The fact that field workers and employers who are exposed to radiation do not have sufficient health awareness and knowledge about radiation, and that it may negatively affect the health of not only the employees in that workplace but also the entire society, reveals the importance of this issue.
This article is organized as follows: in the material and method part of the article the problem of research, the purpose, importance, limitation, assumptions, hypotheses, and all the issues related to the research were given in detail. In the research and discussion part of the article, all the data obtained and all the results of the analysis were presented. The last part of the article is the conclusion part.

2. Material and Method

2.1. Problem of Research

In this research, it is foreseen that the health awareness and knowledge of radiation of field workers and employers who are exposed to radiation due to examinations performed for reasons such as employment may not be sufficient, and by taking radiological analyzes into consideration, it is aimed to investigate the frequency of radiation exposure and occupational health and safety awareness levels of private sector employees within the framework of different parameters. In addition, a comprehensive research was conducted on the occupational health and safety sub-criteria of employees under different parameters in the place where this study was conducted.

2.2. Purpose, Importance and Original Value of the Research

Within the scope of this research, the employment periodic examination forms of private sector employees working under the Occupational Health and Safety Law No. 6331 were examined by taking the permission of the employees within the framework of Personal Data Protection (PDP) law and in addition to the periodic examination information, survey questions were prepared and this survey was conducted among field workers in textile and other business lines such as plastic injection, electrical contracting, and construction. It was aimed to examine the frequency of radiation exposure and occupational health and safety awareness levels of the employees participating in the research according to the gender, age group, sector, and educational status of the participants. This study is one of the pioneering studies in this field, carried out within the framework of the parameters mentioned above. The studies that can be considered similar to the study presented here have mainly been conducted on professionals working in the health field, such as nuclear medicine nurses, doctors, radiography workers, etc. (Harris et al., 2019; Uçar et al., 2020; Abuzaid et al., 2019; Kyaw, 2024; Yunus et al., 2014). However, the study presented here is related to the workers from different sectors as mentioned above.

2.3. Limitations of the Research

The fact that this research covers only private sector employees, only covers the opinions of these employees, and focuses on issues such as the participant's general perception of occupational safety and how often they are exposed to radiation constitute the limitations of the study.

2.4. Assumptions of the Research

Within the scope of the study, it was assumed that the occupational safety perceptions of private sector employees would be determined realistically in relation to the population of the research. It was assumed that the answers given by the participants to the survey questions were sincere and realistic and that the participants were not influenced by each other while answering the survey questions.

2.5. Hypotheses of the Research

In this research, questions such as how often private sector employees change jobs and whether they have a chest X-ray taken when changing jobs were asked, additionally the survey questions given in the following parts of the article releted to the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale were asked the and the results were examined and interpreted for the following hypotheses. The following hypotheses were predicted for this research:
There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and educational differences.
There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and sector differences.
There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and their gender.
There is a statistically significant difference between employees' occupational safety perceptions and age groups.

2.6. Population and Sample of the Research

The population of the research consists of field employees during the period in which the study was conducted, no sampling technique was chosen and it was aimed to reach all employees. The survey, which was prepared to determine employees' perceptions of occupational safety and how frequently they are exposed to radiation, was applied to randomly chosen 121 employees from different sectors in a time interval of three months due to the COVID-19 pandemic conditions.

2.7. Data Collection Tools of the Research

The survey, prepared to determine employees' perceptions of occupational safety and the amount of radiation they are exposed to, consists of two parts. While the first part of the study included questions about the demographic status of the employees, the second part included questions to measure the employees' perceptions of occupational safety and the frequency of radiation exposure.

2.8. Collection of Research Data

Permission was received from the Istanbul Gelişim University Ethics Committee to conduct the surveys. While collecting the data for the research, the COVID-19 pandemic conditions were taken into consideration and a survey method was applied to the employees by making an appointment and informing them in advance. The employees were accompanied online while filling out the survey and were asked to notify the researcher if there was a question or any issue that was not understood in the questions in the survey.

2.9. Data Analysis Method of the Research

The data were examined with validity, reliability, frequency distribution, arithmetic mean, standard deviation, factor, independent sample t test, Chi-square test, Mann-Whitney U test, and Kruskal Wallis test using the SPSS 25 package program. Factor analysis was applied to determine the construct validity of the scale of the applied survey form. As a result of factor analysis, a literature review was conducted and employees' perceptions of occupational safety were grouped by factor.

2.10. Ethical Aspect of the Study

In order to conduct the study, approval was received from the Ethics Committee of T.R. Istanbul Gelisim University at 05.05.2021 with the decision number 2021-16-15. The study group was informed about the purpose of the research and their consent was obtained.

3. Results and Discussion

In this research, Cronbach Alpha reliability analysis was used to test the reliability of the variables of the scale consisting of a total of 20 questions prepared to measure the Occupational Health and Safety Perception attitudes of private sector employees working under the Occupational Health and Safety Law No. 6331, and the results are given in Table 4. According to the results in Table 4, the ratio of 0.77 shows that the scale is quite reliable (Arof et al, 2018). Within the framework of this research, private sector employees working under the Occupational Health and Safety Law No. 6331 were evaluated by taking into account the parameters stated below. Evaluations were made in terms of socioeconomic and demographic characteristics, gender, education level, working time and experience, etc. A total of n=121 people participated in the survey. The employees are 40.5% female (n=49) and 59.5% (n=72) male. As a result of the question asked about the ages of the employees participating in this research, it was determined that the most participants (n = 41 people) were between the ages of 26-35 with a rate of 33.9%. 27 people (22.3%) in the age group of 18-25, 31 people (25.6%) in the age group of 36-43, 16 people (13.2%) in

the age group of 44-51, and those who stated that they were 52 years old and over were the smallest group and this corresponds to a rate of 5% (n = 6 participants).

Table 4. Reliability Analysis Table.

Occupational Health and Safety Perception Scale (OHSPS)	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Alpha Value if Item Deleted
Question 1) I have information about Occupational Health and Safety Law No. 6331	71.35	47.658	0.401	0.759
Question 2) I have been informed about Occupational Health and Safety before.	70.37	47.579	0.486	0.752
Question 3) As an employee, I show the necessary sensitivity to occupational safety rules.	70.45	51.460	0.310	0.766
Question 4) Sufficient importance is given to occupational health and safety issues in our workplace.	71.84	47.933	0.406	0.759
Question 5) A personnel must receive Occupational Health and Safety training before starting work.	70.02	53.697	0.095	0.776
Question 6) I think Occupational Health and Safety will have an impact on our working lives.	70.07	53.364	0.131	0.774
Question 7) It increases the efficiency and quality of work if Occupational Health and Safety rules are followed.	70.14	54.139	0.042	0.778
Question 8) We are regularly warned by our superiors about occupational safety at our workplace.	71.53	48.839	0.361	0.762
Question 9) I believe that my supervisors have sufficient knowledge about Occupational Health and Safety.	71.23	49.038	0.428	0.758
Question 10) Warning signs regarding Occupational Safety are sufficient in our workplace.	71.44	49.022	0.420	0.758
Question 11) There are written signs in our workplace explaining the use and working principle of the devices.	71.21	46.738	0.573	0.746
Question 12) We use personal protective equipment in our work at our workplace.	70.77	47.739	0.565	0.749
Question 13) We were informed in advance about the accident risks of the devices we use in our workplace.	71.25	49.231	0.349	0.763
Question 14) I know what work accidents occur in our profession and to which our colleagues are exposed.	70.59	50.,496	0.399	0.761
Question 15) I know what my legal rights are if I encounter an accident at my workplace.	70.95	51.443	0.269	0.768
Question 16) I know our legal rights in case of an occupational disease that we may encounter in our future working lives.	71.16	47.546	0.613	0.746
Question 17) I know what occupational diseases are.	71.25	47.718	0.505	0.752
Question 18) I have information about the dangers and risks related to our profession.	70.58	50.262	0.420	0.760
Question 19) I have knowledge about eliminating dangers and risks related to my profession.	70.54	51.192	0.322	0.765
Question 20) I have at least one relative (relative, friend, acquaintance) who had a work accident or occupational disease at workplaces where I worked before.	71.75	56.441	-0.169	0.815

In the research conducted on the educational status of the study group, it was seen that the majority were high school graduates with a rate of 39.7% (n = 48 participants). On the other hand, it was observed that the number of university graduates was the lowest, with a rate of 17.4% (n = 21 participants), and the number of secondary school graduates was close to this rate (19.8% and n = 24 participants). 28 people who are primary school graduates constitute the 23.1% group. From the questions asked to the participants to learn about the sector they work in, it was revealed that they worked most in the construction sector (n=38 participants, with a rate of 31.4%), and metal works the least (n=8 participants, with a rate of 6.6%). The number of people working in plastic injection is 21 (17.4%), the number of people working in the textile industry is 22 (18.2%), and the number of people working in other sectors is 32 (26.4%). As a result of the questions asked to investigate their work experience, it was noted that the work experience of the employees participating in the research was quite low. People with 3-5 years of work experience constitute the largest group with a rate of 34.7% and n = 42 people, while the rate of those with only 1-2 years of work experience is 16.5% (n = 20 people). The number of people with work experience between 6-10 years is 35 (28.9%), and the number of people with work experience over 10 years is 24 (19.8%). Considering these results, more than half of the employees in the research group, that is, 51.2% (n = 62 people), have not yet had more than 5 years of experience in their sectors.

From the answers given to the question about how many times employees changed jobs in the last year, it was revealed that they changed jobs at a high rate in the last year. 43% of the employees in the research group (n=52 people) stated that they changed jobs once in the last year, and 38% (n=46 people) stated that they changed jobs twice. The number of people who changed jobs 3 times is 17 (14.4%), there are 2 people who changed jobs 4 times (1.7%), 1 person who answered more (I don't remember) (0.8%) and 3 people who did not want to answer (2.5%) constitute the rest of the group. According to the results obtained, it was revealed that the majority of the employees in the research group had changed jobs in the last year, while 106 people (87.6%) among the employees stated that they had a chest X-ray taken during the job change, 11 people (9.1%) stated that they did not have it taken, and 4 people (3.3%) stated that they did not want to answer the question. These results showed that the employees participating in the study were exposed to radiation at least twice in the last year because they had a chest x-ray when changing jobs. In addition, as examinations may be carried out for different reasons such as work accidents etc. during the year, the frequency of exposure to radiation may increase. One of the positive results of the study is that a high rate of 91.7% (111 people) of the employees participating in the study attended the Occupational Health and Safety training meeting. The number of people who declared that they did not attend the training is 10, which corresponds to a very low rate of 8.3%. Although the high rate of participation in training indicates that employees' awareness of occupational health and safety has increased, the fact that they frequently have chest radiography shows that this awareness does not make a sufficient contribution, especially to radiation exposure.

Table 5. T-Test Results table on Participants' Occupational Health and Safety Perception Attitudes

Occupational Health and Safety Perception Scale (OHSPS)	Test Value=3					
	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Mean	Sd
Question 1) I have information about Occupational Health and Safety Law No. 6331	3.198	120	0.002	0.314	3.31	1.080
Question 2) I have been informed about Occupational Health and Safety before.	15.095	120	0.000	1.298	4.30	0.946
Question 3) As an employee, I show the necessary sensitivity to occupational safety rules.	20.221	120	0.000	1.215	4.21	0.661
Question 4) Sufficient importance is given to occupational health and safety issues in our workplace.	-1.839	120	0.068	-0.174	2.83	1.038
Question 5) A personnel must receive Occupational Health and Safety training before starting work	31.178	119	0.000	1.642	4.64	0.577
Question 6) I think Occupational Health and Safety will have an impact on our working lives.	29.739	120	0.000	1.587	4.59	0.587
Question 7) It increases the efficiency and quality of work if Occupational Health and Safety rules are followed.	28.901	120	0.000	1.521	4.52	0.579
Question 8) We are regularly warned by our superiors about occupational safety at our workplace.	1.380	120	0.170	0.124	3.12	0.988
Question 9) I believe that my supervisors have sufficient knowledge about Occupational Health and Safety.	5.595	120	0.000	0.430	3.43	0.845
Question 10) Warning signs regarding Occupational Safety are sufficient in our workplace.	2.851	120	0.005	0.223	3.22	0.861
Question 11) There are written signs in our workplace explaining the use and working principle of the devices.	5.423	120	0.000	0.455	3.45	0.922
Question 12) We use personal protective equipment in our work at our workplace.	11.885	120	0.000	0.884	3.88	0.818
Question 13) We were informed in advance about the accident risks of the devices we use in our workplace.	4.762	120	0.000	0.413	3.41	0.955
Question 14) I know what work accidents occur in our profession and to which our colleagues are exposed.	17.249	120	0.000	1.066	4.07	0.680
Question 15) I know what my legal rights are if I encounter an accident at my workplace.	10.633	120	0.000	0.711	3.71	0.735
Question 16) I know our legal rights in case of an occupational disease that we may encounter in our future working lives.	7.050	120	0.000	0.504	3.50	0.787
Question 17) I know what occupational diseases are.	5.047	120	0.000	0.413	3.41	0.901
Question 18) I have information about the dangers and risks related to our profession.	17.249	120	0.000	1.074	4.07	0.685
Question 19) I have knowledge about eliminating dangers and risks related to my profession.	17.905	120	0.000	1.116	4.12	0.685
Question 20) I have at least one relative (relative, friend, acquaintance) who had a work accident or occupational disease at workplaces where I worked before.	-0.907	120	0.366	-0.107	2.89	1.303

In the research, the Occupational Health and Safety perception attitudes of private sector employees were examined with a single sample T-Test (Test value: 3) (see Table 5). A 5-point Likert scale was used in this research. (1: Strongly disagree, 2: Disagree, 3: Neutral, 4: Agree, 5: Strongly agree). The results were evaluated at the 5% significance level. According to the results, the participants declared that they were undecided on questions 1, 8, 9, 10, 11, 13 and 17. On the other hand, it was understood that they had a positive opinion about questions 2, 3, 5, 6, 7, 14, 18 and 19. The questions on which the participants expressed negative opinions were questions 4 and 20.

In Table 6 given in the appendices, descriptive statistics such as mean, standard deviation, minimum, and maximum value of the Occupational Health and Safety Perception Scale scores for the employees participating in the research are given. When this table is examined, in the Occupational Health and Safety Perception Scale, the Perception of Knowing Risks subscale received the highest score, while the Occupational Health and Safety Law Awareness subscale received the lowest score. The fact that employees' perception of knowing the risks is high can be considered positive, but the fact that Occupational Health and Safety Law Awareness remains at a low score is a very remarkable result.

Table 6. Descriptive Statistics of Occupational Health and Safety Perception Scale Scores

Occupational Health and Safety Perception Scale (OHSPS) Subscales	**n**	**Min**	**Max**	$\bar{x}$	**s**
Perception of Knowing the Rules	121	6.00	30.00	20.52	3.83
Perception of Knowing Risks	121	12.00	30.00	22.88	2.98
Perception of Knowing Its Impact on Life	121	8.00	20.00	17.95	1.85
Occupational Health and Safety **(**OHS) Law Awareness	121	5.00	13.00	13.33	2.29

A hypothesis of the research study, "There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and their gender," was partially confirmed according to the results given in Table 7 because there was no statistically significant difference in all subscales of the Occupational Health and Safety Perception Scale when the gender of the employees was taken into consideration. Mann-Whitney U test results are given here. Considering the employees' gender, it was determined that there was a statistically significant difference between the scores they received from the sub-dimensions of Knowing the Risks and the Perception of Knowing the Impact on Life, which are sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale ($p<0.05$).

Table 7. Comparison of Occupational Health and Safety Perception Scale Scores of Employees According to Their Gender

Occupational Health and Safety Perception Scale (OHSPS) Subscales	**Gender**	**n**	**Mean Rank**	**Sum of Ranks**	**U**	**Z**	**p**
Perception of Knowing the Rules	Female	49	62.49	3062.00	1691.000	-0.387	0.698
	Male	72	59.99	4319.00			
	Total	121					
Perception of Knowing Risks	Female	49	49.63	2432.00	1207.000	-2.991	**0.003*** **
	Male	72	68.74	4949.00			
	Total	121					
Perception of Knowing Its Impact on Life	Female	49	68.19	3273.00	1359.000	-2.033	**0.042** **
	Male	72	55.38	3987.00			
	Total	121					
OHS Law Awareness	Female	49	64.99	2701.50	1476.500	-1.534	0.125
	Male	72	55.13	4679.50			
	Total	121					

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.
A comparison was also made with the Chi-Square test and similar results were obtained (See Table 8). According to these two results, it was determined that there was a statistically significant difference between the perception of knowing the risks and the perception of knowing the impact on life of the employees participating in the research and their gender. It was revealed that female employees had a higher Perception of Knowing the Impact on Life than male employees, while male employees had a higher Perception of Knowing the Risks.
According to Bedük, et al., 2016 it is mentioned that women take more risks than men for different reasons. It is seen that gender factor has been an important and effective element in shaping social status in societies especially

according to the norms in society. While this situation indicates that men do not take some risks, it supports the fact that the male employees in our study have a high perception of knowing the risks. The fact that the perception of female employees in our study about knowing the impact on life is high in the same sample study given above it is said that women can balance their work and family life. This situation supports the fact that women have a high level of awareness about the impact of different conditions in working life on their lives. No significant difference was observed regarding the other two subscales.

Table 8. Comparison of Chi-Square Analysis According to Gender of Employees

Gender	**Perception of Knowing the Rules**			
	5-11	12-15	16-18	Sig.(p)
Male	23.6%	40.3%	36.1%	0.251
Female	24.5%	26.5%	49.0%	
Total	24.0%	34.7%	41.3%	
Gender	**Perception of Knowing Risks**			
	12-20	21-23	24-30	
Male	8.3%	34.7%	56.9%	0.037**
Female	24.5%	34.7%	40.8%	
Total	14.9%	34.7%	50.4%	
Gender	**Perception of Knowing Its Impact on Life**			
	8-16	17-18	19-20	0.048**
Male	31.9%	25.0%	43.1%	
Female	25.0%	12.5%	62.5%	
Total	29.2%	20.0%	50.8%	
Gender	**OHS Law Awareness**			
	5-11	12-15	16-18	
Male	18.1%	55.6%	26.4%	0.099*
Female	14.3%	79.6%	6.1%	
Total	16.5%	65.3%	18.2%	

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.

Table 9 shows the results of comparing the scores of the Occupational Health and Safety Perception Scale of the participants in the study according to their age groups. In this context, the results of the Kruskal-Wallis test are shown, and it has been revealed that there is no statistically significant difference between the scores of the participants in the Occupational Health and Safety Perception Scale sub-dimensions according to their age groups. Accordingly, the hypothesis predicted in the research, "There is a statistically significant difference between employees' occupational safety perceptions and age groups," could not be confirmed.

Table 9. Comparison of Employees' Scores According to Their Ages

Subscale Group	**Age**	**n**	**Mean Rank**	**Sd.**	**X^2**	**p**
Perception of Knowing the Rules	18-25	27	69.74	4	9.06	0.059*
	26-35	41	66.32			
	36-43	31	58.08			
	44-51	16	49.63			
	52 and above	6	30.75			
	Total	121				
Perception of Knowing Risks	18-25	27	58.07	4	8.25	0.083*
	26-35	41	53.84			
	36-43	31	61.56			
	44-51	16	82.59			
	52 and above	6	62.58			
	Total	121				
Perception of Knowing Its Impact on Life	18-25	26	63.44	4	1.26	0.868
	26-35	41	63.27			
	36-43	31	58.56			
	44-51	16	55.16			
	52 and above	6	53.08			
	Total	121				
OHS Law Awareness	18-25	27	57.67	4	2.11	0.715
	26-35	41	64.79			
	36-43	31	55.18			
	44-51	16	66.03			
	52 and above	6	66.75			
	Total	121				

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.
In the study, employees were compared according to their sector-based distribution with the Kruskal-Wallis test for the Occupational Health and Safety Perception Scale (See Table 10). The results revealed that there was a statistically significant difference between the scores of the employees participating in the study from the subscales of Knowing the Risks and Perception of Knowing the Rules ($p<0.05$).

Table 10. Comparison of Occupational Health and Safety Perception Scale Scores of Employees According to Sector Differences

Subscale Group	Sectors	n	Mean Rank	Sd.	X^2	p
Perception of Knowing the Rules	Plastic Injection	21	82.52	4	13.29	**0.010*** **
	Metal Works	8	55.00			
	Construction	38	49.05			
	Textile	22	57.55			
	Other	32	64.94			
	Total	121				
Perception of Knowing Risks	Plastic Injection	21	54.21	4	10.23	**0.037** **
	Metal Works	8	84.69			
	Construction	38	68.71			
	Textile	22	46.80			
	Other	32	60.14			
	Total	121				
Perception of Knowing Its Impact on Life	Plastic Injection	21	64.79	4	5.06	0.281
	Metal Works	8	40.44			
	Construction	38	57.75			
	Textile	22	57.86			
	Other	31	68.02			
	Total	120				
OHS Law Awareness	Plastic Injection	21	74.38	4	4.44	0.350
	Metal Works	8	59.81			
	Construction	38	61.47			
	Textile	22	54.95			
	Other	32	56.11			
	Total	121				

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.
Another hypothesis predicted in the research, "There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and sector differences", was partially confirmed. The comparison made with Chi-Square Analysis also revealed similar results (See Table 11).

According to the results of the Kruskal-Wallis test, it was determined that there was a statistically significant difference between the perception levels of Knowing the Rules and Knowing Their Impact on Life, which are sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale, according to the educational status of the participants ($p <0.05$) (See Table 12). “There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and educational differences” was partially confirmed. A comparison was also made with the Chi-Square test according to the educational status of the participants in the research, and according to the results obtained here, it was determined that there was a statistically significant difference between the employees' Perception of Knowing the Rules and Their Impact on Life and their education (See Table 13).

Table 11. Comparison of Chi-Square Analysis According to Differences in Employees Based on Sector

Sectors	**Perception of Knowing the Rules**			
	5-11	12-15	16-18	Sig.(p)
Plastic Injection	-	28.6%	71.4%	0.001***
Metal Works	-	87.5%	12.5%	
Construction	36.8%	36.8%	26.3%	
Textile	27.3%	31.8%	40.9%	
Other	28.1%	25.0%	46.9%	
Total	24.0%	34.7%	41.3%	
Sectors	**Perception of Knowing Risks**			0.030**
	12-20	21-23	24-30	
Plastic Injection	4.8%	61.9%	33.3%	
Metal Works	-	12.5%	87.5%	
Construction	10.5%	31.6%	57.9%	
Textile	22.7%	36.4%	40.9%	
Other	25.0%	25.0%	50.0%	
Total	14.9%	34.7%	50.4%	
Sectors	**Perception of Knowing Its Impact on Life**			0.667
	8-16	17-18	19-20	
Plastic Injection	19.0%	19.0%	61.9%	
Metal Works	50.0%	25.0%	25.0%	
Construction	28.9%	26.3%	44.7%	
Textile	31.8%	18.2%	50.0%	
Other	29.0%	12.9%	58.1%	
Total	29.2%	20.0%	50.8%	
Sectors	**OHS Law Awareness**			0.389
	5-11	12-15	16-18	
Plastic Injection	4.8%	76.2%	19.0%	
Metal Works	12.5%	62.5%	25.0%	
Construction	18.4%	60.5%	21.1%	
Textile	13.6%	81.8%	4.5%	
Other	25.0%	53.1%	21.9%	
Total	16.5%	65.3%	18.2%	

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.

Table 12. Comparison of Occupational Health and Safety Perception Scale Scores According to the Educational Status of Employees

Subscale Group	**Education**	**n**	**Mean Rank**	**Sd.**	**X^2**	**p**
Perception of Knowing the Rules	Primary Education	28	45.05	3	15.82	**0.001*** **
	Secondary Education	24	65.08			
	High School	48	74.01			
	University	21	47.86			
	Total	121				
Perception of Knowing Risks	Primary Education	28	64.39	3	2.103	0.551
	Secondary Education	24	54.21			
	High School	48	64.51			
	University	21	56.21			
	Total	121				
Perception of Knowing Its Impact on Life	Primary Education	28	56.73	3	10.07	**0.018** **
	Secondary Education	24	48.75			
	High School	47	60.13			
	University	21	79.79			
	Total	120				
OHS Law Awareness	Primary Education	28	66.61	3	5.84	0.119
	Secondary Education	24	46.77			
	High School	48	65.94			
	University	21	58.50			
	Total	121				

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.

Table 13. Comparison of Chi-Square Analysis according to the Educational Status of Employees

Education level	**Perception of Knowing the Rules**			
	5-11	12-15	16-18	Sig.(p)
Primary Education	42.9%	35.7%	21.4%	0.004***
Secondary Education	12.5%	41.7%	45.8%	
High School	10.4%	33.3%	56.3%	
University	42.9%	28.6%	28.6%	
Total	24.0%	34.7%	41.3%	
Education level	**Perception of Knowing Risks**			0.335
	12-20	21-23	24-30	
Primary Education	10.7%	39.3%	50.0%	
Secondary Education	25.0%	33.3%	41.7%	
High School	8.3%	31.3%	60.4%	
University	23.8%	38.1%	38.1%	
Total	14.9%	34.7%	50.4%	
Education level	**Perception of Knowing Its Impact on Life**			0.012**
	8-16	17-18	19-20	
Primary Education	28.6%	32.1%	39.3%	
Secondary Education	45.8%	16.7%	37.5%	
High School	29.8%	21.3%	48.9%	
University	9.5%	4.8%	85.7%	
Total	29.2%	20.0%	50.8%	
Education level	**OHS Law Awareness**			0.202
	5-11	12-15	16-18	
Primary Education	3.6%	71.4%	25.0%	
Secondary Education	29.2%	62.5%	8.3%	
High School	14.6%	64.6%	20.8%	
University	23.8%	61.9%	14.3%	
Total	16.5%	65.3%	18.2%	

The significance levels are *** for 99%, ** for 95% , and * for 90%.

The last research conducted within the framework of this study is to compare the scores of the Occupational Health and Safety Perception Scale of the participants according to their work experience. As a result of the scores obtained from the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale according to their work experience using the Kruskal-Wallis test, it was determined that there was no statistically significant difference within the framework of the Occupational Health and Safety Perception Scale according to the differences in the work experience of the employees (See Table 14).

Table 14. Comparison of Occupational Health and Safety Perception Scale Scores According to Employees' Work Experience Differences

Subscale Group	**Year**	**n**	**Mean Rank**	**Sd.**	**X^2**	**p**
Perception of Knowing the Rules	1-2 Years	20	64.45	3	5.17	0.163
	3-5 Years	42	67.46			
	6-10 Years	35	60.37			
	Over 10 Years	24	47.73			
	Total	121				
Perception of Knowing Risks	1-2 Years	20	56.48	3	4.58	0.205
	3-5 Years	42	57.48			
	6-10 Years	35	58.61			
	Over 10 Years	24	74.42			
	Total	121				
Perception of Knowing Its Impact on Life	1-2 Years	19	63.61	3	0.521	0.914
	3-5 Years	42	60.73			

	6-10 Years	35	61.30			
	Over 10 Years	24	56.48			
	Total	120				
OHS Law Awareness	1-2 Years	20	56.13	3	3.01	0.390
	3-5 Years	42	66.31			
	6-10 Years	35	54.43			
	Over 10 Years	24	65.35			
	Total	121				

3. Conclusion and Results

Work accidents and occupational diseases, as emphasized in the research, appear as an important problem both in Türkiye and in the world. It is very difficult to say that there is sufficient awareness of safety and health issues for employees and employers. Lack of sufficient knowledge about radiation, especially among employees exposed to radiation and employers, may threaten the health of not only the employees in that sector and region but also the health of the entire society.

In this study, a comprehensive research was conducted on a group of employees with distinctive characteristics such as different working sectors, different ages, different education levels, etc., within the scope of their frequency of exposure to radiation and their awareness of the Occupational Health and Safety Perception Scales. As can be expected due to the sectors in which they work, most of the people in the research group are male. In the research group of 121 people, there were 72 men (59.5%) and 49 women (40.5%). In terms of age, it can be said that this research was conducted with a young group because 33.9% of the participants (41 people) are between the ages of 26-35, and the number of people aged 52 and over is only 6 (5%). In terms of education levels, it is seen that the majority of the participants are high school graduates, with 48 participants (39.7%), and 21 people are university graduates (17.4%). Considering the sectors in which they work, 31.4% (38 people) of the participants work in construction, 18.2% (22 people) in textile, 17.4% (21 people) in plastic injection fields, while the remainings 26.4% (32 people) work in other sectors.

When the same people are examined in terms of their work experience, it is understood that the majority of the group consists of people with 3-5 years of work experience, with a rate of 34.7% (42 people). The group with work experience of 10 years or more remains at 19.8% (24 people). One of the results obtained is that employees change jobs frequently. Even though it is thought that they change jobs at least once a year due to these job changes, it is understood from this study that they have a chest X-ray taken at each change. Considering that similar examinations may be carried out in work accidents and similar injuries in the same year, it would be appropriate to take precautions for this study group in order to prevent the frequency of radiation exposure. Aside from the fact that the research group participants changed jobs frequently, the fact that the participation rate of these people in the Occupational Health and Safety training was quite high with 91.7% which is a positive result. Ensuring that all workers attend the Occupational Health and Safety information meeting and ensuring that this rate is 100% is one of the most important steps to be taken for employee occupational health and safety.

One of the hypotheses of the study, "There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and their gender", has been partially confirmed as seen from the results obtained. In this study, the Mann-Whitney U test was applied to compare the scores of the Occupational Health and Safety Perception Scale of the employees according to their gender, and according to the results obtained, there was a statistically significant difference ($p<0.05$) between the scores obtained for the Perception of Knowing the Risks and Knowing the Impact on Life, which are sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale. According to these results, it was revealed that the Perception Level of Knowing the Impact on Life of female employees was higher than that of male employees, while the Perception Level of Knowing the Risks was found to be higher in male employees. In addition, the results for the Occupational Health and Safety Perception Scale's Law Awareness and Perception of Knowing the Rules sub-dimension levels were independent of gender differences. Similarly, it is emphasized in the literature that perception differences may increase in gender groups. (Bedük et al., 2016; Çerezci et al., 2024).

Another hypothesis of the research, "There is a statistically significant difference between employees' occupational safety perceptions and age groups", could not be confirmed by the results obtained. According to the results of the Kruskal-Wallis test, no statistically significant difference emerged between the scores received by the employees from the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale.

The hypothesis of the study which states that "There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and sector differences", was partially confirmed. The results of the Kruskal-Wallis test showed that there was a statistically significant difference between the scores obtained from the Perception of Knowing the Risks and Knowing the Rules sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale ($p<0.05$). While it was observed that the Perception Level of Knowing the Risks of metal works employees was higher than that of employees in other sectors, it was observed that the Perception of Knowing the Rules level of employees in the plastic injection industry was higher than that of employees in other sectors. The

high risk perception of workers working in metal works can be considered a positive situation. According to Yılmaz, 2021 approximately 35% of fatal occupational accidents in Türkiye occur in the construction sector each year, and one of the important reasons for occupational accidents occurring on construction sites is the lack of knowledge and awareness of workers regarding occupational safety. This study supports the sector-based occupational safety awareness situation revealed in our study, especially in the construction sector.

The last hypothesis determined for this research, "There is a statistically significant difference between employees' perceptions of occupational safety and educational differences", was partially confirmed according to the results obtained. In the comparison made according to educational status, according to the results of the Kruskal-Wallis test, it was determined that there was a statistically significant difference between the perception levels of Knowing the Rules and Knowing Their Impact on Life, which are sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale ($p<0.05$). Accordingly, the perception level of Knowing the Rules, one of the sub-dimensions of the Occupational Health and Safety Perception Scale, was found to be high in high school graduate employees. It is thought-provoking that the results were the same for university and primary school graduates for the same level in question. The reason for the high perception of knowing the rules of the high school graduates may be related to the type the high schools they graduated from. Thera are vocational or technical high schools in which the school curricula are planned directly in accordance with the field of work, their perception of knowing the rules regarding occupational health and safety in the relevant work sectors may be high. There are some documents and guides which are prepared for Vocational and Technical Education Schools in cooperation with the Ministry of National Education and the General Directorate of Occupational Health and Safety of the Ministry of Labor and Social Security. Accordingly, it is an expected situation that the awareness of the students who graduated from these high schools is high regarding Occupational Health and Safety. In one of the studies supporting this estimate, it is emphasized that 78% of the vocational high school students selected as a sample received up to 8 hours of Occupational Health and Safety training, and the percentage of students who received up to 12 hours of Occupational Health and Safety training was 6.6% (Bayguş , 2019). This situation supports the fact that the high school students can have high awareness of Occupational Health and Safety in terms of Knowing the Rules.

Finally, it was observed that the level of Perception of Knowing the Impact on Life was high for university graduate employees.

In addition to the results stated above, it was observed that there was no statistically significant difference between the scores of the employees participating in the research from the Occupational Health and Safety Perception Scale sub-dimensions according to their work experience.

Additionally, it can be said that the employees in the sample group were exposed to radiation as a result of having their chest x-rays taken frequently due to frequent job changes, even if it is predicted that it does not reach harmful levels (Güdük et al.,2018). Potential illnesses that may arise due to radiation should be prevented by taking certain precautions, such as preventing employees from changing jobs so frequently or limiting the number of chest x-rays taken on a yearly basis. It is also necessary to create a common awareness while taking precautions against work accidents and occupational diseases. More than 3.6 billion X-ray examinations, thirty-seven million nuclear medications, and seven and a half million radiation treatments are performed each year worldwide. Radiation exposure in medical settings affects 20% of the global population, and this number is increasing. It was noted that even among healthcare professionals examined in this study, most had insufficient knowledge about radiation exposure safety and many were inadequate in implementing radiation protection procedures (Allam et al., 2024).The actual knowledge levels of workers on OHS measures in the workplace is significantly lower than their perceived knowledge levels. Some protective measures and actions such as occupational safety expert, employee representatives, tarinings about OHS and etc. can positively affect the safety awareness of employees (Yılmaz, 2021). According to Malysa et al., 2024 awareness and knowledge in the field of occupational health and safety can transform into the level of safety culture in the workplace and therefore can also set the direction for further improvement activities in the field of occupational health and safety. The results of the study conducted by Tasnova and Rafizul , 2024, shows that occupational health and safety training has a positive effect on the attitudes and safety behaviors of the workers participating in the study, making them more conscious of avoiding occupational injury or illness, and also increasing awareness of the risk of infectious diseases. On the other hand, companies have the chance to improve employees' understanding and awareness of current safety procedures and risks through effective and periodic information implementation, and as a result, contribute significantly to achieving zero accidents in the workplace. During these efforts, companies should also pay attention to other factors such as safety culture and employee participation (Widyasmoro et al., 2025). These findings also comfirm the importance of the our study conducted and presented here.

In conclusion, it is necessary to raise the awareness of employees in Türkiye and other countries by making their participation in Occupational Health and Safety information trainings mandatory, so that they can contribute positively to the health and safety of themselves and other employees around them at work, as well as to the protection of national wealth by eliminating financial losses that may occur due to accidents that could be avoided.

Acknowledgment

This article was produced from the master's thesis titled " Evaluation of Occupational Health and Safety Perceptions Within the Frequency of Radiation Exposure (Application for Some Private Sector Employees)" prepared by Umarettin UÇAK under the supervision of Kenan ŞENTÜRK.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

Abuzaid, M.M., Elshami, W., Shawki, M., Salama, D., 2019. Assessment of compliance to radiation safety and protection at the radiology department, International Journal of Radiation Research, 17(3): 439-446

Akbıyıklı, R., Dikmen, S. Ü., 2018. İnşaat Şantiyelerinde İş Sağlığı ve İş Güvenliği (İSG) Yönetiminin Ana Belirteçleri. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6, 1391-1409

Akciğer Bilgisayarlı Tomografisi ve Radyasyon Güvenliği, https://toraks.org.tr/site/news/3220 adresinden erişildi. Erişim tarihi: 01.09.2023

Akarsu, H., Burak, A., Çakmak, E., Doğan, B., Boz Eravcı, D., Karaman, E., Koçak., D., 2013. Meslek Hastalıkları, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezi, Özyurt Matbaacılık, Ankara, 48s

Akyolcu, M. C. ve Ark., 2010. İyonizan Radyasyonun Biyolojik Etkileri. ss.449-468, Editör:Dursun Ş. Biyofizik Ders Kitabı , İstanbul Üniversitesi Yayınevi, 598s

Allam, S.M.E., Algany, M.M.A.A., and Khide, Y.I.A., 2024. Radiation safety compliance awareness among healthcare workers exposed to ionizing radiation, BMC Nursing 23, 208

Arof , K.Z.M, Ismail, S., Saleh A. L., 2018. Contractor's Performance Appraisal System in the Malaysian Construction Industry : Current Practice , Perception and Understanding, International Journal of Engineering & Technology, 7 (3.9) 46-51

Bayguş, D., 2019. Bir Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Öğrencilerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Bilgi Düzeyi ve İş Kazaları Sıklığı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye

Bedük, A.,Eryeşil,K., Oğuz,H., 2016. Kadın ve Erkek Girişimcilerin Algılama Farklılıkları. Selçuk Üni. Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi. 19(41),1-15

Ceylan, H., 2011. Türkiye'deki İş Kazalarının Genel Görünümü ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. International Journal of Engineering Research and Development,3 (2),18-24.

Ceylan, H., Kaplan, A., 2024. Fatal Occupational Accidents in Turkey from a City and Country Perspectiv , Urban Academy, 17(1), 231-254

Coşkun, Ö., 2011. İyonize Radyasyonun Biyolojik Etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi. 1(2),13-17

Çerezci,D., Tutgun-Ünal, A., Cerezci, F., 2024. Elektromanyetik Radyasyon Maruziyet Algısı Ölçeğinin Geliştirilmesi: Geçerlilik ve Güvenilirlik Analizleri. Düzce Üni.Bilim ve Teknoloji Dergisi. 12(1),247-263

Durgut, Ş. V.,1999. Sağlık kuruluşlarında iş ve güvenliği ve meslek hastalıkları ve İ.Ü. Cerrahpaşa Tıp Fakültesi ile S.S.K. İstanbul Hastanelerinde İş Güvenliği ve Meslek Hastalıklarına ilişkin bir araştırma, T.C. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Fakültesi, Hastane ve Sağlık Kuruluşlarında Yönetim Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul,133s

Ergun, A. R., Atalay, Ö., Tülü, M., Acar, İ., Özmen, M., Işık, M. K., 2019. Kamuda İş Sağlığı ve Güvenliği (6331 Sayılı İSG Kanununun Kamuda Uygulanması), T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Matus Basımevi, Ankara, 68s

Güdük,Ö.,Kılıç,C. H, Güdük,Ö., 2018. Radyasyonun zararlı etkileri Hakkında Hastaların Bilgi Düzeyinin Değerlendirilmesi: Bir Hastane Örneği. Adıyaman Üni.Sağlık Bilimleri Derg. 4(2),874-889.

Harris, A., Loomis, J., Hopkins, M., Bylund, J., 2019. Assessment of Radiation Safety Knowledge Among Urology Residents in the United States, Journal of Endourology 33(6): 492-497.

Kumar P., Gupta S., Agarwal M., Singh U., 2016. Categorization and standardization of accidental risk-criticality levels of human error to develop risk and safety management policy, Safety Science (85) 88–98,

Kyaw, S.S., 2024. A Study On Radiation Protection Awareness Among Radiation Workers (Case Study: Selected Hospitals In Yangon), Yüksek Lisans Tezi, Yangon Üniversitesi, Mynmar

Liu W., Chen X., and Sun Q., 2019. Development of Enterprise Accident Early Warning System Based on IOT. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019 P. M. F. M. Arezes (Ed.): AHFE 2018, AISC 791, 139–148

Malysa, T., Furman, J., Kuczynska-Chalada, M., Tyranski, M., Blasko, P., 2023. Survey of Employees' Awareness Regarding Occupational Health and Safety in the Automotive Industry, Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series No.182, 229-243

Nişancı, Z. N., Demirören, J. K., 2020. Davranış Odaklı İş Güvenliği Uygulamalarının İş Güvenliği Kültürüne Etkisi. Journal of Yasar University, 2020, Special Issue on 3rd International EUREFE Congress, 21-39

Orhan, S., Uysal, S., 2019. İş Sağlığı ve Güvenliğinin Sağlanmasında Çalışan Temsilciliğinin Önemi. Yorum-Yönetim-Yöntem Uluslararası Yönetim-Ekonomi ve Felsefe Dergisi 7(1), 1-16

Özabacı, M. N., 1990. Tedavi edici saglık hizmetlerinde çalışan hemşirelerde görülen meslek hastalıkları ve nedenlerinin araştırılması, T.C. İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hemşirelik Anabilim Dalı, Psikiyatri Hemşireliği Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 94s

Özdemir, M., 2024. Work Accidents, Occupational Diseases, and Lost Workdays in Türkiye's Forestry Sector:
Increasing Risks and Improvement Proposals for the 2019-2023 Period, Journal of Apitherapy and Nature 7(2), 141-153

Patterson J. M., Shappell S. A., 2010. Operator error and system deficiencies: Analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS, Accident Analysis and Prevention, 42, 1379–1385

Radiation Health Effects - Canadian Nuclear Safety Commission, https://www.cnsc-ccsn.gc.ca/eng/resources/radiation/radiation-health-effects/ adresinden erişildi. Erişim tarihi: 06.03.2024

Radyasyon Ölçüm Birimleri ve Dönüşümleri, https://www.afad.gov.tr/kbrn/radyasyon-olcum-birimleri-ve-donusumleri adresinden erişildi. Erişim tarihi: 01.09.2023

Reis, B.L.dos, Leal, G.C.L., Souza, R.C.T.de., 2024. Work accidents in Brazil: a perspective from registered accidents in the manufacturing industry from 2018 to 2023, Brazilian Journal of Health Review, 7(9) p. e75263

Suhma F. M., Marchianti A. C. N., Ma'rufi I., 2021. Effect of Unsafe Actions and Conditions with Work Accidents in the Rotary Section of Plywood Industry Pt.x Jember, Indonesia. Medico-legal Update, 21(3), 274-279

Tasnova, S.I., Rafizul, I.M., 2024. Assessing the Efficacy of Training Program to Promote a Positive Occupational Health and Safety Culture Among Informal Workers at Open Dump Site in Khulna Using Inductıve Thematic Analysis, 7th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2024), Bangladesh

Uçak, U., 2021. İş sağlığı ve güvenliği algılarının radyasyona maruz kalma sıklığı kapsamında değerlendirilmesi (Bazı Özel Sektör Çalışanlarına Yönelik Uygulama). T.C. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye

Uçar, M., Akkoç, A., Topçuoğlu, M., Öztürk, S. A., Demir, M., 2020. Evaluation of exposure and awareness of radiation in healthcare professionals exposed to ionizing radiation, Acta Medica Alanya 4(3):285-290

Widyasmoro, A., Elnardy, M.C., Supriyadi, S., Zaharuddin, Z., 2025. The Influence of Safety Briefing, Knowledge and Awareness of Occupational Safety and Health in Realizing Zero Accidents in the Work Environment, 6 (1),14-21

Yeyin, N., 2015. Radyasyonun Biyolojik Etkileri. Nükleer Tıp Seminerleri, Galenos Yayınevi,3,139-43

Yılmaz, F., 2021. Analysis of the interaction between safety measures and workers' safety awareness from the construction workers' perspective, Engineering, Construction and Architectural Management 30 (1), 41-55

Yuliana L., Ardhyaksa D.,2019. Analysis Of Unsafe Action And Unsafe Condition Based On Occupational Health And Safety Card reporting programs. Journal of Global Research in Public Health, 4 (2), 78-86

Yunus, N.A., Abdullah, M.H.R.O., Said, M.A., Ch'ng, P.E., 2014. Assessment of radiation safety awareness among nuclear medicine nurses: a pilot study, Journal of Physics: Conference Series 546 , 012015.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 613-622, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1532525

Araştırma Makalesi Research Article

A CROSS-POLARIZER METASURFACE DESIGN FOR K- AND KA-BAND APPLICATION STUDIES

Abdulkadir ÇILDIR[1*]

[1] Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur, 15030, Türkiye,

Keywords

Metasurface, Cross-Polarizer, PCR, Angular Stability, Broadband.

Abstract

In this study, a novel cross-polarizer metasurface (CPM) is presented. The metasurface is designed on Roger 5880 substrate by using CST microwave studio. The metasurface design features a split-ring that incorporates a U-shape. This metasurface can convert an x/y-polarized linear incident wave into a y/x-polarized linear wave in K- and Ka- frequency bands. It has a bandwidth of 12.15 GHz (11.95–12.6 GHz, 23.5–35 GHz) with an efficiency of 90% polarization conversion ratio (PCR). This design also has angular stability up to 30 degrees. This study comes in handy with some K- and K-band application studies.

K VE KA-BANT UYGULAMA ÇALIŞMALARI İÇİN ÇAPRAZ POLARİZE EDİCİ METAYÜZEY TASARIMI

Anahtar Kelimeler

Metayüzey, Çapraz Polarize Çevirici, PCR, Açısal Kararlılık, Geniş Bant.

Öz

Bu çalışmada, yeni bir çapraz kutupsal metayüzey (CPM) sunulmuştur. Metayüzey, CST mikrodalga stüdyosu kullanılarak Roger 5880 alt tabakası üzerinde tasarlanmıştır. Metayüzey tasarımı, U şeklini içeren bölünmüş bir halka içerir. Bu metayüzey, K ve Ka frekans bantlarında x/y kutupsal bir doğrusal dalgayı y/x kutupsal doğrusal bir dalgaya dönüştürebilir. 12.15 GHz geniş bantta (11.95-12.6, 23.5-35 GHz) %90 kutupsal dönüşüm oranına (PCR) sahiptir. Bu tasarım ayrıca 30 dereceye kadar açısal kararlılığa sahiptir. Bu çalışma, bazı K- ve Ka-bant uygulama çalışmalarında kullanışlıdır.

Alıntı / Cite

Çıldır, A., (2025). A cross-polarizer metasurface design for K- and Ka-band application studies, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 613-622.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
A. Çıldır, 0000-0003-1789-6088

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	13.08.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	06.05.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	06.05.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: acildir@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-28-03

A CROSS-POLARIZER METASURFACE DESIGN FOR K- AND KA-BAND APPLICATION STUDIES

Abdulkadir ÇILDIR[1†]

[1] Electrical Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, 15030, Türkiye, acildir@mehmetakif.edu.tr

Highlights

- It transforms polarizations.
- It works in K and Ka application studies.
- It converts x/y- linear polarized wave to y/x- linear polarized wave.
- It has a good PCR (polarizarion conversion ratio).
- It has an angular stability up to 30 degrees.

Purpose and Scope
To design a metasurface which transforms linear polarized wave to another linear polarized wave.

Design/methodology/approach
The unit cell is designed on a Roger 5880 substrate with a thickness of 1.6 mm, a loss tangent of 0.025, and a permittivity of 4.3. The presented unit cell is composed of a split ring including U-shape. A metallic ground supports the unit cell. This design works in K and Ka applicaiton studies. It works as a cross-polarizer which can transform a polarized wave to another. It has a 90% polarization conversion ratio (PCR) efficiency in the 12.15 GHz broadband (11.95-12.6, 23.5-35 GHz). This design also has angular stability up to 30 degrees.

Findings
The reflection coefficient results are shown for x- and y- polarized waves. As seen in these graphs, the same results are given for two different polarized waves. These same results result from the mirror image of the unit cell in xy-orthogonal axis. Co-reflection coefficient results should be as low as possible to obtain a CPC, while cross-reflection coefficients should be equal. Polarization conversion ratio (PCR) results are given for normal and oblique incidence waves, respectively. These results show that this design has linear-to-linear conversion over 90% efficiency across 11.95-12.6, 23.5-35.0 GHz for normal incidence wave and also efficiently performs linear-to-linear conversion up to 30 degrees.

Originality
This paper has a new design with a high PCR value. This paper works in a broadband including K and Ka band. It has also an angular stability up to 30 degrees.

[†] Corrosponding Author: acildir@mehmetakif.edu.tr, +90-248-213-28-03

1. Introduction

Metasurfaces are two-dimensional arrays of subwavelength unit cell structures. These structures have been suggested for numerous applications, including polarization manipulation, incident wave absorption (Amin, Fida et al. 2022), antenna gain enhancement (Samantaray and Bhattacharyya 2020, Nasser and Chen 2021), electromagnetic wave diffusion (Al-Nuaimi, He et al. 2019), flexible beam formation using (Wu, Hou et al. 2023), satellite applications (Shukoor, Dey et al. 2022), EMC applications (Chandra, Samantaray et al. 2022), and radar cross-section reduction (Liu, Li et al. 2021). If metasurface structures are anisotropic, they can be utilized in cross-polarization conversion (CPC), where linear polarization (LP) plays a crucial role.

Polarization defines the direction of the electric field in an electromagnetic wave. The electric field can oscillate in different types of polarization such as linear, circular, and elliptical, which are used in different areas.However, in some applications such as antenna systems (Wang, Shao et al. 2022), optical instruments (Bi, Huang et al. 2022, Ullah, Zhao et al. 2022), medical imaging (Razzicchia, Ghavami et al. 2023), communication systems (Zhang, Sun et al. 2022, Yang, Zheng et al. 2023), it is important to convert one polarization to another.Metasurfaces are one of the materials, which can transform the polarization states of electromagnetic waves. Metasurfaces are be able to called cross-polarizers if they make linear-to-linear (LTL) conversion.

Recently, various designs for LTL have been proposed. These include arrow-shaped structures (Rashid, Murtaza et al. 2023), split ring resonators (SRR) developed by (Wahidi, Khan et al. 2020), (Kamal, Chen et al. 2021). Additionally, Z-shaped structures (Wang and Zhai 2020) and chessboard structures (Al-Nuaimi, Hong et al. 2019) have been investigated. The main objectives of these designs are to achieve broadband linear polarization (LP) (Cildir, Tahir et al. 2024), high polarization conversion ratio (PCR), low axial ratio, and high angular stability (Çıldır 2024). Meanwhile, to enhance the total bandwidth, various studies (Zhao, Qi et al. 2019, Kamal, Chen et al. 2021, Liu, Li et al. 2021, Chandra, Samantaray et al. 2022, Shukoor, Dey et al. 2022, Xu, Gao et al. 2022) have reported bandwidths of 20.64, 9.5, 10.2, and 5.1 GHz, respectively, for LTL conversion in reflection mode.

It is seen from the given studies, broadband and angular stability of metasurfaces are still insufficiently addressed in the literature. This paper presents a new metasurface a split ring cross-polarizer metasurface (SR-CPM) that stands out for its versatility, wide frequency coverage, and straightforward design. The device features unit cells on one side and a full copper layer on the other. It can conduct both LTL conversion efficiency greater than 90% over a frequency band ranging from 11.95-12.6, 23.5-35 GHz. It can also LTL conversion at different oblique angles up to 30 degrees. The research is proposed into segments that delve into unit cell design, polarization theory, simulation results and discussions, and conclusion.

2. Material and Method

The designed unit cell configuration for a metasurface is shown in Fig. 1. The unit cell is designed on a Roger 5880 substrate with a thickness of 1.6 mm, a loss tangent of 0.025, and a permittivity of 4.3. The dimensions of the unit cell, shown in Fig. 1, is determined using the optimization feature of CST Microwave Studio using Periodic boundary conditions with Floquet ports. The presented unit cell is composed of a split ring including U-shape. A metallic ground supports the unit cell.

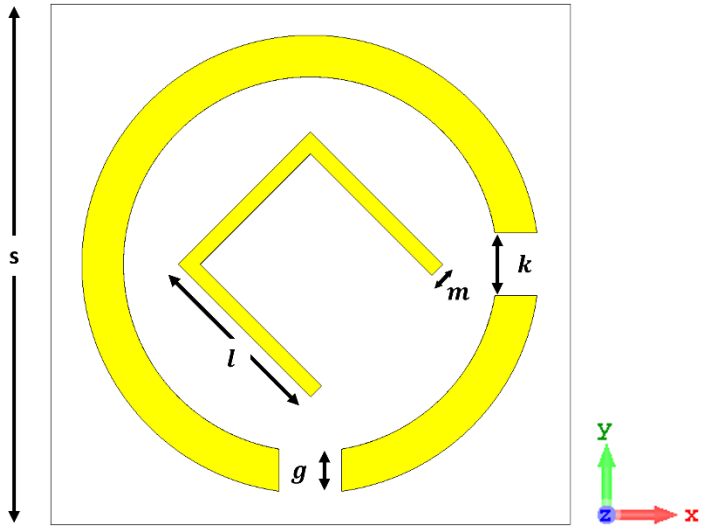


Fig. 1. Designed unit cell with its dimensions (s: 7, k: 1.2, l: 1.8, m: 0.15, g: 0.4)

For electromagnetic waves which are coming towards z-direction, x-polarized incident electronic wave to the metasurface, they are reflected as y-polarized electromagnetic waves. If y-polarized waves impinge to this metasurface, they are reflected as x-polarized waves. So, this unitcell has been designed to convert linear polarized waves to other linear polarized waves.

The incident wave into the metasurface surface is reflected by changing its polarization. This polarization conversion can be expressed with reflection coefficients. In this study, reflection coefficients, which are the ratio of the incident and reflected waves, are expressed as follows: $R_{xx}=E_{rx}/E_{ix}$, $R_{yy}=E_{ry}/E_{iy}$, $R_{yx}=E_{ry}/E_{ix}$ and $R_{xy}=E_{rx}/E_{iy}$. Here, R_{xx}, R_{yy} are co-reflection coefficients and R_{yx}, R_{xy} are cross-reflection coefficients.

In Fig. 2, the reflection coefficient results are shown for x- and y-polarized waves. As seen in these graphs, the same results are given for two different polarized waves. These same results result from the mirror image of the unit cell in xy- orthogonal axis. Co-reflection coefficient results should be as low as possible to obtain CPC, while cross-reflection coefficients should be equal. In Fig. 2 is seen that co-reflection coefficients results are below threshold value (-10 dB) in some frequency regions (11.95-12.6 GHz, 23.5-35 GHz), while cross-reflection coefficient results are about 0 dB.

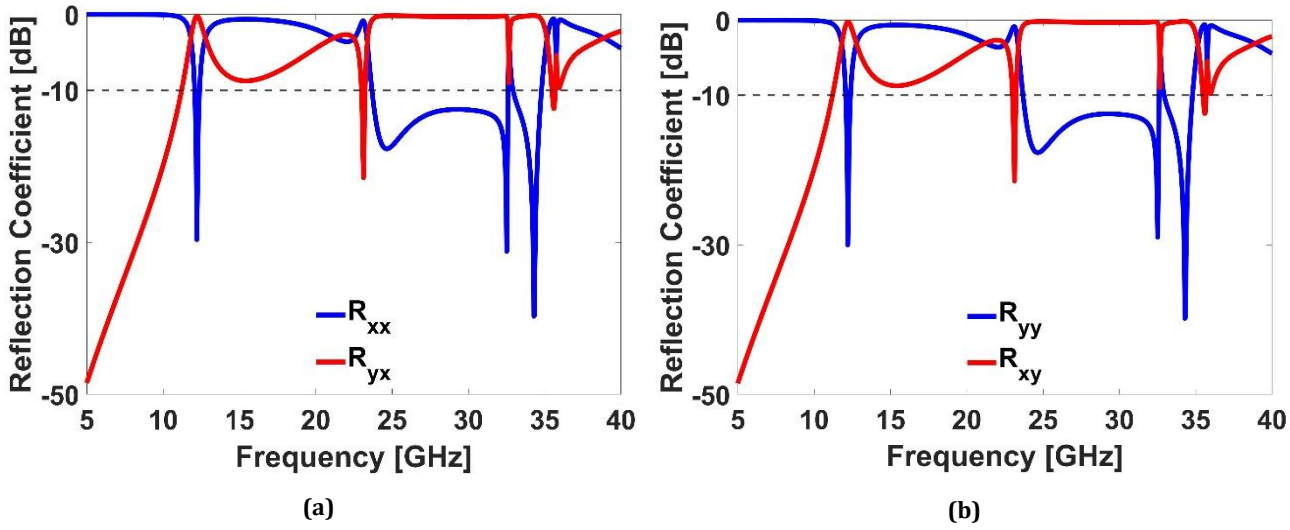


Fig. 2. Reflection coefficient simulation results for **(a)** x-, **(b)** y- polarized incident waves.

In Fig. 3, the designed unit cell is shown on the uv- axis. This axis helps us understand more cross polarization conversion existence. This axis is obtained xy- axis by rotating 45 degrees in horizontal plane. Equ. (1) and (2) analyze the electric field components on this axis in Fig. 3.

$$\boldsymbol{E}_{iy} = \vec{y}E_i = \vec{u}E_{iu}e^{j\varphi_{iu}} + \vec{v}E_{iv}e^{j\varphi_{iv}} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{E}_{rx} = \vec{x}E_r = \vec{u}E_{ru}e^{j\varphi_{ru}} + \vec{v}E_{rv}e^{j\varphi_{rv}} \quad (2)$$

Here, the components E_{iy} and E_{rx} can be expressed in terms of components E_{iu}, E_{iv}, E_{ru}, and E_{rv} as described in Equ. (2) and (3). In thiis context, ' φ ' expresses the phase of the wave, while the subscripts 'i' and 'r' refer the incident and reflected waves, respectively. The subscripts 'y, x, u, v' indicate the directions of the waves.

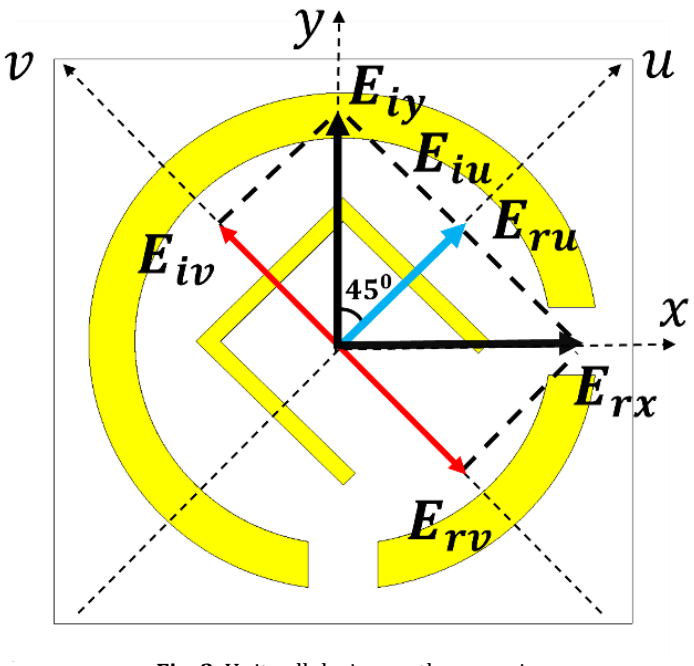
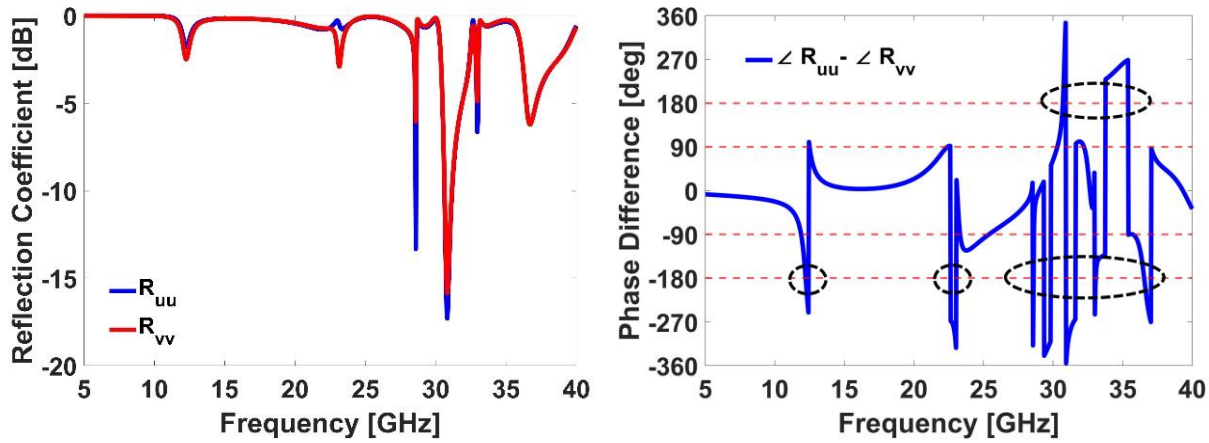


Fig. 3. Unit cell design on the uv- axis

For this unit cell, reflection coeefficients R_{uu}=E_{ru}/E_{iu} and R_{vv}=E_{rv}/E_{iv} can write on the uv- axis. When R_{uu} and R_{vv} are placed in Equ. (1) and (2), it is seen that the equal circumstances $|R_{uu}| = |R_{vv}| \cong 0\ dB$ and $\Delta\varphi = \varphi_{uu} - \varphi_{vv} \cong \pm\pi$ must be ensured to obtain CPC.

3. Results and Discussion

In Fig. 4, reflection coefficient results are presented for the unit cell on the uv- axis. Fig. 4 (a) and (b) illustrate R_{uu} and R_{vv} and their phase difference. Analyzing Fig. 4 (a) and (b) using the mentioned equations reveals that the magnitudes of R_{uu} and R_{vv} are approximately equal and 0 dB within the working frequencies of the unit cell. Additionally, the phase difference between R_{uu} and R_{vv} follows a ±180-degree line. These results indicate that the designed unit cell can transform an x/y-incident wave into a y/x-reflected wave.



(a) **(b)**

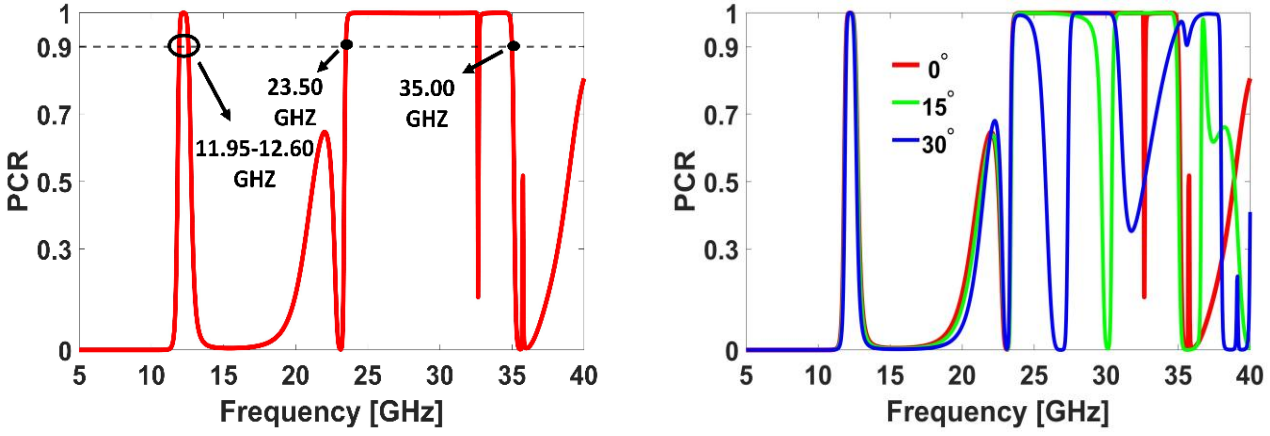
Fig. 4. (a) Reflection coefficient results, **(b)** reflection coefficient phase differences, on the uv- axis

In Fig. 5, polarization conversion ratio (PCR) results are given for normal and oblique incidence waves, respectively. PCR is an efficiency ratio for CPC and can be expressed as follows:

$$PCR = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \times 100 \qquad (3)$$

In Fig. 5 (a), frequency points showing 90% efficiency have been signed. Fig. 5 (a), this design can make linear conversion over 90% efficiency across 11.95-12.6, 23.5-35.0 GHz, for normal incidence wave.

Fig. 5 (b) shows PCR results for oblique incidences. As seen in Fig. 5 (b), in the first frequency region (11.95-12.6), no change can be seen up to 30 degrees. In the other frequency region (23.5-35.0), some different frequencies come out with different angles. By seeing these results, the desing metasurface has angular stability up to 30 degrees.



(a) **(b)**

Fig. 5. PCR results for **(a)** normal incidence, **(b)** oblique incidences

The surface current distributions on the metasurface are illustrated in Fig. 6, where surface currents (a) and (c) correspond to 12.45 GHz, and surface currents (b) and (d) represent the resonance frequency of 29.25 GHz. In Fig. 6, (a) and (b) show the surface currents on the top side of the metasurface, while (c) and (d) illustrate the surface currents on the bottom side. However, the ring structure indicates the presence of a magnetic field, as the opposing surface current distribution shown in Fig. 6 confirms the existence of a magnetic field on the metasurface.

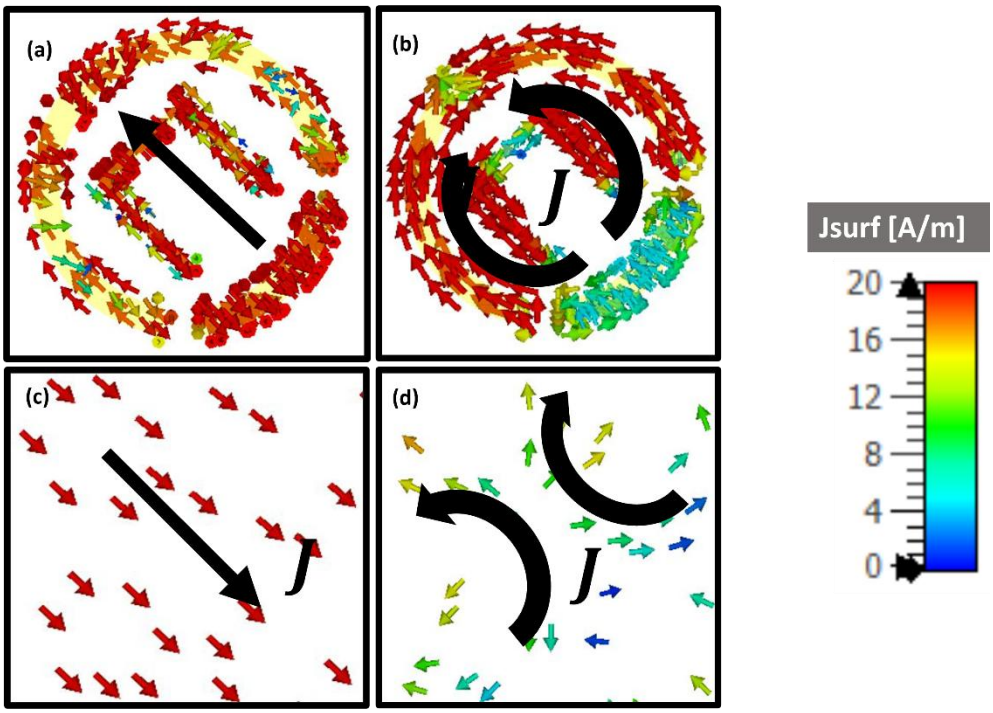


Fig. 6. Surface currents for linearly polarization at 12.45, 29.25 GHz

In the existence of the magnetic field plays crucail role the incident wave, impinging to the metasurface induces the surface currents that arise magnetic dipole moments oriented perpendicular to the metasurface. This magnetic field indicates the formation of a magnetic dipole, which contributes to the magnetic resonances responsible for the broadband behavior of the metasurface. This physical phonomenon are given in Equ. (4) and (5). (Khan, Fraz et al. 2017).

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{J} \\ \boldsymbol{M} \end{bmatrix} = iw \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha_{ee}} & \boldsymbol{\alpha_{em}} \\ \boldsymbol{\alpha_{me}} & \boldsymbol{\alpha_{mm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{H} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{p} \\ \boldsymbol{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{ee} & \alpha_{em} \\ \alpha_{me} & \alpha_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{H} \end{bmatrix} \tag{5}$$

Here, $\boldsymbol{J}$ and $\boldsymbol{M}$ are electric and magnetic surface current densities, respectively. w is the angular frequency of the incident wave. $\boldsymbol{\alpha_{ee}}, \boldsymbol{\alpha_{em}}, \boldsymbol{\alpha_{em}}, \boldsymbol{\alpha_{em}}$ are electric and magnetic polarizatabilities of particules on the metasurface. $\boldsymbol{E}$ and $\boldsymbol{H}$ electric and magnetic field at the metasurface.

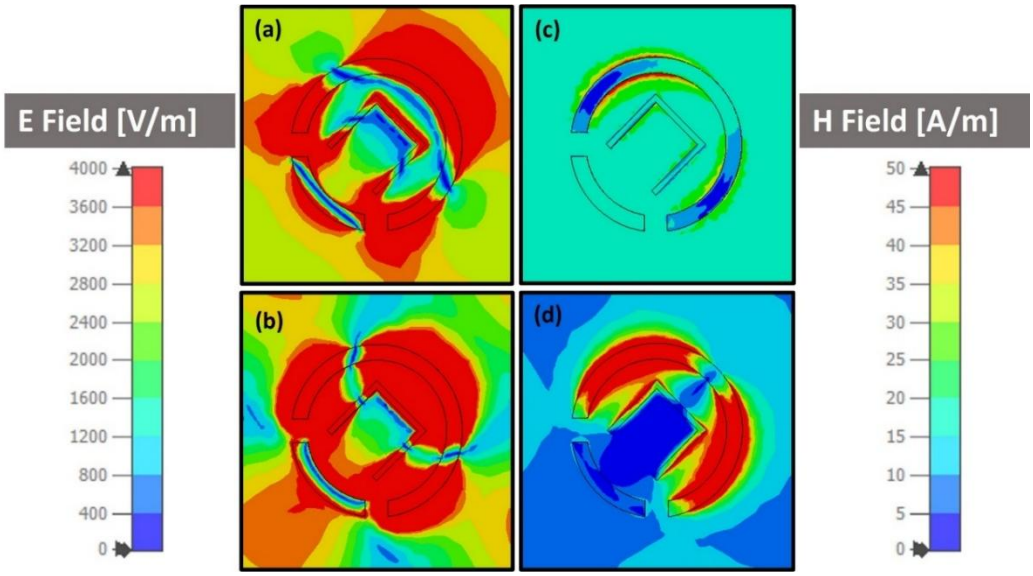


Fig. 7. E-field distributions at (a) 12.45, (b) 29.25 GHz; H-field distributions at (c) 12.45, (d) 29.25 GHz

In Fig. 7, the E-field and H-field distributions are shown on the surface of the metasurface at 12.45 and 29.25 GHz. In Fig. 7(a) and 7(b), the electric field distributions are enclosed within the C-shaped structure. In Fig. 7(c) and 7(d), the magnetic fields are more concentrated on the C-shaped side. All field distributions exhibit a diagonal pattern in Fig. 7. As a result, the different positions of the electric and magnetic responses correspond to different resonance frequencies.

Tablo 1. Literature comparisons

Ref.	Operation Type	Conversion Type	Frequency Band Region (GHz)	Total Bandwidth (GHz) with PCR (90%)	Angular Stability
[1] (Liu, Zhou et al. 2022)	Reflection	LTC	29-41.5 52.5-61.5	21	45
[2] (Shah, Shoaib et al. 2021)	Transmission	LTC	5.18-5.23 10.64-10.82 12.25–12.47 14.42–14.67	0.75	45
[3] (Agrahari, Rajbhar et al. 2023)	Reflection	LTL LTC	10.3-15.26 ---------- 8.97-9.75 17.51-23.93	4.97 7.2	-
[4] (Qiu, Fang et al. 2023)	Reflection	LTL	6-9	3	-
[5] (Chandra, Samantaray et al. 2022)	Reflection	LTL	4.6-10.8	10.2	**-**
[6] (Xu, Gao et al. 2022)	Reflection	LTL	9.2-18.7	9.5	75
This Study	**Reflection**	**LTL**	**11.95-12.6 23.5-35.0**	**12.15 (90)**	**30**

Table 1 compares the literature studies in terms of the metasurface process type, conversion type, frequency band region, total bandwidth and anglular stability. In this table, it is seen that studies 3, 4, and 5 don't have any angular stability. As study 1 operates in the higher band according to this study. It has a wider bandwidth. However, this study outperforms studies 2, 3, 4, 5, and 6 in terms of total bandwidth. It is understood from Table 1, this designed metasurface study can efficiently reflect linear polarized waves by rotating 90^0 and will take its place in the literature.

4. Conclusion

This research introduces a novel cross-polarizer metasurface operating in reflection mode. In this paper, a split ring inluding U-shaped has been designed as a unit cell. Roger 5880 substrate with a thickness of 1.6 mm has been used in the design. This design achieves over 90% efficiency in converting a linearly polarized wave (x, y) into another linear polarized wave (y, x) within the frequency ranges of 11.95-12.6 GHz and 23.5-35 GHz. Additionally, this metasurface maintains angular stability up to 30^0. It can be applied in linear polarization conversion for K- and Ka- bands.

Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

References

Agrahari, R., et al. (2023). "Metasurface assisted wideband multifunctional polarizer." Journal of Applied Physics 133(9).

Al-Nuaimi, M. K. T., et al. (2019). "Design of inhomogeneous all-dielectric electromagnetic-wave diffusive reflectarray metasurface." IEEE Antennas Wireless Propagation Letters 18(4): 732-736.

Al-Nuaimi, M. K. T., et al. (2019). "Design of diffusive modified chessboard metasurface." IEEE Antennas Wireless Propagation Letters 18(8): 1621-1625.

Amin, M., et al. (2022). "Anti-reflecting metasurface for broadband polarization independent absorption at Ku band frequencies." Scientific Reports 12(1): 20073.

Bi, Y., et al. (2022). "Magnetically controllable holographic encryption based on a magneto-optical metasurface." Optics Express 30(5): 8366-8375.

Chandra, M., et al. (2022). "A broadband transmissive type metasurface cross-polarization converter for EMC application." IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 65(1): 186-194.

Chandra, M., et al. (2022). "A broadband transmissive type metasurface cross-polarization converter for EMC application." IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 65(1): 186-194.

Cildir, A., et al. (2024). An Innovative Metasurface Polarizer Working in 5G Frequency Bands. 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE.

Çıldır, A. (2024). "Multi-functional Multi-band Metasurface for Linear and Circular Polarization in Reflection Mode." Teknik Bilimler Dergisi 14(1): 26-30.

Kamal, B., et al. (2021). "Design and experimental analysis of dual-band polarization converting metasurface." IEEE Antennas Wireless Propagation Letters 20(8): 1409-1413.

Khan, M. I., et al. (2017). "Ultra-wideband cross polarization conversion metasurface insensitive to incidence angle." 121(4).

Liu, J., et al. (2021). "Broadband polarization conversion metasurface for antenna RCS reduction." Transactions on Antennas Propagation 70(5): 3834-3839.

Liu, J., et al. (2021). "Broadband polarization conversion metasurface for antenna RCS reduction." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 70(5): 3834-3839.

Liu, X., et al. (2022). "Dual-band dual-rotational-direction angular stable linear-to-circular polarization converter." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 70(7): 6054-6059.

Nasser, S. S. S. and Z. N. Chen (2021). "Low-profile broadband dual-polarization double-layer metasurface antenna for 2G/3G/LTE cellular base stations." IEEE Transactions on Antennas Propagation 70(1): 75-83.

Qiu, L.-L., et al. (2023). "Wideband high-selective linear polarization converter and its application in bifunctional metasurface for reduced isolation band." 71(3): 2735-2744.

Rashid, A., et al. (2023). "A single-layer, wideband and angularly stable metasurface based polarization converter for linear-to-linear cross-polarization conversion." Plos one 18(1): e0280469.

Razzicchia, E., et al. (2023). Metasurface Technology for Medical Imaging. Electromagnetic Imaging for a Novel Generation of Medical Devices: Fundamental Issues, Methodological Challenges and Practical Implementation, Springer: 69-99.

Samantaray, D. and S. Bhattacharyya (2020). "A gain-enhanced slotted patch antenna using metasurface as superstrate configuration." IEEE Transactions on Antennas Propagation 68(9): 6548-6556.

Shah, S. M. Q. A., et al. (2021). "A multiband circular polarization selective metasurface for microwave applications." Scientific reports 11(1): 1774.

Shukoor, M. A., et al. (2022). "Broadband chiral-type linear to linear reflecting polarizer with minimal bandwidth reduction at higher oblique angles for satellite applications." IEEE Transactions on Antennas

Propagation 70(7): 5614-5622.

Shukoor, M. A., et al. (2022). "Broadband chiral-type linear to linear reflecting polarizer with minimal bandwidth reduction at higher oblique angles for satellite applications." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 70(7): 5614-5622.

Ullah, N., et al. (2022). "Recent advancement in optical metasurface: fundament to application." Micromachines 13(7): 1025.
Wahidi, M. S., et al. (2020). "Multifunctional single layer metasurface based on hexagonal split ring resonator." IEEE access 8: 28054-28063.
Wang, K., et al. (2022). "Design of high-gain metasurface antenna based on characteristic mode analysis." IEEE Antennas Wireless Propagation Letters 21(4): 661-665.
Wang, M. and Z. Zhai (2020). "Wide-angle circular polarization converter based on a metasurface of Z-shaped unit cells." Frontiers in Physics 8: 527394.
Wu, X., et al. (2023). "Multitarget wireless power transfer system strategy based on metasurface-holography multifocal beams." IEEE Transactions on Microwave Theory
Techniques 71(8): 3479-3489.
Xu, G., et al. (2022). "Broadband polarization manipulation based on W-shaped metasurface." 9: 850020.
Yang, H., et al. (2023). "A THz-OAM wireless communication system based on transmissive metasurface." IEEE Transactions on Antennas Propagation 71(5): 4194-4203.
Zhang, X. G., et al. (2022). "A metasurface-based light-to-microwave transmitter for hybrid wireless communications." Light: Science Applications 11(1): 126.
Zhao, Y., et al. (2019). "Ultra-wideband and wide-angle polarization rotator based on double W-shaped metasurface." AIP Advances 9(8).

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 623-631, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Araştırma Makalesi

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1508001

Research Article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE AND FINENESS OF KAOLIN FROM BALIKESİR REGION ON POZZOLANIC ACTIVITY

Nuri IŞILDAR[1*], Mutlu İrem TUNCER[2], Metin DAVRAZ[3], Şemsettin KILINÇARSLAN[4]

[1]Natural and Industrial Building Materials R&A Center, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye
[2] Department of Construction, Yalvaç Technical Sciences Vocation School, Isparta University of Applied Science, Isparta, Türkiye
[3] Department of Civil Engineering, Technology Faculty, Isparta University of Applied Science, Isparta, Türkiye
[4] Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye

Keywords

Kaolin, Metakaolin, Fineness, Compressive Strength, Pozzolanic Activity.

Abstract

The use of mineral additives in cement production supports an environmentally friendly production process by reducing the amount of clinker and significantly reducing CO_2 emissions. Methacholine, obtained as a result of calcination of kaolin at high temperatures, is used effectively as a pozzolan. The study was carried out in two stages to determine the effect of calcination temperature and fineness on the pozzolanic activity index. In the first stage, kaolin was calcined at 3 different temperatures: 600°C, 750°C and 900°C. Mortar samples in accordance with the standard were prepared to determine the pozzolanic activity strength index depending on the calcination temperature. When the 28-day pozzolanic activity strength index results were examined, it was seen that kaolin calcined at 600°C provided the best strength value of 122%. In the second part of the study, the material calcined at 600 °C was ground to three different finenesses as 13800 cm^2/g, 15900 cm^2/g and 18700 cm^2/g, and mortar samples were prepared to determine the pozzolanic activity strength index. As the fineness increased, the pozzolanic activity strength index values also increased.

BALIKESİR BÖLGESİNE AİT KAOLİNİN KALSİNASYON SICAKLIĞININ VE İNCELİĞİNİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Anahtar Kelimeler

Kaolin, Metakaolin, İncelik, Basınç Dayanımı, Puzolanik Aktivite.

Özet

Mineral katkıların çimento üretiminde kullanılması klinker miktarını azaltırken CO_2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak çevre dostu bir üretim sürecini desteklemektedir. Kaolinin yüksek sıcaklıklarda kalsinasyonu sonucu elde edilen metakolin, puzolan olarak etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Çalışma kalsinasyon sıcaklığının ve inceliğin puzolanik aktivite indeksine etkisini belirlemek amacıyla 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kaolin 600°C, 750°C ve 900°C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta kalsine edilmiştir. Kalsinasyon sıcaklığına bağlı olarak puzolanik aktivite dayanım indeksini belirlemek için standarda uygun harç numuneleri hazırlanmıştır. 28 günlük puzolanik aktivite dayanım indeksi sonuçları incelendiğinde %122 ile en iyi dayanım değerini 600°Cde kalsine edilen kaolinin sağladığı görülmüştür. Çalışmanın ikinci kısmında 600 C° de kalsine edilen malzeme 13800 cm^2/g, 15900 cm^2/g ve 18700 cm^2/g olmak üzere 3 farklı incelikte öğütülmüş ve puzolanik aktivite dayanım indeksinin tespiti için harç numuneleri hazırlanmıştır. İnceliğin artmasıyla birlikte puzolanik aktivite dayanım indeksi değerlerin de artış görülmüştür.

Alıntı / Cite

Işıldar, N., Tuncer, M.İ., Davraz, M., Kılınçarslan, Ş. (2025). Investigation of The Effect of Calcination Temperature and Fineness of Kaolin from Balikesir Region on Pozzolanic Activity, Journal of Engineering Sciences and Design,13(2), 623-631.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)
N. Işıldar, 0000-0001-6639-3650
M.İ. Tuncer, 0000-0002-7445-756X
Ş. Kılınçarslan, 0000-0001-8253-9357
M. Davraz, 0000-0002-6069-7802

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	01.07.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	24.03.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: nuriisildar@sdu.edu.tr, +90-246-211-8206

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CALCINATION TEMPERATURE AND FINENESS OF KAOLIN FROM BALIKESİR REGION ON POZZOLANIC ACTIVITY

Nuri IŞILDAR[1†], Mutlu İrem TUNCER[2], Metin DAVRAZ[3], Şemsettin KILINÇARSLAN[4]
[1]Natural and Industrial Building Materials R&A Center, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye
[2] Department of Construction, Yalvaç Technical Sciences Vocation School, Isparta University of Applied Science, Isparta, Türkiye
[3] Department of Civil Engineering, Technology Faculty, Isparta University of Applied Science, Isparta, Türkiye
[4] Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Süleyman Demirel University, Isparta, Türkiye

Highlights

- Investigation of the effects of calcination of kaolin at different temperatures
- Determination of the role of fineness on pozzolanic activity
- Investigation of the use of kaolin material in concrete in Balıkesir region.

Graphical Abstract

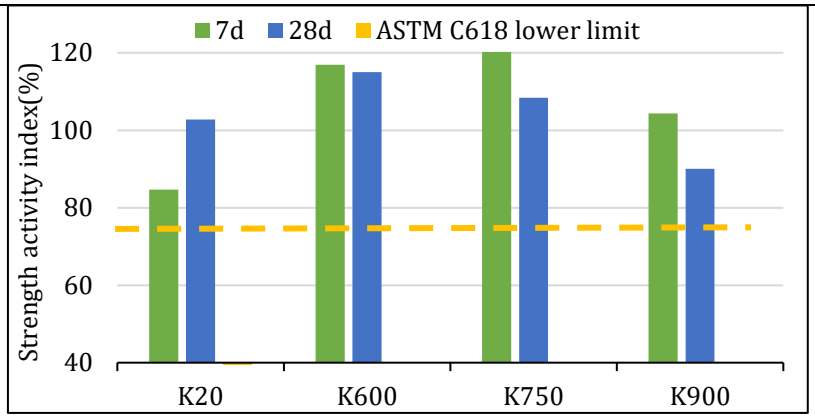


Figure. 7 and 28 Strength activity index values

Purpose and Scope
This study aims to determine the effect of kaolin calcined at different temperatures and fineness on the pozzolanic activity index.
Design/methodology/approach
The effect of kaolin calcined at different temperatures and fineness on the pozzolanic activity index was determined by testing the compressive strength.
Findings
According to the results of compressive strength tests, it was determined that kaolin calcined at different temperatures and fineness affected the pozzolanic activity index.
Research limitations/implications
In future studies, it is recommended to investigate the effect on the pozzolanic activity index by using different calcination methods.
Social Implications
It is predicted that the use of kaolin as a mineral additive can reduce CO_2 emissions in clinker production.
Originality
This study presents a more effective usage method by revealing the effect of kaolin calcined at different fineness and temperature on the pozzolanic activity index.

† İlgili yazar / Corresponding author: nuriisildar@sdu.edu.tr, +90-246-211-8206

1. Introduction

Nowadays, increasing environmental awareness and sustainability targets lead to significant changes in the construction and building materials industry (Yılmaz and Bakış, 2015). In this context, cement production draws attention as one of the largest sources of carbon dioxide emissions worldwide. The high amount of energy consumption and CO_2 emission in the cement production process necessitates the development of more environmentally friendly and sustainable production methods in the sector (He et al., 2019).

In cement production, pozzolans are widely used additives to improve environmental sustainability and product performance (Tulashie et al., 2021). Pozzolans are silica or alumina-containing materials that do not exhibit binding properties on their own but gain binding properties with cement when they react with water. They are divided into 3 main categories as natural pozzolans (such as volcanic tuffs and diatomites), artificial pozzolans (such as fly ash, blast furnace slag and silica fume) and processed natural pozzolans (such as calcined clay) (Erdoğan, 2007). Pozzolans provide chemical and physical advantages in the cement matrix. Chemically, pozzolans react with calcium hydroxide released during hydration reactions to form more durable calcium silicate hydrate (C-S-H) phases, which increases the long-term durability of cement (Şişman et al., 2022). Physically, the fine-grained structure of pozzolans helps to improve the microstructure of concrete and reduce the void ratio. This increases impermeability and durability. Furthermore, the use of pozzolans provides a significant environmental benefit in cement production. While a large amount of CO_2 is emitted in the production of traditional Portland cement, pozzolans offer an environmentally friendly alternative with a low carbon footprint (Ceylan, 2020).

Clays undergo significant chemical and physical changes at high temperatures, making them valuable material for various industrial applications (Astudillo et al., 2023). When heated at high temperatures (generally in the range of 600-900°C), the bound water molecules in the internal structure of clays are released and the mineral structure of the clay is transformed (Hollanders et al., 2016; Gültekin and Ramyar, 2022). In this process, the aluminum silicate minerals in the clay content turn into an amorphous structure, which makes the clay reactive. This transformation at high temperature increases the usability of clays as pozzolans in cement production (Snellings et al., 2023). When calcined clay is included in the cement matrix, it reacts with calcium hydroxide released during the hydration process to form more durable calcium silicate hydrate (C-S-H) phases (Özcan and Güngör, 2019). Calcined clay obtained by heating clays at high temperatures offers significant advantages when used as a binding material in concrete and mortar mixtures. In addition, the calcination process increases the surface area and reactivity of the clay, helping to reduce the amount of energy used in cement production and CO_2 emissions (Erdemoğlu et al., 2019; Karatas et al., 2020). High temperature calcined clays play an important role not only in the cement industry but also in other industries such as ceramics, refractory materials and catalyst carriers. The mechanical and thermal durability of the clay increases with the effect of high temperatures, which makes calcined clays stand out in applications requiring high performance. As a result, calcination of clays at high temperatures is of great importance for both sustainable material production and industrial efficiency.

In this study, the effect of thermal treatment on the strength activity index of kaolin obtained from the Balıkesir region was investigated. Kaolin samples were calcined at 600°C, 750°C, and 900°C in a furnace in accordance with ASTM C311 standards, and the optimal calcination temperature was determined based on the findings. Additionally, the calcined kaolin was ground to three different fineness levels of 13800 cm^2/g, 15900 cm^2/g, and 18700 cm^2/g using a ball mill, and the effect of fineness on the strength activity index was thoroughly examined. The results indicate that kaolin from the Balıkesir region can be utilized as metakaolin, and its use as a partial replacement for cement has the potential to enhance strength properties while contributing to a reduction in CO_2 emissions. This study provides significant insights into the sustainable utilization of local resources and offers valuable data for the effective use of Balıkesir kaolin by determining its optimal calcination temperature.

2. Material and Methods

In the study, kaolin clay was crushed in a jaw crusher, dried to constant mass at 105°C, ground in a ball mill and calcined at 3 different temperatures (600°C, 750°C and 900°C) for 1 hour. The material was then allowed to cool to room temperature within 24 hours. In order to determine the effect of calcination on the pozzolanic activity index, the compressive strength of mortar samples produced with non-calcined (K20) and calcined kaolin additives was determined on days 7 and 28. According to the results obtained, the optimum calcination temperature was determined. The material was then used in 13800 cm^2/g, 15900 cm^2/g and 18700 cm^2/g finenesses. These fines were milled for 3 different times (120, 150 and 180 min.) and pozzolanic activity indices were determined.

After the grinding and calcination processes of kaolin material, the specific surface area was determined by Blaine device at Süleyman Demirel University (SDU) Natural and Industrial Building Materials Application and Research Centre (DEYMAM) in accordance with TS EN 196-6 standard. Specific surface area measurement is shown in Figure 1. Specific surface area was determined using Equation 1 and Equation 2.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10-\eta_1}} \quad (1)$$

$$S = \frac{524.2K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (2)$$

S, Blaine fineness cm^2/g; K, device constant; η, viscosity of the air at the experimental temperature (20 ±2 ˚C) (Pa.s); e, porosity of the bed; t: time, s; ρ: density of the powder material g/cm^3 ; for the value e=0.500; Equation 2 was used.

Figure 1. Blaine test

CEM I 42.5 R type cement obtained from Isparta Göltaş Cement Company was used in the preparation of mortar specimens. The chemical content of CEM I 42.5 R type cement is given in Table 1 (Göltaş, 2024).

Table 1. Chemical and physical properties of cement

Chemical Component	Content (%)	Physical and Mechanical Properties	
SiO_2	19.30	Fineness (45 μ)	0.50
Al_2O_3	3.95	Fineness (90 μ)	3.50
Fe_2O_3	3.40	Blaine (cm^2/g)	4100
CaO	63.0	Specific Gravity (g/cm^3)	3.14
MgO	1.80	Le Chatelier (mm)	0,60
SO_3	3.00	Setting Time Initial (dk)	170
CI	0.15	Setting Time Final (dk)	265
Free CaO	1.50	2 Days (MPa)	24.5
LOI	3.80	28 Days (MPa)	49.5

In the preparation of the mortars, tap water from the city of Isparta was used. For the production of the samples, TS EN 196-1 CEN standard sand with a density of 2.56 g/cm^3 was used. The granulometry of the standard sand is given in Table 2.

Table 2. Granulometry of standard sand (TS EN 196-1)

Sieve Aperture (mm)	Cumulative Remaining in Sieve (%)
2.00	0.00
1.60	7 ± 5
1.00	33 ± 5
0.50	67 ± 5
0.16	87 ± 5
0.08	99 ± 1

The prepared mortar mixture was placed in 5×5×5 mm mortar molds according to ASTM C311. For each series, 3 samples were cured in lime-saturated water at 20±1°C until the test date. Before measurement, the samples were removed from the water and left to dry to be ready for testing. According to the findings obtained from the tests, the 7-day and 28-day compressive strength of the samples were calculated using Equation 3 according to the TS EN 196-1 standard.

$$f_c = \frac{P}{A} \qquad (3)$$

f_c, compressive strength, N/mm^2; P, axial compressive force, N; A, area of the sample, mm^2.
The pozzolanic activity strength indices were determined using Equation 4 according to ASTM C311 (ASTM, 2022).

$$PAI = \frac{A}{B} \times 100 \qquad (4)$$

PAI, pozzolanic activity strength index, %; A, average compressive strength of the test sample, N/mm^2; B, average compressive strength of the control sample, N/mm^2.

The prepared mortar samples and compressive strength tests are shown in Figure 2.

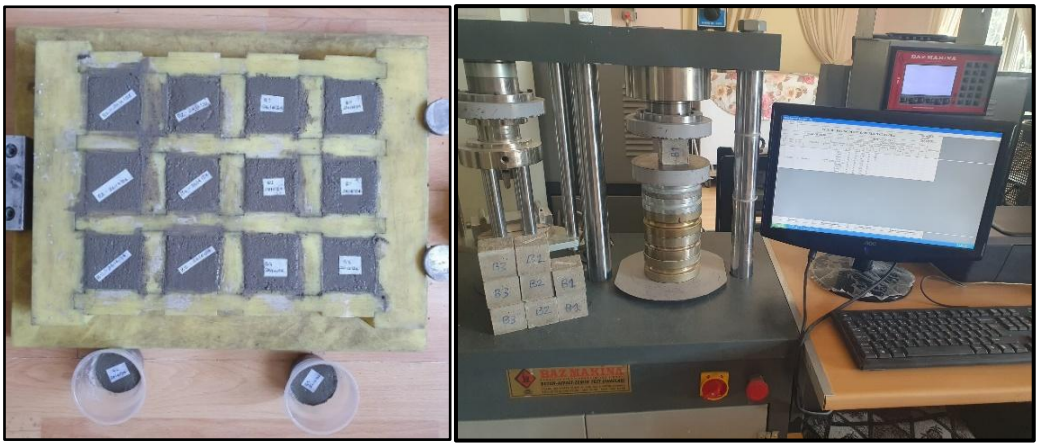


Figure 2. Fresh mortar specimens (left) and compressive strength test (right)

3. Experimental Results

The kaolin used in the study was obtained from a company operating in the Balıkesir-Sındırgı region. The chemical composition of the kaolin was determined using the XRF method at Afyon Kocatepe University (AKÜ) Accredited Natural Stone Analysis Laboratory (DAL), and the findings are presented in Table 3.

Table 3. Chemical composition of kaolin

Chemical Component	Content %
SiO_2	46.75
Al_2O_3	35.53
Fe_2O_3	0.835
CaO	0.46
MgO	0.03
K_2O	0.56
Na_2O	1.23

The specific gravity of the kaolin used in the production of the mortar samples was determined using the Micromeritics Accupyc II 1340 gas pycnometer device located at SDÜ DEYMAM. In the measurement, ASTM D 5550-06 standard was referenced, a 10 cm^3 measuring cup was used, and for each non-calcined and calcined sample, 5 repetitions were performed, with the average values presented in Table 4. Additionally, the Blaine test findings are presented in Tables 5 and 6.

Table 4. Average mass values of kaolin samples determined by gas pycnometer

Kaolin Clay	Density (g/cm³)
K20	2,64
K600	2,68
K750	2,69
K900	2,71

Table 5. Blaine values of kaolin grinded at constant time and calcined at different temperatures

K	ρ	η_1	e	t	S
22.492	2.64	0.00001819	0.495	1015	13747
22.492	2.64	0.00001819	0.488	1045	13491
22.492	2.64	0.00001819	0.497	1015	13886
Average (K20)					**13708**
22.492	2.68	0.00001819	0.490	1025	13403
22.492	2.68	0.00001819	0.504	1000	14197
22.492	2.68	0.00001819	0.496	1020	13812
Average (K600)					**13804**
22.492	2.69	0.00001819	0.492	1035	13547
22.492	2.69	0.00001819	0.498	1010	13822
22.492	2.69	0.00001819	0.506	990	14203
Average (K750)					**13857**
22.492	2.71	0.00001819	0.493	1080	13829
22.492	2.71	0.00001819	0.497	1065	14017
22.492	2.71	0.00001819	0.494	1080	13882
Average (K900)					**13909**

Table 6. Blaine values of kaolin clays grinded at different times and calcined at 600°C

K	ρ	η_1	e	t	S
22.492	2.68	0.00001819	0.490	1025	13403
22.492	2.68	0.00001819	0.504	1000	14197
22.492	2.68	0.00001819	0.496	1020	13812
Average (B1)					**13804**
22.492	2.68	0.00001819	0.489	1480	16025
22.492	2.68	0.00001819	0.484	1535	15893
22.492	2.68	0.00001819	0.485	1504	15797
Average (B2)					**15905**
22.492	2.68	0.00001819	0.499	1860	18890
22.492	2.68	0.00001819	0.493	1890	18439
22.492	2.68	0.00001819	0.496	1900	18769
Average (B3)					**18700**

The water requirement of the mortar mixtures was determined using a Vicat needle according to ASTM C618 Standard. Accordingly, the quantities of materials used in the production of the mortar mixtures are given in Table 7.

Table 7. Components of reference and kaolin added mortars

Specimens	Cement (g)	Kaolin (g)	Sand (g)	Water (g)
Reference	500	-	1375	242
K20	400	100	1375	244
K600	400	100	1375	245
K750	400	100	1375	246
K900	400	100	1375	247
B1	400	100	1375	245
B2	400	100	1375	246
B3	400	100	1375	247

K* Calcination temperatures. Numbers are degrees of temperature.

B* Blaine values. 1-2-3 symbolizes increasing fineness.

3.1 The Effect of Calcination Temperature on Mortar Compressive Strength

The results of compressive strength tests applied to samples obtained at 7 and 28 days within the scope of the study are presented in Figure 3. When examining the effects of using calcined kaolin mineral in concrete on strength, it was observed to increase strength compared to the reference sample. Upon examining the maximum strengths at 7 and 28 days, the highest compressive strength at 7 days was achieved at 750°C, measuring 46.08 MPa, while at 28 days, the highest compressive strength was recorded at 600°C, measuring 54.03 MPa. Consequently, based on the evaluation using 28-day compressive strength values, a calcination temperature of 600°C is found to be suitable.

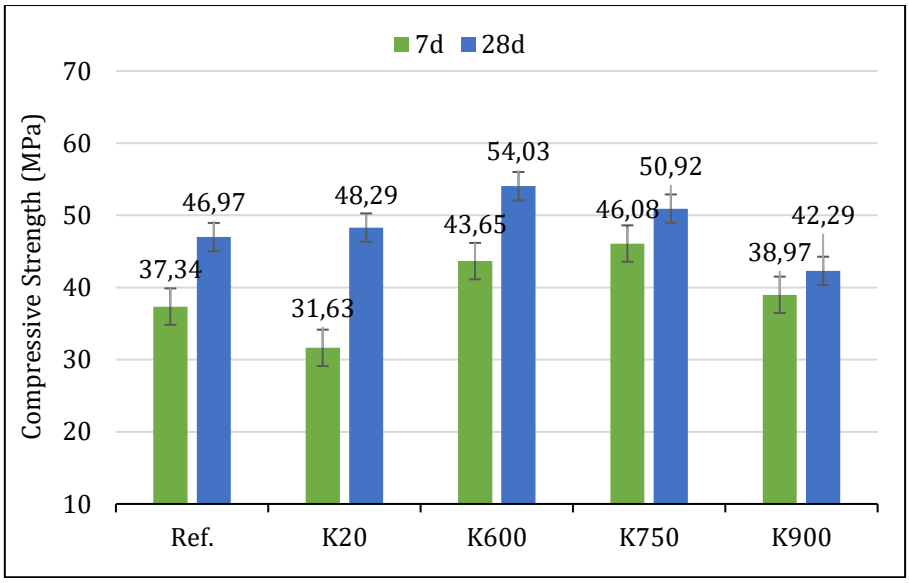


Figure 3. Compressive strength values of mortar specimens at 7 and 28 days

According to ASTM C618 standard, the minimum PAI (pozzolanic activity index) for pozzolanic materials is 75% at 7 and 28 days. In this study, kaolin samples calcined at different temperatures exhibit PAI values above 75% (Figure 4).

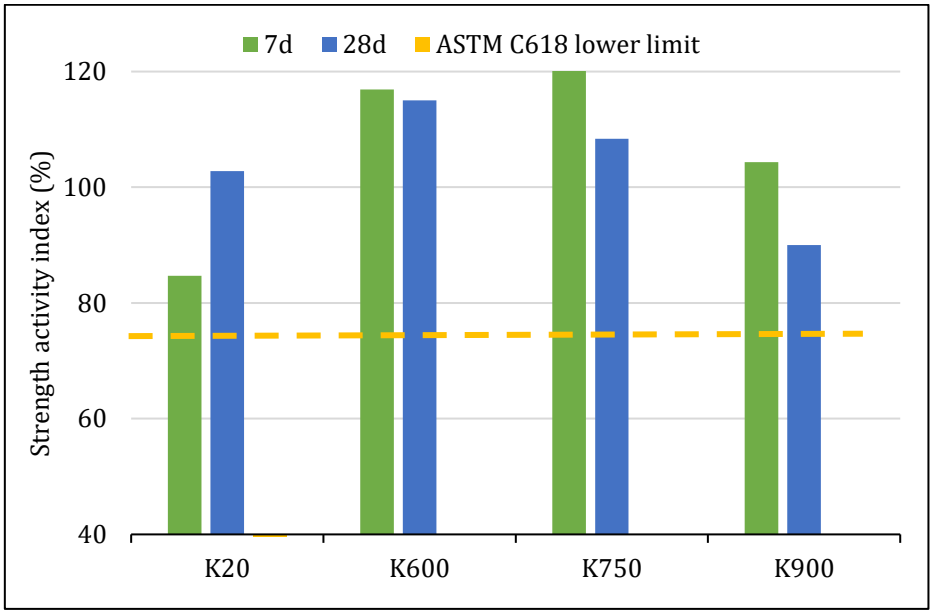


Figure 4. Temperature dependent variation of 7 and 28 days pozzolanic activity index values

3.2 The Effect of Specific Surface Area on Pozzolanic Activity

In the study, based on the findings, the most suitable calcination temperature was determined to be 600°C. The kaolin clay subjected to calcination at this temperature was ground at different durations in a ball mill, and their

specific surface areas were determined using the Blaine test device according to TS EN 196-6 standard. The specific surface areas of the samples were calculated as 13800 cm^2/g (B1), 15900 cm^2/g (B2), and 18700 cm^2/g (B3). The effects of these three differently ground calcined kaolin samples on compressive strength and PAI values are presented in Figures 5 and 6.

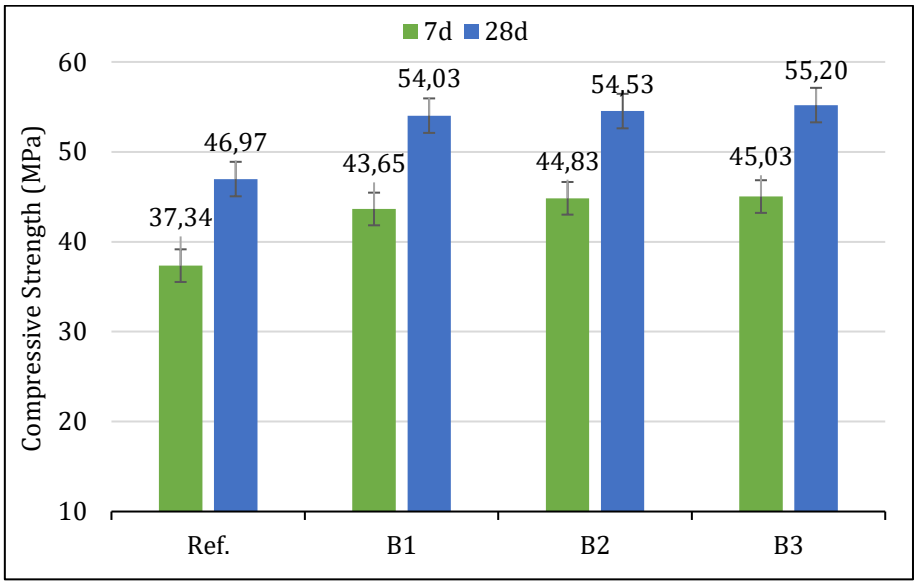


Figure 5. Compressive strength values of mortar specimens at 7 and 28 days

According to the experimental results, all mortar samples exhibited higher compressive strength compared to the reference sample. The highest compressive strength, 55.20 MPa, was achieved in sample B3. However, the strength values are very close to each other. When evaluated in terms of strength activity index, it was determined that calcined kaolin samples with three different fineness levels meet the requirements of ASTM C618 standard.

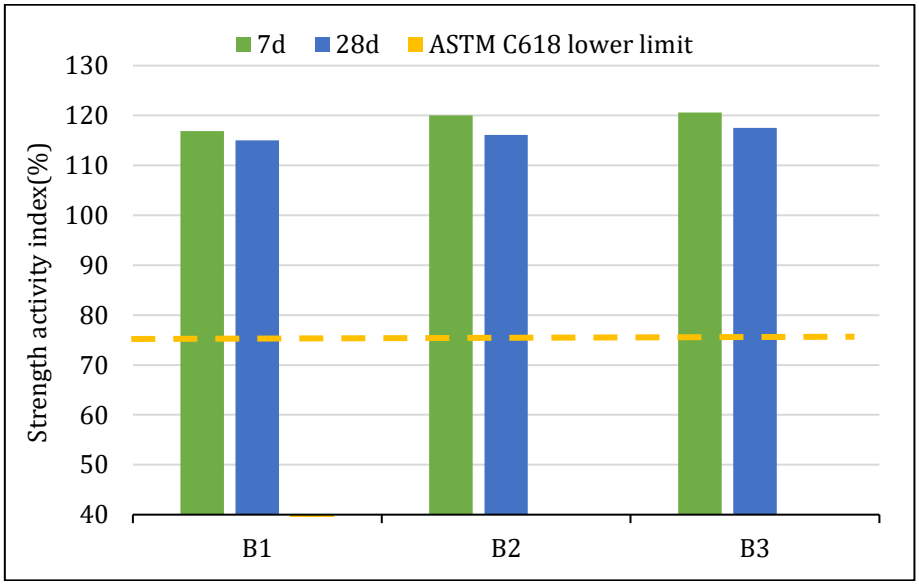


Figure 6. Variation of 7 and 28 day pozzolanic activity index values depending on different finenesses

4. Discussion and Conclusion

In this study, variations in the pozzolanic activity index of kaolin clay according to ASTM C618 standard were investigated as a function of calcination temperature and fineness. The changes observed in kaolin after calcination at different temperatures, along with the effects of material fineness levels on compressive strength and pozzolanic activity, were evaluated. The results indicate that calcination temperature has a more significant effect on the pozzolanic properties and mechanical performance of kaolin. Detailed analysis of the results revealed the following:

- No significant change was observed in specific surface areas of kaolin ground to a constant fineness before and after heat treatment.
- The optimal calcination temperature for mortar compressive strength was determined to be 600°C.
- Mortars produced with kaolins of different fineness at the optimal calcination temperature resulted in a 13% and 35% increase in pozzolanic activity index, corresponding to a 1% and 2.2% increase in compressive strength, respectively.
- Due to the pozzolanic reactivity of calcined clay, the use of kaolin as an additive improved the compressive strength of mortars by 14% and 25% at 7 and 28 days, respectively.

The test results suggest that despite the increase in specific surface area, the lack of significant increase in compressive strength indicates that maximum pozzolanic reactivity has been achieved (Siline, M., & Mehsas, B., 2022). Similar conclusions were drawn in this study as well. Compressive strength results at specific surface areas of 13800, 15900, and 18700 cm^2/g were consistently close at 7 and 28 days. Therefore, economically speaking, calcined kaolin at approximately 14000 cm^2/g fineness and 600°C provides a sufficient pozzolanic activity index ratio. The utilization of kaolin from the Balıkesir region as a partial replacement for cement in varying proportions and the investigation of its activity factor would be a valuable area of study.

Conflict of Interest

The authors have not declared any conflict of interest.

References

ASTM C311/C311M-22, 2022. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0311_C0311M-22.

ASTM C618-19, 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0618-19.

ASTM D 5550-14, 2016. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.

Astudillo, B., Martín, D. A., Costafreda, J. L., Presa, L., Sanjuán, M. A., & Parra, J. L., 2023. Improvement of the Mechanical Properties of Mortars Manufactured with Partial Substitution of Portland Cement by Kaolinitic Clays. Buildings, 13(7), 1647. https://doi.org/10.3390/buildings13071647.

Ceylan, H., 2020. Isparta Tüfünün Puzolanik Özelliklerinin Araştırılması. Teknik Bilimler Dergisi, 10(2), 1-6. https://doi.org/10.35354/tbed.726102.

Erdemoğlu, M., Birinci, M., Uysal, T., 2018. Kil Minerallerinden Alümina Üretimi: Güncel Değerlendirmeler. Politeknik Dergisi, 21(2), 387-396. https://doi.org/10.2339/politeknik.386907.

Erdoğan T. Y., 2007. Beton, Published by METU Press Publishing Company, 760s.

Göltaş, 2024. Goltas Cement Inc. Isparta/Turkey. https://www.goltas.com.tr/(accepted 07 April 2024).

Gültekin, A., Ramyar, K., 2022. Mikrodalga Isıl İşlemi Uygulanan Kaolinin Puzolanik Aktivitesinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(3), 758-765. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1114737.

He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., Wang, Y., 2019. Comparison of CO2 Emissions From OPC and Recycled Cement Production. Construction and Building Materials, 211, 965-973. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289.

Hollanders, S.,Adriaens, R.,Skibsted, J., Cizer, Ö., Elsen, J., 2016. Pozzolanic Reactivity of Pure Calcined Clays. Applied Clay Science, 132-133, 552-560. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.003.

Karatas, M., Benli, A., Arslan, F., 2020. The Effects of Kaolin and Calcined Kaolin on the Durability and Mechanical Properties of Self-Compacting Mortars Subjected to High Temperatures. Construction and Building Materials, 265, 120300. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300.

Özcan, U., Güngör, S., 2019. Sürdürülebilir Bir Yöntem/Betonda Puzolan Kullanımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (15), 176-182. https://doi.org/10.31590/ejosat.517346.

Siline, M., Mehsas, B., 2022. Effect of Increasing the Blaine Fineness of Metakaolin on Its Chemical Reactivity. Journal of Building Engineering, 56, 104778.

Snellings, R., Suraneni, P., Skibsted, J., 2023. Future and Emerging Supplementary Cementitious Materials. Cement and concrete research, 171, 107199. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199.

Şişman, C. B., Ozocak, M., Kocaman, İ., 2022. Usage of The Agricultural Wastes as A Pozzolan in Concrete Production. Architectural Sciences and Building Materials, 257-281.

TS EN 196-1, 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. Turkish Standards Institute.

TS EN 196-6, 2020. Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness. Turkish Standards Institute.

Tulashie, S. K., Ebo, P., Ansah, J. K., Mensah, D., 2021. Production of Portland pozzolana cement from rice husk ash. Materialia, 16, 101048. https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101048.

Yılmaz, M., Bakış, A., 2015. Sustainability in construction sector. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 195, 2253-2262. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.312.

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 632-648, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1610170

Araştırma Makalesi Research Article

TÜNEL YAPILARINDA KARŞILAŞILAN MÜHENDİSLİK PROBLEMLERİNİN JEOFİZİK YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ: BURSA İLİ DOĞANCI TÜNELİ ÖRNEĞİ

Mustafa KİRİCİ[1], Hakan KARSLI[2]*

[1] Zimer Mühendislik, Trabzon, Türkiye

[2] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi, Elektrik Özdirenç Tomografi, Yer Radarı, Tünel.

Öz

Tüm dünyada karayolu tünellerin yapımı sırasında ve sonrasında, jeolojik koşullardan kaynaklı pek çok mühendislik problemi ile karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada, Bursa İli Osmangazi-Orhangazi ilçeleri bağlantı karayolundaki Doğancı Tüneli'nin yan ve tavan duvarlarından su sızıntılarının ve ilişkili oluşan deformasyonların belirlenmesinde, üç farklı jeofizik yöntemin sağladığı katkılar incelenmiştir. Bu kapsamda, tünelin iç duvarlarında Yer Radarı (YR), Elektrik Özdirenç Tomografi (EÖT) ve Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi (ÇKYDA), tünelin girişinde üst kotta ve çıkışındaki palye üstünde sadece EÖT ölçümleri yapılmıştır. Özdirenç değerleri 4-1000 Ohm.m ve S-dalga hızı değerleri 280-800 m/s arasında elde edilmiştir. Birbirine paralel YR profillerinden tünelin duvarlarının ve dış cephesinin üç boyutlu görüntüleri oluşturulmuştur. Tüm bulgular birlikte değerlendirildiğinde, genel olarak özdirencin ve S-dalga hızının düşük, YR genliklerinin ise görece yüksek olduğu tünel bölümleri su sızıntılarından kaynaklı deformasyonlarla ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, birkaç jeofizik yöntemin birlikte kullanılmasının tünellerde gözlenen deformasyonların kaynağının belirlenmesinde son derece yararlı olduğu görülmüştür.

DETERMINATION OF ENGINEERING PROBLEMS ENCOUNTERED IN TUNNEL STRUCTURES USING GEOPHYSICAL METHODS: THE CASE OF DOĞANCI TUNNEL IN BURSA PROVINCE

Keywords

Multichannel Analysis of Surface Wave, Electrical Resistivity Tomography, Ground Penetrating Radar, Tunnel.

Abstract

During and after the construction of highway tunnels all over the world, many engineering problems originating from geological conditions are encountered. In this study, the contributions of three different geophysical methods were investigated in determining the water leakages and related deformations from the side and ceiling walls of the Doğancı Tunnel on the Osmangazi-Orhangazi districts connection highway of Bursa Province. In this context, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Multi-Channel Surface Wave Analysis (MASW) were measured on the inner walls of the tunnel, and only the ERT measurements were made on the upper level at the entrance and on the berm at the exit of the tunnel. Resistivity values were obtained between 4-1000 Ohm.m and S-wave velocity values were between 280-800 m/s. Three-dimensional images of the tunnel walls and exterior facade were created from parallel ER profiles. When all the findings are evaluated together, the tunnel sections where the resistivity and S-wave velocity are generally low and the YR amplitudes are relatively high are associated with deformations caused by water leaks. As a result, it has been seen that the use of several geophysical methods together is extremely useful in determining the source of the deformations observed in the tunnels.

Alıntı / Cite

Kirici, M., Karslı, H., (2025). Tünel Yapılarında Karşılaşılan Mühendislik Problemlerinin Jeofizik Yöntemlerle Belirlenmesi: Bursa İli Doğancı Tüneli Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 632-648.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. Kirici, 0009-0003-2563-1415
H. Karslı, 0000-0002-7758-1363

Makale Süreci / Article Process	
Başvuru Tarihi / Submission Date	31.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	24.03.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	24.03.2025
Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: hkarsli@ktu.edu.tr, +90-462-377-2020

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROBLEMS ENCOUNTERED IN TUNNEL STRUCTURES USING GEOPHYSICAL METHODS: THE CASE OF DOĞANCI TUNNEL IN BURSA PROVINCE

Mustafa KİRİCİ[1], Hakan KARSLI[2†]
1 Zimer Engineering, Trabzon, Türkiye
2 Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Department of Geophysical Engineering, Trabzon, Türkiye

Highlights

- Use of geophysical methods to detect the source of water leaks in tunnels
- Contributions of combined use of ERT, GPR and MASW methods in determining water leakage and deformations
- Demonstration of applicability of geophysical methods on concrete surfaces

Purpose and Scope
The aim of this study is to investigate the contributions of three different geophysical methods in determining water leakages and related deformations from the side and ceiling walls of the Doğancı Tunnel on the Osmangazi-Orhangazi districts highway in Bursa Province.
Design/methodology/approach
Within this scope, Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical Resistivity Tomography (ERT), and Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) measurements were conducted on the right and left sidewalls and the roof of the tunnel. ERT measurements were also performed on the upper exterior surface and the bench at the tunnel's exit.
Findings
According to all geophysical sections, areas with generally low resistivity and S-wave velocity, along with relatively high GPR amplitudes, were associated with deformations caused by water leakage. As a result, it was concluded that the combined use of several geophysical methods is extremely effective in determining the source of water leakage.
Originality
This study is original in that it is one of the first academic studies in our country that presents the applicability and contributions of geophysical methods in tunnels and on concrete surfaces.

† Corresponding author: hkarsli@ktu.edu.tr, +90-462-377-2020

1. Giriş (Introduction)

Ulusal ve uluslararası ulaşımda zorlu coğrafik koşulların aşılmasında, karayolları, demiryolları ve su kanallarının önemli bir parçasını oluşturan tünellerin tasarımı sırasında yeterli düzeyde dikkate alınmayan jeolojik ve hidrojeolojik koşullar, kaya kütlesinde meydana gelebilecek deformasyonlar veya heyelanlar farklı boyutlarda hasarlara neden olabilmektedir. Bunların yanı sıra, beton kaplı tünellerde destekleyici yapının eskimesi, zamanla deformasyona uğraması, hava koşulları veya uygunsuz inşaat teknikleri nedeniyle de hasarlar meydana gelmektedir. Bu tür hasarların tespit edilmesine yönelik olarak, tünel tavanı ve yan duvarlarındaki kırık ve çatlakların tespiti, boşlukların tanımlanması, kısmen veya tamamen su ile dolu olup olmadığı, su sızıntısının ve içeriğinin belirlenmesi, tünel duraylılığının incelenmesi gibi birçok konuda jeofizik yöntemler oldukça başarılı sonuçlar sağlamaktadır (Cardarelli vd., 2003; Chen vd. 2020; Lyu vd. 2020; Fores vd. 2021; Izumotani vd. 2021; Radinger vd. 2021; Su vd. 2021; Ding vd. 2022; Liu vd. 2023). Uygulamada tünel yüzeyinden ve/veya içinden yapılan ölçümlerde yer radarı (YR), elektrik özdirenç tomografi (EÖT), çok kanallı yüzey dalgası analizi (ÇKYDA) gibi tahribatsız jeofizik yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır (Lin vd. 2020; Sharma vd. 2021; Barbieri vd. 2023). Bu kapsamda, olası problemlerin tespiti ve çözümünde tek bir yöntem yerine birkaç yöntemin birlikte kullanımı ve yorumu daha başarılı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Cardarelli vd., 2003; Ghezzi vd., 2019; Pasierb ve Nawrocki, 2020).

Doğal veya yapay tünellerin ve boşlukların (hava ve/veya su dolu) varlığıyla ilişkili jeolojik risklerin en aza indirilmesine yönelik mühendislik ve çevre projesi çalışmalarında, EÖT ve YR uygulamaları önemli bir yere sahiptir. Tünel amaçlı yeraltı kazılarının yapıldığı yerlerde duraylılık sorunlarının, kaplama malzemelerinin düşme nedenlerinin, dolgu birimlerinin durumunun, boşlukların, kırıkların, su içeriğinin tespit edilmesinde ve konumlandırılmasında (Lin vd., 2020; Feng vd., 2020; Nie vd. 2023), önceki beton (precast)-dolgu beton-doğal zemin sınırlarının belirlenmesinde (Ergüven 2015), beton kalitesinin tespitinde (Sabbağ ve Uyanık, 2017, 2018), tünel içi dolguların yapısal durumu ve kırık-çatlak yerlerinin belirlenmesinde (Sezer, 2010), zeminin ve karstik boşlukların 3B'lu görüntülerinin oluşturulmasında (Capizzi vd., 2005; Aktürk, 2010; Kadıoğlu ve Ulugergerli, 2012) EÖT ve YR yöntemleri önemli uygulama alanı bulmuştur. Bununla birlikte, literatürde birçok çalışmada (Özçep vd. 2010; Uyanık vd., 2013; Pamuk vd. 2017; Durdağ 2018; Uyanık, 2020; Aytaş vd., 2023; Karslı vd. 2024a; Uyanık vd. 2024) yaygın olarak kullanılan ÇKYDA yöntemi, tünel, köprü, baraj gibi yapıların oturacağı zeminin geometrisinin, fiziksel özelliklerinin ve dinamik davranışlarının (büyütme, sıvılaşma, hakim titreşim frekansı), yeraltı boşluklarının, dolgu-zemin ve zemin-kaya ayırımının belirlenmesinde etkin bir jeofizik yöntem olarak kullanılmıştır.

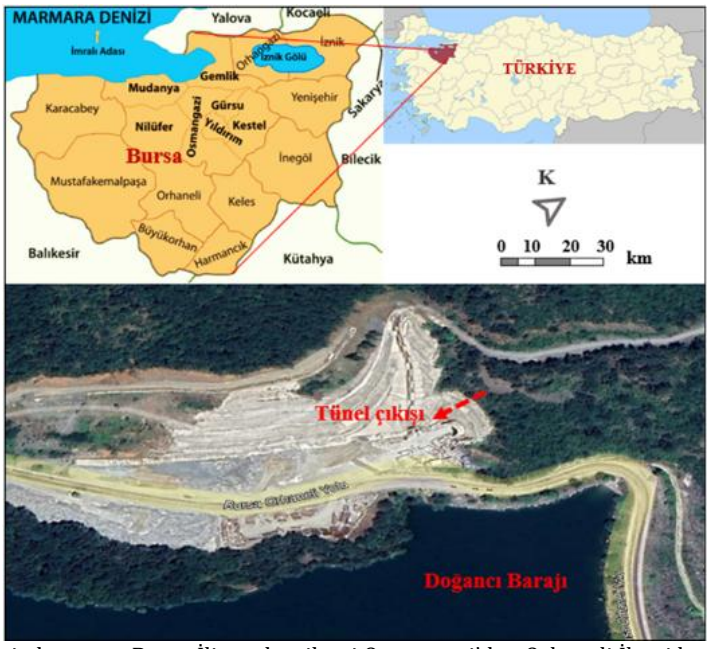
Bu çalışma, Bursa İli Osmangazi İlçesi ile Orhaneli İlçesi arası karayolu güzergahındaki Doğancı köyünde, inşası 2024 yılında tamamlanmış olan Doğancı Tüneli'nin içerisinde, tünelin girişinde üst kotta ve tünelin çıkış tarafı palye (belirli yüksekliklerde şevlere uygulanan basamak sistemi) üzerinde üç farklı jeofizik (ÇKYDA, EÖT ve YR) yöntem uygulanmıştır. Bu kapsamda, zeminin su içeriğinin, S-dalgası hız (Vs) değişiminin ve dolayısıyla tünel duvarlarını etkileyebilecek unsurların (su gelimi, şişme, kırık, çatlak, vb.) tespitinin yapılması ve haritalanması hedeflenmiştir. Doğancı Tüneli'nin konumu ve tünelin geçtiği alanın genel jeolojisi, kullanılan jeofizik yöntemler ve gerçekleştirilen ölçümler hakkında bilgiler, elde edilen jeofizik parametrelerin değişimleri jeofizik bulgulara göre yapılan değerlendirmeler verilmiştir. Çalışmada kullanılan jeofizik yöntemlerin (YR, EÖT ve ÇKYDA) tünel yapılarında karşılaşılması muhtemel su sızıntısı ve deformasyon problemlerinin belirlenmesinde birbirini destekleyici önemli katkılar sağladığı görülmüştür.

2. Çalışma Alanı ve Genel Jeolojisi (Study Area and General Geology)

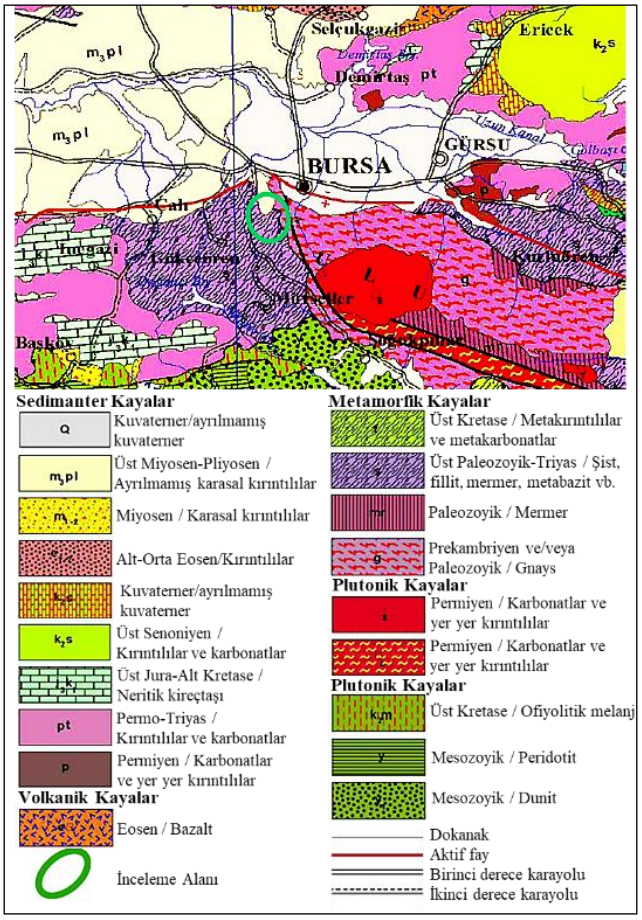
Doğancı Tüneli projesinin konum başlangıcı Km: 8+750.00 (Osmangazi-Orhaneli yolunun 8'nci kilometresinin-K 750'nci metresi-m)ve bitişi Km: 13+205.83 olarak belirlenmiştir. Bursa'nın Orhaneli ilçesini şehir merkezine bağlayan ve inşası 2024 Ocak ayında tamamlanmış olan tünel, Km: 10+420.00' da başlayıp, Km: 12+456.00' da sonlanmakta olup, tünel uzunluğu L=2036 m' dir. Bu tünelde R=2000 m olan yatay kurb (yol planında düz kısımlar arasındaki eğri kısımlar) yer almaktadır (Şekil 1). Tünelin giriş kotu deniz seviyesinden 290 m ve çıkış kotu 366 m olup, tünel güzergahı boyunca Karakaya Karmaşığı'na ait şist-kireçtaşı birimleri gözlenmiştir. Giriş tarafında çoğunlukla şist ve kireçtaşı birimlerinin ardalanması görülürken, çıkış tarafına doğru şist biriminin hakim olduğu raporlanmıştır (KGM, 2019).

Bölgede yüzeyleyen kayaçların stratigrafik dağılımı incelendiğinde, Trias öncesi metasedimanter Kalabak Formasyonu, Çamlık Metagranodiyoriti ve Manyas Grubu birimlerini içeren ve Karakaya Karmaşığına ait metamorfik kayaç topluluklarından oluşan Kazdağ Grubunun egemen olduğu görülmektedir (Bingöl vd. 1973). Tektonik olarak Kazdağ Grubu Metamorfitleri Karakaya Karmaşığı'nın Nilüfer birimi ile örtülmüştür (Okay vd. 1990). Bununla birlikte, Jura-Orta Kretase yaşlı birimler olan Bayırköy Formasyonu üzerine uyumsuz olarak, Bilecik Kireçtaşı ve Vezirhan formasyonu gelmiştir. Diğer yandan, Karakaya Karmaşığı içinde yer alan Hodul birimi

Çamlık Metagranodiyoriti (Balıkesir-Havran kuzeydoğusundaki stratigrafik temel) üzerine uyumsuz olarak gelmiştir Tüm bu istif Tersiyer yaşlı diğer birimler ile örtülmektedir. Tersiyer biriminin üzerine açısal uyumsuzluk ile Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ve alüvyon birimi gelmektedir (Şekil 2).

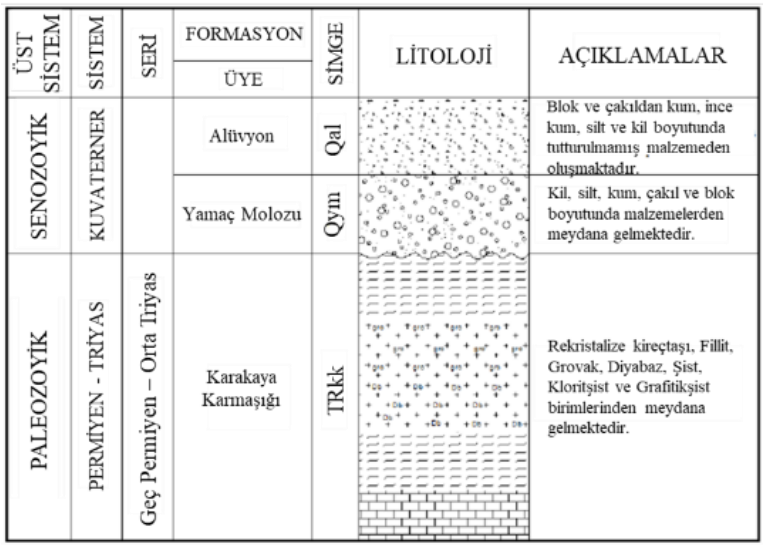


Şekil 1. Doğancı Tüneli'nin konumu. Bursa İli merkez ilçesi Osmangazi'den Orhaneli İlçesi kara yolunun Km:8+750 ve Km:13+205.83 arasındaki Doğancı Köyü (The location of the Doğancı Tunnel. The Doğancı Village between Km: 8+750 and Km: 13+205.83 of the highway from Osmangazi, the central district of Bursa Province, to Orhaneli District)



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin genel jeoloji haritası (MTA, 1/500 000 ölçekli)
(General geological map of the study area and its surroundings (MTA, 1/500 000 scale)

İnceleme alanında yol güzergahı boyunca yaşlıdan gence doğru sırasıyla, Geç Permiyen-Orta Triyas yaşlı Karakaya Karmaşığı, Kuvaterner yaşlı yamaç molozları ve dere alüvyonları geçiş göstermektedir. Karakaya Karmaşığı, yol güzergahı üzerinde en yaygın gözlenen birim olup inceleme alanının temelini oluşturmaktadır. Yeniden kristalize olmuş Kireçtaşı, Fillit, Grovak, Diyabaz, Şist, Kloritşist ve Grafitikşist birimlerinden ve bu kaya birimlerinin fiziksel şartların etkisiyle tamamen ayrışması neticesinde oluşmuş ayrışma ürünlerinden meydana gelmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. İnceleme alanının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (KGM, 2019))
(Generalized stratigraphic section of the study area)

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Kullanılan Jeofizik Yöntemler (Used Geophysical Methods)

Doğancı Barajı Tüneli'n deki su sızıntısı sorununun kaynağını tespit etmek üzere tünelin sağ ve sol yan duvarları ile tünel tavanında, YR, EÖT ve ÇKYDA, tünel içi profillere ek olarak, tünelin üst kodunda ve çıkışındaki palye üstünde yerin su içeriği ve yapısal durumu hakkında bilgi edinmek için sadece EÖT ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

YR yöntemi, yeraltında gömülü nesnelerin ve litolojik arayüzeylerin konumunu belirlemek için elektromanyetik dalganın yayılma ilkelerini kullanır (Jol ve Smith, 1991; Annan, 2003). Farklı elektromanyetik özelliklere sahip gömülü tank, boşluklar, inşaata yönelik temel yapıları, sediman tabakalar, su tablası veya arkeolojik kalıntılar gibi nesnelerin farklı dielektrik sabitli olmasından kaynaklı olarak yer radarı yansımaları oluşmaktadır (Davis ve Annan, 1989). Yöntem farklı frekanslı (Birkaç 10 MHz'den birkaç GHz'e değişen) bir verici (Tx) bir alıcı (Rx) anten kullanarak, yakın yüzey yer altı jeolojik malzemelerin özelliklerini (dielektik sabiti ve geçirgenlik, hız, kırık, çatlak, gözenek, vb.) ve gömülü unsurları (mağara, boşluk, metal olan ve olmayan nesneler) herhangi bir kazıya gerek kalmadan hızlı, güvenli ve tahribatsız bir araştırma yapma imkânı sağlamaktadır. Bu kapsamda, YR ile gerçekleştirilen jeofizik araştırmalar, farklı jeolojik tabakaların belirlenmesi, arkeolojik kazılar, inşaat ve inşaat mühendisliği endüstrileri, ulaşım sistemleri, polis ve adli tıp sektörleri ve güvenlik/istihbarat güçleri için temel olan keşif çalışmalarının verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Yöntemde korumalı (verici ve alıcı anten muhafazalı bir sistem içinde) veya korumasız (verici ve alıcı anten açıkta tutulur) antenler yüzeyde bir profil boyunca ilerletilerek yer içindeki unsurlardan yansıma sinyalleri sürekli olarak kaydedilir. Bu yansıma izlerine radagram denilir ve bu izlerin yüzlercesi bir araya getirilerek 2-boyutlu (2B) radar kesitleri oluşturulur. Ayrıca, bir sahada birbirine paralel 2B'lu radar profilleri birleştirilerek üç boyutlu olarak görüntülenmektedir (Kadıoğlu, 2003).

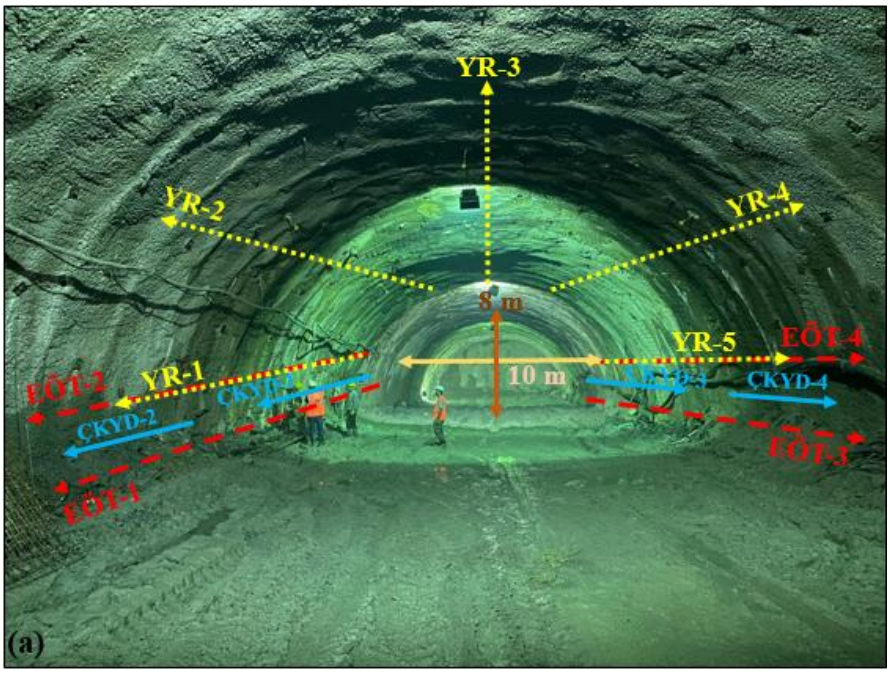
ERT yöntemi, yakın yüzey araştırmalar için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Dahlin, 2001; Loke vd., 2018) ve jeolojik malzemelerin elektriksel özdirençlerindeki değişiklikleri haritalamayı sağlar. Bu nedenle birçok yeraltı yapısal, fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırma ve jeoteknik projelerinde giderek daha önemli bir hale gelmiştir (Loke vd., 2013; Loke vd., 2018). Bunlar mineral arama (Irawan vd., 2013; Arifin vd., 2019), hidrokarbon arama (Bauman, 2005), kirliliğin izlenmesi (Chambers vd., 2006; Rucker vd., 2010), yeraltı suyunun araştırılması (Page, 1968; Yılmaz ve Yıldırım, 2021), tuzlu su girişiminin haritalanması (Wilson vd., 2006; Kaya vd., 2015; Babacan ve Ceylan, 2021), arkeolojik arama (Tsokas vd., 2008; Gündoğdu vd., 2017; Yılmaz vd., 2019; Yılmaz vd., 2021), katı atık depolama alanlarının yer seçimi (Karslı vd., 2024), yeraltı boşluklarının tespiti (Cardarelli vd., 2006; Funk vd., 2024; Alemdağ vd., 2024) gibi temel araştırma alanları olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, ERT yöntemi jeolojik, çevresel, mühendislik ve hidrojeolojik sorunlarının tespitine ve çözümüne yönelik olarak

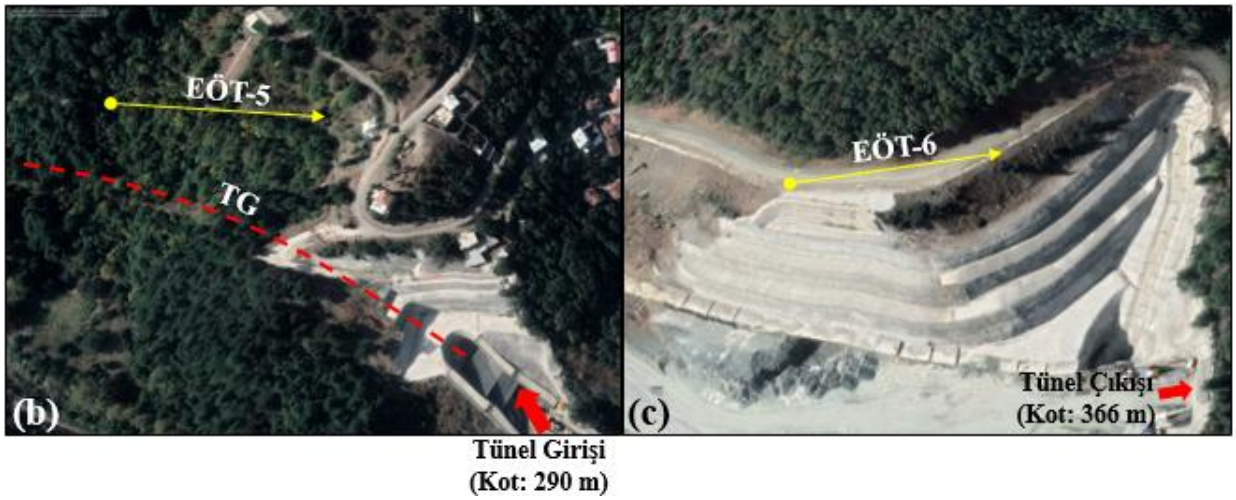
yeraltının 2B ve 3B'lu modellerin elde edilmesini sağladığı için (Griffiths ve Barker, 1993), jeoteknik proje çalışmalarında etkili ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Loke vd., 2013; Abdullah vd., 2018; Babacan ve Ceylan, 2021).

ÇKYDA yöntemi, sığ jeofizik araştırmalarda S-dalga hızının (Vs) derinlik değişiminin pratik ve güvenilir olarak elde edilmesi için geliştirilen tahribatsız bir sismik yöntemdir ve son yirmi yıldır yakın yüzey yer altı karakterizasyonu için etkin ve geniş bir kullanım alanına sahiptir (Park vd., 1999; Miller vd., 1999; Socco ve Strobbia, 2004; Park vd., 2004; Foti vd., 2011; Geraldine C vd., 2018; Karslı 2018; Karslı vd., 2024b). ÇKYDA yüzey dalgasının (esas olarak Rayleigh dalgası) dispersiyon özelliklerini (faz hızının frekansa bağlı değişimi) kullanır. Bu kapsamda, yöntem, üç temel aşama olan veri toplama (arazide veri kaydı), işleme (f-c görüntüsünün elde etme ve dispersiyon eğrisi pikleme) ve yorum (ters çözüm ile 1B'lu kayma dalgası hızı (Vs)-derinlik profilinin elde edilmesi) aşamalarını içerir. Böylece, Vs jeoteknik projelerde giderek daha fazla kullanım alanı bulan önemli bir fiziksel parametre olmuştur ve literatürde yaygın olarak yer almaktadır (Miller vd., 1999; Xia vd., 2002a, 2002b; Anbazhagan ve Sitharam, 2008; Park et al., 2018) ve zemin karekterizasyonu yapmak için gerekli olan VS30 değerinin (zemin sınıflamasında kullanılan 30 m derinlik için ortalama S-dalga hızı) hesaplanması, zeminin sıkılık-katılık değerlendirmesi, zemin-kaya ayrımının yapılması, zemin ve kayaların dinamik elastik parametrelerinin hesaplanması (elastisite, kayma ve hacim modülleri) ve zeminin dinamik davranışlarının (emniyetli taşıma kapasitesi veya zemin emniyet gerilmesi, ani veya elastik oturma, zemin büyütmesi, zemin hakim titreşim periyotu, sıvılaşma) belirlenmesi için vazgeçilmezdir.

3.2. Veri Toplama ve İşleme (Data Acquisition and Processing)

Şekil 4 profillerin konumlarını göstermektedir. Buna göre, tünel içinde sağ ve sol duvarlardaki EÖT profillerinin konumları tünel tabanından 1.0 m (EÖT-1 ve EÖT 3) ve 2.0 m (EÖT-2 ve EÖT-4) olacak şekilde ayarlanmış olup, ÇKYDA profilleri, her iki duvardaki EÖT profillerinin tam arasına gelecek şekilde tünel tabanından 1.5 m yükseklikte konumlandırılmıştır. YR profilleri ise, tabandan 2.0 m yükseklikten başlamak üzere eşit mesafelerde 5 profil olacak şekilde tünel ekseni boyunca ölçülmüştür. EÖT-2 ve YR-1, EÖT-4 ve YR-5 ölçümleri üst üste profillerdir (tünel tabanından 2.0 m yüksektedirler), gösterim amaçlı farklı çizilmiştir (Şekil 4a). Tünelin tabandan yüksekliği 8 m ve genişliği 10 m'dir. Tünel girişine yakın-üst kotta (Şekil 4b, EÖT-5) ve tünel çıkışı palye üstünde (Şekil 4c, EÖT-6) yamaçlardan tünel sahasına ve içine muhtemel su gelimi olup olmadığını anlamak ve yeraltı yapısal durumunu görüntülemek için sadece EÖT ölçümleri yapılmıştır. Her bir yönteme ait ölçüm parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 4b'de temsili olarak gösterilen tünel güzergahı (TG) EÖT-5 profilinden yatayda yaklaşık 50 m daha uzaktan ve yaklaşık 25-35 m derinden geçmektedir.





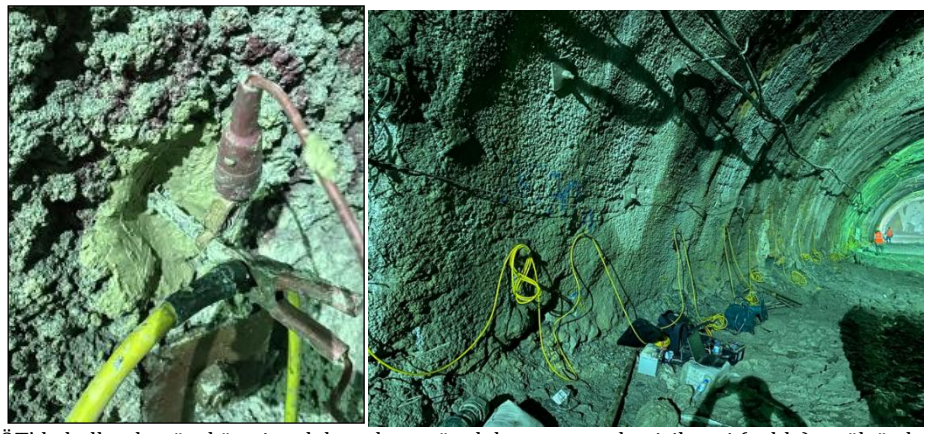
Şekil 4. (a) Tünel içi , (b) giriş üst kotta ve (b) çıkış palye üstündeki jeofizik ölçümlere ait profil konumları. TG: Tünel Güzergahı. TG ile EÖT-5 arasında yatayda yaklaşık 50 m mesafe vardır ve TG yüzey topoğrafyasına bağlı yaklaşık 25-35 m arasında değişen derinliklerden geçmektedir. (Çizimler ölçeksizdir)
(Profile locations of geophysical measurements (a) inside the tunnel, (b) at the entrance upper level and (b) at the exit berm. TG: Tunnel Route. There is a horizontal distance of approximately 50 m between TG and ERT-5 and TG passes through depths varying between approximately 25-35 m depending on the surface topography. (Drawings are not to scale))

Tablo 1. Ölçüm yöntemleri, ekipmanlar ve parametreler
(Measurement methods, equipment and parameters)

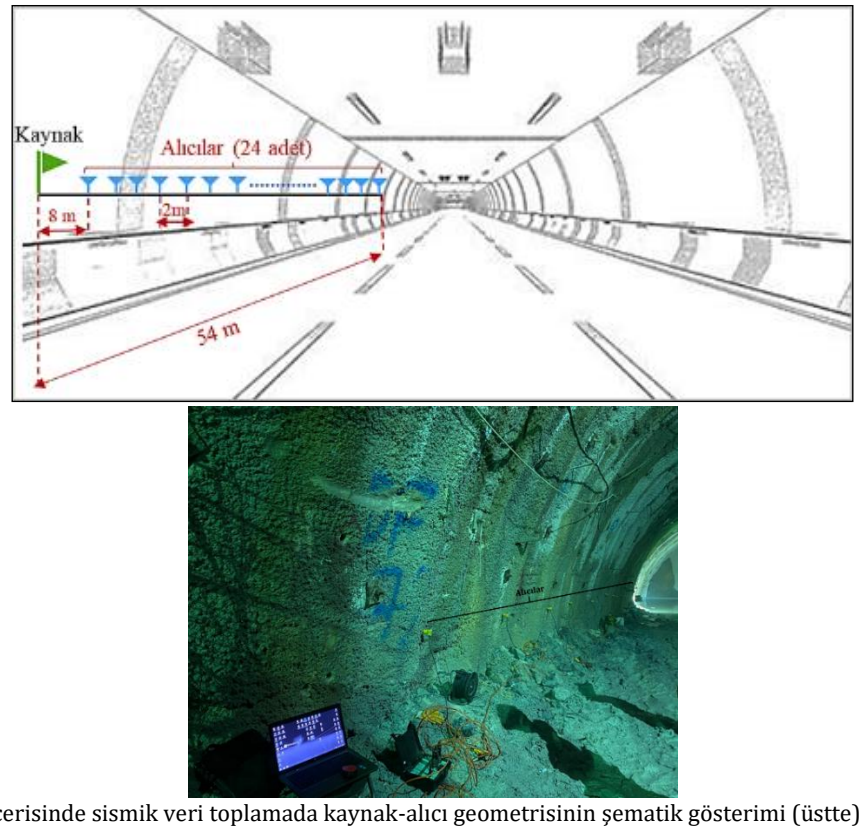
Ölçüm Yöntemi	Ekipman ve Ölçüm Parametreleri
YR	Cihaz: GSSI Marka SIR3000, 270 MHz korumalı anten Profil Sayısı: 5 Yazılım: GPR-Slice (URL-1, 2023)
EÖT	Cihaz: Ambrogeo-Mangusta, Ambrogeo Instruments, ITALY Elektrot sayısı ve malzemesi: 48, çelik Elektrot dizilimi: Wenner-Schlumberger Elektrot aralığı: Tünel içi ve Palyede 2.0, Tünel girişi üst kotta 3.0 m Yazılım: ZondRes2d (URL-2, 2023)
ÇKYDA	Cihaz: PASI Marka, Gea-24 Model Kayıt süresi: 0.5 s Örnekleme zamanı: 0.5 ms Alıcı sayısı: 24 Alıcı frekansı: 4.5 Hz Alıcı aralığı:2 m Kaynak ofseti:8 m Düşey yığma:3 Kaynak: 9 kg balyoz Tabla: 20x20x5 cm metal Yazılım: SeisImager/SW (URL-3, 2023)

Tünelin içinde beton duvarların varlığından ve tavan yüksekliğinden kaynaklı olarak jeofizik ölçümlerin yapılabilmesi zorlaşmaktadır. Bu nedenle özel ölçü düzenekleri ve ölçüm işlemini kolaylaştıracak destekleri kullanmak gerekir. Şekil 5'de tünel yan duvarlarında ve tavanında sürekli YR ölçümlerinin alınabilmesi için sepetli bir araç kullanılmıştır. ERT verilerinin toplanmasında, tünel içindeki duvarlarda yer alan beton kaplamadan dolayı elektrotlar çakılabilmesi ve arkadaki zeminle kontağının sağlanabilmesi için belirlenen elektrot yerleri delici makina ile delinmiştir. Sonra, özel üretilen 120 cm uzunluğundaki uzun çelik elektrotlar kullanılmış olup, her bir elektrot yerine bentonit ile macun enjekte edilmiş ve bu sayede kontak direncin önüne geçilmiştir (Şekil 6). Benzer şekilde ÇKYDA analiz verilerinin duvar yüzeyinden toplanabilmesi için (tünelin yan duvarlarının kalınlığı 1m'dir) duvar matkap yardımı ile delinerek alıcılar sıkı bir şekilde ölçü hattı üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 7).

Şekil 5. Tünel içerisinde sepetli araç kullanılarak YR verilerinin toplanması
(GPR data acquisition using a basket vehicle in the tunnel)



Şekil 6. EÖT'de kullanılan özel üretim elektrotların tünel duvarına yerleştirilmesi (solda) ve ölçü alımı (sağda)
(Placing the specially produced electrodes used in ERT on the tunnel wall (left) and measurements (right))



Şekil 7. Tünel içerisinde sismik veri toplamada kaynak-alıcı geometrisinin şematik gösterimi (üstte) ve alıcıların yan duvarlara yerleştirilmesi (altta) (Schematic representation of source-receiver geometry for seismic data collection inside the tunnel (top) and placement of receivers on side walls (bottom))

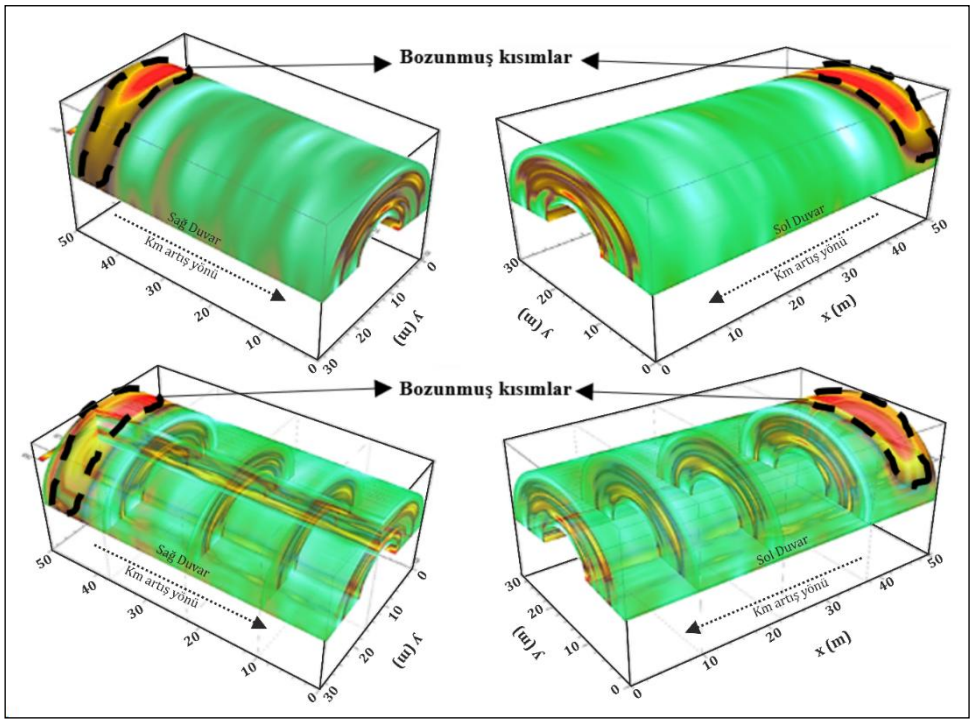
Çalışma kapsamında toplanan jeofizik veriler kendi teorik temelleri kapsamında işlenerek yoruma hazır hale getirilmiştir. Ham YR verilerinin işlenmesinde ve elde edilen radagramlardan tünele ait 3B'lu ve eşyüzey (katı model, eş yüzey/isosurface) haritalar/görüntülerin oluşturulması için lisanslı GPR-Slice yazılımı kullanılmıştır (URL-1, 2023). Verilerin işlenmesinde, ortam hızı, tüm radagram verileri üzerinde yapılan hiperbol (hız analizi) analizlerinden ortalama olarak 0.105 m/ns olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır. Ham verilere sırası ile, arka plan gürültünün (veya sabit bileşen) kaldırılması (background removal), çok düşük frekanslı bileşenin kaldırılması (dewow), sıfır zaman düzeltmesi, bant geçişli süzgeç (isteğe bağlı) ve genlik düzeltme/dengeleme işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen görüntüler tünel içine sızan suyun geliş yolu hakkında (şekil, boyut, konum) sadece yüzeysel değil aynı zamanda derinlik boyutunda bilgiler sunmuştur.

ERT verilerinin analizinde ZondRes2d yazılımı kullanılmıştır (URL-2, 2023). Yazılımın ters çözüm algoritması, ağ yöntemleri (Dey ve Morrison, 1979; Lowry vd. 1989) içinde daha iyi sonuçlar sağlayan sonlu elemanlar ağ yapısını kullanır. Genel olarak ERT verilerine özel bir veri işlem uygulanmamakla beraber, bazı ölçü noktalarına ait hatalı ölçüm olarak kabul edilen negatif değerler veriden ayıklanmıştır. Bu ayıklamadan sonra verilere doğrudan ters çözüm uygulanmıştır.

ÇKYDA verileri SeisImager/SW yazılımı ile değerlendirilmiştir. Arazi verilerine faz kayması tekniğini uygulanarak frekans-faz hızı dönüşümünü (f-c görüntüsü) elde edilmiş ve böylece, f-c görüntüsü üzerinden en geniş frekans aralığında ve yüksek ayrımlı olan temel mod dispersiyon eğrisi (frekansa karşılık faz hızı değişimi) piklenmiştir. Daha sonra, ölçülen ve hesaplanan dispersiyon eğrilerinin çakıştırılma esasına dayanan ters çözüm işlemi için sönümlü en küçük kareler yaklaşımını (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) kullanılmıştır. Böylece, ters çözüm işlemiyle tünel içerisindeki ÇKYDA profillerine ait 1B-V_S-derinlik yapısı belirlenmiştir.

4. Bulgular (Findings)

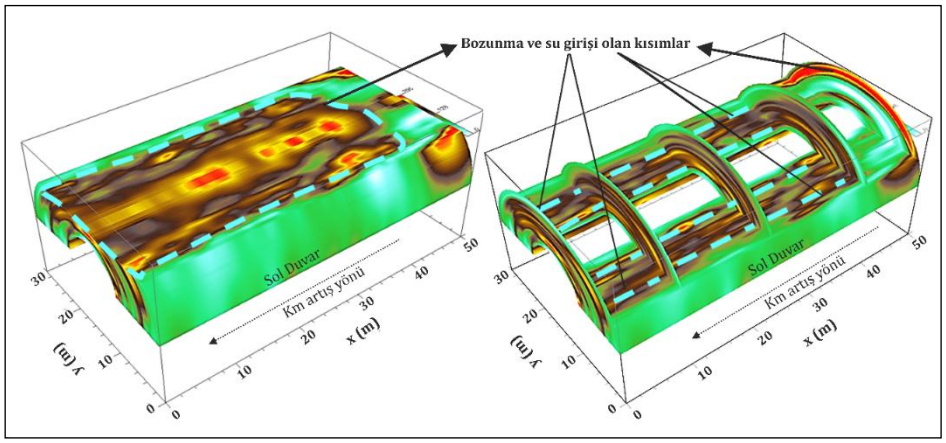
İşlenmiş 2B'lu radagramlar profil konumlarına uygun şekilde bir araya getirilerek tünelin 485. m ile 535. m arasındaki alanı kapsayacak şekilde ve tünelin geometrik yapısına uygun 3B'lu görüntüler hazırlanmıştır (Şekil 8'den 11'e). Bu modellerde kırmızı renk ve tonları (sıcak renkler), yeşil renk ve tonları (soğuk renkler) kısmen daha kuru ve bozunmamış alanları ifade etmektedir. Şekil 8 tünelin içine ait 3B'lu YR modellerinin farklı bakış açılarından ve saydamlıkta görüntülerini sunmaktadır.



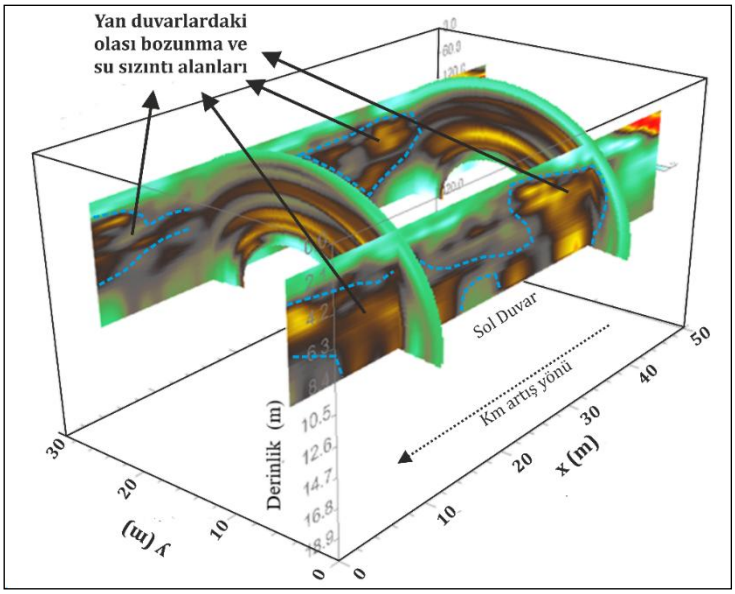
Şekil 8. Yer Radarı ölçümlerinden hazırlanan 3B'lu modeller üzerinde bozunmuş alanların (siyah kesikli çizgiler) farklı açılardan gösterimi (Representation of the degraded areas (black dashed lines) from different angles on 3D models prepared from Ground Penetrating Radar measurements)

Bu görüntülere göre, yüksek genlikli (Şekil 8a, b, c ve d'de kesikli siyah çizgi ile belirtilen alandaki kırmızı ve tonları) alan, tünelin 490. m'si ile 495. M'si arasında tünel tavanından itibaren ~8-10 metre yükseklikte olup, muhtemelen bozunmuş zemin (yoğun kırıklı-çatlaklı) ve içeriğinde yoğun olarak su bulunduğunu ve tünel üst kotlarından tünele doğru su girişinin olduğu konumu göstermektedir. YR modellerinde dikkat çeken bir diğer

husus, tünelin sağ ve sol yan duvarları içerisinde gözlenmiş olan anomalilerdir. Tünelin her iki yan duvarı içerisinde yüksek yansıma genlik anomalilerinin bozunmuş ortam ile su içeriğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir (Şekil 9 ve Şekil 10). Söz konusu anomali alanlarında (yüksek elektromanyetik yansımalı alanlar, sıcak renkler) bozunmanın yüksek, su içeriğinin fazla olduğu belirlenmiştir.



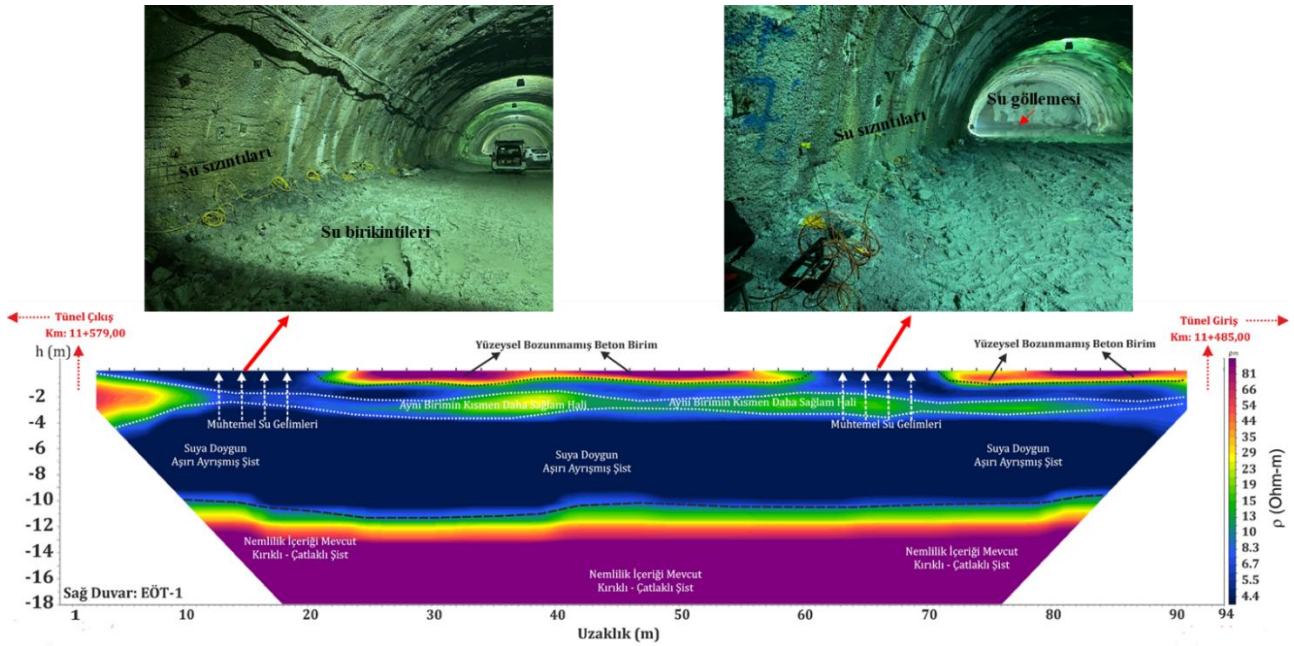
Şekil 9. Tünel tavanından itibaren 5.5 m yükseklikteki anomalilerin (kesikli mavi çizgili alanlar) 3B'lu model üzerindeki görüntüsü (The image of the anomalies (dashed blue lines) at a height of 5.5 m from the tunnel ceiling on the 3D model)



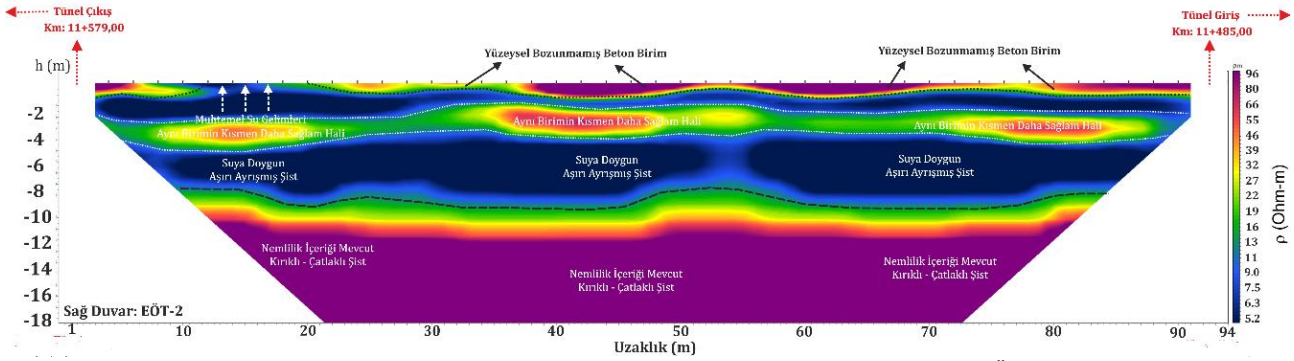
Şekil 10. Tünelin yan duvarlarına ait yüksek elektromanyetik yansımaların 3B'lu model üzerinde görüntülenmesi (Image of the high electromagnetic reflections of tunnel side walls on 3D model)

Şekil 11, 12, 13 ve 14 ters çözümünden elde edilen EÖT kesitlerinin yorumlanmış kesitlerini sunmaktadır. Şekillerdeki düşey eksenler, h(m), tünel iç yüzeyinden zemin içine doğru olan uzaklığı (veya derinliği) göstermektedir. EÖT sonuçlarına göre özdirençlerin 4-100 Ohm.m arasında değişmektedir. Tünel içi ölçümlerde yanal yönde zemin içine doğru ortalama 18 m derinlik görüntülenebilmiştir. EÖT kesitlerinde, yüksek, orta ve düşük özdirençli bölgeler sırasıyla sarı-kırmızı-mor, yeşil ve mavi renkler ile temsil edilmiştir. EÖT kesitleri genel olarak tünel duvarından yanal yönde zemin (şist birimi) içine doğru, sırasıyla ince yüksek düşük ve yüksek özdirenç değişimleri görülmektedir.

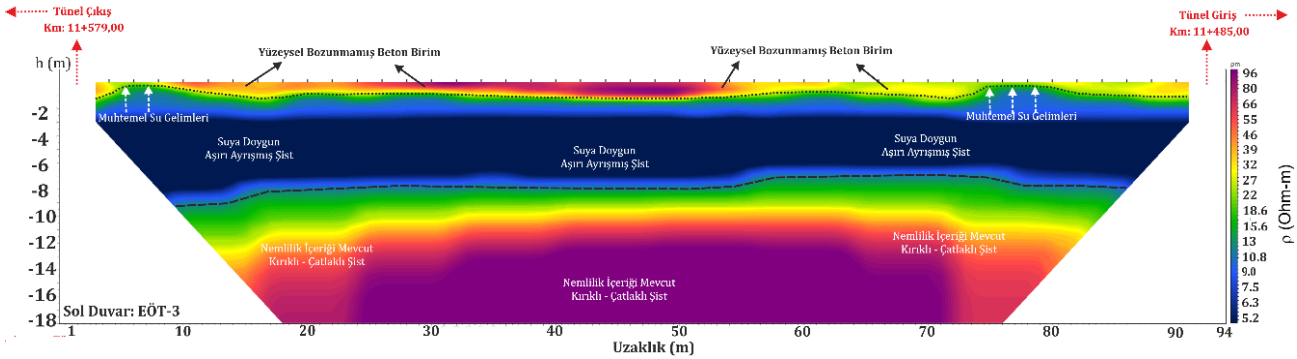
Tünelin sağ yan duvarındaki EÖT-1 ve EÖT-2 kesitlerinde (Şekil 11 ve 12) yüzeydeki sarı-kırmızı-mor renkler muhtemel beton birimin varlığına işaret etmektedir. Bu beton kaplamanın yanal yönde özelliğini kaybederek bozunduğu ve bu bölümlerden (düşey beyaz oklarla gösterilen) tünel içerisine su sızıntılarının olduğu değerlendirilmiştir (Şekil 11 ve Şekil 12). Bu sızıntıların tünel içinde yer yer oluşturduğu su birikintileri ve su gölcükleri ERT-1 profili (ERT-2 içinde uygundur) boyunca ilişkilendirilerek Şekil 11'de ERT-1 kesitinin üzerinde gösterilmiştir. Tünel duvarının hemen arkasındaki birimin suya doygun ve aşırı altere olduğu (mavi-koyu mavi (ya da lacivert) renkler)ve bu durum yaklaşık 10 m içeriye doğru (yanal derinlik) devam etmektedir. Diğer yandan, 10 m derinlikten sonra görülen yüksek özdirençlilik, birimin daha az kırık-çatlaklı olması ve su içeriğinin görece düşük olması ile ilişkilendirilmiştir. EÖT-1 ve EÖT-2 profillerinden elde edilen yer modellerinden birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



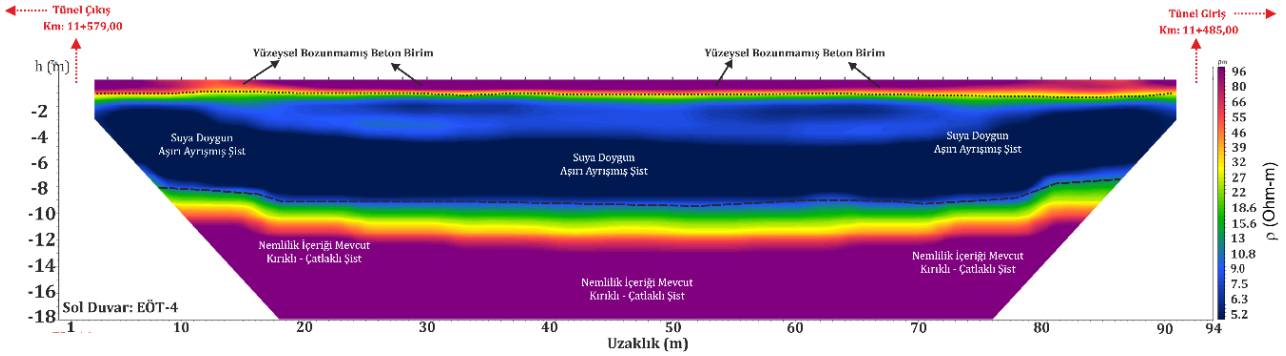
Şekil 11. Tünelin sağ duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-1 kesiti (altta) ve tünel içindeki su gelimi ile ilişkili görüntüler (üstte) (2D ERT-1 section associated with the lithology obtained from the right wall of the tunnel (below) and images related to the water flow inside the tunnel (above))



Şekil 12. Tünelin sağ duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-2 kesiti (2D ERT-2 section associated with the lithology obtained from the right wall of the tunnel)



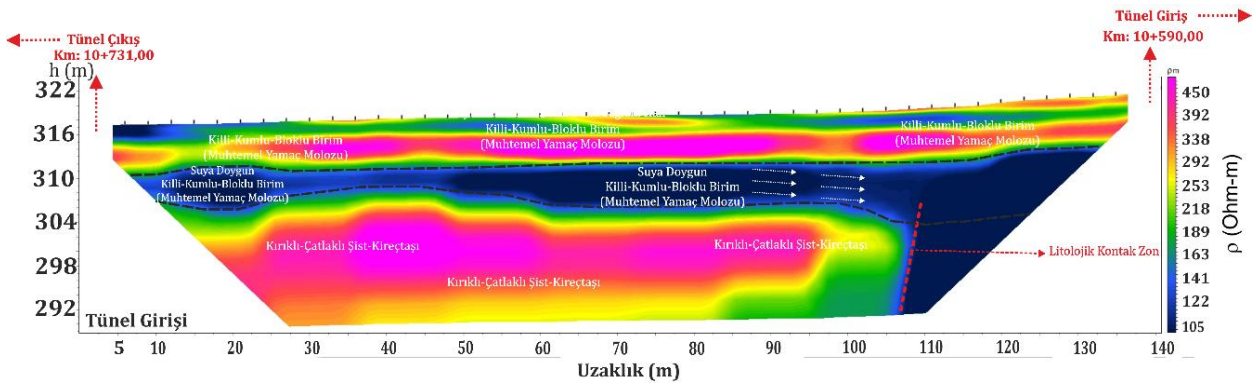
Şekil 13. Tünelin sol duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-3 kesiti (2D ERT-3 section associated with the lithology obtained from the left wall of the tunnel)



Şekil 14. Tünelin sol duvarından elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT-4 kesiti
(2D ERT-4 section associated with the lithology obtained from the left wall of the tunnel)

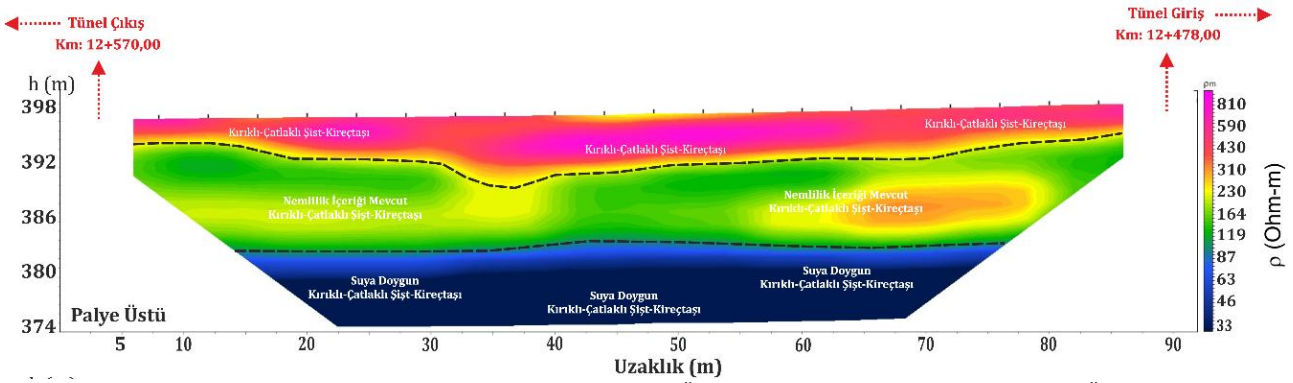
Tünelin sol yan duvarından elde edilen EÖT-3 ve EÖT-4 kesitleri Şekil 13 ve Şekil 14'de gösterilmektedir. EÖT-1 ve EÖT-2 kesitlerinde olduğu gibi yüzeyde yer yer özelliğini yitirmiş beton birimin yer aldığı ve tünel içerisinde su sızıntılarının varlığı izlenebilmektedir. Sol yan duvardaki her iki kesite göre, duvarın arkasından yanal yönde 8 m derinliğe kadar yer alan birimin suya doygun ve aşırı altere olduğu anlaşılmaktadır. Bu seviyeden sonra daha az su içeriği ve kırık-çatlaklı yapıda olan yüksek özdirençli bir birim tanımlanmıştır.

Tünel girişinde üst kottaki EÖT-5 kesitine göre, özdirenç değerleri 100-500 Ohm.m arasında değişmektedir (Şekil 15) ve düşey yönde ulaşılan derinlik ortalama 25 m'dir. Düşey eksen, h(m), kot değerlerini göstermekte olup yüzeyden düşey yöndeki derinliği göstermektedir. Buna göre, yüzeyde sarı-kırmızı-mor renkle ayrımlanan bir birim yanal yönde içerdiği oldukça değişken özdirençler sebebi ile, killi-kumlu-bloklu yani yamaç molozundan ibaret olduğu değerlendirilmiştir. Bu yamaç molozunun hemen altında, mavi renkle ayrımlanan birimin ise, yine yamaç molozu ancak suya doygun olduğu (100-150 Ohm.m) anlaşılmakta olup, yaklaşık 10-11 metre derinliğe kadar izlenebilmektedir. Bu birimin altında ise, mor renkler ile ayrımlanan yüksek özdirençli (250-500 Ohm.m) kırıklı çatlaklı kaya birim yer almaktadır. Kesitte görülen en önemli ayrıntılardan biri ise kesit sonuna doğru, yatayda 105-110 metreler arasında görülen litolojik kontak zondur. Yüksek özdirençli (250-500 Ohm.m) kaya biriminin içerisinde girişim yapan suyun etkisi ile özdirenç değerleri düşmüş (100-150 Ohm.m) ve aynı kaya birimin su içeriğinin yoğun olduğuna işaret etmektedir.



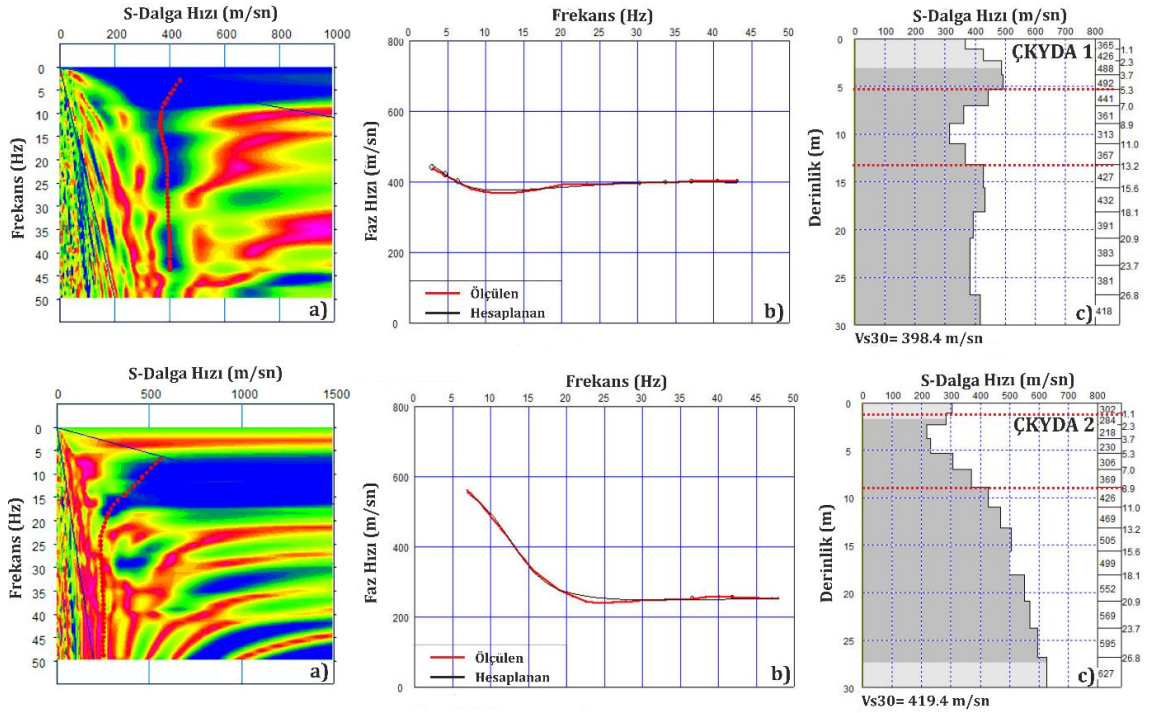
Şekil 15. Tünelin giriş tarafında üst kotta (EÖT-5) elde edilen litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti
(2D ERT section associated with the lithology obtained at the upper level (ERT-5) on the entrance side of the tunnel)

Tünel çıkışında yer alan palyenin üzerinde elde edilen EÖT-6 kesitine göre, özdirenç değerleri 30-1000 Ohm.m arasında değişirken, ortalama ulaşılan derinlik 22 m'dir (Şekil 16). Düşey eksen, h(m), kot değerlerini göstermekte olup yüzeyden düşey yöndeki derinliği göstermektedir. Şekil 16' ya göre, yüzeyde sarı-kırmızı-mor renkle ayrımlanan yüksek özdirençli kırıklı-çatlaklı ancak su içermeyen kaya birimin varlığı görülmektedir. Derinlere doğru inildikçe aynı birimin daha nemli ve suya doygun olduğu dikkat çekmektedir. Kaya birim en alt kotlarda düşük ödirenç özelliği gösterip, mavi renkle ayrımlanmış ve suya doygun kırıklı-çatlaklı kaya birim olarak adlandırılmıştır. Tünel içerisinde yapılan EÖT ölçümlerinde görülen su içeriği tünelin hemen çıkışında yer alan palye üzerinde yapılan ölçümlerde de izlenebilmektedir.

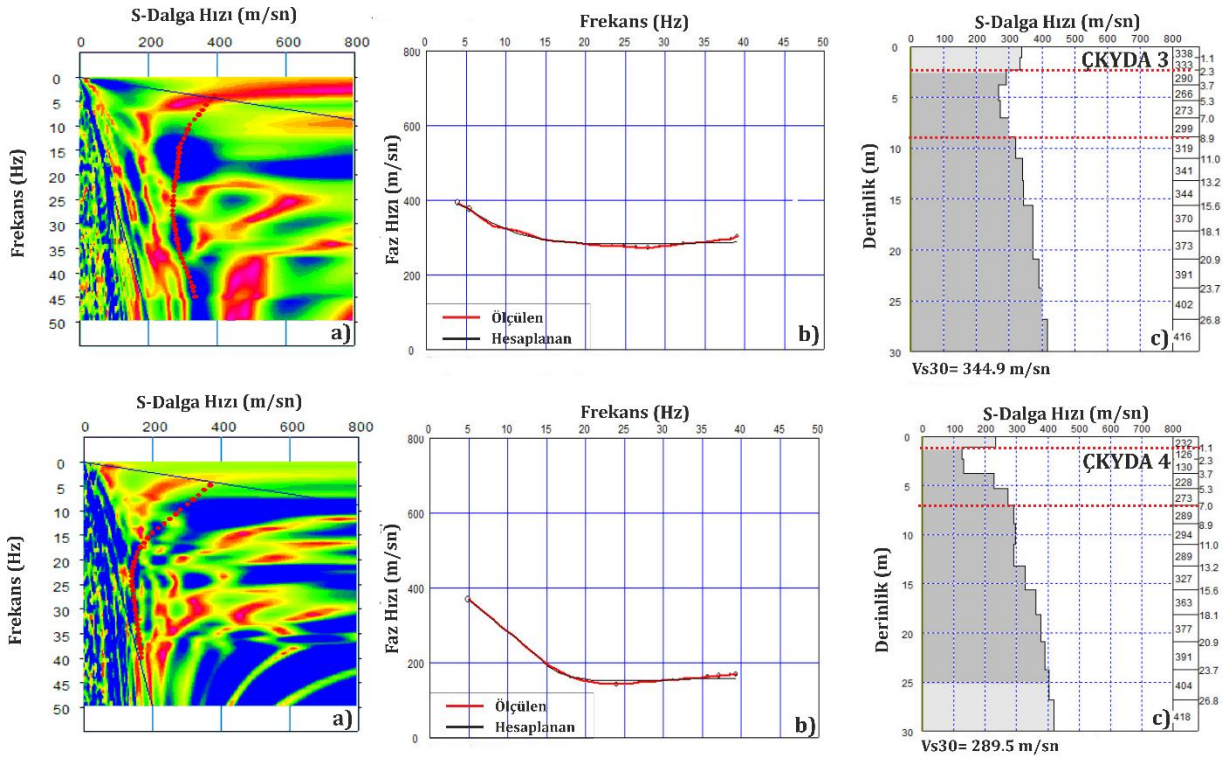


Şekil 16. Tünel çıkışında Palye üstünden elde edilen (EÖT-6) litoloji ile ilişkilendirilmiş 2B'lu EÖT kesiti (2D ERT section associated with the lithology obtained from the berm at the tunnel exit (ERT-6))

ÇKYDA ölçümleri tünelin sağ ve sol yan duvarlarında EÖT profillerinde gerçekleştirilmiştir. ÇKYDA ölçülerinin yapılma amacı, S-dalgası hızının derinlik ile değişimini belirlemek, altere ve sulu kesimlerde, S-dalga hızının azaldığı yerleri tespit etmektir ve böylece YR ve EÖT sonuçlarını destekleyici bilgi sağlamaktır. Tünelin sağ ve sol duvarlarında alınan ÇKYDA verileri değerlendirilerek toplam 4 profile ait 1B Vs-derinlik modelleri elde edilmiştir (Şekil 17 ve Şekil 18). Her bir profil için kaydedilen ham verilerden elde edilen frekans-faz hızı (f-c) görüntüleri ve temel mod dispersiyon pikleri (Şekil 17a ve Şekil 18a), ölçülen (kırmızı) ve ters çözümden hesaplanan (siyah) dispersiyon eğrileri (Şekil 17b ve Şekil 18b) ve ters çözüm sonucu hesaplanan 1B Vs-derinlik profilleri (Şekil 17c ve Şekil 18c) Şekil 17'de (ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2) ve Şekil 18'de (ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4) gösterilmektedir. 1B Vs-derinlik profillerinin hepsinde birkaç m'den sonra kalınlıkları ~5-8 m arasında değişen birimlerde anlamlı hız düşüşlerinin (Şekil 17c ve Şekil 18c'deki kesikli kırmızı çizgiler arası) olduğu görülmektedir. Bu modellere göre tünel içerisinde sağ ve sol yan duvarlardaki S-dalgası hız değerleri 280-800 m/sn arasında değişmektedir. Sağ ve sol yan duvarlardaki EÖT kesitlerinde 10 m ve 8 m derinliğe kadar aşırı altere ve suya doygun olan birimin görüldüğü kısımlardan elde edilen S-dalgası hızlarında belirgin azalmaların saptanmış olması, EÖT ve ÇKYDA ölçüm sonuçları ile iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir.



Şekil 17. Tünelin sağ yan duvarındaki ÇKYDA-1 ve ÇKYDA-2 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız-derinlik modeli ((a) energy field (b) dispersion curve and (c) 1D S-wave velocity-depth model of MASW-1 and MASW-2 profiles on the right side wall of the tunnel)



Şekil 18. Tünelin sol yan duvarındaki ÇKYDA-3 ve ÇKYDA-4 profiline ait (a) enerji alanı (b) dispersiyon eğrisi ve (c) 1B'lu S-dalgası hız-derinlik modeli ((a) energy field (b) dispersion curve and (c) 1D S-wave velocity-depth model of MASW-3 and MASW-4 profiles on the left side wall of the tunnel)

5. Sonuç (Result)

Bu çalışma kapsamında Doğancı Tüneli içerisinde Km: 11+485-11+579 arasında YR, EÖT ve ÇKYDA, tünel dışı üst kotta ise Km: 11+590-11+731 arasında ve tünel çıkışı palye üzerinde EÖT yöntemleri uygulanmıştır. Tünel içi ölçümlerde EÖT ve ÇKYDA'nın yapılamadığı tavan bölümünde YR ölçümleri Km: 11+485–11+535 arasında tünel ekseni boyunca 50 m'lik bir kısımda gerçekleştirilmiştir. YR ölçüm sonuçları 3B'lu olarak görüntülenmiş ve tünel içi sorunlu bölgeler tespit edilmiştir. Ölçümlerden, tünel tavanı ile duvarlarında bozunmanın olduğu ve su içeriğinin yoğun olduğu kısımlar belirlenmiş olup, bu yapıların tünel içerisine kadar etkidiği görülmüştür. Tünelin sağ ve sol yan duvarlarında alınan tüm ölçümlerde yüzeyde kalınlığı 1 m'ye ulaşan, yüksek özdirençli zonun (muhtemel beton) devamında oldukça düşük özdirençli birim elde edilmiştir ve bu birimin kalınlığı tünel girişinden çıkışına doğru sağ duvarda yaklaşık 10 metre, sol duvarda ise yaklaşık 8 metredir. Söz konusu birimin aşırı altere olduğu ve bünyesinde yoğun miktarda su bulundurduğu ölçülerde görülen çok düşük özdirenç değerlerinden (4-10 Ohm-m) anlaşılmaktadır. Sağ ve sol duvarda söz konusu derinliklerden sonra kısmen daha sağlam ve daha kuru birimler bulunmaktadır. Tünel girişindeki üst kotta toplanan EÖT kesitlerine, göre yamaç molozu birimi düşey yönde 10-11 m derinliğe kadar izlenmektedir. Bununla birlikte, aynı kesitin yatayda 105-110 m arasında belirgin bir litolojik kontak zonu belirlenmiştir. Tünel çıkışı palye üstünden elde edilen EÖT kesitine göre, yüksek özdirençli birimin, kırıklı-çatlaklı kaya birim olduğu ve su içermediği değerlendirilmiştir. Aynı birim, daha alt kotlarda düşük özdirence sahiptir ve derinlere doğru daha nemli ve suya doygun olduğu anlaşılmıştır. EÖT kesitleri ve 1B-VS derinlik modelleri birlikte değerlendirildiğinde, EÖT kesitlerinde görülen aşırı altere ve suya doygun birimlerin S-dalgası hızlarının da düşük olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada, mühendislik ve sanat yapılarının önemli ve ekonomik maliyeti yüksek olan tünel yapılarında karşılaşılması muhtemel su sızıntısı ve deformasyon problemlerinin konumlarının ve nedenlerinin tespit edilmesinde ve çözüm önerilerinin sunulmasında jeofizik yöntemlerin (YR, EÖT ve ÇKYDA) sağladığı katkılar gösterilmiştir. Bununla birlikte, tek bir jeofizik yöntemin yerine birbirini destekleyecek birkaç jeofizik yöntemin birlikte kullanılmasının problemi tanımlamada son derece yararlı olduğu görülmüştür.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makale Mustafa KİRİCİ'nin Yüksek Lisans tezinden hazırlanmıştır. Yazarlar, verilerin toplanması sürecinde destek ve verilerin kullanılması için gerekli izinleri sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Bursa İli 14. Bölge Müdürlüğü'ne ve Bergiz Holding'e teşekkür ederler. ERT kesitlerin litoloji ile ilişkilendirilmesi sırasında kullanılan jeolojik bilgilerin temin edildiği Proyapı Mühendislik Müşavirlik A.Ş.'ne şükranlarımızı sunuyoruz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

Aksu, T. F., 2006. Jeofizik elektrik yöntemlerinde 2 boyutlu tomografi ve arazi uygulamaları. *Yeraltı suyu Araştırmalarında Uygulanan Yöntemler ve Saha Uygulamaları Seminer Notları, Jeofizik Mühendisleri Odası*.

Aktürk, Ö., 2010. *Tünel Çevresindeki Deformasyon Alanının 3-Boyutlu Sayısal Modeller ile Değerlendirilmesi (Necatibey Metro İstasyonu, Ankara, Türkiye)*. ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

Alemdağ, H., Köroğlu, F., Aydın, Z.Ö., Şeren, A., Babacan, A.E., Fırat Ersoy, A., 2024. Deciphering of karst geomorphology and sinkhole (doline) structures using multiple geophysical and geological methods (Trabzon, NE Türkiye). Bulletin of Engineering Geology and Environment, 83, 286.

Annan, P. ,2003. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and software*, *278*.

Anbazhagan, P., Sitharam, T.G., 2008. Site characterization and site response studies using shear wave velocity. J. Seismol. Earthq. Eng. 10 (2), 53–67.

Arifin, M.H., Kayode, J.S., Izwan, M.K., Hasan Said, H.A., Hussin, H., 2019. Data for the potential gold mineralization mapping with the applications of electrical resistivity imaging and induces polarization geophysical surveys. Data Brief 2019 (22), 830–835.

Aytas Z., Alpaslan N., Ozcep F. ,2023. Evaluation of liquefaction potential by standard penetration test and shear wave velocity methods: a case study. Natural Hazards, 118(3),2377-2417.

Babacan, A.E., Ceylan, S., 2021. Evaluation of soil liquefaction potential with a holistic approach: a case study from Arakli (Trabzon, Turkey). Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 62(1), 173-198.

Barbieri, A., Regala, F. T., Cascalheira, J., Bicho, N., 2023. The sediment at the end of the tunnel: Geophysical research to locate the Pleistocene entrance of Gruta da Companheira (Algarve, Southern Portugal). *Archaeological Prospection*, *30*(2), 117-134.

Bauman, P., 2005. 2-D resistivity surveying for hydrocarbons–a primer. CSEG Recorder 30 (04), 1–15.

Benyassine, E.M., Lachhab, A., Dekayir, A., Parisot, J.C., Rouai, M., 2017. An application of electrical resistivity tomography to investigate heavy metals pathways. J. Environ. Eng. Geophys. 22 (4), 315–324.

Bingöl, E., Akyürek, B., Korkmazer, B., 1973. Geology of the Biga Peninsula and some characteristics of the Karakaya Formation. *Geological Congress, 50th Anniversary of Turkish Republic,* pp. 71-77, *MTA Ankara*.

Capizzi, P., Cosentino, P. L., Fiandaca, G., Martorana, R., Messina, P., 2005. 2D GPR and Geoelectrical Modelling–Tests on Man–Made Tunnels and Cavities. *Near Surface 2005-11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics,* s. cp-13). European Association of Geoscientists & Engineers.

Cardarelli, E., Marrone, C., Orlando, L., 2003. Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods. *Journal of Applied Geophysics*, *52* (2-3), 93-102.

Cardarelli, E., Di Filippo, G., Tuccinardi, E., 2006. Electrical resistivity tomography to detect buried cavities in Rome: a case study, Near Surface Geophysics, Vol. 4, 387-392.

Chambers, J.E., Kuras, O., Meldrum, P.I., Ogilvy, R.D., Hollands, J., 2006. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. Geophysics 71 (6), B231–B239.

Chen, L., Wang, H., Xu, X., Zhang, Y., Wang, C., Song, J., Han, L., 2020. Geological exploration using integrated geophysical methods in tunnel: a case. *Geotechnical and Geological Engineering*, *38*, 1111-1119.

Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, *27*(9), 1019-1029.

Davis, J. L., Annan, A. P., 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy Geophysical prospecting, *37*(5), 531-551.

Dey, A., Morrison, H. F., 1979. Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical prospecting*, *27*(1), 106-136.

Ding, Y., Yang, B., Xu, G., Wang, X., 2022. Improved Dempster–Shafer evidence theory for tunnel water inrush risk analysis based on fuzzy identification factors of multi-source geophysical data. *Remote Sensing*, *14*(23), 6178.

Durdağ, D., 2018. *Çok Kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (Masw) ve Jeoteknik Uygulamaları.* DEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Ergüven, K., 2015. *Tünel İmalatında Yer Radarı Yöntemiyle Tahribatsız Test Uygulaması*. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Feng, S. J., Zhao, Y., Zhang, X. L., Bai, Z. B., 2020. Leachate leakage investigation, assessment and engineering counter measures for tunneling underneath a MSW landfill. *Engineering Geology*, *265*, 105447.

Fores, B., Champollion, C., Lesparre, N., Pasquet, S., Martin, A., Nguyen, F., 2021. Variability of the water stock dynamics in karst: insights from surface-to-tunnel geophysics. *Hydrogeology Journal*, *29*(6), 2077-2089.

Foti, S., Parolai, S., Albarello, D., Picozzi, M., 2011. Application of surface-wave methods for seismic site characterization. Surv. Geophys. 32 (6), 777–825.

Funk, B., Flores-Orozco, A., Steiner, M., 2024. Possibilities and limitations of cave detection with ERT, Geomorphology, 462, 109332, 1-10.

Geraldine C, . Anukwu, Amin E, . Khalil, Mohd, Nawawi, Khiruddin, Abdullah, Fathi M, . Abdullah, 2018. Multi-channel analysis of surface waves (MASW) using CMP analysis to identify soil problems threat on the heritage site at Georgetown, Malaysia. SEG Glob. Meet. Abstr. 1640–1643. https://doi.org/10.1190/IGC2018-404.

Ghezzi, A., Schettino, A., Pierantoni, PP., Conyers, L., Tassi, L., Vigliotti, L., Schettino, E., Melfi, M., Gorrini, ME., Boila, P., 2019. Reconstruction of a Segment of the UNESCO World Heritage Hadrian's Villa Tunnel Network by Integrated GPR, Magnetic–

Paleomagnetic, and Electric Resistivity Prospections. *Remote Sensing*, 11(15), 1739.
Griffiths, D. H., Barker, R. D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, *29*(3-4), 211-226.
Gündogdu, N.Y., Candansayar, M.E., Genç, E., 2017. Rescue archaeology application: Investigation of Kuriki mound archaeological area (Batman, SE Turkey) by using direct current resistivity and magnetic methods. J. Environ. Eng. Geophys. 22 (2), 177–189.
Irawan, D., Sumintadireja, P., Saepuloh, A., 2013. 2-D Subsurface imaging tecniques for deep ore mineral mapping using geoelectrical and induced polarization (IP) methods. Proc. Earth Planet. Sci. 6, 139–144.
Izumotani, S., Takeuchi, M., Murayama, H., Okazaki, K., 2021. Estimating rock properties using seismic refraction survey data: a case study in an abandoned road tunnel. *Exploration Geophysics*, *52*(4), 409-418.
Jol, H. M., Smith, D. G., 1991. Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *28*(12), 1939-1947.
Kadıoğlu, S., 2003. 3D Ground Penetrating Radar-Data Acquisition, Processing, and Interpretation. *14th International Petroleum Congress and Natural Gas Congress and Exhibition*, *Bildiriler Kitabı*, s. 485-486. Ankara.
Kadioglu S., Ulugergerli E. U., 2012. Imaging karstic cavities in transparent 3D volume of the GPR data set in Akkopru dam, Mugla, Turkey. Nondestructive Testing and Evaluation, 27(3), 263-271.
Karslı, H., 2018. Jeofizik-Jeoteknik İşbirliği Sürecinde Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz (ÇKYDA) Yöntemi. *Jeofizik Bülteni*, 78, 14-48, JFMO, Ankara.
Karslı, H., Babacan, A.E., Sayıl, N., Çoban K.H., Akın, Ö., 2024a. An assessment of seismicity and near surface geophysical characteristics of potential solid waste landfill sites in the Eastern Black Sea Region of Türkiye. *Environ Sci Pollut Res* 31, 14156–14177.
Karslı H., Babacan A. E., Akın Ö., 2024b. Subsurface characterization by active and passive source geophysical methods after the 06 February 2023 earthquakes in Turkey. Natural Hazards, 120 (6), 5257-5286.
Kaya, M.A., Özürlan, G., Balkaya, Ç., 2015. Geoelectrical Investigation of Seawater Intrusion in the Coastal Urban Area of Çanakkale, NW Turkey, Environ Earth Sci, 73, 1151–1160.
KGM, 2019. Geoteknik Proje Raporu. Bursa. Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü.
Levenberg, K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, *2*(2), 164-168.
Lin, C., Wang, X., Nie, L., Sun, H., Xu, Z., Du, Y., Liu, L., 2020. Comprehensive geophysical investigation and analysis of lining leakage for water-rich rock tunnels: A case study of Kaiyuan Tunnel, Jinan, China. *Geotechnical and Geological Engineering*, *38*, 3449-3468.
Liu, R., Sun, H., Liu, D., Wang, X., Zhou, X., Zhao, Y., Sun, H., 2023. A joint application of semi-airborne and in-tunnel geophysical survey in complex limestone geology. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(6), 1-17.
Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. J. Appl. Geophys. 95, 135–156.
Lowry, T., Allen, M. B., Shive, P. N., 1989. Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, *54*(6), 766-774.
Lyu, Y. Z., Wang, H. H., Gong, J. B., 2020. GPR detection of tunnel lining cavities and reverse-time migration imaging. *Applied Geophysics*, 1-7.
Marquardt, D. W. , 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, *11*(2), 431-441.
Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., Ivanov, J. M., 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, *18*(12), 1392-1396.
Nie, L., Wang, C., Liu, Z., Xu, Z., Sun, X., Du, Y., Wei, W., 2023. An integrated geological and geophysical approach to identify water-rich weathered granite areas during twin tunnels construction: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *135*, 105025.
Okay, A. İ., Siyako, M., Bürkan, K. A., 1990. Biga Yarımadası'nın jeolojisi ve tektonik evrimi. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, *2*(1), 83-121.
Page, L.M., 1968. Use of the electrical resistivity method for investigating geologic and hydrologic conditions in Santa Clara County, California. Groundwater 6 (5), 31–40.
Pamuk E., Özdağ Ö. C., Özyalın Ş., Akgün M., 2017. Soil characterization of Tınaztepe region (İzmir/Turkey) using surface wave methods and nakamura (HVSR) technique. Earthquake Engıneerıng And Engıneerıng Vıbratıon,16(2), 447-458.
Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, *64*(3), 800-808.
Park, C., Miller, R., Laflen, D., Bennett, B., Ivanov, J., Neb, C., Huggins, R. , 2004. Imaging dispersion curves of passive surface waves. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2004). Houston.
Park, C., Richter, J., Rodrigues, R., Cirone, A., 2018. MASW applications for road construction and maintenance. Lead. Edge 37 (10), 724–730.
Pasierb, B., Nawrocki, W., 2020. Not only the 'Gold Train'–the 'Underground Town'of Riese (Poland)–the ambiguity of interpretation ERT and GPR methods. *Archaeological Prospection*, *27*(4), 361-375.
Radinger, A., Hofmann, T., Holzer, R., Fasching, F., Kusnirak, D., 2021. Highly specialized geophysical methods for undergroud construction works–Semmering Base Tunnel, a practice report. *Geomechanics and Tunnelling*, *14*(5), 654-660.
Rucker, D.F., Loke, M.H., Levitt, M.T., Noonan, G.E., 2010. Electrical-resistivity characterization of an industrial site using long electrodes. Geophysics 75 (4), WA95–WA104.
Sabbağ, N., Uyanık O., 2017. Prediction of Reinforced Concrete Strength by Ultrasonic Velocities. Journal of Applied Geophysics, 141, 13-23.
Sabbağ N., Uyanık O., 2018. Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. Journal of Applied Geophysics, 155, 13- 25.
Sezer, H., 2010. *Yer Radarı Yöntemi ile Zonguldak Demiryolu Tünelinin Duraylılığının ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması*. Ankara

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
Sharma, S., Thakur, S., Sharma, T., 2021. Applications of Geophysical Methods in Tunnel and Oil Exploration. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 889, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
Socco, L.V., Strobbia, C., 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. Near Surf. Geophys. 2 (4), 165–185.
Su, M., Zhao, Y., Xue, Y., Wang, P., Xia, T., Zhang, K., Li, C., 2021. Progressive fine integrated geophysical method for karst detection during subway construction. *Pure and Applied Geophysics*, *178*, 91-106.
Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Vargemezis, G., Novack, M., 2008. Non-destructive electrical resistivity tomography for indoor investigation: the case of Kapnikarea Church in Athens. Archaeol. Prospect. 15 (1), 47–61.
Uyanık O., Ekinci B, Uyanık NA, 2013. Liquefaction Analysis from Seismic Velocities and Determination of Lagoon Limits Kumluca /Antalya Example. Journal of Applied Geophysics, 95, 90-103.
Uyanık O, 2020. Soil liquefaction analysis based on soil and earthquake parameters. Journal of Applied Geophysics, 176, 104004.
Uyanık, O., Öncü, Z., Uyanık, N. A., & Ekin, N., 2024. Seismic microzonation and geotechnical modeling studies considering local site effects for İnegöl Plain (Bursa-Turkey). Earth and Space Science, 11, e2023EA003460.
Wilson, S.R., Ingham, M., McConchie, J.A., 2006. The applicability of earth resistivity methods for saline interface definition. J. Hydrol. 316 (1–4), 301–312.
Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, *64*(3), 691-700.
Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., Harris, J.B., Ivanov, J., 2002a. Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. Soil Dyn. Earthq. Eng. 22 (3), 181–190.
Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Wightman, E., Nigbor, R., 2002b. A pitfall in shallow shear-wave refraction surveying. J. Appl. Geophysics. 51 (1), 1–9.
Yılmaz, S., Oksum, E., Cakmak, O., Dogan, O., Tekelioğlu, E. 2018. Preliminary results of an integrated archaeo-geophysical survey on the basis of ancient finds unearthed by an illegal excavation at Kılıç Ören site (Isparta, Turkey). Archaeological Prospection, 25(3), 197-207.
Yılmaz, S., Balkaya, Ç., Cakmak, O., Oksum, E. 2019. GPR and ERT explorations at the archaeological site of Kılıç village (Isparta, SW Turkey). Journal of Applied Geophysics, 170, 103859.
Yılmaz, S. Yıldırım E., 2021. Emirdağ-Karaağaç yeraltı suyu potansiyelinin elektrik özdirenç yöntemler ile araştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 9(4), 1267-1275.
URL-1. (2023, Aralık 24). https://www.gpr-survey.com/
URL-2. (2023, Aralık 24). https://geodevice.co/product/zondres2d/
URL-3. (2023, Ekim 17). https://www.geometrics.com/software

Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi
13(2), 649-674, 2025
e-ISSN: 1308-6693

Journal of Engineering Sciences and Design
DOI: 10.21923/jesd.1631703

Araştırma Makalesi

Research Article

POTANSİYEL YER ALTI SUYU BÖLGELERİNİN ANALİTİK HİYERARŞİ YÖNTEMİ (AHY) VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) TEKNİKLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ: GEDİZ NEHRİ HAVZASI ÖRNEĞİ

Cansu YURTERİ[1*]

[1]İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler

AHY,
CBS,
Gediz Nehri Havzası,
Yer Altı Suyu Bölgeleri,
ROC Eğrisi.

Öz

Sunulan çalışma, Gediz Nehri Havzası'nın potansiyel yer altı suyu bölgelerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri ile Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Yönteminin (AHY) entegre bir kombinasyonu kullanılmıştır. Bu kapsamda jeoloji, jeomorfoloji, arazi kullanımı, çizgisel yoğunluk, drenaj yoğunluğu, yükselti, yağış, toprak, eğim, topoğrafik nemlilik indeksi, pürüzlülük ve eğrisellik olmak üzere 12 parametre kullanılmıştır. CBS ortamında AHY algoritması ile tüm parametreler analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda havzanın 2258.03 km^2'lik kesimi yer altı suyu potansiyeli yüksek ve çok yüksek bölgeler olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı için oluşturulan potansiyel yer altı suyu bölgeleri haritası, kuyu verimleri ve kaynak debileri kullanılarak ROC (Alıcı İşlem Karakteristiği) Eğrisi yardımıyla doğrulanmıştır. Eğri altında kalan alan 0.891 doğruluk oranı ile %89 olarak hesaplanmıştır. Bu oran gerçekleştirilen analizin iyi, araştırma kapsamında izlenilen metodolojinin ise etkin ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

DETERMINATION OF POTENTIAL GROUNDWATER ZONES USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS) TECHNIQUES: A CASE STUDY OF THE GEDIZ RIVER BASIN

Keywords

AHP,
GIS,
Gediz River Basin,
Groundwater Zones,
ROC Curve.

Abstract

The presented study was conducted to determine the groundwater potential zones of the Gediz River Basin. In the current study, an integrated combination of GIS techniques and the Analytic Hierarchy Process (AHP), one of the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods, was employed. Within the scope of the study, 12 parameters geology, geomorphology, land use/land cover, lineament density, drainage density, elevation, precipitation, soil, slope, topographic wetness index, roughness, and curvature were used. All parameters analyzed with the AHP algorithm in GIS environment. As a result of the analysis, 2258.03 km^2 of the basin were determined as areas with high and very high groundwater potential. The groundwater potential zone map created for the study area was validated using well yields and spring discharges with the help of the ROC (Receiver Operating Characteristic) Curve. The area under the curve was calculated as 0.891, with an accuracy rate of 89%. This ratio indicates that the analysis performed is good and that the methodology followed within the scope of the research is effective and dependable.

Alıntı / Cite

Yurteri, C., (2025). Potansiyel Yer Altı Suyu Bölgelerinin Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Teknikleri Kullanılarak Belirlenmesi: Gediz Nehri Havzası Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(2), 649-674.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
C. Yurteri, 0000-0002-4944-0168	**Başvuru Tarihi / Submission Date**	02.02.2025
	Revizyon Tarihi / Revision Date	11.03.2025
	Kabul Tarihi / Accepted Date	08.04.2025
	Yayım Tarihi / Published Date	27.06.2025

[*] İlgili yazar / Corresponding author: cansu.yurteri@yahoo.com, +90-312-258-2687

DETERMINATION OF POTENTIAL GROUNDWATER ZONES USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (GIS) TECHNIQUES: A CASE STUDY OF THE GEDIZ RIVER BASIN

Cansu YURTERİ[1†]
[1]Ministry of Interior, Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, Türkiye

Highlights

- Identifying the potential groundwater potential zones is essential for effective water management.
- GIS techniques have been useful to create various thematic layers.
- Groundwater potential zone map was prepared using AHP algorithm and Weighted Overlay Method
- The borehole data was used to validate the accuracy of the model map using ROC curve

Purpose and Scope

This research is mainly focused on assessing groundwater potential zones in Gediz River Basin using GIS-based AHP through weighted overlay analysis.

Design/methodology/approach

Various parameters such as geology, lineament density, geomorphology, slope, soil, elevation, precipitation, drainage density, topographic wetness index, curvature, roughness, and land use/land cover were considered to identify potential groundwater zones in the basin. The selected parameters were weighted and transferred to the ArcGIS 10.8 software for analysis. A weighted overlay analysis was performed on thematic layers in raster data format created in the GIS environment to map groundwater potential zones in the Gediz River Basin. The model map generated was validated using well yields and spring discharges in the basin, and the reliability of the analysis and the suitability of the methods used were determined.

Findings

The evaluated basin area for potential groundwater zones was divided into four regions, each characterized by varying groundwater potential. Among the parameters analyzed using the AHP technique, the geomorphology layer was determined to be the most significant factor influencing groundwater potential, with a weight of 17%. The results indicate that potential groundwater zones in the basin are highly concentrated in the plains in the western and southern areas, where alluvial units are widespread, while the eastern sections exhibit low to medium groundwater potential.

Research limitations/implications

To advance the presented study, it is suggested that additional criteria (e.g., depth to groundwater, groundwater level, topographic position index, NDVI, NDWI, distance to fault, distance to river) and remote sensing techniques be incorporated into the parameters used in the analysis. This would enable analyses with various scenarios involving numerous thematic layers. Accordingly, different model maps representing the basin could be created based on the weights of the factor layers. Additionally, future studies employing satellite data with higher spatial resolution are expected to yield more detailed results due to reduced margins of error, providing a more comprehensive representation of the basin.

Practical implications

The rapid population growth across the basin, along with the parallel increase in demand for access to clean water, underscores the critical importance of investigating and identifying potential groundwater zones for future groundwater development and management.

Social Implications

Given that %75 of the water resources in the study area are used for agricultural practices, the findings have significant potential to improve irrigation processes, agricultural production, and domestic water use efficiency. Furthermore, the research findings are thought to contribute to the United Nations (UN) Sustainable Development Goal 6, which focuses on access to clean water and sanitation.

Originality

There is no prior study specific to the basin that maps potential groundwater zones using AHP and GIS techniques. Within the scope of this research, the potential groundwater zone map for the basin highlights the possibility of developing different strategies for the sustainable use and management of groundwater resources. It also suggests the potential for better land use or urban planning in regions currently under water stress. The findings of this study will serve as a guide in proposing new well locations with high yield potential within the basin. It is also believed that the techniques used in this research have proven effective and could be utilized to identify potential groundwater zones in various regions of Türkiye and around the world.

† Corresponding author: cansu.yurteri@yahoo.com, +90-312-258-2687

1. Giriş (Introduction)

Yüzey suları ve yer altı suları yeryüzündeki toplam su hacminin yaklaşık %2.5'ini oluşturmaktadır (Nampak vd., 2014; Kumar vd., 2014; Arulbalaji vd., 2019). Yer altı ve yüzey suları insanların içme ve kullanma suyu olarak temin edebildikleri tatlı su kaynaklarıdır (Patra vd., 2018). Dünyadaki su kaynakları kullanım alanlarına göre tarımsal, endüstriyel ve evsel tüketim amacıyla kullanılmaktadır (Ajay Kumar vd., 2020).

Küresel ekonomik büyüme ve gıda güvenliği için hayati bir öneme sahip yer altı su kaynaklarının miktarı ve kalitesi yıllar içerisindeki iklim koşullarına, nüfusa veya kullanım ihtiyacına göre değişmektedir (Murmu vd., 2019). İnsani tüketim, tarımsal sulama amaçlı ve endüstriyel kullanımlar nedeniyle Dünya genelinde içilebilir suya olan talebin sürekli artması, yer altı suyu potansiyelini ve akiferlerin üretkenliğini değerlendirme gerekliliğini doğurmaktadır (Kom vd., 2024). Bu kapsamda gerek ekosistemlerin gerekse insan faaliyetlerinin sürdürülebilirliğinde kritik bir rol oynayan yer altı su kaynaklarının etkin yönetilebilmesi oldukça önemlidir. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Raporu'na göre, Dünyada su stresi yaşayan ülkeler arasında 72. sırada olan Türkiye'de kişi başına düşen su miktarı 2000 yılında 1652 m^3 iken; 2009 yılında bu miktar önce 1544 m^3'e, 2017 yılında 1385 m^3'e, 2020 yılında 1346 m^3'e, 2023 yılında ise 1313 m^3'e düşmüştür (UN, 2024; DSİ, 2025). 2050 yılı nüfus projeksiyonuna göre Türkiye nüfusunun 100 milyon olacağı hesaplanırken, kişi başı yıllık su miktarının ise 1145 m^3'e düşebileceği ve Falkenmark İndeks değerlerine göre su stresinin daha da artacağı öngörülmektedir (UN, 2024; Falkenmark vd., 1989). Dolayısıyla su stresi yaşanan bölgelerde dinamik bir kaynak olan yer altı sularının ve akifer sistemlerinin dikkatle izlenmesi gerekmektedir.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Günümüzde potansiyel yer altı suyu bölgelerini belirlemek ve haritalamak için jeofizik, jeoloji ve hidrojeoloji disiplinleri aracılığıyla kullanılan geleneksel yöntemler, oldukça maliyetli araştırma tekniklerine dayanmaktadır (Panahi vd., 2017). Özellikle bir bölgedeki yer altı suyu potansiyeli değerlendirilirken; bu potansiyelin farklı parametrelere bağlı olduğu ve yer altı suyu varlığının kısa bir mesafede dahi aynı jeolojik birim içerisinde değiştiği gözlemlenmiştir (Saho vd., 2020; Driba vd., 2024). Dolayısıyla günümüzde yer altı suyu aramacılığına yönelik araştırmalar yapılırken geleneksel yöntemlerle; modern bilgisayar tabanlı teknikler ile yer gözlem teknolojilerinin birlikte kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Son yıllarda yer altı suyu araştırmalarında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleri, büyük ve karmaşık mekânsal verileri işlemek, karmaşık problemleri anlamak için sistematik, hızlı ve etkin bir yapılandırma sağlamaktadır (Driba vd., 2024; Ganapuram vd., 2009). Özellikle hidrojeolojik araştırmalarda, CBS tabanlı çalışmaların etkili, uygulanabilir, hızlı ve maliyetsiz olması nedeniyle bu teknikler büyük önem kazanmıştır (Murmu vd., 2019). Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) kullanılarak gerçekleştirilen potansiyel yer altı suyu bölgelerini belirlemeye yönelik araştırmalarda en yaygın bilinen teknik CBS tabanlı uygulanan yöntemlerdir (Patra vd., 2018; Kumar vd., 2014). Dünyanın farklı bölgelerindeki potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin haritalanması için AHY ile CBS tekniklerinin birlikte kullanıldığı birçok araştırma yürütülmüştür (Kom vd., 2024, Bhuyan ve Deka, 2024; Driba vd. 2024; Achu vd., 2020; Ajay Kumar vd., 2020; Arulbalaji vd., 2019). Bu araştırmalar da genellikle jeoloji, jeomorfoloji, yağış, arazi kullanımı/arazi örtüsü, drenaj yoğunluğu, eğim, yer altı suyu seviyesi derinliği, toprak dokusu, topoğrafik nemlilik indeksi, yükselti ve çizgisellik gibi parametreler kullanıldığı görülmektedir (Shao vd., 2020; Pinto vd., 2017; Dar vd., 2021). Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) ile çeşitli parametrelerin analiz edilerek CBS veri tabanına aktarıldığı araştırmalarda potansiyel yer altı suyu bölgeleri başarılı bir şekilde belirlenebilmektedir (Saranya ve Saravanan, 2020). AHY, tüm tematik katmanların ortak bir veri tabanında analiz edilmesini mümkün kılmaktadır (Kumar vd., 2014).

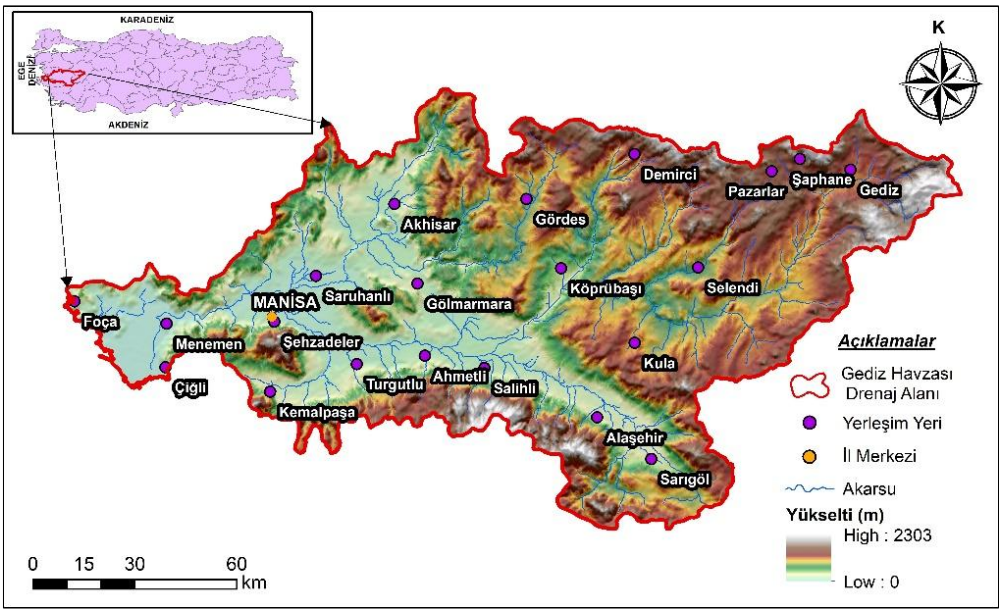
Türkiye'de yer altı suları üzerindeki doğal ve antropojenik faktörler nedeniyle oluşan baskıların giderek artması mevcut tatlı su kaynaklarının daha iyi anlaşılması ve değerlendirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Özellikle Türkiye'nin tarım ve turizm faaliyetlerinde önemli akarsu havzalarından biri olan Gediz Nehri Havzası'ndaki yıllar içerisindeki kentleşme, sanayileşme, nüfus artışı ve ovalık bölgelerde gerçekleştirilen tarımsal faaliyetler, su kaynakları üzerinde kalite ve miktar yönünden baskı oluşturmaktadır. Bununla birlikte iklim değişikliği süreçleri nedeniyle gerçekleşen taşkın ve kuraklık afetleri havzada su kaynaklarını ve beşeri faaliyetleri olumsuz etkilemektedir (SYGM 2019a, SYGM 2018). Havza özelinde iklim değişikliği kapsamında yapılan projeksiyonlarda 2050 yılı ve sonrasında yağış miktarının %25'i geçen bir oranda azalacağı, sıcaklık artışlarının ise 2.0°C ile 5.5°C arasında gerçekleşeceği öngörülmektedir (SYGM, 2019b, SYGM 2018). Dolayısıyla gerek havza genelinde tespit edilen güncel baskılar gerekse gelecekte havzadaki yer altı su kaynaklarının etkin planlanması ve yönetimi için Gediz Nehri Havzası çalışma alanı olarak seçilmiştir. Geçmişte çalışma alanı ve yakın çevresinde paleosismoloji, tektonizma, uzaktan algılama ve hidroloji disiplinlerine yönelik çeşitli çalışmalar yürütülmüştür (Seçen, 2024; Yılmaz 2023; Kaya, 2020; Kütükçü, 2016; Gündoğdu, 2006; Biricik, 1995). Bununla birlikte havza özelinde

potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin AHY ve CBS teknikleri kullanılarak haritalanmasına yönelik bir çalışma mevcut değildir. Bu gerekçeyle Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) teknikleri ile Analitik Hiyerarşi Yönteminin (AHY) entegre bir kombinasyonu kullanılarak Gediz Nehri Havzasında potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışma alanında jeoloji, çizgisel yoğunluk, jeomorfoloji, eğim, toprak, yükselti, yağış, drenaj yoğunluğu, topoğrafik nemlilik indeksi, eğrisellik, pürüzlülük ve arazi kullanımı/arazi örtüsü gibi parametreler dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen analiz kapsamında seçilen parametreler ağırlıklandırılarak ArcGIS 10.8 yazılımına aktarılmıştır. CBS veri tabanında raster veriye dönüştürülen tematik katmanların ağırlıklı çakıştırma (Weighted Overlay) analizi gerçekleştirilerek Gediz Nehri Havzası'nda potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan model harita ile havzada açılmış kuyuların verimleri ve kaynak debileri ROC Eğrisi (Receiver Operating Characteristic) ile kontrol edilerek analizin güvenilirliği ve kullanılan yöntemlerin uygunluğu belirlenmiştir.

Sunulan araştırma ile çalışma alanı için oluşturulan potansiyel yer altı suyu bölgeleri haritası yardımıyla havzadaki yer altı su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve yönetimi için farklı stratejilerin geliştirilebileceği, hali hazırda su stresi altında olan bölgeler için daha uygun arazi kullanımı veya kentsel planlamaların oluşturulabileceği düşünülmektedir. Havzada yüksek verime sahip olabilecek yeni kuyu lokasyonlarının önerilmesi aşamasında araştırma bulguları yön gösterici olacaktır. Araştırma kapsamında kullanılan tekniklerin etkili sonuçlar verdiği, bu tekniklerin ülkemizin ve dünyanın çeşitli bölgelerinde yer altı suyu içeren potansiyel bölgelerin belirlenmesinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Ayrıca araştırma bulgularının Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin (UNDP, 2015) 6. Maddesi olan temiz suya erişim ve sanitasyona yönelik hedeflere de katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

2.1. Çalışma Alanı (Research Area)

Çalışma alanı olarak seçilen Gediz Nehri Havzası İç Batı Anadolu'da 38°02' - 39°10' Kuzey enlemleri ile 26°40' - 29°44' Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Havza kuzeyde Susurluk ve Kuzey Ege, doğuda Sakarya, güneyde Büyük ve Küçük Menderes Havzaları ile komşu olup, batıda Ege Denizi'ne kadar uzanmaktadır (Şekil 1). Ortalama 575 m yükseltiye sahip havzadaki yükseltiler 0 m ile 2.303 m arasında değişmektedir (Şekil 1). Kütahya, Balıkesir, Denizli, Manisa, İzmir, Uşak ve Aydın illeri ile komşu olan havza alanının kuzeyinde Simav Dağları (1.800 m) doğusunda Uysal Dağı (1.135 m), Murat Dağı (2.303 m), batısında Spil Dağı (1.513 m) ile Yamanlar Dağı (1.076 m), güney kesiminde Bozdağlar (2.070 m), orta kesime doğru ise Çal Dağı (1.034 m) ve Aysekizi Tepe (1.032 m) yer almaktadır. Çalışma alanının yükseltisi batıdan doğuya doğru artmakta ve doğu batı dağ sıraları arasında Selendi, Akhisar, Menemen ile Alaşehir ovaları yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma sahasına ait yer bulduru haritası (Location map of the research area)

İç Batı Anadolu'da yer alan havzanın NASA POWER DAV portalı ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre 1984-2022 periyodu için yıllık ortalama yağış miktarı ve sıcaklık değerleri sırasıyla 760.51 mm/yıl ve 16.9° C'dir (NASA, 2025; MGM,2025). Havzanın denize yakın kesimlerinde Akdeniz iklimi özellikleri hâkim iken, havzanın iç kesimlerine doğru Akdeniz ve İç Anadolu iklimleri arasında geçiş iklimi özellikleri görülmektedir. Havza çevresi 962.4 km, havza uzunluğu 264 km, havza yüzey drenaj alanı ise 16.980 km²'dir. Havzadaki ana akarsu olan Gediz Nehri uzunluğu ise 275 km'dir. Gediz Nehri Havzası, doğudan batıya doğru akan bir akarsu

sistemine sahiptir. Havza, yedinci dereceden akarsu ağına sahip olup Gediz Nehri ile Alaşehir, Selendi, Kocaçay, Demirci, Gördes, Kum ve Kemalpaşa çaylarının yer aldığı akarsu kolları ile dendritik bir drenaj deseni sergilemektedir. 2021 yılı TÜİK verilerine göre havzanın toplam nüfusu 1.944.050 olup bu nüfusun %74'ü kentsel bölgelerde yaşamaktadır (TÜİK, 2021). Havza için yapılan nüfus projeksiyonlarına göre 2040 yılı için havza nüfusunun minimum 2.174.843, maksimum ise 2.908.663 kişi olacağı hesaplanmıştır (SYGM, 2019a).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

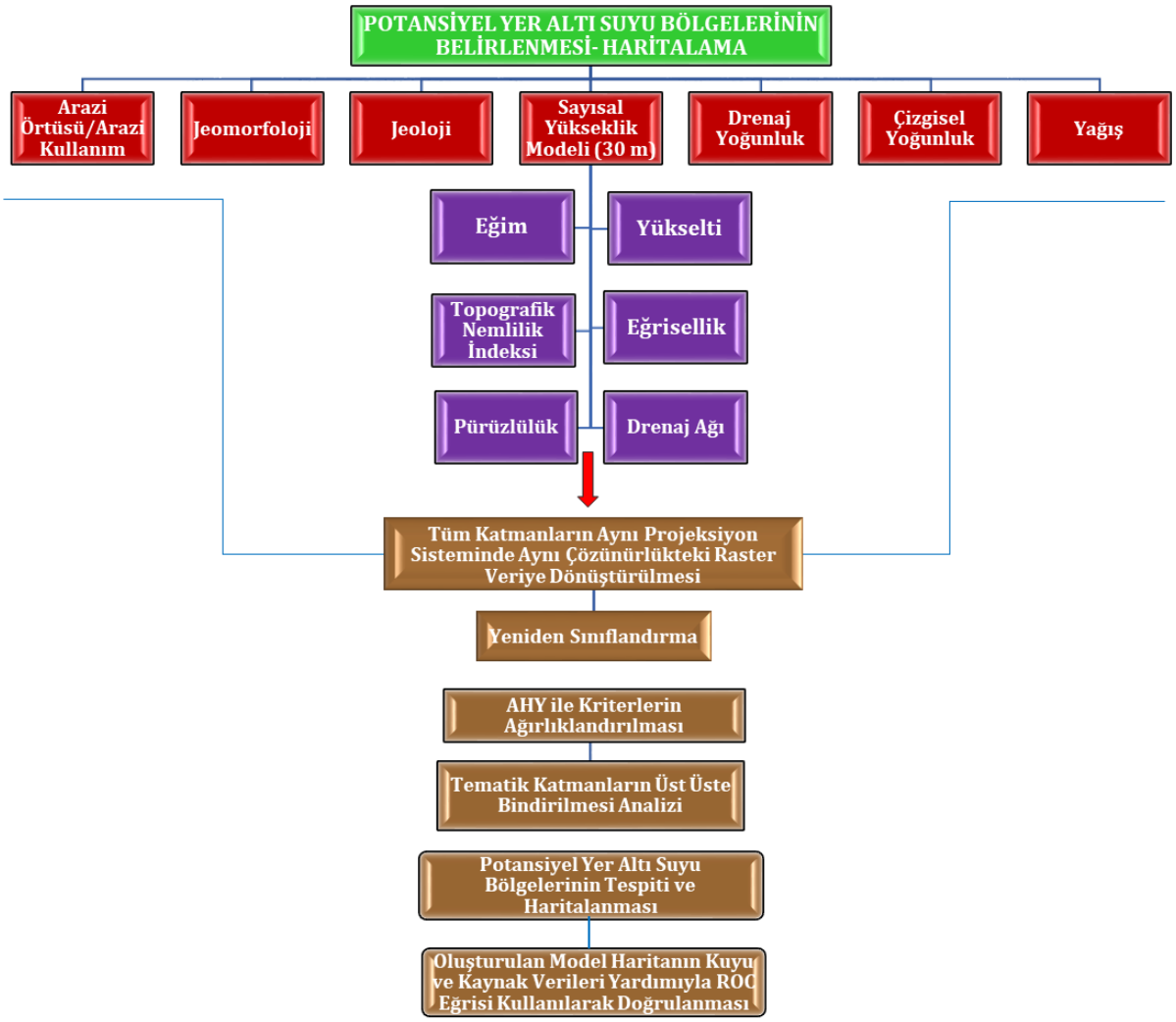
3.1. Materyal (Material)

Sunulan çalışmada, yapılan analizlere altlık oluşturacak olan sayısal veriler çeşitli kurum ve kuruluşların açık erişime sahip, ücretsiz veri portallarından temin edilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan veri setlerinin özellikleri (Properties of the data sets used in the research)

ANALİZ EDİLEN PARAMETRE	OLUŞTURULAN VERİ SETİ KULLANILAN VERİ TABANI	ÇÖZÜNÜRLÜK/ÖLÇEK	AÇIK KAYNAK DOSYASI/ERİŞİM ADRESİ/VERİ TÜRÜ
Yükselti	Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)-30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri - CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımı	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ Raster Veri
Eğim	Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)-30 m çözünürlüğe sahip SRTM verileri - CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımı	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ SYM 'den üretilen Raster Veri
Jeomorfoloji	30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri-Jenness algoritması kullanılarak otomatik yer yüzey şekilleri sınıflandırma modülü	30 m	(https://earthexplorer.usgs.gov/ https://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm SYM'den üretilen Raster Veri
Drenaj Yoğunluğu	30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri-CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımının Hidroloji komutu ile havza drenaj ağı belirlenmiştir.	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ SYM'den üretilen Akarsu Ağı: Vektör veri
Yağış	NASA POWER DAY verileri-Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)- CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımı	30 m	https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ Noktasal Veri
Çizgisel Yoğunluk	MTA Fay Haritası	1/500.000	https://yerbilimleri.mta.gov.tr/ Vektör Veri
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri-CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımının çeşitli komutları kullanılmıştır.	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ SYM 'den üretilen Raster Veri
Jeoloji	MTA Jeoloji Haritası	1/500.000	https://yerbilimleri.mta.gov.tr/ Vektör veri
Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü	CORINE Land Cover 2018 verileri-CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımı	1/100.000	https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover Vektör veri
Toprak	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütünün (FAO/UNESCO) web portalı- CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımı	1/5.000.000	www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/ Vektör Veri
Pürüzlülük	30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri-CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımının Pürüzlülük komutu	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ Raster Veri
Eğrisellik	30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) verileri-CBS ortamında ArcGIS 10.8 yazılımının Eğrisellik komutu	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/ Raster veri
Su Noktaları (Kuyu, Kaynak)	CBS ortamında noktasal verilerin alansal dağılımı	-	Vektör Veri

Çalışma alanı için oluşturulan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) NASA'nın Earth Explorer Portalı'ndan (USGS, 2025), yağış ile sıcaklık verileri NASA POWER DAV portalı ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (NASA, 2025; MGM, 2025); toprak verileri Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü toprak portalından (FAO/UNESCO, 2025); jeoloji paftaları ve fay haritası Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nden (MTA, 2025), arazi kullanım/arazi örtüsü verileri Kopernik Arazi İzleme Servisi'nden (COPERNICUS, 2025), jeomorfoloji verileri ise Jenness arazi yüzey şekilleri sınıflandırma modülünden temin edilmiştir. Çalışma alanında kullanılan verilere yönelik bilgiler Tablo 1'de, izlenilen yönteme ilişkin akış şeması ise Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin haritalanması sırasında takip edilen metodolojiye ilişkin akış şeması (Flowchart of the methodology followed during the mapping of potential groundwater zones)

3.2. Analitik Hiyerarşi Yöntemi (Analytic Hierarchy Process Method)

Son yıllarda ÇKKV tekniklerinden en yaygın ve en bilinen yöntemlerden biri olan Analitik Hiyerarşik Yöntemi (AHY) kullanılarak potansiyel yer altı suyu içeren bölgeler haritalanmaktadır. Bu yöntem, tüm tematik katmanların analiz edilmesine ve CBS ortamına aktarılmasına yardımcı olmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında toplamda 12 parametre dikkate alınmıştır.

1980 yılında Thomas Saaty tarafından geliştirilmiş olan AHY, seçme ve sıralama problemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Saaty, 1980). Söz konusu yöntem, kriterlerin ve alternatiflerin ikili olarak karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. AHY çeşitli aşamalarla gerçekleştirilmektedir. Öncelikle 1. aşamada ele alınan problem tanımlanarak bir hiyerarşik yapı oluşturulur.

2. aşamada alanında uzman görüşlerden, saha gözlemlerinden ve yapılmış araştırmalardan yararlanılarak Saaty (1990) tarafından geliştirilen ölçeğe göre ilgili kriterlere veya alternatiflere değer atanarak karşılaştırma matrisi oluşturulur. Oluşturulan karşılaştırma matrisi kullanılarak gerçekleştirilen ikili karşılaştırma, iki kriter veya alternatifin birbiriyle karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Saaty tarafından geliştirilen göreceli önem ölçeği 1

ile 9 arasında değişen bir ölçek olup bu ölçekteki sayısal değerler aracılığıyla kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri tanımlanmıştır (Saaty, 1990) (Tablo 2).

Tablo 2. Saaty tarafından önerilen ikili karşılaştırma ölçeği (Saaty, 1990) (Scale for pairwise comparison proposed by Saaty)

ÖNEM DERECESİNİN SAYISAL DEĞERİ	ÖNEM DERECESİ	DEĞERLENDİRME
9	Son Derece Önemli	Bir parametre diğer parametreye göre son derece öneme sahiptir.
7	Çok Yüksek Derecede Önemli	Bir parametre diğer parametreye göre çok yüksek derecede öneme sahiptir.
5	Yüksek Derecede Önemli	Bir parametre diğer parametreye göre yüksek derecede öneme sahiptir.
3	Orta Derecede Önemli	Bir parametre diğer parametreye göre orta derecede öneme sahiptir.
1	Eşit Derecede Önemli	İki parametrede eşit derecede önem derecesine sahiptir.
2,4,6,8	Ara Değerler	

İkili karşılaştırma ölçeğine göre hazırlanan karşılaştırma matrisinin (A) i. satır ve j. sütununda bulunan elemanı a_{ij} seklinde gösterilir. a_{ij} değeri i. kriter ile j. kriterin ikili karşılaştırma değeri olarak gösterilmektedir. a_{ji} değeri ise matrisin köşegene göre simetrisi nedeniyle $1/a_{ij}$ olarak hesaplanmaktadır. Karşılık olma özelliği olarak bilinen bu özellik kriter i'nin, kriter j'ye göre ne derecede önemli olduğunu göstermektedir (Saaty, 1990) (Eşitlik 1).

$$A=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{ij} \\ 1/_{a12} & 1 & \ldots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ 1/_{a_{1n}} & 1/_{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad a_{ij}=\frac{a_{ij}}{\sum_1^n a_{ij}} \; i.j = 1.2\ldots\ldots,n \quad (1)$$

3. aşamada önem dereceleri belirlenen kriterlerden oluşan karşılaştırma matrisinin normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. NxN boyutlu bir kare matris ile temsil olan karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki bileşenleri diyagonal olarak 1 değerini almaktadır. Karşılaştırma matrisindeki her bir hücre değerinin ilgili sütun toplamına bölünmesi ile matrisin normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Sonrasında matriste yer alan her bir değerin toplamının aritmetik ortalaması şeklinde öncelik vektörü (W_i) hesaplanır (Eşitlik 2).

$$W_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{aij}{\sum_{j=1}^{n} aij} \qquad (2)$$

Sonrasında öncelikler vektörü (Wi) ile başlangıçtaki karşılaştırma matrisi (A) çarpılarak her bir kriterin ağırlık değerleri bulunur. Ağırlık değerleri öncelikler vektörü elemanlarına bölünerek özdeğer vektör bulunur ve en büyük özdeğer vektör olan λ max hesaplanır (Eşitlik 3).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{W_i} \qquad (3)$$

4. aşama olarak hesaplanan λ max değeri ve analizde kullanılan kriter veya alternatif sayısı kullanılarak Tutarlılık Indeksi (CI) değeri hesaplanır (Eşitlik 4).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \qquad (4)$$

CI değeri hesaplandıktan sonra 5. aşamada ikili karşılaştırmaların tutarlılık durumlarının anlaşılabilmesi amacıyla tutarlılık testleri gerçekleştirilir. Tutarlılık testleri kalibrasyon, seçme ya da sıralama işlemlerinden oluşmaktadır. Tutarlılık testleri yapabilmek için öncelikle yapılan analizin Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanır. CR hesaplanırken CI ve Rassal Indeks (RI) parametreleri kullanılır (Eşitlik 5).

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (5)$$

CR hesaplanırken hesaplamada kullanılan RI değeri analizde kullanılan kriter veya alternatif sayısına göre değişmektedir (Saaty, 2000).

Tablo 3. Rassal Indeks değerleri (Random Index values)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57	1.59

CI değerinin RI değerine oranlanmasıyla CR değeri hesaplanmaktadır. CR'nin 0.10'dan küçük olması karar verici tarafından karar matrisi kullanarak yapılan karşılaştırmaların tutarlı olduğunu göstermektedir (Saaty, 2000). Gerçekleştirilen analizde yüksek ağırlığa sahip bir parametre, yer altı suyu potansiyeli üzerinde yüksek etkiye sahip katmanı gösterirken, düşük ağırlığa sahip parametre, yer altı suyu potansiyeli üzerinde düşük bir etkiye sahip olan katmanı göstermektedir. CR değerinin 0.00 olması durumunda ise kriterler veya alternatifler arası karşılaştırmada mükemmel bir tutarlılık düzeyinin olması söz konusudur. CR'nin 0.10'dan büyük olması ise karar vericinin karar matrisinde verdiği cevaplarının tutarsızlığına ya da hesaplama hatasına işaret etmektedir (Saaty, 2000). Dolayısıyla hipotezin tekrar kurularak analizin tekrar gözden geçirilmesi gerekmektedir.

4. Bulgular (Findings)

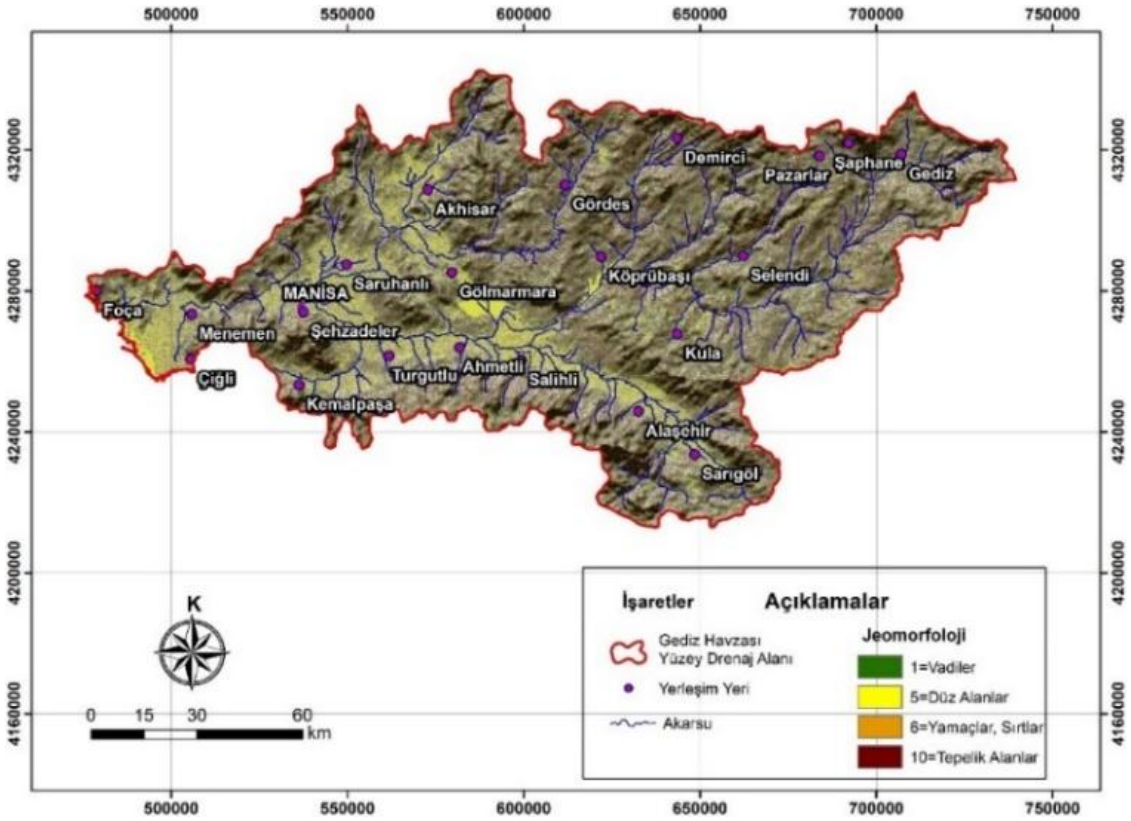
Akifer birimlerin yer altı sularıyla beslenmesi birçok faktöre bağlıdır. Mevcut çalışmada, havzadaki potansiyel yer altı suyu içeren bölgeleri belirlemek için jeomorfoloji, jeoloji, çizgisel yoğunluk, yükselti, eğrisellik, pürüzlülük, eğim, toprak, yağış, drenaj yoğunluğu, arazi kullanımı/arazi örtüsü ve topoğrafik nemlilik indeksi olmak üzere 12 parametre dikkate alınmıştır. Analizde değerlendirilen her bir parametre raster veri formatında birer tematik katmanı temsil edecek şekilde hazırlamıştır. 12 parametrenin analizi ile oluşturulan tematik katmanların, havza alanındaki yer altı suyu beslenmesine katkı verdiği varsayılmaktadır.

Çalışma kapsamında kullanılan tüm veriler ArcGIS 10.8 yazılımıyla ortak bir veri tabanında Dünya Jeodezi Sistemi 1984 (WGS 84) Evrensel Enlem Merkatörü (UTM) Zon 35 projeksiyon sistemiyle analiz edilmiştir. Analizde kullanılan her bir katmanı temsil eden alt sınıflar 1 ile 5 arasında değişen bir sıralamayla puanlanmış, Saaty ölçeği yardımıyla AHY kullanılarak ilgili katmanların ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Tüm katmanlar CBS ortamında ağırlıklı çakıştırma (weighted overlay) komutu kullanılarak üst üste bindirilmiş ve havza için potansiyel yer altı suyu bölgelerini içeren model bir harita oluşturulmuştur. CBS teknikleri, aşağıda bulguları sunulan farklı parametreleri temsil eden tematik katmanları hazırlamak için kullanılmıştır. Sunulan araştırma kapsamında her bir katmana ilişkin gerçekleştirilen analizlere yönelik bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir.

4.1 Jeomorfoloji (Geomorphology)

Bir alanın arazi yüzeyini ve topografyasını temsil eden jeomorfoloji parametresi potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan faktörlerdendir (Ganapuram vd., 2009). Hidro-jeomorfolojik araştırmalar, hidro-jeomorfik birimler ile yer altı suyu kaynakları arasında güçlü bir ilişkinin varlığını ortaya koymaktadır (Patra vd., 2018). Bu kapsamda ArcGIS 10.8 yazılımı kullanılarak Jenness arazi yüzey şekilleri sınıflama modülü ile havzanın jeomorfolojik sınıflaması yapılmıştır.

Çalışma alanı vadiler, düz alanlar, yamaçlar, sırtlar ile tepelik alanlardan oluşmaktadır (Şekil 3). Havzanın %13.54'lük (2289.8 km^2) kesimi düz alanlardan, %41.21'lik (6970.6 km^2) kesimi vadilerden, %39.48'lik (6677.7 km^2) kesimi tepelik alanlardan, %5.77'lik (975.3 km^2) kesimi ise yamaç ve sırtlardan oluşmaktadır (Tablo 4). Sunulan çalışmada vadiler ve düz alanlar yer altı suyu potansiyeli yüksek bölgeler olarak tanımlanırken; yamaçlar, sırt ve tepelik alanlar yer altı suyu potansiyeli düşük alanlar olarak tanımlanmıştır.
Bu kapsamda vadiler ve düz alanlar için yüksek ağırlık değerleri; sırtlar, yamaçlar ve tepelik alanlar için düşük ağırlık değerleri verilmiştir.



Şekil 3. Çalışma sahasının jeomorfoloji haritası (The geomorphology map of the research area)

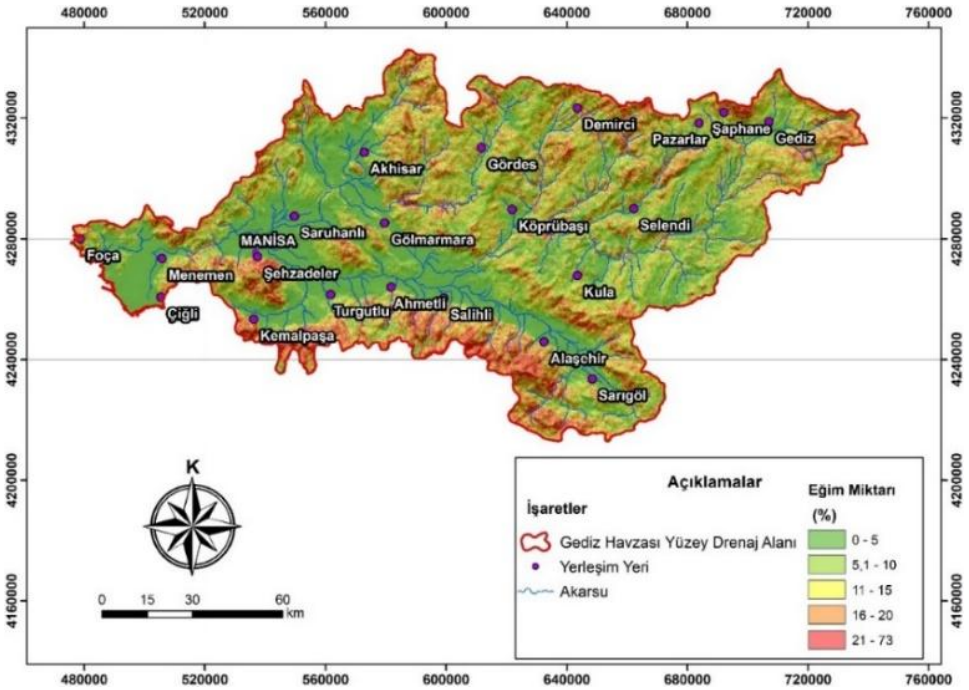
Tablo 4. Jeomorfoloji katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the geomorphology layer)

JEOMORFOLOJİ	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
Vadiler	0.558	6970.6	41.21
Düz Alanlar	0.263	2289.8	13.54
Yamaçlar, Sırtlar	0.122	975.3	5.77
Tepelik Alanlar	0.057	6677.7	39.48
CR: 0.065, CI:0.059, λ max:4.18, RI: 0.90			

4.2 Eğim (Slope)

Suyun yer altı suyuna sızmasını kontrol eden ve yüzey akışını doğrudan etkileyen eğim parametresi potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılan bir kriterdir (Dar vd., 2021). Sızma hızı ile ters orantılı olan eğim açısı miktarı, yer altı suyu potansiyelini etkileyen önemli bir topoğrafik faktör olarak kabul edilmektedir (Pande vd., 2021). Genellikle, hafif eğimli bir arazide yüzeysel akışa geçen suyun hızı düşük, sızma oranı ise yüksektir (Verma ve Patel, 2021). Dolayısıyla bu durum yer altı suyuna olan beslenimi artırmaktadır. Orta ve daha dik eğim derecelerine sahip yamaçlarda ise yüzeysel akış hızı daha yüksek, sızma oranı ise daha düşük olup sınırlı bir beslenim gerçekleşmektedir.

Çalışma alanının eğim haritası 30 m çözünürlüğe sahip SYM kullanılarak ArcGIS 10.8 yazılımında yer alan yüzey modülünün eğim komutuyla oluşturulmuştur (Şekil 4). Çalışma alanındaki eğim miktarı 0° ile 73° derece arasında değişmektedir. Havza eğim dereceleri ise ArcGIS ara yüzünün doğal kırılma algoritması kullanılarak beş sınıfa ayrılmıştır (Tablo 5). Havzanın 9877.6 km²'lik (%58.40) bölümü düşük eğim miktarına (0-10°) sahip alanlardan oluşmaktadır. Havzada eğim miktarı düşük olan alanlar yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanırken, eğim miktarı yüksek bölgeler yer altı suyu potansiyeli düşük alanlar olarak tanımlanmıştır.



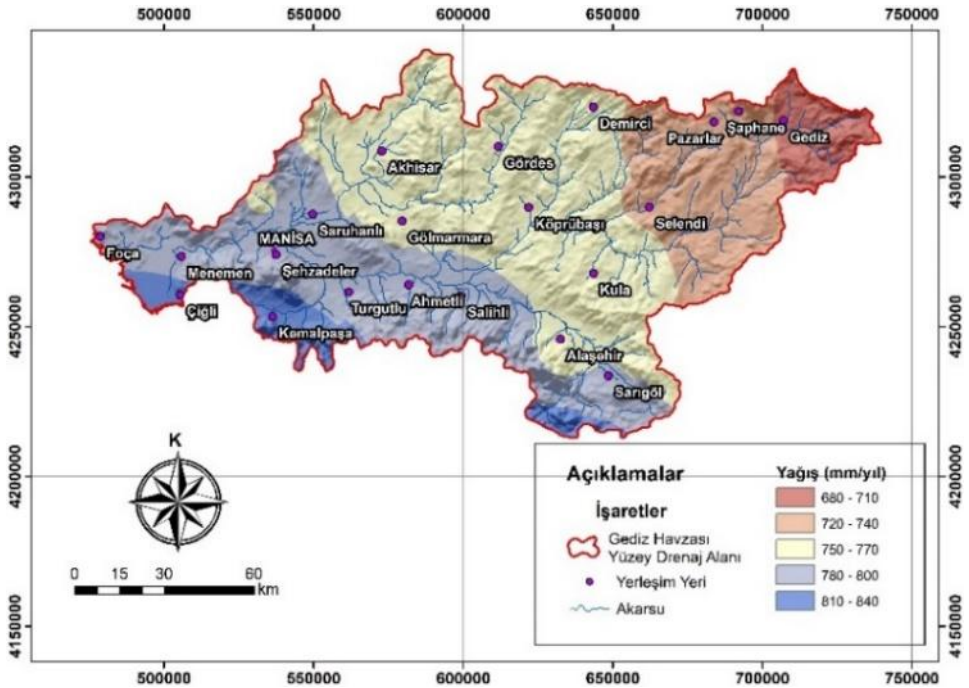
Şekil 4. Çalışma sahasının eğim haritası (The slope map of the research area)

Tablo 5. Eğim katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the slope layer)

EĞİM DERECESİ(°)	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
0-5	0.503	5829.0	34.5
5-10	0.260	4048.6	24.9
11-15	0.134	3125.1	18.5
16-20	0.068	1944.5	11.5
21-73	0.035	1969.7	11.6
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.3. Yağış (Rainfall)

Hidrolojik döngünün bir bileşeni olan ve yer altı suyu beslenmesinin önemli bir kaynağı olan yağış, potansiyel yer altı suyu bölgelerinin haritalanmasında yaygın kullanılan parametrelerden biridir (Panahi vd., 2017). Yağışın süresi ve yoğunluğu, sızma ve yer altı suyu beslenim süreçleri üzerinde oldukça etkilidir (Shao vd., 2021). Yüksek yağış miktarına sahip alanlar yer altı suyunun beslenmesine, az yağış alan bölgelere göre daha fazla katkıda bulunmaktadır (Manap vd., 2013)yeraltı suyunun beslenme olasılığı, yıllık yağışın yüksek olduğu yerlerde maksimum, yıllık yağışın düşük olduğu yerlerde ise minimumdur. Çalışma alanı olan Gediz Nehri Havzası'nın alansal yağış dağılım haritası ArcGIS 10.8 yazılımında IDW komutu kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 5). Havzada noktasal yağış verileri kullanılarak oluşturulan alansal yağış dağılım haritasına göre bölgeye düşen yağış miktarı beş sınıfa ayrılmıştır. Havzanın batı, güney ve kuzey batı kesimleri dere yataklarının yer aldığı alüvyon alanlar olup bu bölgelere düşen yağış miktarı 780-800 mm/yıl arasında değişmektedir. Alanın güney ve güneybatı kesimlerindeki dağ sıralarının olduğu bölgeler, çalışma alanında yükseltinin arttığı bölgeler olup, bu bölgelere düşen yağış miktarı 810-840 mm/yıl arasında değişmektedir. Sunulan çalışmada oluşturulan yağış dağılım haritasına göre yüksek yağış sınıfına, akiferlerin yeniden beslenme potansiyelinin yüksek olması nedeniyle daha yüksek puan verilirken, az yağış alan bölgelere görece daha düşük puanlar verilmiştir.



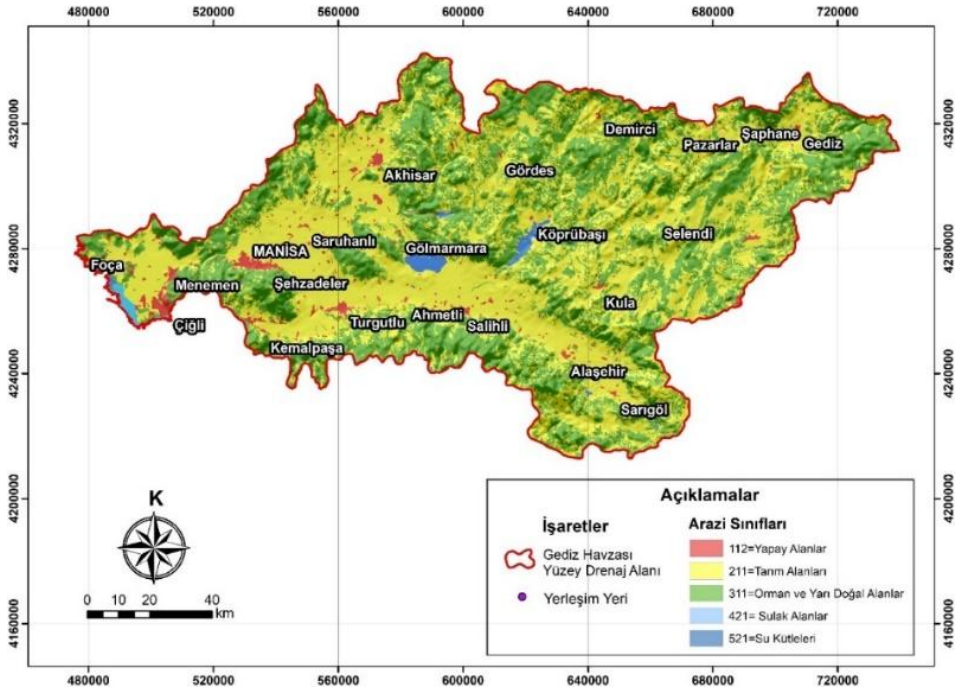
Şekil 5. Çalışma sahasının yağış dağılım haritası (The rainfall distrubition map of the research area)

Tablo 6. Yağış katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the rainfall layer)

YAĞIŞ (MM/YIL)	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	0RAN(%)
680-710	0.036	905.3	5.34
720-740	0.076	2803.3	16.52
750-770	0.158	7018.1	41.36
780-800	0.306	4940.2	29.11
810-840	0.423	1302.5	7.68
CR: 0.048, CI:0.055, λ max:5.22, RI: 1.12			

4.4. Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (Land Use/Land Cover)

Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü herhangi bir havzanın akış, sızma ve yer altı suyu potansiyelinin değerlendirilmesinde önemli bir role sahiptir (Shekhar ve Pandey, 2015). Ayrıca toprak nem içeriği, sızma, yer altı ve yüzey su kütleleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Kumar vd., 2014). Özellikle belirli bir alandaki bitki örtüsü miktarı yüzeysel akışa geçen su miktarını doğrudan etkilemektedir (Saranya ve Saravanan, 2020). Çalışma alanında Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından önerilen arazi kullanım sınıflamasına göre arazi sınıfları belirlenmiştir. Bu kapsamda CORINE 1. Seviye arazi örtüsü verilerine göre havza, beş grup altında sınıflandırılmıştır (Şekil 6). Çalışma alanında su kütleleri, tarım alanları ile orman ve yarı doğal alanlar (geniş yapraklı, iğne yapraklı, karışık ormanlar, doğal çayırlıklar, fundalıklar, makiler, seyrek bitki alanları, sahiller) yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak değerlendirilirken, yapay alanlar (şehir yapıları, endüstri, ticaret ve ulaşım birimleri, maden çıkarım sahaları, evsel, endüstriyel ve madeni atıkların boşaltım sahaları, inşaat sahaları ile spor ve eğlence alanları) olarak tanımlanan bölgeler yer altı suyu potansiyeli düşük alanlar olarak analiz edilmiştir (Tablo 7). Çalışma alanının arazi örtüsü/arazi kullanım verileri Avrupa Çevre Ajansı'nın 2018 yılına ait 1/100.000 ölçekli vektör veri setinden oluşan CORINE veri tabanından temin edilmiştir (Copernicus, 2025).



Şekil 6. Çalışma sahasının arazi kullanımı/arazi örtüsü haritası (Land use/Land cover map of the research area)

Tablo 7. Arazi Kullanım/Arazi Örtüsü katmanı için yapılan analize ait bulgular
(Findings of the analysis for the Land Use/Land Cover layer)

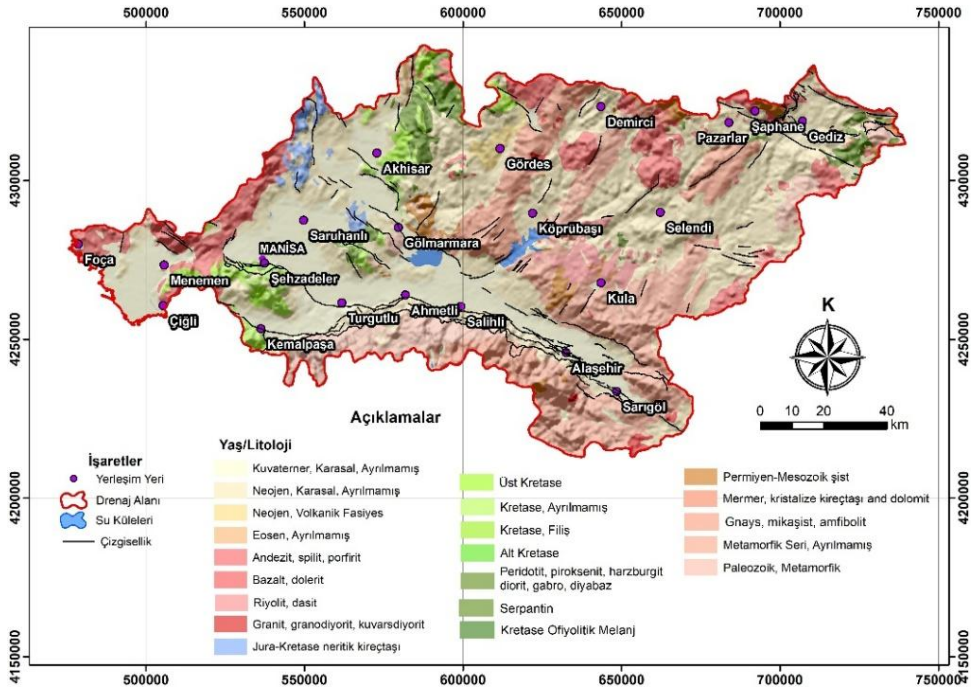
1.SEVİYE ARAZİ KULLANIM/ARAZİ ÖRTÜSÜ SINIFLARI	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
Yapay Alanlar (1 Kodlu)	0.034	369.2	2.17
Tarımsal Alanlar (2 Kodlu)	0.153	8917.4	52.52
Orman ve Yarı Doğal Alanlar (3 Kodlu)	0.119	7500.4	44.17
Sulak Alanlar (4 Kodlu)	0.291	50.9	0.30
Su Kütleleri (5 Kodlu)	0.403	142.2	0.84
CR: 0.049, CI:0.055, λ max:5.22, RI: 1.12			

4.5. Jeoloji/Geçirimlilik (Geology/Permeability)

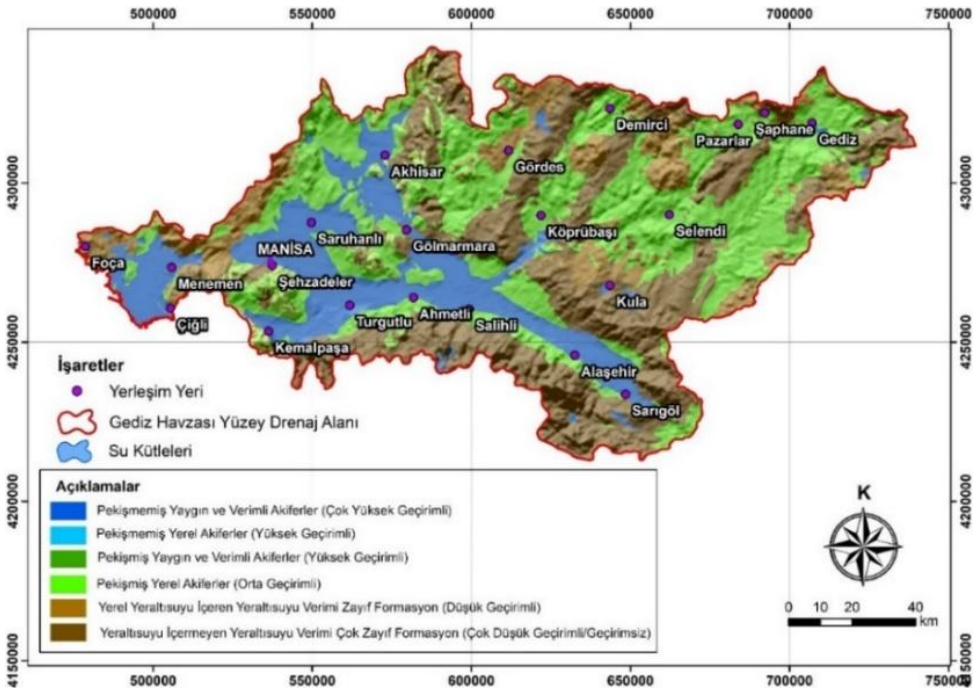
Herhangi bir bölgede yer altı suyunun akışı, depolanması ve iletilmesinde birimlerin litolojik özellikleri önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma alanındaki jeolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleri, yer altı suyunun depolama kapasitesini ve akışını etkileyen önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Mohammadi-Behzad vd., 2019). Farklı litolojilerden oluşmuş jeolojik birimlerin varlığı ve bunların birbirleri ile etkileşimi, alanın toplam sızma kapasitesini ve bölgenin potansiyel yer altı suyu kapasitesini belirlemektedir (Murmu vd., 2019). Bu kapsamda çalışma alanında yüzeyleyen jeolojik birimler belirlenmiştir. Buna göre MTA tarafından üretilen jeoloji verisinin ArcGIS 10.8 yazılımına aktarılması ile çalışma alanına ait jeoloji katmanı analize hazır hale getirilmiştir.

Çalışma alanı olarak seçilen Gediz Nehri Havzası, Batı Anadolu Genişleme Bölgesinde yer almaktadır. Havza sınırları içerisinde paleotektonik ve neotektonik döneme ait çeşitli jeolojik birimler yer almaktadır. Paleozoyik yaşlı Menderes Metamorfitleri'ne ait kayaçlar çalışma alanının temelini oluşturmaktadır (SYGM, 2018). Havzada Menderes Metamorfiti kayalarına bağlı eş yaşlı sayılabilecek granit yüzlekleri yer almaktadır. Alanda Akhisar ilçesinin kuzeydoğusunda diorit, gabro ve peridotit birimleri yer almaktadır. Havzanın batısındaki Menemen Ovası'nda yükseltinin arttığı bölgeler ile İzmir ilinin Foça ilçesinde andezit, bazalt ve yer yer büyük bloklar halinde serpantinitler görülmektedir. İzmir-Ankara Zonu ile temsil olan ofiyolitik melanj ve filiş kaya birimleri temel kaya olan Menderes Metamorfitleri üzerine bindirme fayları ile gelmektedir. Bu birimlerin üzerine uyumsuzlukla Neojen yaşlı magmatik kayalar ile sedimanter çökeller gelmektedir (SYGM, 2019a). Neojen yaşlı sedimanter çökeller çalışma alanı sınırları içinde fay kontrollü karasal ve gölsel istifler ile karakterize olmakta ve bu istifler havza genelinde faylar tarafından parçalanmış bir halde yer almaktadır. Karasal kökenli Neojen serilerin ovalık alanlarda yüzeyleyen kesimlerinde kalınlık ve geçirimlilik açısından değişiklikler görülmektedir (SYGM, 2019a). Havza içerisindeki temel kaya birimleri ve Neojen yaşlı seri, Kuvaterner yaşlı alüvyon birimler ile Kuvaterner yaşlı bazalt kayalar tarafından açısal uyumsuzlukla örtülmektedir (SYGM, 2019a)(Şekil 7).
Havza içerisinde yüzeyleyen jeolojik birimlerin yer altı suyu taşıma ve iletebilme kapasitelerini gösteren hidrojeoloji haritası oluşturulmuştur (Şekil 8). Yapılan analizde çok yüksek geçirimliliğe sahip jeolojik birimlerin

yer aldığı alanlar yer altı suyu potansiyeli yüksek bölgeler olarak haritalanırken, çok düşük geçirimliliğe sahip jeolojik birimlerin yer aldığı bölgeler ise yer altı suyu potansiyeli düşük alanlar olarak haritalanmıştır. Havzada Kuvaterner yaşlı pekişmemiş sedimanlardan oluşan alüvyon ve yamaç molozu birimleri yaygın ve verimli yer altı suyu akiferi olan çok yüksek geçirimli birimler olarak haritalanmıştır. Paleozoyik yaşlı Menderes Metamorfitleri'ne ait kristalen mermer seviyeler alandaki yoğun tektonik hareketlerin etkisi ile çok yoğun kırık çatlak sistemlerinden oluşan bir yapı kazanmış ve karstlaşmış olmaları nedeniyle akifer özelliği taşıyan yüksek geçirimli birimler olarak tanımlanmıştır. Mesozoyik yaşlı kristalize kireçtaşı, dolomit seviyeler ile Neojen yaşlı kırıntılı karasal ayrılmamış birimlerin killi kireçtaşı seviyeleri orta geçirimli akifer birimler olarak, Neojen yaşlı volkanik kayalar ile bazalt, andezit, riyolit, dasit gibi kayaçlar ise çatlaklı olmaları durumunda yer altı suyu verimi zayıf, düşük geçirimli birimler olarak haritalanmıştır. Paleozoyik metamorfik birimlere ait şist kuvarsit seviyeler ile filiş, ofiyolitik melanj, peridotit, serpantinit, amfibolit gibi litolojiler ise yer altı suyu bulundurmayan geçirimsiz birimler olarak haritalanmış ve yapılan analizde en düşük puana sahip sınıfta değerlendirilmiştir (Şekil 8, Tablo 8).



Şekil 7. Çalışma sahasının jeoloji haritası (MTA, 1961 1:500.000 ölçekli)
(Geology map of the research area) (MTA,1961 1:500.000 scale)



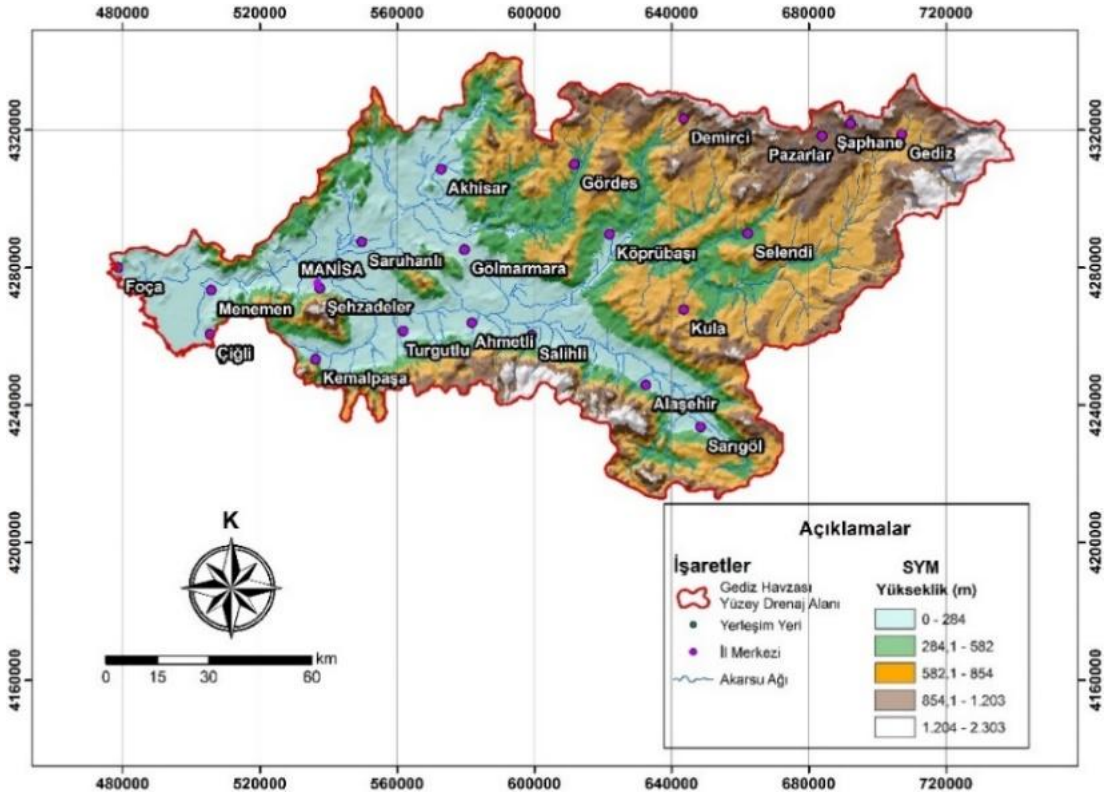
Şekil 8. Çalışma sahasının geçirimlilik haritası (Permeability map of the research area)

Tablo 8. Jeoloji katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the geology layer)

GEÇİRİMLİLİK	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
Çok Düşük Geçirimli	0.035	5860.2	34.55
Düşük Geçirimli	0.068	2042.8	12.04
Orta Geçirimli	0.134	6108	36.01
Yüksek Geçirimli	0.260	6.70	0.04
Çok Yüksek Geçirimli	0.503	2942.8	17.35
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.6. Yükselti (Elevation)

Yükselti parametresi potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Sunulan çalışmada yükselti sınıflarını oluşturmak amacıyla araştırma alanı için 30 m çözünürlüğe sahip Shuttle Radar Topografya Misyonu (SRTM) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verileri kullanılmıştır. Çalışma alanında potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde, düşük yükseltiye sahip bölgelere yüksek puanlar verilirken bu alanlar yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip bölgeler olarak tanımlanmıştır. Orta ve yüksek rakımlı alanlara ise görece daha düşük puanlar verilmiştir. Bu ağırlıklandırma yaklaşımı, yükseltinin değişim gösterdiği alanlarda yer altı suyu potansiyelinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Buna göre çalışma alanı içerisindeki yükselti değişimlerinin belirlenmesi amacıyla SYM aralıkları çok düşük (0-284 m), düşük (284.1-582 m), orta (582.1-854 m), yüksek (854.1-1.203 m) ve çok yüksek (1.204 - 2.303 m) olmak üzere beş sınıfa ayrılmıştır (Şekil 9). Çalışma alanında en düşük yükseltiye sahip kesimler %28.73'lük oranla havzanın ovalık kesimlerine karşılık gelmekte olup yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmıştır (Tablo 9).



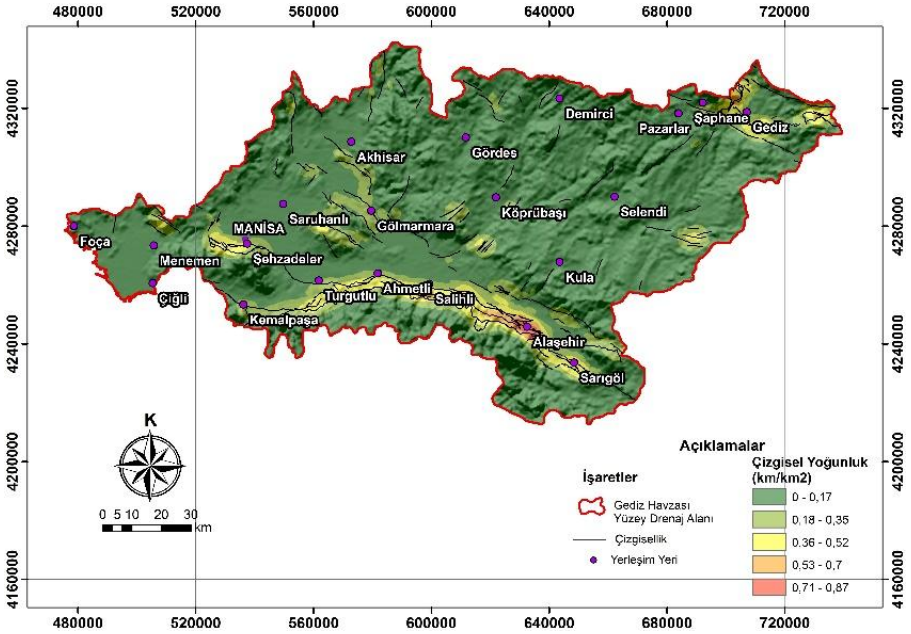
Şekil 9. Çalışma sahasının yükselti haritası (Elevation map of the research area)

Tablo 9. Yükselti katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the elevation layer)

YÜKSELTİ (M)	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
0-284	0.503	4865.2	28.73
284.1-582	0.260	3540.3	20.91
582.1-854	0.134	4627.6	27.33
854.1-1.203	0.068	3035.9	17.93
1.204-2.303	0.035	864.3	5.10
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.7.Çizgisel Yoğunluk (Lineament Density)

Tektonik kökenli doğrusal yapılar olan çizgisellikler, artan ikincil gözeneklilik ve geçirgenlikle sonuçlanan faylanma ve kırılma bölgelerini temsil etmektedir (Pinto vd., 2017). Çizgisel yapılar bir bölgede suyun dolaşımına izin veren, yer altı suyu varlığını işaret eden göstergelerdir (Mandal vd., 2016). Özellikle bir alanın çizgisel yoğunluğu arttıkça yer altına sızan su miktarı artmakta ve akifer sistemlerinin beslenebilmesi için bir akış zonu oluşturarak o bölgenin doğrudan yer altı suyu potansiyelini etkilemektedir. Çizgiselliklerin kesiştiği bölgeler ise yer altı suyu potansiyeli yüksek bölgeler olarak tanımlanmaktadır. Çalışma alanındaki çizgisel yoğunluk km^2 başına 0.17km ile 0.87 km arasında değişmektedir (Şekil 10). Buna göre çalışma alanında çizgisel yoğunluğun yüksek olduğu yerler yüksek yer altı suyu potansiyeli ile temsil edilirken, çizgisel yoğunluğun düşük olduğu yerler ise yer altı suyu potansiyeli düşük bölgeler olarak belirlenmiştir (Tablo 10).



Şekil 10. Çalışma sahasının çizgisel yoğunluk haritası (Lineament density map of the research area.)

Tablo 10. Çizgisel yoğunluk katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the lineament density layer)

ÇİZGİSEL YOĞUNLUK (KM/KM^2)	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM^2)	ORAN (%)
0-0.17	0.035	14251.5	83.93
0.18-0.35	0.068	1843.4	10.86
0.36-0.52	0.134	719.3	4.24
0.53-0.70	0.260	135	0.80
0.71-0.87	0.503	30.8	0.18
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

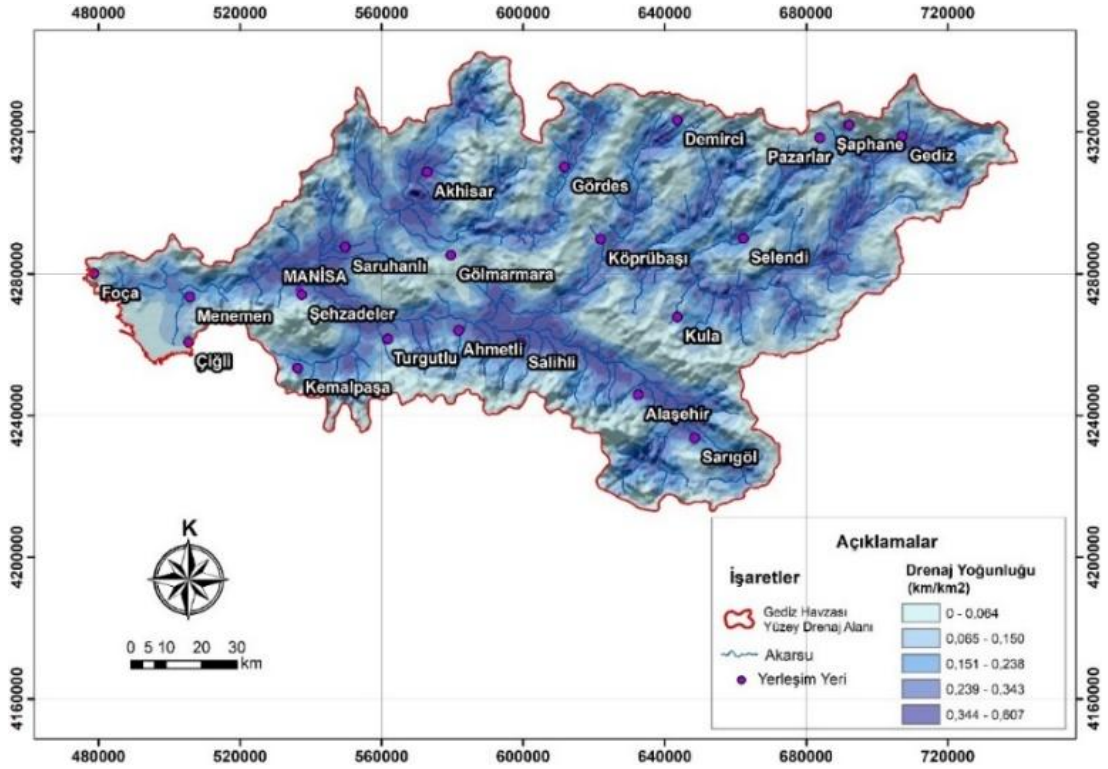
4.8. Drenaj Yoğunluğu (Drainage Density)

Drenaj yoğunluğu, bir drenaj havzasındaki tüm akarsuların toplam uzunluğunun drenaj havzasının toplam alanına bölünmesiyle elde edilen bir parametredir (Horton, 1932). Horton (1932) tarafından önerilen drenaj yoğunluğu parametresi aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır (Eşitlik 6). Eşitlik 6'ya göre L: Tüm akarsu kollarının uzunluğu A: Havza alanını göstermektedir.

$$D_d = \frac{L}{A} \qquad (6)$$

Drenaj yoğunluğu parametresi potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde önemli bir faktördür (Rajasekhar vd., 2019). Litolojik birimlerin türüne bağlı olarak sızma sürecinde önemli bir etkiye sahip olan drenaj yoğunluğu, geçirimlilik faktörü ile ters orantılıdır (Rajasekhar vd., 2019). Yüksek drenaj yoğunluğu düşük sızma derecesi ile temsil edilirken bir havzanın yer altı suyu potansiyeline çok fazla katkıda bulunamaz. Düşük drenaj yoğunluğu ise yüksek sızma derecesini temsil etmekte olup yer altı suyu potansiyeline daha fazla katkıda bulunmaktadır (Manap vd., 2013). Yapılan analizde düşük drenaj yoğunluğuna sahip bölgeler sızmanın yüksek, yüzeysel akışın az olduğu, yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip bölgeler olarak tanımlanmıştır (Şekil 11). Yapılan çalışma kapsamında ArcGIS arayüzündeki hidroloji modülü kullanılarak SYM üzerinden havzanın hidroloji

analizi yapılmış ve havza drenaj ağı oluşturulmuştur. Sonrasında ArcGIS yazılımının line density modülü kullanılarak çalışma alanının drenaj yoğunluğu haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanındaki drenaj yoğunluğu km² başına 0.06 km ile 0.60 km arasında değişmektedir. Buna göre drenaj yoğunluğunun düşük olduğu yerler yüksek yer altı suyu potansiyeli ile temsil edilirken drenaj yoğunluğunun yüksek olduğu yerler ise yer altı suyu potansiyelinin düşük olduğu alanlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 11 ve Tablo 11).



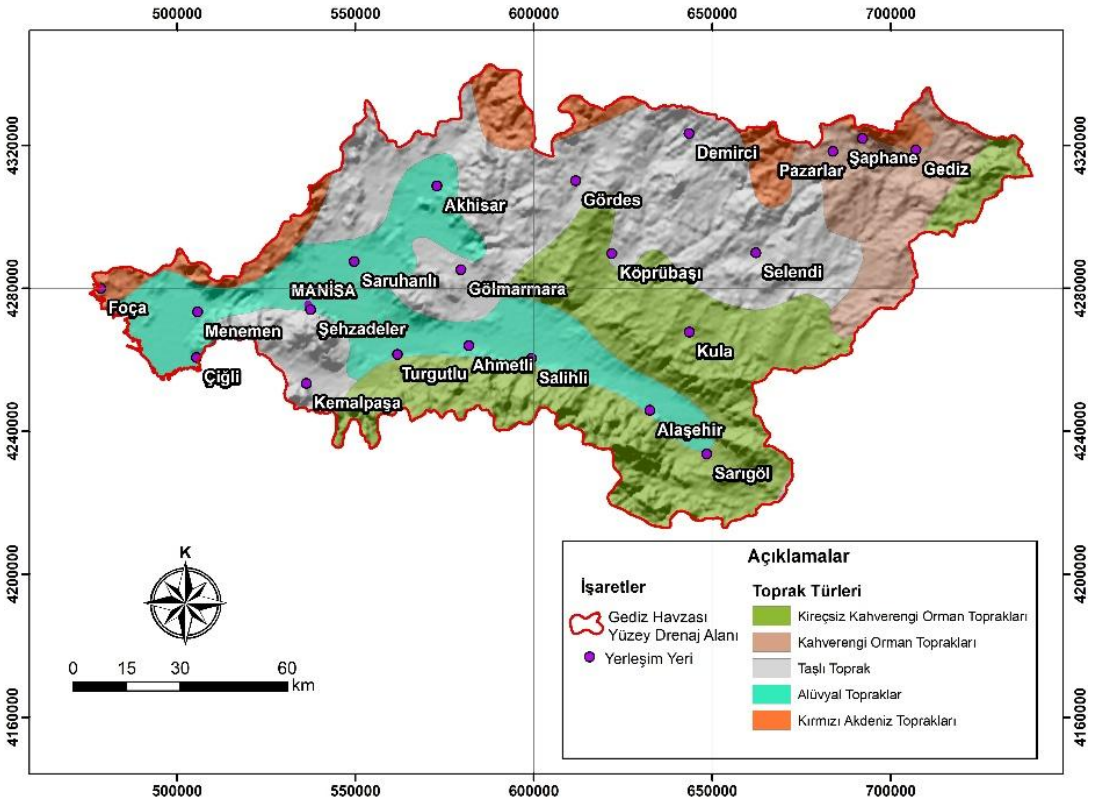
Şekil 11. Çalışma sahasının drenaj yoğunluk haritası (Drainage density map of the research area)

Tablo 11. Drenaj yoğunluk katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the drainage density layer)

DRENAJ YOĞUNLUĞU (KM/KM²)	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
0-0.064	0.503	4811.1	28.41
0.065-0.150	0.260	4015.4	23.71
0.151-0.238	0.134	3784.1	22.35
0.239-0.343	0.068	3005.1	17.75
0.344-0.607	0.035	1317.5	7.78
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.9. Toprak (Soil)

Toprak türü ve dokusu, yüzey akışını ve yağışın yer altına sızmasını kontrol eden diğer önemli faktörlerdendir. Toprağın tipi, kalınlığı, dokusu ve bileşimi sızma özelliklerini ve dolayısıyla yer altı suyu beslenmesini doğrudan etkilemektedir (Nampak vd., 2014). Bu durum toprak parametresini yer altı suyu potansiyel bölgelerinin değerlendirilmesinde önemli bir kriter haline getirmektedir. Gediz Nehri Havzası'nda FAO/UNESCO toprak sınıflamasına göre Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları, Alüvyal Topraklar, Kahverengi Orman Toprakları, Kırmızı Akdeniz Toprakları ve Taşlı Topraklar yer almaktadır (FAO, 2025) (Şekil 12). Buna göre çalışma alanında Alüvyal Toprakların (3330.8 km²) olduğu alanlar yüksek yer altı suyu potansiyeli ile temsil olurken; Taşlı Toprakların (5705.5 km²) yer aldığı bölgeler yer altı suyu potansiyelinin düşük olduğu alanlar olarak tanımlanmıştır (Tablo 12).



Şekil 12. Çalışma sahasının toprak haritası (Soil map of the research area)

Tablo 12. Toprak katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the soil layer)

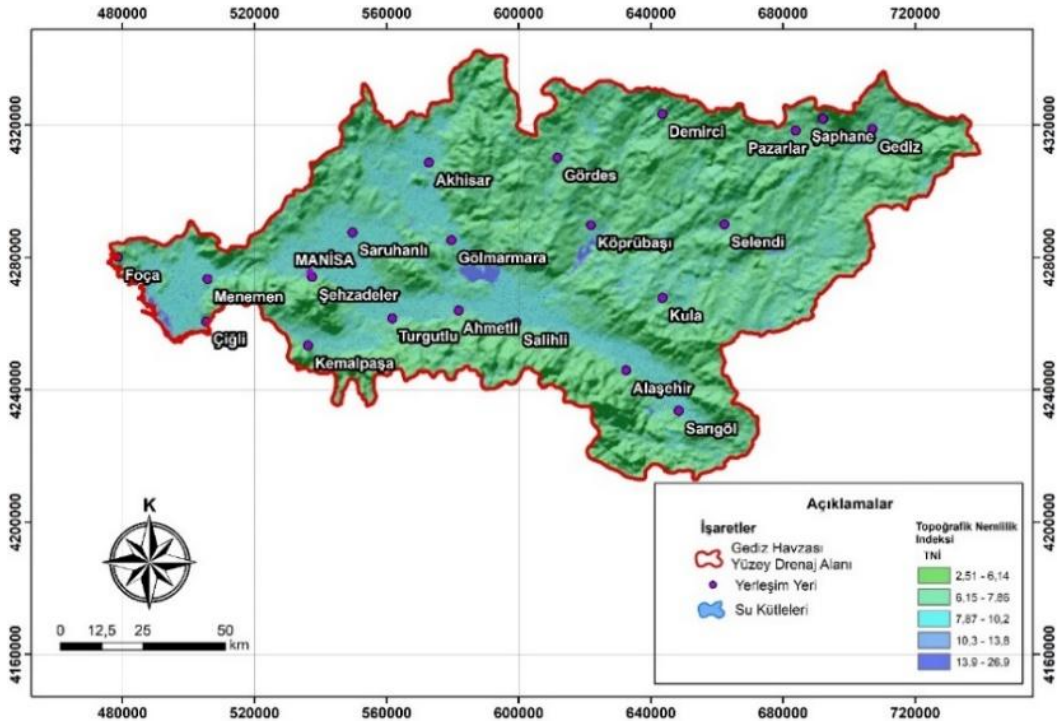
TOPRAK TÜRLERİ	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM^2)	ORAN (%)
Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	0.110	5168.1	30.44
Kahverengi Orman Toprakları	0.174	1563.9	9.21
Taşlı Topraklar	0.045	5705.5	33.61
Alüvyal Toprak	0.406	3330.8	19.62
Kırmızı Akdeniz Toprakları	0.264	1209.9	7.13
CR: 0.032, CI:0.036, λ max:5.14, RI: 1.12			

4.10. Topografik Nemlilik İndeksi (Topographic Wetness Indeks)

Topografik Nemlilik İndeksi (TNİ) genellikle hidrolojik süreçler üzerinde topografyanın etkilerinden kaynaklanan yer altı suyu sızmasını yansıtan bir parametre olup topoğrafik olarak suya doygun alanların lokasyonlarını ve boyutlarını ifade eden bir parametredir (Murmu vd., 2019). Moore vd. (1991) tarafından önerilen TNİ aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır (Eşitlik 7). Eşitlik 7'ye göre A_s parametresi özgül havza alanı ile temsil olurken, tanβ ise yamaç eğimi ile temsil olmaktadır.

$$\text{TNİ} = \frac{A_s}{tan\beta} \qquad (7)$$

Çalışma alanının TNI değeri 2.51 ile 26.9 arasında değişmektedir. Bu kapsamda havzada yüksek TNİ sahip alanlara yüksek ağırlık değerleri verilmiş olup, bu bölgeler diğer bölgelere göre daha yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmıştır (Tablo 13). Orta ve düşük TNİ değerine sahip alanlara ise görece daha düşük ağırlıklar verilmiştir. Gediz Nehri Havzası'nın TNİ haritası Şekil 13'te sunulmuştur.



Şekil 13. Çalışma sahasının topoğrafik nemlilik indeksi haritası (Topographic Wetness Index of the research area)

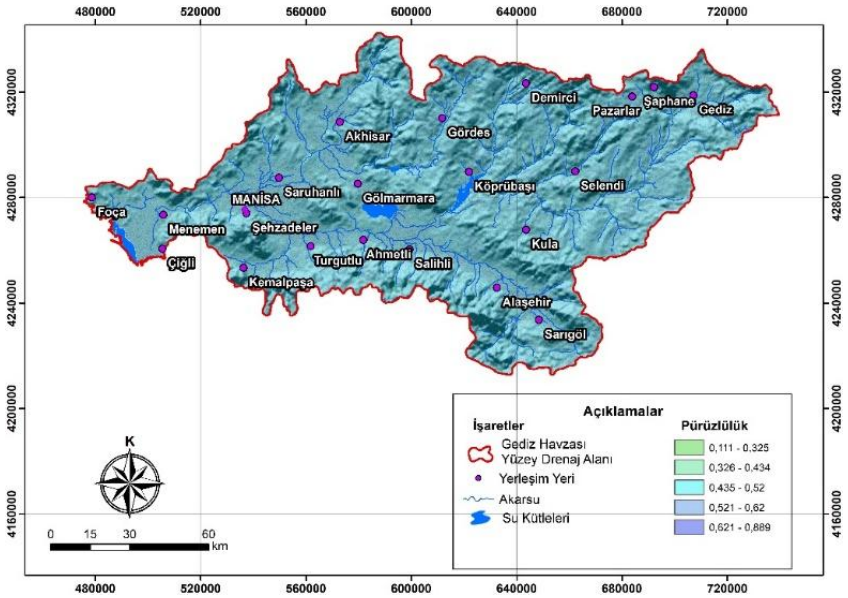
Tablo 13. Topoğrafik nemlilik indeksi katmanı için yapılan analize ait bulgular
(Findings of the analysis for the topographic wetness index layer)

TNİ	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (km²)	ORAN (%)
2.51-6.14	0.035	6337.7	37.41
6.15-7.86	0.068	6080.9	35.90
7.87-10.2	0.134	2892.4	17.07
10.3-13.8	0.260	1213.2	7.16
13.9-26.9	0.503	416.1	2.46
CR: 0.083, CI:0.093, RI: 1.12, λ max:5.37			

4.11. Pürüzlülük (Roughness)

Pürüzlülük sayısal yükseklik modelinin bitişik hücreleri arasındaki yükseklik farkını ifade etmekte olup topografyanın dalgalanması ile temsil olmaktadır (Verma ve Patel, 2021). Yüksek pürüzlülük değerlerinde yüzeysel akışa geçen su miktarı fazla iken düşük pürüzlülük değerlerinde yüzeysel akışa geçen su miktarı azalarak yer altına süzülür (Mohammadi-Behzad vd., 2019). ArcGIS 10.8 yazılımının Focal Statistics komutu ile Gediz Nehri Havzası'nın pürüzlülük haritası oluşturulmuştur (Şekil 14). Çalışma alanının pürüzlülük değerleri Eşitlik 8'e göre hesaplanmış olup havza içerisinde bu değerler 0.111 ile 0.889 arasında değişmektedir (Şekil 14). Potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde, düşük pürüzlülük değerine sahip alanlara daha yüksek ağırlık puanı verilmiş olup bu bölgeler daha yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmıştır. Orta ve yüksek pürüzlülük değerine sahip olan bölgeler ise daha düşük yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmış ve bu alanlara görece daha düşük ağırlıklar atanmıştır (Tablo 14).

$$\text{Pürüzlülük} = \frac{FS_{ort} - FS_{min}}{FS_{mak} - FS_{min}} \qquad (8)$$



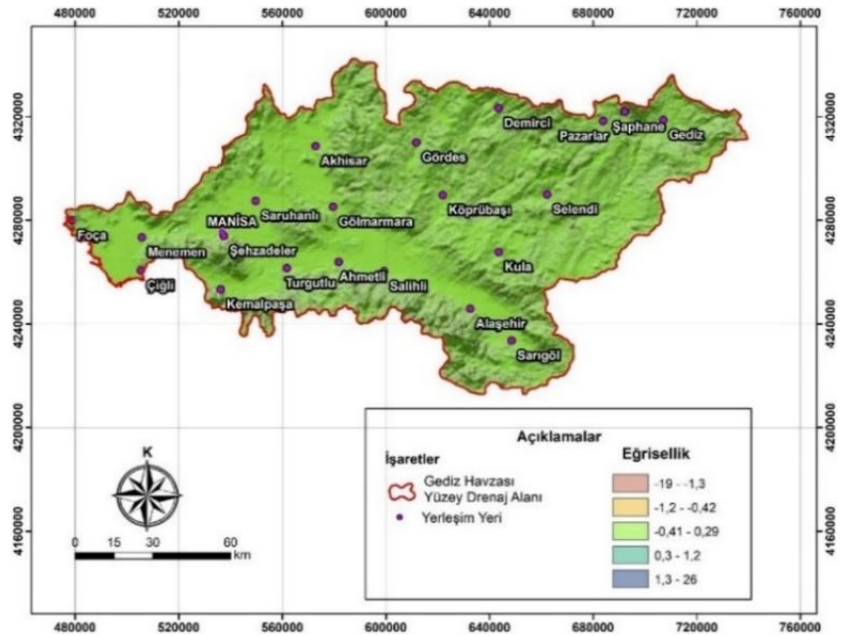
Şekil 14. Çalışma sahasının pürüzlülük haritası (Roughness map of the research area)

Tablo 14. Pürüzlülük katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the roughness layer)

PÜRÜZLÜLÜK	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN (KM²)	ORAN (%)
0.111-0.325	0.503	226.6	1.35
0.326-0.434	0.260	3150.7	18.74
0.435-0.520	0.134	10297.1	61.24
0.521-0.620	0.068	2933.0	17.44
0.621-0.889	0.035	208.2	1.24
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.12.Eğrisellik (Curvature)

Eğrisellik, yüzey profili ile tanımlanan bir parametredir. Bir havzada yer altı suyu yüzey profiline göre sırasıyla dışbükey ve içbükey profillerde yavaşlama ve birikme eğilimindedir (Uc Castillo vd., 2022). ArcGIS 10.8 yazılımının eğrisellik komutu ile havzanın eğrisellik haritası oluşturulmuştur. Çalışma alanında eğrisellik değerleri -19 ile 26 arasında değişmektedir (Şekil 15). Havzada potansiyel yer altı suyu içeren bölgeler belirlenirken, yüksek eğriselliğe sahip, suyun birikme eğiliminde olduğu içbükey alanlara yüksek ağırlık değeri verilmiş olup bu bölgeler yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmıştır. Orta ve düşük eğrisellik değerine sahip olan alanlar ise dış bükey profili temsil eden bölgeler olup görece daha düşük ağırlık değerleri verilmiş ve bu bölgeler düşük yer altı suyu potansiyeline sahip alanlar olarak tanımlanmıştır (Tablo 15).



Şekil 15. Çalışma sahasının eğrisellik haritası (Curvature map of the research area)

Tablo 15. Eğrisellik katmanı için yapılan analize ait bulgular (Findings of the analysis for the curvature layer)

EĞRİSELLİK	AHY AĞIRLIK DEĞERİ	ALAN(KM²)	ORAN (%)
-19- (-1.3)	0.035	705.2	4.2
-1.2-(-0.42)	0.068	2463.3	14.5
-0.41-(-0.29)	0.134	9361	55.2
0.3-1.2	0.260	3623.6	21.4
1.3-26	0.503	817.6	4.8
CR: 0.083, CI:0.093, λ max:5.37, RI: 1.12			

4.2 AHY ile Oluşturulan Matrisler, Sınıflandırmalar ve Değerlendirmeler (Matrices, Classifications and Evaluations Created with AHP)

Gerçekleştirilen analize dahil olan tüm kriterler korelasyon matrisi, normalize edilmiş matris ve kullanılan kriterlere ait alt sınıfların puanları ile hesaplanmış olup ağırlık yüzdesi değerleri aşağıda sırasıyla sunulmuştur (Tablo 16, Tablo 17 ve Tablo 18). Sunulan çalışma kapsamında analiz edilen kriterlerin önem derecelerine göre ağırlık yüzdeleri sırasıyla jeomorfoloji, çizgisel yoğunluk, arazi kullanımı/arazi örtüsü, jeoloji, eğim, toprak, drenaj yoğunluğu, TNI, yağış, yükselti, pürüzlülük ve eğrisellik olarak belirlenmiştir. Yapılan analizlerde her bir parametre ve ilgili parametrenin alt sınıfları için CR oranı %10'nun altında olup, tüm kriterler arasında yapılan analizde CR oranı %6 olarak hesaplanmıştır (Tablo 17). Tüm tematik katmanların puanlanmış raster veri halleri Şekil 16'da sunulmuştur.

Tablo 16. Potansiyel Yer Altı Suyu Bölgelerinin Belirlenmesi Amacıyla Oluşturulmuş Karşılaştırma Matrisi (Comparison Matrix Created to Identify Potential Groundwater Zones)

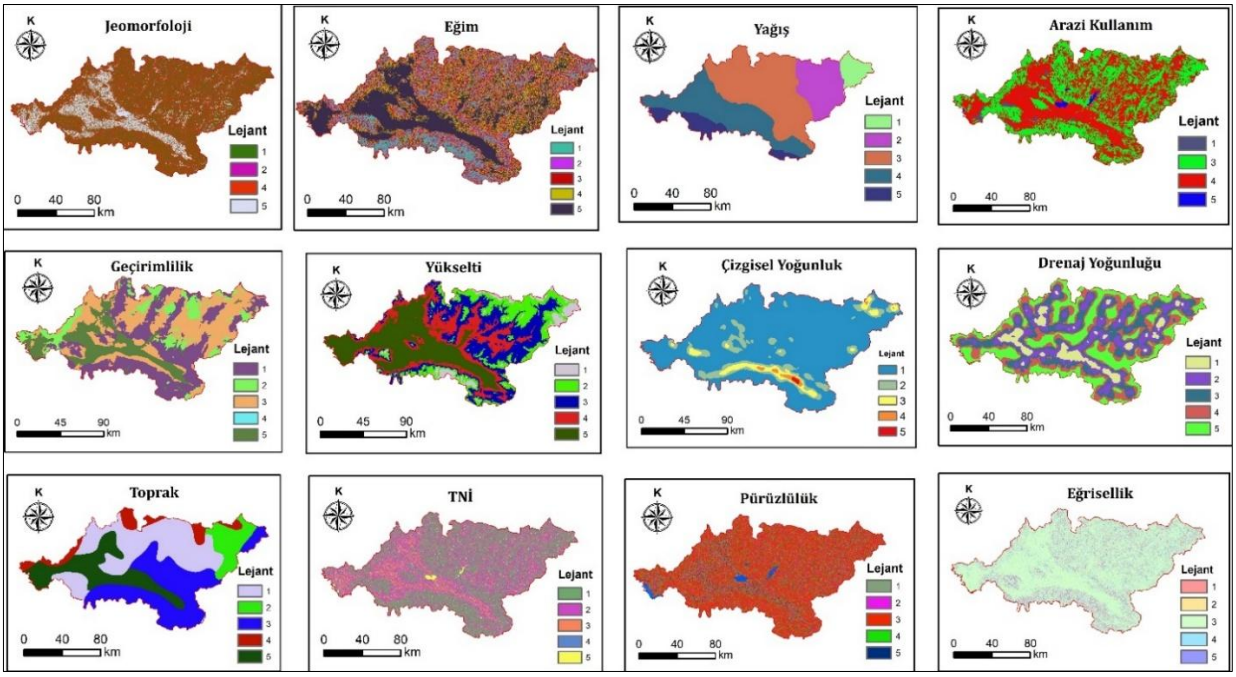
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Jeomorfoloji (1)	**1**	2	2	3	3	3	2	3	2	3	3	3
Çizgisel Yoğunluk (2)	0.50	**1**	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3
Arazi Kullanımı (3)	0.50	0.50	**1**	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Jeoloji (4)	0.33	0.50	0.33	**1**	2	3	2	3	3	2	3	3
Eğim (5)	0.33	0.33	0.50	0.50	**1**	3	3	2	2	3	3	3
Toprak (6)	0.33	0.50	0.33	0.33	0.33	**1**	2	2	2	2	2	3
Drenaj Yoğunluğu (7)	0.50	0.50	0.33	0.50	0.33	0.50	**1**	3	2	2	2	2
Yağış (8)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.50	**1**	2	2	2	2
TNİ (9)	0.50	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	**1**	3	3	3
Yükselti (10)	0.33	0.33	0.33	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.33	**1**	2	2
Pürüzlülük (11)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	**1**	2
Eğrisellik (12)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	**1**
Sütun Toplam	**5.31**	**6.98**	**8.14**	**12.15**	**13.65**	**18.00**	**17.50**	**22.00**	**21.00**	**25.00**	**27.50**	**30.00**

Tablo 17. Normalize Edilmiş Karşılaştırma Matrisi (Normalized Comparison Matrix)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Jeomorfoloji (1)	0.19	0.29	0.25	0.25	0.22	0.17	0.11	0.14	0.10	0.12	0.11	0.10
Çizgisel Yoğunluk (2)	0.09	0.14	0.25	0.16	0.22	0.11	0.11	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10
Arazi Kullanımı (3)	0.09	0.07	0.12	0.25	0.15	0.17	0.17	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10
Jeoloji (4)	0.06	0.07	0.04	0.08	0.15	0.17	0.11	0.14	0.14	0.08	0.11	0.10
Eğim (5)	0.06	0.05	0.06	0.04	0.07	0.17	0.17	0.09	0.10	0.12	0.11	0.10
Toprak (6)	0.06	0.07	0.04	0.03	0.02	0.06	0.11	0.09	0.10	0.08	0.07	0.10
Drenaj Yoğunluğu (7)	0.09	0.07	0.04	0.04	0.02	0.03	0.06	0.14	0.10	0.08	0.07	0.07
Yağış (8)	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.10	0.08	0.07	0.07
TNİ (9)	0.09	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.02	0.05	0.12	0.11	0.10
Yükselti (10)	0.06	0.05	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.07	0.07
Pürüzlülük (11)	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07
Eğrisellik (12)	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Toplam	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**
CR: 0.069, CI:0.107, λ max:13.18, RI: 1.54												

Tablo 18. Analiz edilen parametrelerin önem sıralamalarına göre puanları ve hesaplanmış ağırlık yüzdeleri (Scores and calculated weight percentages of the analyzed parameters according to their importance rankings

Katman	Sınıflar	Puan (5:En Yüksek 1:En Düşük)	AHY Ağırlık Yüzdesi (%)
Jeomorfoloji	Vadiler	4	17.0
	Düz Alanlar	5	
	Yamaç, Sırtlar	2	
	Tepelik Alanlar	1	
Eğim (°)	0-5	5	9.6
	5-10	4	
	10-15	3	
	15-20	2	
	20-73	1	
Yükselti (m)	0-284	5	4.1
	284-582	4	
	582-854	3	
	854-1203	2	
	1203-2303	1	
Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü	Yapay Alanlar	1	13.6
	Tarım Alanları	3	
	Orman Alanları ve Yarı Doğal Alanlar	3	
	Sulak Alanlar	4	
	Su Kütleleri	5	
Çizgisel Yoğunluk (km/km²)	0.0-0.17	1	14.2
	0.18-0.35	2	
	0.36-0.52	3	
	0.53-0.70	4	
	0.71-0.87	5	
Drenaj Yoğunluğu (km/km²)	0.0-0.06	5	6.4
	0.07-0.1	4	
	0.1-0.2	3	
	0.2-0.3	2	
	0.3-0.4	1	
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	2.51-6.14	1	5.9
	6.15-7.86	2	
	7.86-10.2	3	
	10.2-13.8	4	
	13.8-26.9	5	
Eğrisellik	-19- (-1.3)	1	3.1
	-1.2-(-0.42)	2	
	-0.42-(-0.29)	3	
	-0.29-1.2	4	
	1.2-26	5	
Pürüzlülük	0.111-0.325	5	3.5
	0.326-0.434	4	
	0.435-0.520	3	
	0.521-0.620	2	
	0.621-0.889	1	
Yağış (mm/yıl)	680-710	1	5.3
	720-740	2	
	750-770	3	
	780-800	4	
	810-840	5	
Toprak	Alüvyal Topraklar	5	6.7
	Kahverengi Orman Toprakları	3	
	Kırmızı Akdeniz Toprakları	4	
	Taşlı Topraklar	1	
	Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	3	
Jeoloji/Geçirimlilik	Çok Yüksek Geçirimli Birimler	5	10.5
	Geçirimli Birimler	4	
	Orta Geçirimli Birimler	3	
	Düşük Geçirimli Birimler	2	
	Çok Düşük Geçirimli Birimler	1	



Şekil 16. Çalışmada kullanılan parametrelerin puanlamalarına göre oluşturulmuş tematik katmanlar (Thematic layers created according to the scores of the parameters used in the research)

4.3 Belirlenen Potansiyel Yer Altı Suyu Bölgelerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Identified Potential Groundwater Zones)

Gediz Nehri Havzası için CBS ortamında çizgisel yoğunluk, drenaj yoğunluğu, eğim, yükselti, arazi kullanımı/arazi örtüsü, toprak, jeomorfoloji, yağış, pürüzlülük, eğrisellik, topoğrafik nemlilik indeksi ve jeoloji olmak üzere çeşitli parametreler kullanılarak AHY yardımıyla potansiyel yer altı suyu bölgeleri haritası oluşturulmuştur. Oluşturulan tematik haritada 5 farklı sınıf altında yer altı suyu potansiyeline sahip bölgeler sınıflandırılmıştır.

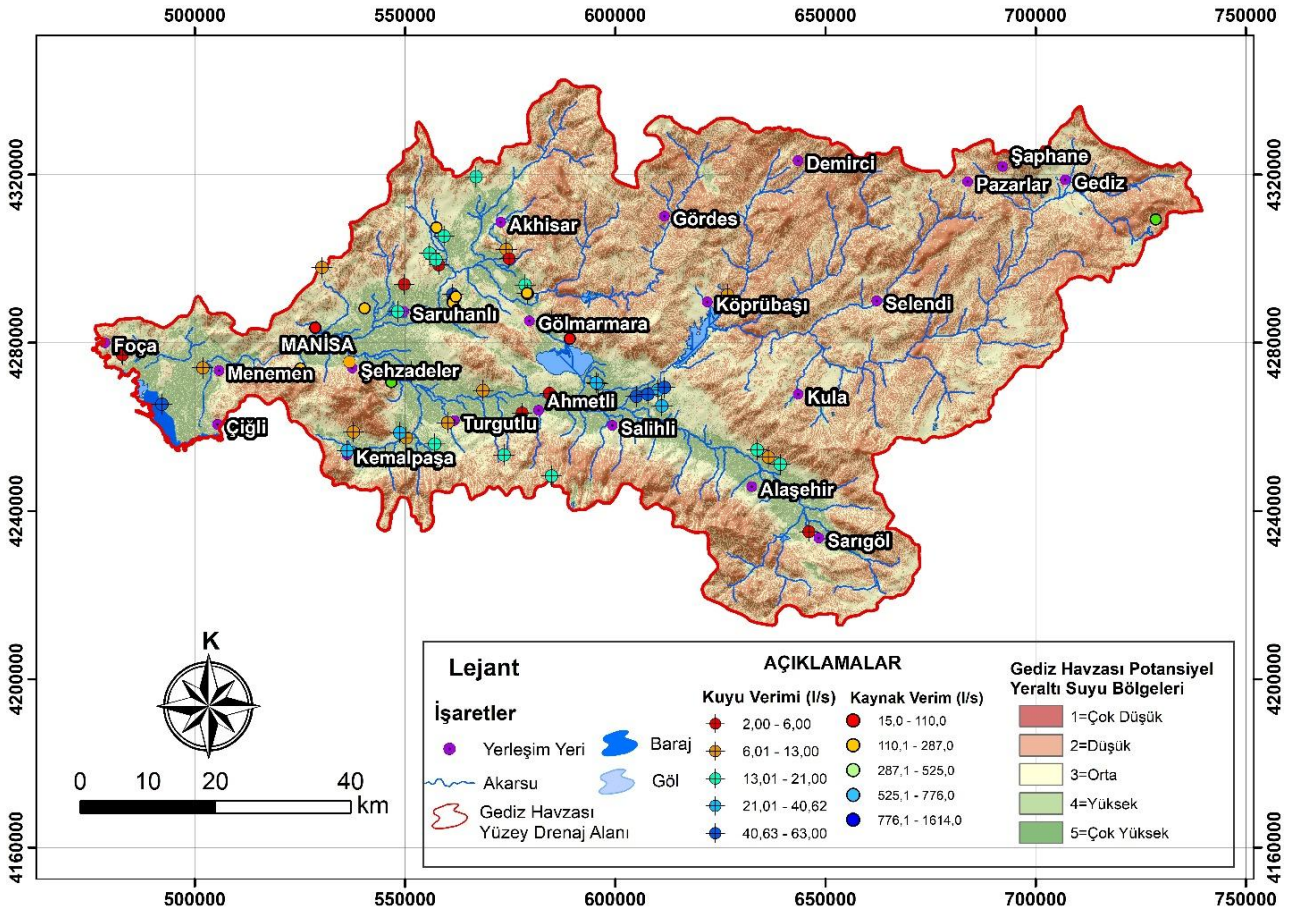
Bu sınıflamaya göre çalışma alanında 1. sınıf olarak yer altı suyu potansiyeli çok zayıf alanlar 0.03 km^2 alan kaplamakta ve bu oran havzanın doğusunda çok sınırlı bir bölüm ile temsil olmaktadır. Çok düşük yer altı suyu potansiyeline sahip bu alanlar eğim miktarının çok yüksek, geçirimliliğin oldukça düşük, çizgisel yoğunluğun ve topoğrafik nemlilik indeksinin çok düşük, drenaj yoğunluğunun çok yüksek, yapay alanların çok fazla yer kapladığı bölgeler olarak belirlenmiştir.

2. sınıf olarak yer altı suyu potansiyeli düşük alanlar 6059.08 km^2 alan kaplamaktadır. Bu alan havzanın %36.14'lük kesimini oluşturmaktadır. Havzanın doğu ve kuzey kesimlerine düşen bu alanlarda yağış miktarının yüksek olmadığı, eğim miktarı, geçirimsizlik ve drenaj yoğunluğunun yüksek, çizgisel yoğunluğun ise düşük olduğu belirlenmiştir.

3. sınıf olarak yer altı suyu potansiyeli orta alanlar 8447.65 km^2 alan kaplamaktadır. Bu alan havzanın %50.39'luk kesimini oluşturmaktadır. Bu alanlarda yağış miktarının görece daha yüksek olduğu, eğim miktarı, geçirimsizlik ve drenaj yoğunluğunun orta, çizgisel yoğunluğun ise orta-düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir.

4. sınıf olarak yüksek yer altı suyu potansiyeli taşıyan alanlar çalışma alanında 2258 km^2 alan ile çalışma alanının %13.47'sini oluşturmaktadır. Havza genelinde bu alanlar topoğrafya olarak eğimin azaldığı, düz arazilerin yaygınlaştığı, toprak geçirgenliğinin ve çizgiselliklerin arttığı, topoğrafik nemlilik indeksinin yüksek olduğu, drenaj yoğunluğunun azaldığı, yüksek geçirimliliğe sahip jeolojik birimlerin yer aldığı, tarım alanlarının ve su kütlelerinin yaygınlaştığı alanlar olarak belirlenmiştir (Şekil 17). Havzanın merkezinde yer alan ovalık alanda yer altı suyu potansiyeli yüksek olup bu alanlar; Saruhanlı, Kemalpaşa, Şehzadeler, Gölmarmara, Ahmetli, Salihli, Alaşehir, Sarıgöl, Menemen, Foça, Kula, Gediz, Şaphane ve Pazarlar yerleşim merkezlerinin olduğu kesimlerde yer almaktadır.

5. sınıf olarak çok yüksek yer altı suyu potansiyeline sahip bölgeler ise Alaşehir ile Sarıgöl yerleşim yerlerinin ortasında havzanın çok sınırlı bir bölümünü (0.03 km^2) kaplamaktadır. Havza genelinde bu alanlar topoğrafya olarak eğimin oldukça azaldığı, çizgiselliklerin çok arttığı, topoğrafik nemlilik indeksinin çok yüksek olduğu, drenaj yoğunluğunun oldukça azaldığı, çok yüksek geçirimliliğe sahip alüvyon birimlerin yer aldığı alanlar olarak belirlenmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Gediz Nehri Havzası'nın potansiyel yer altı suyu bölgeleri haritası
(Map of potential groundwater zones of the Gediz River Basin)

Tablo 19. Çalışma alanındaki potansiyel yer altı suyu bölgeleri sınıflandırması (Classification of potential groundwater zones in the research area)

POTANSİYEL YER ALTI SUYU İÇEREN BÖLGELERİN SINIFLAMASI	ALAN (KM^2)	ORAN (%)	TEMSİL OLUNAN ÖZELLİKLER
Çok Düşük	0.11	0.00	Çok yüksek eğimli topoğrafya, dağlık alanlar, çok yüksek drenaj yoğunluğu, çok düşük çizgisel yoğunluk, çok düşük TNİ, geçirimlilik derecesi çok düşük birimler
Düşük	6059.08	36.14	Yüksek eğimli topoğrafya, tepelik alanlar, yüksek drenaj yoğunluğu, çok düşük çizgisel yoğunluk, çok düşük TNİ, geçirimlilik derecesi düşük birimler
Orta	8447.65	50.39	Orta-Yüksek eğimli topoğrafya, yamaç sırtların olduğu alanlar, orta drenaj yoğunluğu, orta çizgisel yoğunluk, orta TNİ, geçirimliliği düşük birimler
Yüksek	2258.00	13.47	Düşük eğimli alanlar, düşük drenaj yoğunluğu, yüksek çizgisel yoğunluk, yüksek TNİ, yüksek geçirimlilik
Çok Yüksek	0.03	0.00	Çok düşük eğimli düz topoğrafya, ovalık alanlar, çok düşük drenaj yoğunluğu, yüksek yağış miktarı, çok yüksek çizgisel yoğunluk, çok yüksek TNİ, çok yüksek geçirimli alüvyon birimler

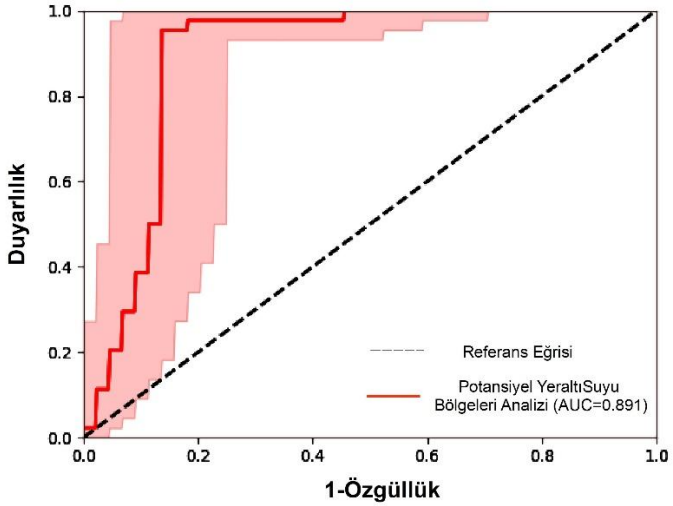
4.4 Potansiyel Yer Altı Suyu Bölgeleri Haritasının ROC Eğrisi ile Doğrulanması (Validation of Potential Groundwater Zones Map with ROC Curve)

ROC eğrisi bir parametrenin farklı kesme noktaları için gerçek pozitif değerlerin yanlış pozitif değerlere karşı oranının çizildiği grafiksel bir gösterimdir (Bradley, 1997). Bir olasılık eğrisi olan ROC eğrisi oluşturulurken Y ekseninde duyarlılık (gerçek pozitif değerler), X ekseninde ise 1-özgüllük (yanlış pozitif değerler) yer almaktadır. Eğrinin altında kalan alan bir parametrenin ikili sınıflarının ne kadar iyi ayırt edilebildiğinin bir ölçüsüdür. Oluşturulan eğri grafiğin sol üst köşesine ne kadar yakınsa model verileri kategorilere ayırmada o kadar başarılıdır (Bradley, 1997).

Çalışma alanı için oluşturulan potansiyel yer altı suyu bölge haritası havzada açılan sondaj kuyularının verimleri

ve kaynakların debileriyle doğrulanmıştır. ArcGIS ortamında AHY yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analiz ROC (Receiver Operation Characteristic) eğrisi kullanılarak havza için üretilmiş model haritanın doğruluk değerlendirmesi yapılmış, eğri altında kalan alan (Area Under The Curve) hesaplanmıştır.

Havza için oluşturulan model haritanın doğrulama işlemi bölgede açılan 44 kuyu ve 15 kaynak noktasının debileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonucun doğruluk oranı 0.891 ile %89'dur (Şekil 18). Bu değer ROC eğrisi altında kalan alanın 0.001'den küçük bir önem değerinde olduğu, elde edilen bu sonuç gerçekleştirilen araştırmada izlenilen yöntem ve tekniklerin potansiyel yer altı suyu bölgelerinin belirlenmesinde oldukça etkin ve güvenilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 18. Model harita için üretilen ROC analiz grafiği (ROC analysis graph produced for the model map)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Sunulan araştırmada Gediz Nehri Havzası'ndaki potansiyel yer altı suyu bölgelerinin AHY kullanılarak CBS teknikleri yardımıyla belirlenmesi amaçlanmıştır. AHY birden fazla parametrenin uygulanmasına izin veren, karar alma süreçlerinde karmaşık sorunların basitleştirilmesi için kullanılan bir tekniktir. Sunulan çalışmada, potansiyel yer altı suyu bölgelerini belirlemek için çizgisel yoğunluk, drenaj yoğunluğu, eğim, yükselti, arazi kullanımı/arazi örtüsü, toprak, jeomorfoloji, yağış, pürüzlülük, eğrisellik, topoğrafik nemlilik indeksi ve jeoloji olmak üzere 12 parametre kullanılmıştır. Potansiyel yer altı suyu bölgeleri değerlendirilen havza alanı her biri farklı yer altı suyu potansiyeliyle karakterize edilen beş bölgeye ayrılmıştır. Gediz Nehri Havzası özelinde AHY tekniği ile analiz edilen parametreler arasında jeomorfoloji katmanının %17'lik oranla yer altı suyu potansiyeli üzerinde en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Jeomorfoloji katmanını sırasıyla çizgisel yoğunluk (%14.2), arazi kullanımı/arazi örtüsü (%13.6) ve jeoloji (%10.5) katmanları takip etmektedir. AHY modeline göre, çalışma alanının potansiyel yer altı suyu bölgelerinin % 36.14'ü düşük potansiyel, % 50.39'u orta potansiyel ve %13.47'si yüksek potansiyel olarak sınıflandırılmıştır. Çok yüksek (0.03 km^2) ve çok düşük yer altı suyu potansiyeline (0.11 km^2) sahip olan bölgeler havzanın çok sınırlı kesimlerini oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre; havzadaki potansiyel yer altı suyu bölgeleri çalışma alanının batı ve güneyindeki ovalık alanlarda yüksek, doğu ve kuzey kesimlerinde ise düşük-orta yer altı suyu potansiyeline sahiptir.

AHY tekniğiyle havza için oluşturulan potansiyel yer altı suyu bölgeleri haritası, çalışma alanında yer altı suyu planlaması ve yönetimi için önemli bir veri tabanı görevi görmektedir. Sunulan çalışmanın bulgularının karar vericiler tarafından sürdürülebilir yer altı suyu kullanımının ve etkin yer altı suyu yönetim stratejilerinin oluşturulması ile mevcutta var olan kalkınma planlarının geliştirilmesi amacıyla kullanabileceği düşünülmektedir. Özellikle havza genelinde hızlı nüfus artışının temiz suya erişim talebi ile paralel artışı, gelecekteki yer altı suyunun varlığı ve yönetimi için potansiyel yer altı suyu bölgelerinin araştırılması ve belirlenmesinde hayati önem taşımaktadır.

Önceki çalışmalar kapsamında Gediz Nehri Havzası'nda yer altı su kütleleri ile ilgili olarak miktar, kalite, izleme, kullanılabilirlik ve kontaminasyon süreçlerine yönelik araştırmalar ile ekonomik analiz, tarımsal faaliyetler konuları üzerine çalışmalar yürütülmüştür (SYGM, 2016; SYGM, 2018; SYGM 2019a; SYGM 2019 b). Bununla birlikte çalışma alanındaki potansiyel yer altı suyu bölgelerinin AHY ve CBS teknikleri ile haritalanması konusunda bir çalışma mevcut değildir. Dolayısıyla mevcut çalışmada hazırlanan potansiyel yer altı suyu bölge haritası ile yer altı suyunun elde edilebileceği uygun sahaların bulunması, yer altı suyu kaynaklarının kullanımı için sürdürülebilir bir yaklaşımın geliştirilmesi ve hâlihazırda su stresi altında olan havzanın daha iyi arazi kullanım planlaması ile su

kaynaklarının kullanımı açısından farklı yönetim stratejilerinin oluşturulmasında etkili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca potansiyel yer altı suyu içeren bölgelerin haritalanmasında CBS tekniklerinin kullanımının oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanındaki su kaynaklarının %75'nin tarımsal uygulamalar amaçlı kullanılması hususu dikkate alındığında, elde edilen bulgular sulama süreçlerini, tarımsal üretimi ve evsel su kullanım verimliliğini iyileştirmek için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Sunulan çalışmanın ilerletilmesine yönelik olarak araştırma kapsamında kullanılan parametrelere farklı kriterler (yer altı suyu seviyesi, topoğrafik pozisyon indeksi, NDVI (normalize edilmiş fark bitki indeksi), NDWI (normalize edilmiş fark su indeksi), faya yakınlık, akarsuya yakınlık vb.) ve uzaktan algılama teknikleri ilave edilerek analizin birçok tematik katmanla farklı senaryolar için gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Bu kapsamda faktör katmanların ağırlıklarına bağlı olarak havzayı temsil eden çeşitli model haritalar oluşturulabilecektir. Ayrıca gelecekte yapılacak araştırmalarda mekânsal çözünürlüğü daha yüksek (5 m, 12.5 m vb.) olan uydu verilerinin kullanılmasıyla elde edilecek sonuçların hata payı az olması nedeniyle havzayı daha ayrıntılı temsil edebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazar çalışmaya altlık oluşturan açık kaynak verileri ve raporlar için Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu'na, Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü'ne, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'ne, Copernicus Arazi İzleme Servisi'ne, National Aeronautics and Space Administration The Prediction Of Worldwide Energy Resources'a, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü ile Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

Achu, A. L., Thomas, J., Reghunath, R., 2020. Multi-Criteria Decision Analysis for Delineation of Groundwater Potential Zones in a Tropical River Basin Using Remote Sensing, GIS and Analytical Hierarchy Process (AHP). Groundwater for Sustainable Development, 10, 100365.

Agarwal, R., Garg, P. K., 2016. Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision Making Technique. Water Resources Management, 30, 243-260.

Ajay Kumar, V., Mondal, N. C., Ahmed, S., 2020. Identification of Groundwater Potential Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a part of Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 48(3), 497-511.

Arulbalaji, P., Padmalal, D., Sreelash, K., 2019. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: A Case Study from Southern Western Ghats, India. Scientific Reports, 9(1), 2082.

Bhuyan, M. J., Deka, N., 2024. Delineation of Groundwater Potential Zones at Micro-Spatial Units of Nagaon District in Assam, India, Using GIS-Based MCDA and AHP Techniques. Environmental Science and Pollution Research, 31(41), 54107-54128.

Biricik, A., 2014. Gediz Havzası'nın Su Potansiyeli. Türk Coğrafya Dergisi, (30), 13-23.

Bradley, A. P., 1997. The Use of the Area Under the ROC Curve in the Evaluation of Machine Learning Algorithms. Pattern Recognition, 30(7), 1145-1159.

Copernicus, 2025. Data of Land Use from Copernicus Land Monitoring Service. https://land.copernicus.eu/ Erişim Tarihi: 12.01.2025.

Dar, T., Rai, N., Bhat, A., 2021. Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones Using Analytical Hierarchy Process (AHP). Geology, Ecology, and Landscapes, 5(4), 292-307.

Diriba, D., Karuppannan, S., Takele, T., Husein, M., 2024. Delineation of Groundwater Potential Zonation Using Geoinformatics and AHP Techniques with Remote Sensing Data. Heliyon, 10(3).

DSİ, 2025. Toprak Su Kaynakları. Devlet Su işleri Genel Müdürlüğü, https://dsi.gov.tr Erişim Tarihi: 25.01.2025

Falkenmark, M., Lundqvist, J., Widstrand, C., 1989. Macro-Scale Water Scarcity Requires Microscale Approaches. Natural Resources Forum. 13(4), 258-267.

FAO/UNESCO, 2025. FAO/UNESCO Dünya Toprak Haritası, https://fao.org Erişim Tarihi: 17.01.2025

Ganapuram, S., Kumar, G. V., Krishna, I. M., Kahya, E., Demirel, M. C., 2009. Mapping of Groundwater Potential Zones in the Musi Basin Using Remote Sensing Data and GIS. Advances in Engineering Software, 40(7), 506-518.

Gündoğdu, V., Kocataş, A., 2006. Gediz Nehir Havzası Yönetim Planı Oluşturulmasına Yönelik Bir Yaklaşım. Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 23(3), 371-378.

Kaya, M., 2020; Gediz Deltası ve Yakın Çevresinde Zamansal Değişimin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Kom, K. P., Gurugnanam, B., Sunitha, V., 2024. Delineation of Groundwater Potential Zones Using GIS and AHP Techniques in Coimbatore District, South India. International Journal of Energy and Water Resources, 8(1), 85-109.

Kumar, T., Gautam, A. K., Kumar, T., 2014. Appraising the Accuracy of GIS-Based Multi-Criteria Decision Making Technique for Delineation of Groundwater Potential Zones. Water Resources Management, 28, 4449-4466.

Kütükçü, A., 2016; Komşu Havzaların Hidrolojik ve Morfolojik Olarak Karşılaştırılması. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Manap, M. A., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M. F., Pradhan, B., Surip, N., 2013. A Knowledge-Driven GIS Modeling Technique for Groundwater Potential Mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. Arabian Journal of Geosciences, 6, 1621-1637.

Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S. B., Dhar, A., Panda, S. N., Kar, A., Mishra, P. K., 2016. Delineation of Groundwater Potential Zones of Coastal Groundwater Basin Using Multi-Criteria Decision Making Technique. Water Resources Management, 30, 4293-4310.

MGM, 2025. İllere Ait İstatistiki Yağış Verileri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, https://www.mgm.gov.tr/, Erişim Tarihi 12.01.2025.

Mohammadi-Behzad, H. R., Charchi, A., Kalantari, N., Nejad, A. M., Vardanjani, H. K., 2019. Delineation of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing (RS), Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Techniques: A Case Study in the Leylia–Keynow Watershed, Southwest of Iran. Carbonates and Evaporites, 34, 1307-1319.

MTA, 1961. 1/500.000 Ölçekli Jeoloji Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I., Singh, S. K., 2019. Delineation of Groundwater Potential Zones Using Geospatial Techniques and Analytical Hierarchy Process in Dumka District, Jharkhand, India. Groundwater for Sustainable Development, 9, 100239.

Nampak, H., Pradhan, B., Abd Manap, M., 2014. Application of GIS Based Data Driven Evidential Belief Function Model to Predict Groundwater Potential Zonation. Journal of Hydrology, 513, 283-300.

NASA Power, 2025. The Prediction of Worldwide Energy Resources. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ Erişim Tarihi 25.01.2025.

Panahi, M. R., Mousavi, S. M., Rahimzadegan, M., 2017. Delineation of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing, GIS, and AHP Technique in Tehran-Karaj Plain, Iran. Environmental Earth Sciences, 76, 1-15.

Pande, C. B., Moharir, K. N., Panneerselvam, B., Singh, S. K., Elbeltagi, A., Pham, Q. B., Rajesh, J., 2021. Delineation of Groundwater Potential Zones for Sustainable Development and Planning Using Analytical Hierarchy Process (AHP), and MIF techniques. Applied Water Science, 11(12), 186.

Patra, S., Mishra, P., Mahapatra, S. C., 2018. Delineation of Groundwater Potential Zone for Sustainable Development: A Case Study from Ganga Alluvial Plain Covering Hooghly District of India Using Remote Sensing, Geographic Information System and Analytic Hierarchy Process. Journal of Cleaner Production, 172, 2485-2502.

Pinto, D., Shrestha, S., Babel, M. S., Ninsawat, S., 2017. Delineation of Groundwater Potential Zones in the Comoro Watershed, Timor Leste using GIS, Remote Sensing and Analytic Hierarchy Process (AHP) Technique. Applied Water Science, 7, 503-519.

Rajasekhar, M., Raju, G. S., Sreenivasulu, Y., Raju, R. S., 2019. Delineation of Groundwater Potential Zones in Semi-Arid Region of Jilledubanderu River Basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India Using Fuzzy Logic, AHP and Integrated Fuzzy-AHP Approaches. HydroResearch, 2, 97-108.

Saaty T. L., 2000. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process (Vol. 6). RWS publications.

Saaty, T. L., 1980. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Mc Graw-Hill, New York, 19.

Saaty, T. L., 1990. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operation Research, 48, 9–26.

Saranya, T., Saravanan, S., 2020. Groundwater Potential Zone Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS for Kancheepuram District, Tamilnadu, India. Modeling Earth Systems and Environment, 6(2), 1105-1122.

Seçen, B., 2024. Gediz graben sistemine ait Akçapınar ve Salihli Segmentlerinin Paleosismolojik Hendek Çalışmaları ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., Li, Y., 2020. Integrated Remote Sensing and GIS Approach Using Fuzzy-AHP to Delineate and Identify Groundwater Potential Zones in Semi-Arid Shanxi Province, China. Environmental Modelling & Software, 134, 104868.

Shekhar, S., Pandey, A. C., 2015. Delineation of Groundwater Potential Zone in Hard Rock Terrain of India Using Remote Sensing, Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Techniques. Geocarto International, 30(4), 402-421.

SYGM, 2016. İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi, Proje Nihai Raporu Ek-7 Gediz Havzası, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 390.

SYGM, 2018. Gediz Havzası Nehir Havza Yönetim Planı. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

SYGM, 2019a. Gediz Havzası Kuraklık Yönetim Planı. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Cilt 1, Ankara.

SYGM, 2019b. Gediz Havzası Taşkın Yönetim Planı. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Cilt 1, Ankara.

TÜİK, 2021. Nüfus İstatistikleri Portalı. Türkiye İstatistik Kurumu, https://data.tuik.gov.tr/ Erişim tarihi: 27.12.2024.

UNDP, 2015. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri https://www.undp.org/sustainable-development-goals/ Erişim tarihi: 20.12.2024.

Uc Castillo, J. L., Martinez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Tuxpan Vargas, J., Rodriguez Tapia, S. A., Marin Celestino, A. E., 2022. Delineation of Groundwater Potential Zones (GWPZs) in a Semi-Arid Basin through Remote Sensing, GIS, and AHP Approaches. Water, 14(13), 2138.

United Nations, 2024. The Sustainable Development Goals Report, 2024. https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf/, Erişim Tarihi 24.01.2025.

USGS, 2025. Earth Data and Digital Elevation Model (DEM) for Gediz River Basin. United States Geological Survey. https://www.usgs.gov/ Erişim Tarihi: 05.01.2025.

Verma, N., Patel, R. K., 2021. Delineation of Groundwater Potential Zones in Lower Rihand River Basin, India Using Geospatial Techniques and AHP. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 24(3), 559-570.

Yılmaz, M., 2023. Gediz ve Büyük Menderes Nehir Yataklarında Meydana Gelen Uzun Süreli Değişimin Landsat Uydu Görüntüleriyle Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.