



**DÜZCE
ÜNİVERSİTESİ**

**BİLİM ve TEKNOLOJİ
DERGİSİ**

Düzce University
Journal of
Science & Technology

e-ISSN: 2148-2446

Cilt
Volume

12

Sayı
Issue

2

Nisan/ April
2024

Düzce Üniversitesi
BİLİM ve TEKNOLOJİ DERGİSİ
DÜBİTED

<http://dergipark.org.tr/dubited>



Düzce University
JOURNAL of SCIENCE & TECHNOLOGY
DUBİTED

<http://dergipark.org.tr/dubited>

Sahibi

Owner

Pınar GÜLTEKİN (Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü)
(D. Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü adına)

(On behalf of D. U. Institute of Graduate Programs)

Editör

Editor

Suat SARIDEMİR
Erdem ELİBOL
Ümit AĞBULUT

Yardımcı Editörler

Assistant Editors

Berfin ŞENİK
Vesile YALÇIN
Anıl DEMİRCAN
Ahmet AYTEĞİN
Nisa KAPLAN ERGÜL

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü

Publishing Manager

Pınar GÜLTEKİN

Yayın Kurulu

Editorial Board

Ahmet Bora KIRKLIKÇI, Karamanoğlu Mehmet Bey
Üniversitesi, Türkiye
Ali ÇALHAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ali Etem GÜREL, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Alper ERGÜN, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Ali ÖZDEMİR, Muş Alparslan Üniversitesi, Türkiye
Ali ÖZTÜRK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ahmet DEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Arif ÖZKAN, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Aytaç AYDIN, Karadeniz Teknik Üniversitesi,
Türkiye
Barış KARAKAYA, Fırat Üniversitesi, Türkiye
Emre AVCI, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Engin EROĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fatih TAŞPINAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fatih YILMAZ, Bayburt Üniversitesi, Türkiye
Fikret POLAT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Alev ÖZKÖK, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye
Gökhan YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hakan ARSLAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Harun BAYRAKDAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hüseyin BUDAK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hüseyin BAKIR, Doğu Üniversitesi, Türkiye
İrem DÜZDAR ARGUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Koray ŞARKAYA, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye
Mecit AKSU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mehmet SÖNMEZ, Osmaniye Korkut Ata
Üniversitesi, Türkiye
Melahat Sevgül BAKAY AĞBULUT, Düzce
Üniversitesi, Türkiye
Melike ERDOĞAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mert YILDIRIM, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Metin TOZ, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi,
Türkiye
Mevlüt ERSOY, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Muhammet Emin ŞAHİN, Yozgat Bozok Üniversitesi,
Türkiye
Muhammet GÜL, Munzur Üniversitesi, Türkiye
Mustafa KARAGÖZ, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Murat AYDEMİR, Erzurum Teknik Üniversitesi, Türkiye
Murat Kadir YEŞİLYURT, Bozok Üniversitesi,
Türkiye
Murat EYVAZ, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
Mustafa DAYI, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Musa Çadırcı, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Nuray Benli YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Nihat Hakan AKYOL, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Nuri ŞEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Osman DİKMEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Osman KANDARA, Southern University,
Özge Tüzün ÖZMEN, İzmir Bakırçay Üniversitesi,
Türkiye
Özlem ÖZKAN ÖNÜR, Nişantaşı Üniversitesi, Türkiye
Pınar GÜLTEKİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Revna ACAR VURAL, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Salih Tunç KAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Semih ÖZDEN, Milli Savunma Üniversitesi, Türkiye
Sercan SERİN, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi,
Türkiye
Serdar BİROĞUL, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Serhat DUMAN, Bandırma Onyedil Eylül
Üniversitesi, Türkiye
Suat SARIDEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Şerife Gülsün KIRANKAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Taner YOLDAŞ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Tarık GEDİK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Tikendra Nath VERMA, Maulana Azad National
Institute of Technology, Hindistan
Turgay BİRTÜRK, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Uğur GÜVENÇ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit AĞBULUT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit ERGUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Ümit YURT, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Yasin ŞALE, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
Yaşar Selman GÜLTEKİN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Zehra KARAPINAR ŞENTÜRK, Düzce Üniversitesi,
Türkiye

Ulusal Danışma Kurulu
National Advisory Board

Adem ACIR, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Adem ÇİÇEK, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye
Arif ÖZKAN, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Devrim AKGÜN, Sakarya Üniversitesi, Türkiye
Elif UZ, Uludağ Üniversitesi, Türkiye
Ercan ÖZGAN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Erol BURDURLU, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Ethem TOKLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Fahri VATANSEVER, Uludağ Üniversitesi, Türkiye
Fatih TAŞPINAR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
H.Hüseyin CİRİTCİOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Hakan AKTAŞ, Süleyman Demirel Üniversitesi, Türkiye
Hakan ALTINÇEKİÇ, İstanbul Üniversitesi, Türkiye
Hakan HOCAOĞLU, Gebze Teknik Üniversitesi, Türkiye
İbrahim YÜCEDAĞ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
İlyas UYGUR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
İsmail TORÖZ, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye
İsmet YILDIZ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Mehmet BUDAKÇI, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Memiş IŞIK, Karabük Üniversitesi, Türkiye
Meral KEKEÇOĞLU, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Muharrem GÖKÇEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Murat KALE, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Murat SİPAHİOĞLU, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye
Mustafa OKUTAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
Raşit TURAN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye
Salih TOSUN, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Selçuk ÖZMEN, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Seyhan FIRAT, Gazi Üniversitesi, Türkiye
Suat SARIDEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Şerife Gülsün KIRANKAYA, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Uğur GÜVENÇ, Düzce Üniversitesi, Türkiye
Yasin KİŞİOĞLU, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
Yusuf AVCI, Bahçeşehir Üniversitesi, Türkiye
Zeki DEMİR, Düzce Üniversitesi, Türkiye

Uluslararası Danışma Kurulu
International Advisory Board

Abdelilah SLAOUI, Universite de Strasbourg, France
Clay S. GLOSTER, North Carolina A&T University,
USA
A.S. El-Shafay, Prince Sattam bin Abdulaziz Üniversitesi,
Suudi Arabistan
Nicoleta BREAZ, University of Alba Lulia, Romania
Luis ROSEIRO, Coimbra Institute of Engineering,
Portugual
Mohamed Saber Gad, Fayoum University, Egypt
Marwan BIKDASH, North Carolina A & T State
University, USA
Sadık ARTUNÇ, Mississippi State University, USA
Salim HIZIROĞLU, Oklahoma State University, USA
Thomas C. CULBRETH, North Carolina State
University, USA

Cilt
Volume

12

Sayı
Issue

2

Nisan/April
2024

Ürün Bilgisi
Product Information

Yayıncı
Publisher

Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Düzce University Institute of Graduate Programs

Sahibi
Owner

Pınar GÜLTEKİN (Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü)
(D. Ü. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü adına)
(On behalf of D. U. Institute of Graduate Programs)

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü
Publishing Manager

Pınar GÜLTEKİN

Web Sayfası

<http://dergipark.org.tr/dubited>

Web Page

Basım Tarihi
Date of Publication

Nisan 2024
April 2024

Yayın Dili
Language

Türkçe / İngilizce
Turkish / English

Yayın Aralığı
Frequency

Yılda dört kez yayınlanır
Published four times in a year

Yayın Türü
Type of Publication

Sürelî yayın
Periodical

e-ISSN Numarası
e-ISSN Number

2148-2446

Yazışma Adresi

Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim
Enstitüsü Rektörlük Binası 3. Kat 81620
Düzce/TÜRKİYE

Telefon: +90 380 542 12 08

Fax: +90 380 542 12 38

E-posta: dubitedyayin@duzce.edu.tr

<http://dergipark.org.tr/dubited>
adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve
makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Correspondence Address

*Düzce University Institute of
Graduate Programs Rectorship
Building 3rd Floor 81620
Düzce/TURKEY*

Phone: +90 380 542 12 08

Fax: +90 380 542 12 38

E-mail: dubitedyayin@duzce.edu.tr

*Instructions for authors and all
articles in this journal can be
reached at
<http://dergipark.org.tr/dubited>*

İÇİNDEKİLER

Sayfa Makale

BİYOLOJİ/BİYOKİMYA/BİYOMEDİKAL/MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK/SU ÜRÜNLERİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 631-641 Contact Lens that Enabled Early Diagnosis for Diseases Induced by Oxidative Stress and Potassium Ion (K+) in Ocular Tissues
Oküler Dokularda Oksidatif Stres ve Potasyum İyonunun (K+) Tetiklediği Hastalıklarda Erken Teşhis İmkânı Sağlayan Kontakt Lens
Yaşar ŞEN
- 1192-1200 Chemical Composition and Antibacterial Activity of Volatile Compounds *Genista carinalis* Plant
Genista carinalis Bitkisinin Uçucu Bileşiklerinin Kimyasal Bileşenleri ve Antibakteriyel Aktivitesi
Hilmican ÇALIŞKAN, Merve ARGON, Muazzez GÜRGAN, Temine ŞABUDAK

BİLGİSAYAR / YAZILIM MÜHENDİSLİĞİ/BİLİŞİM SİSTEMLERİ VE TEKNOLOJİLERİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 696-708 Investigation on the Effect of Parasitic Elements on PID Control of DC-DC Buck Converter
Parazitik Elemanların DC-DC Buck Dönüştürücünün PID Kontrolüne Etkisinin İncelenmesi
Mustafa İNCİ, Yusuf ALTUN
- 709-720 Türkiye Özelinde Ekonomik Yük Dağıtım Problemi için Sürüngen Arama Algoritmasının Geliştirilmiş Versiyonu
Improved Version of Reptile Search Algorithm for Economic Load Dispatch Problem in Turkey
Ayşe ERDOĞAN YILDIRIM
- 745-761 Comparative Performance Analysis of Time-Frequency Domain Images and Raw Signal Data for Classification of ECG Signals

EKG Sinyallerinin Sınıflandırılmasında Zaman-Frekans Domenindeki Görüntülerin ve Ham Sinyal Verilerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi

Turgut ÖZSEVEN

1000-1035 A Novel Ensemble Feature Selection Technique for Cancer Classification Using Logarithmic Rank Aggregation Method
Kanser Sınıflandırma için Logaritmik Sıra Birleştirme Yöntemini Kullanan Yeni Topluluk Öznitelik Seçim Tekniği
Hüseyin GÜNEY, Hüseyin ÖZTOPRAK

1075-1085 İkili Bal Porsuğu Algoritmasının Küme Birleşimli Sırt Çantası Problemine Uygulanması
Implementation of Binary Honey Badger Algorithm to Set Union Knapsack Problem
Gülşen ORUCOVA BÜYÜKÖZ, Hüseyin HAKLI

1114-1125 Implementing a hybrid Android sandbox for malware analysis
Android zararlı uygulama analizi için hibrit kum havuzu geliştirilmesi
Mert Can COŞKUNER, Dr. Murat İSKEFİYELİ

Derleme Makale / Review Article

1136-1165 Bilgisayarlı Görüde Öz-Denetimli Öğrenme Yöntemleri Üzerine Bir İnceleme
A Review on Self-Supervised Learning Methods in Computer Vision
Serdar ALASU, Muhammed Fatih TALU

ÇEVRE / ZİRAAT / JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ / JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi / Research Article

776-797 Balıkesir İli ve Çevresinin Gutenberg-Richter İlişkisi ve Depremselliğinin Bölgesel Dağılımı
The Gutenberg-Richter Relationship and the Regional Distribution of Seismicity of Balıkesir Province and its Vicinity
Nazlı Ceyla ANADOLU KILIÇ

Derleme Makale / Review Article

612-630 Atıksuların Yeniden Kullanımına Genel Bir Bakış
Overview of Wastewater Reuse
Betül FIRAT, Sevgi SERİCİK, Yakup ÇAKMAK, Sultan UĞUZLU, Özlem DEMİR

ELEKTRİK/ELEKTRONİK / ELEKTRİK ELEKTRONİK/ MEKATRONİK/ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 762-775 İnsansız Hava Araçları ile Orman Yangınlarının Tespitinde Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Tabanlı Otomatik Bir Model
An Automatic Model Based on Image Processing and Artificial Intelligence via Unmanned Aerial Vehicles in Detection of Forest Fires
Mustafa Alptekin ENGİN, Serhan KÖKHAN
- 798-826 Space Activities and the Simultaneous Development of the Economy in Türkiye
Türkiye’de Uzay Faaliyetleri ve Ekonominin Eş Zamanlı Gelişimi
Nedim SÖZBİR, Murat BULUT, Şenol GÜLGÖNÜL, Lokman KUZU, Osman DUR
- 932-946 Antalya İlindeki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yeşil Hidrojen Üretiminin Ekonomik Analizi
Economic Analysis of Green Hydrogen Production from Renewable Energy Sources in Antalya Province
Ahmet ARSLAN, Talha ERTÜRK, Battal DOĞAN, Murat Kadir YEŞİLYURT
- 1178-1191 The Effect of Resolution and Watermark Strength on Multi-level DWT Image Watermarking
Çok Seviyeli DWT Görüntü Damgalamada Çözünürlük ve Damga Gücünün Etkisi
Hüseyin Bilal MACİT

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ / ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ

Derleme Makale / Review Article

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 721-744 Yönetim Sistemi Standartlarının İşletmelerde Uygulanması: Düzce Sanayi İşletmelerinde Bir Araştırma
Application of Management System Standards In Businesses: A Research In Duzce Industrial Companies
Büşra KESİCİ, Mehmet Selami YILDIZ
- 847-857 Çoklu Bükme Operasyonlarında Şekillendirme Parametrelerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkisi

Effect of Forming Parameters on Springback in Multi-Bending Operations

Murat AYDIN, Esra KALENDER, Mertcan YAKAR

- 881-900 Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Tavlama Benzetimiyle Çözümünde Rassal Aramanın Katkısı
Contribution of Random Search on the Solution of Flow-Shop Scheduling Problems by Using Simulated Annealing
Gökay Görkem GÜNDAY, Nilgün FIGLALI
- 1086-1100 Why Sentiment Analysis-Based Metrics are Essential for Measuring Channel Performance on YouTube: An Experimental Study
YouTube'da Kanal Performansını Ölçmek İçin Neden Duygu Analizi Temelli Metrikler Gereklidir: Deneysel Bir Çalışma
Hakan ELBAŞ, Alparslan MESRİ
- 1101-1113 Bir Perakendeciye İletilen E-Ticaret Sipariş Kargo Atamalarında Kombinatoriyal Optimizasyon ve Sezgisel Metot Karşılaştırması
Comparison of Combinatorial Optimization and Heuristic Method in E-Commerce Order Cargo Assignment to a Retailer
Batuhan KOCAOĞLU, Didem CİVELEK

İNŞAAT / METALURJİ ve MALZEME / ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 839-846 Geri Dönüşümü Yapılmış Polipropilen ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemesinin Izod Darbe ve Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi
Determination of Izod Impact and Thermal Properties of Recycled Polypropylene and High-Density Polymer Material
Ömer ŞENGÜL
- 869-880 Yanmazlık Özellikleri İyileştirilmiş Akrilik Kauçuk Karışımlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu
Preparation and Characterization of Acrylic Rubber Compounds with Improved Flammability Properties
Seda BEKİN AÇAR, Furkan Emin ALACALAR, Mehmet Atilla TAŞDELEN
- 965-980 Kocaeli Körfez Geçiş Köprüsü Kuzey Ankraj Derin Kaya Temeli Geçici Susuzlaştırma Problemleri ve Çözüm Yöntemleri
Kocaeli Bay Crossing Bridge North Anchorage Deep Rock Foundation Temporary Dewatering Problems and Solution Methods
Mehmet İNCE, Hasan TAŞAN

Derleme Makale / Review Article

- 827-838 Sürdürülebilirlik Kavramı Anlayışında Tuğla Endüstrisinin İncelenmesi
Examining the Brick Industry in Understanding the Concept of Sustainability
Can DEMİREL, Osman ŞİMŞEK

KİMYA / FİZİK / MATEMATİK

Araştırma Makalesi / Research Article

- 642-653 Synthesis, Characterization, and Photophysical Properties of 2-Quinolone-Based Compounds
2-Kinolon Temelli Bileşiklerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotofiziksel Özellikleri
Tahir SAVRAN
- 858-868 Synthesis and Characterization of Amido-Thiourea Based p-tert-butylcalix[4]arene Compound and Investigation of Transition Metal Complex Properties
Amido-Tiyoüre Bazlı p-tert-bütikaliks[4]aren Bileşiğinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Geçiş Metal Kompleks Özelliklerinin Araştırılması
Sevil SÖYLEYİCİ
- 947-956 Solitary Wave Solutions to the General Class of Nonlocal Nonlinear Coupled Wave Equations
Yerel ve Lineer Olmayan Kuple Dalga Denklemlerinin Genel Sınıfı için Yalnız Dalga Çözümleri
Şenay PASİNLİOĞLU, Gulcin M. MUSLU
- 981-999 Antioxidant Activity and Theoretical Profile of Novel 2,4,6-Triarylpyridine Derivatives Based on Syringaldehyde
Siringaldehit Bazlı Yeni 2,4,6-Triarilpiridin Türevlerinin Antioksidan Aktiviteleri ve Teorik Profili
Esra Nur ALBAYRAK, Samed ŞİMŞEK, Ahmad Badreddin MUSATAT, Zeynep AKŞİT, Hüseyin AKŞİT, Alparslan ATAHAN

MAKİNE / MEKATRONİK / MALZEME / ENDÜSTRİ / İMALAT / OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi / Research Article

- 654-668 Optimization of Surface Roughness and Cutting Temperature in Turning of 1.4534 Stainless Steel under Sustainable Conditions

- 1.4534 Paslanmaz Çeliğin Sürdürülebilir Koşullarda Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığının Optimizasyonu
Emine ŞİRİN
- 669-679 Exploring the Multifaceted Dynamics of Cartilage: A Comparative Modeling Study
Kıkırdağın Çok Yönlü Dinamiklerinin İncelenmesi: Karşılaştırmalı Modelleme Çalışması
Sabri UZUNER
- 680-695 Design, Manufacturing, and Comparative Analysis of a Mini Extruder for Polymer Flow Characterization: A Case Study on HDPE and PMMA Polymers
Polimer Akış Karakterizasyonu için Bir Mini Ekstrüderin Tasarımı, Üretimi ve Karşılaştırmalı Analizi: HDPE ve PMMA Polimerleri Üzerine Bir Uygulama
Emin USLU, Galip YILMAZ
- 915-931 Bipolar ve Unipolar SPWM Tekniklerinin Düşük Maliyetli Sistemlerde Deneysel İncelenmesi
Experimental Investigation of Bipolar and Unipolar SPWM Techniques in Low Cost Systems
Serdar YILMAZ, Hüseyin YILDIZ
- 1036-1049 Etil Alkol Yakıtlı HCCI Motorun Performans, NO ve İs Emisyon Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi
Experimental Investigation of Performance, NO and Soot Emission Properties of Ethyl Alcohol Fueled HCCI Engine
Adem TÜYLÜ, Ahmet KOLİP, Hasan Ali ÇELİK
- 1050-1063 Düşük Güçlü, Kayıplı Ağlarda RPL Yönlendirme ve Kenar İşleme Destekli, Merkezi Yönetime Sahip İzleme Sistemi
Edge Computing Supported Centrally Managed Monitoring System In Low Power and Lossy Networks with RPL Routing
Arif CEYLAN, Ali ÇALHAN, Murtaza CİCİOĞLU
- 1126-1135 Bilyalı Dövme ve Plazma Nitrürleme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi
Effect of Shot Peening and Plasma Nitriding Processes on Wear Resistance of AISI 4140 Steel
Azmi ERDOĞAN, Okan ÜNAL, M. Sabri GÖK, Soner ÖZDEMİR, Sabri ALKAN
- 1166-1177 Rüzgâr Temelli Piezoelektrik Jeneratör Tasarımı
Wind Based Piezoelectric Generator Design
Okan Gökhan USTA, Sibel Akkaya OY

- 1201-1216 Thermo-mechanical behaviours investigation of Nano-Sized Al₂O₃, TiO₂, and Graphene Nanoplatelet Reinforced Epoxy Composites
Nano Boyutlu Al₂O₃, TiO₂ ve Grafen Nanoplatelet Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Termo-mekanik Davranışlarının İncelenmesi
Gülden KABAKÇI, Mert KILINÇEL, Güler Bengüsü TEZEL

MADEN/ORMAN/ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ/PEYZAJ MİMARLIĞI/ZİRAAT MÜHENDİSLİĞİ

Araştırma Makalesi/ Research Article

- 957-964 Burdur ili Kabakgillerinde Watermelon mosaic virus ve Cucumber mosaic virus'unun Belirlenmesi
Detection of Watermelon Mosaic Virus-2 and Cucumber Mosaic Virus in Cucurbits in Burdur Province
Handan ÇULAL KILIÇ, Ahmet KAHRAMAN
- 1064-1074 Nevşehir İğnimbiritlerinde Kapiler Su Emme Özelliğinin İncelenmesi
Investigation of Capillary Water Absorption in Nevşehir İğnimbrites
Oğün Ozan VAROL

MİMARLIK BÖLÜMÜ

Araştırma Makalesi/ Research Article






- 901-914 Creation of Historical Building Information Modelling (HBIM) Library, A Case Study of Registered House (No:56), Akçakoca Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM) Kütüphanesi Oluşturulması, Tescilli Yapı (No: 56) Örneği, Akçakoca
Nuray BENLİ YILDIZ, Zehra SÖNMEZ, Nuray ÖZKARACA



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makale

Atıksuların Yeniden Kullanımına Genel Bir Bakış

 Betül FIRAT ^{a,b},  Sevgi SERİCİK ^a,  Yakup ÇAKMAK ^c,  Sultan UĞUZLU ^a,  Özlem DEMİR ^{b,d,*}

^a Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, TÜRKİYE

^b Harran Üniversitesi, GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Merkezi, Şanlıurfa, TÜRKİYE

^c Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, TÜRKİYE

^d Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, TÜRKİYE

* odemir@harran.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1207875

ÖZ

Dünya nüfusunun dörtte biri suyun fiziksel olarak kıt olduğu yerlerde yaşamakta ve küresel olarak her üç kişiden biri su kıtlığına katlanmaktadır. Sürdürülemez tüketim seviyeleri, yerel su kıtlığına yol açmış ve tatlı su ekosistemlerini önemli ölçüde etkilemiştir. Nüfus artışı ve endüstrinin gelişmesinden kaynaklanan artan su taleplerini karşılamak mevcut su kaynaklarını azaltmaktadır. Birçok kurak ve yarı kurak alanda endüstriyel, tarımsal, rekreasyonel ve içme uygulamaları için gerekli olan büyük miktarda suyu sağlamak zordur. Uygun arıtma yoluyla geri kazanılan atıksu, çeşitli su kalitesi gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Geri kazanılmış su, arıtma seviyesine bağlı olarak tarımsal ve peyzaj sulama, endüstriyel işlemler, tuvalet yıkama ve yeraltı suyu havzasının yenilenmesi gibi birçok su talebini karşılamak için çok sayıda uygulama kullanılabilir. Nüfuslar artmaya devam ettiği sürece genel su dengesi kontrol altında tutulmalıdır. Daha fazla insan daha fazla tatlı su anlamına gelir, bu da daha fazla atıksu anlamına gelmektedir. Dünyanın artan su ihtiyaçlarına verebilecek tek çözümün su geri dönüşümü olduğu bilinci her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada dünya genelinde ve Türkiye’de mevcut bulunan su potansiyeline, suyun geri kazanımının önemine, atıksuların geri kazanım tekniklerine, arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili yapılan bazı çalışmalara ve halkın görüşüne yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki atıksuların geri kazanımı çeşitli arıtım yöntemleri ile mümkün olmaktadır fakat arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su kaynakları, Suyun Önemi, Arıtılmış atıksu, Atıksu geri kazanımı, Atıksu yeniden kullanımı

Overview of Wastewater Reuse

ABSTRACT

A quarter of the world’s population lives in places where water is physically scarce, and globally one in three people endure this water shortage. Unsustainable levels of consumption have led to local water scarcity and have significantly impacted freshwater ecosystems. Meeting the increasing water demands caused by population growth and industry development reduces the available water resources. In many arid and semi-arid areas, it is difficult to provide the large amounts of water needed for industrial, agricultural, recreational and drinking applications. With proper treatment, the recovered wastewater can meet various water quality requirements. Depending on the level of treatment, recycled water can be used in many applications to meet many water demands, such as agricultural and landscape irrigation, industrial processes, toilet flushing, or groundwater basin regeneration. Although populations continue to increase, the overall water balance must be kept in check. More people mean more fresh

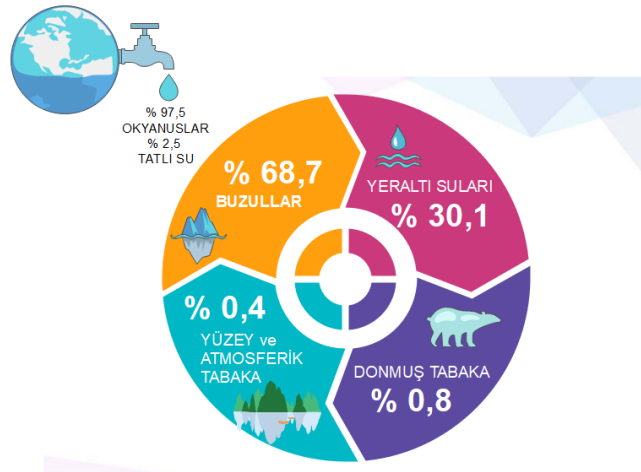
water, which means more wastewater. The awareness that water recycling is the only solution that can be given to the world's growing water needs is increasing every day. In this study, the water potential in the world and in Turkey, the importance of water recovery, the recovery techniques of wastewater, some studies on the reuse of treated wastewater, and the public opinion on the reuse of treated wastewater are included. Studies have shown that the recovery of wastewater is possible with various treatment methods, but more studies are needed on the reuse of treated wastewater.

Keywords: Water resources,, Water potential,, Treated wastewater, Wastewater recovery, Wastewater reuse

I. GİRİŞ

Su, daha fazla insana ve kullanıma hizmet etmek zorunda olan sınırlı bir kaynaktır ve bu nedenle insanın hayatta kalmasını, herkesin güvenilir bir kaynağa erişmesini ve sürdürülebilir ilerleme için çok önemlidir. Stratejik bir konuma sahip olan su hayatın, ekosistemin ve canlılığın temelini oluşturan yaşamımızın vazgeçilmez doğal ve sınırlı bir kaynaktır [1]. Kentleşme, iklim değişikliği, nüfus artışı ve sanayileşmenin artması ile suya olan ihtiyaçta artmaktadır. Yiyecek ve suya olan bu ihtiyaçların artışı da su kıtlığına neden olmaktadır [2]. IWMI, yiyecek olarak tüketilen her kaloriyi üretmek için yaklaşık 1 litre su gerektiğini söylemektedir [3]. Kaynakların aşırı tüketilmesi, nüfus artışı ve bu artışa bağlı olarak doğal kaynaklara olan ihtiyacın artması var olan kaynakların kirlenmesine ve tükenmesine yol açmıştır. Tehlike alarmı veren kaynaklardan biri de sudur [4]. Suyun hayatımızda olmadığı yer yoktur ve su kaynaklarımız baskı altındadır. Su kıtlığı dünya genelinde başlıca bir sorun olup endişe verici bir hal almaktadır. Su kıtlığının önemli bir nedeni tarımdır, çünkü bitkisel üretim, içme ve diğer evsel amaçlar için kullanılandan 70 kat daha fazla su kullanılmaktadır.

Küresel ölçekte doğal sebepler ve insan eylemleri kullanılabilir su kaynaklarını azaltmaktadır. Doğal şartların değişimi ve iklim değişimi ile bu durum daha da artmaktadır [5]. Dünya genelinde 1,4 milyar insan temiz suya erişememekte ve nüfusun 470 milyonu su kıtlığı ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu rakamların 2025 yılında 6 katına kadar çıkması beklenmektedir [1]. Orta Doğu, Afrika'nın büyük bir bölümü, Amerika, Hindistan ve Asya'da su kıtlığı yaşanmaktadır [6]. 1 milyar 400 milyon km³ kullanılabilir su bulunmaktadır ve bu suyun %97,5'i tuzlu su %2,5'i ise içilebilir tatlı su kaynaklarıdır [7]. Dünya'da mevcut suyun dağılımı Şekil 1'de gösterilmektedir.

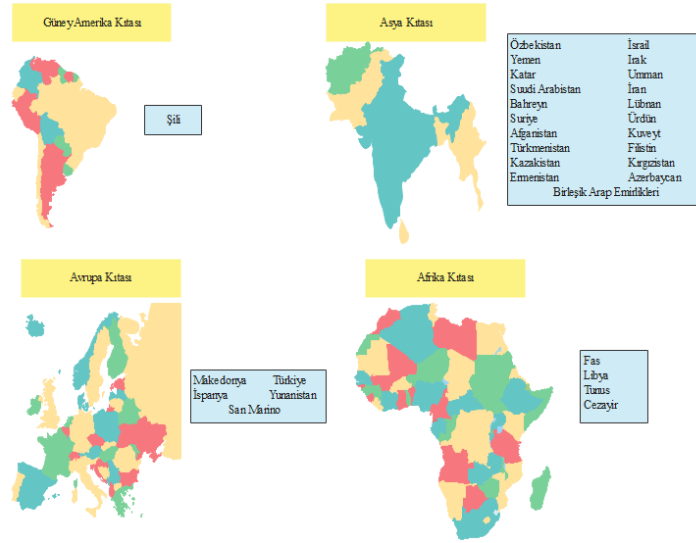


Şekil 1. Dünyadaki suyun küresel dağılımı.

Suyun yeryüzündeki dağılımı düzensizdir. Yağışlar suyun tek kaynağı konumundadır. Yağış yok ise sudan bahsetmek olanaksızdır. Yeryüzüne 1 damla yağış düşmez ise problem içerisindeyiz demektir [8]. Dünyada bazı yerler yoğun yağış alırken bazı yerlerde yağış almamakta ve aşırı sıcaktan olumsuz etkilenmektedir. Güney Amerika %30, Avrupa %33, Asya %60, Afrika'nın büyük bir bölümü, Avustralya'nın neredeyse tamamı ve Amerika'nın kuzeybatısı az yağış almaktadır [9]. Bu olumsuz

etki sebebiyle bazı yerler su zengini ülkeler arasına girerken bazı yerler su fakiri ülkeler arasında bulunmaktadır. Kullanılabilir kişi başı yıllık su miktarı Falkenmark göstergesine göre dört kategoride değerlendirilmektedir. Kullanılabilir su miktarı $>1.000 \text{ m}^3$ “su fakiri”, $1.000 - 3.000 \text{ m}^3$ “su sıkıntısı çeken”, $3.000-10.000 \text{ m}^3$ “yeterli suya sahip”, $<10.000 \text{ m}^3$ “su zengini ” ülkeler olarak tanımlanır [10]. Suyun kalitesi önemli bir göstergedir. Kaliteli suya sahip olmayıp kaynak bakımından zengin olan bir bölge sürdürülebilirliği sağlayamaz. Su kıtlığını önleyebilmek için sürdürülebilir su yönetimini kontrol altında tutmalıyız [11]. Ülkelerin sağlık alanında, geçim kaynaklarında ve ekonomik gelişiminde ciddi sorunlarının olması su kalitesinin düşüklüğüne ve bilinçsiz kullanımından kaynaklanmaktadır. Su uygulamalarında verimliliğin en üst düzeyde olabilmesi için yöntem ve alışışlıkların düzenlenmesi gerekmektedir [12].

Yapılan çalışmalar neticesinde, Türkiye'nin de su sıkıntısı yaşayacağı düşünülmektedir. Yakın zamanda su sıkıntısı yaşayacak ülkeler arasında Türkiye 27. sırada bulunmaktadır. Su sıkıntısı yaşanacağı düşünülen ülkeler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Su sıkıntısı ile karşı karşıya kalan ülkeler [13].

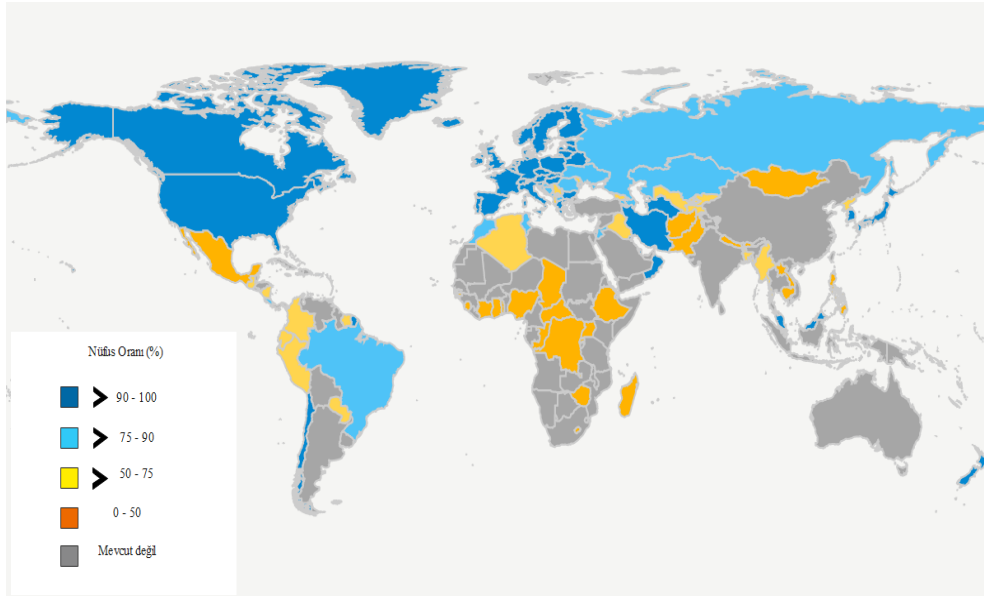
Mevcut su kaynaklarının yetersizliği ve tükenmesi ile alternatif su kaynağı arayışları hızlanmaktadır. Alternatiflerin başında da birçok ülkede kullanılan arıtılmış atıksular bulunmaktadır [14]. Dünya geneli yaklaşık %18 ülke atıksularını arıtarak geri kazanmaktadır. Asya ülkelerinin (Ürdün, İsrail, Bahreyn, Irak, İran, Katar, Lübnan) yaklaşık %35’i, Afrika ülkelerinin (Mısır, Tunus, Cezayir, Güney Afrika, Libya) %13’ü, Avrupa ülkelerinin (Yunanistan, İtalya, Belçika, Fransa) %8’i, Amerika ülkelerinin (Meksika, Arjantin, Şili, Brezilya) %12,12’si atıksularını arıtarak geri kazanmaktadır. Dünya Sağlık Örgütüne göre atıksuların yeniden kullanılmasının itici güçleri arasında; a) var olan suyun azlığı, b) atıksu ve gri suyun kaynak öneminin olması, c) nüfusun artışı, d) arıtımı doğru yapılamayan atıksu bertarafından kaynaklı çevre kirliliği gibi nedenler tespit edilmiştir [2, p. 2]. Suyun bir sorun halinden çıkarılması için su yönetimi planları geliştirilip kullanılması gerekmektedir. Tatlı su kaynakları üzerindeki baskı ancak atıksuların arıtılıp içme suyu dışındaki çeşitli alanlarda kullanımı ile azaltılır [15], [16].

II. MEVCUT SU DURUMU

A. DÜNYADA MEVCUT SU DURUMU

Yerkürenin büyük bir kısmı, yaklaşık olarak %75'i sular ile kaplı olmasına rağmen yalnızca %3'ü içilebilir su formundadır. Var olan içilebilir sulara ise erişim kolay olmamaktadır. Dünyada toplam 1,4 milyar kilometreküp su bulunmaktadır. Bu suların %97,5'i tuzlu sulardır. Toplam suyun sadece %2,5'i insan kullanımına uygun tatlı su olarak nehir ve göllerde yer almaktadır. Az olan bu tatlı su kaynaklarının %90'ı kutuplarda ve yer altında bulunuyor. Dünyada her 10 kişiden yaklaşık 1'i temiz suya ulaşabiliyorken, nüfusun büyük çoğunluğu temiz sulara ulaşmadan yaşamaktadırlar. Dünya genelindeki insanlar yılda %42'lik bir oranla kısıtlı ve kirli olan su kaynaklı hastalıklardan ölmektedir. Bu bağlamda nüfusun çoğunlukta olduğu yerler su sıkıntısı ile mücadele etmekte, tatlı ve içilebilir suya olan ihtiyaç 64 milyar m³ artmaktadır [17]. Dünya nüfusunun %72'si iyi kalitede suya sahiptir. Bu nüfusun %74'ü güvenli bir şekilde yönetilen içme suyu hizmetini kullanabilmekte, %54'ü sanitasyon hizmeti kullanabilmekte, %56'sı ise evsel atıksularını arıtılabilmektedir [18]. Güvenli bir şekilde yönetilen içme suyu hizmetlerini kullanan nüfusun oranı Şekil 3'de gösterilmektedir. Dünya genelinde sürekli artan sürdürülemez su talebini karşılamak, çağımızın en büyük sorunlarından biri olmuştur ve olmaya devam edecektir [19]. Dünya mevcut su kaynağı yıllık 43,750 km³ olarak düşünülmekte ve bu kaynağın %15.5 Avrupa, %45 Amerika, %9 Afrika ve %28'i Asya'da bulunmaktadır. Yıllık kişi başına su miktarı Asya'da 9.300 m³, Amerika'da 24.000 m³, Afrika'da 3.400 m³, Avrupa'da 5,000 m³ seviyesindedir [20].

Dünya yüzeyine yağış kaynaklı yaklaşık olarak yılda 100.000 km³ su düşmektedir. Bu suyun yaklaşık 40.000 km³'ü nehirler aracılığıyla göllere ve denizlere ulaşmaktadır. Bu suların ekonomik ve teknik olarak kullanılabilir miktarı ise 9.000 km³'tür. Dünya genelindeki bu suların %74'ü tarımda, %11'i sanayide, %15'i evde kullanılmaktadır. Ekonomik gelişmeler dikkate alındığında 2030 yılında, 4.500 km³ global su gereksiniminin 6.900 km³'e artacağı ön görülmektedir. Ön görülen bu su miktarı mevcut güvenilir ve ulaşılabilir su miktarının %40'ı üzerindedir [1]. Ülke bazında yenilenebilir su miktarı bakımından 8.233 m³ ile Brezilya birinci, 4508 m³ ile Rusya ikinci, 3.069 m³ ile ABD üçüncü sırada yer almaktadır. Türkiye ise 211.6 m³ ile 42. sırada yer almaktadır [21]. Avrupa ülkeleri arasında ise en yüksek kişi başı yenilenebilir tatlı su kaynağı ülke sıralamasında Hırvatistan 29.200 m³ ile birinci, Finlandiya 19.900 m³ ile ikinci, İsveç 18.900 m³ ile üçüncü sırada yer almaktadır [22].



Şekil 3. Güvenilebilir su kalitesi iyi olan su kütlelerinin oranı [24].

2025 yılında evsel su kullanımının 1.8, endüstriyel su kullanımının 1.5, tarımsal su kullanımının 1.3 kat artması beklenmektedir. Bu artışın toplamda %50'sinin gelişmekte olan ülkelerde %18'nin ise gelişmiş olan ülkelerde olması öngörülmektedir [24]. UNESCO'ya göre, 2 milyar insan su sıkıntısı yaşayacak ülkelerde ikamet etmektedirler. Çin ile Hindistan'da ikamet edenler daima su kıtlığı yaşarken Yemen,

Suudi Arabistan, Libya, Pakistan ve Somali'de bulunan popülasyonun çoğunluğu yıl boyunca şiddetli su stresiyle karşı karşıyadır [25].

Luo vd. [24] yapılan çalışmada; 2010 yılı baz alınarak 30 yıl sonra yaşanacak su stresi uyarlamasında Türkiye 27. sırada su sıkıntısı çeken ülke konumunda iken İsrail, Filistin, Katar gibi ülkelerde tüm sektörlerde en çok su stresi yaşayacak ülke konumundadır [24].

328 ülke-havza biriminde yaşayan yaklaşık 1.6 milyar insan, yılda en az bir ay boyunca ciddi bir su kıtlığı krizine maruz kalmaktadırlar. Ayrıca, 175 ülke havzasında yaşayan insanlar yılda 3 ila 12 ay su kıtlığından mustarıptirler [27], [28]. 20. yüzyılda su stresi yol haritasını incelemiş olup, su sıkıntısı çekenlerin nüfusunun 1900'lerde 0.24 milyar (nüfusun %14'ü) iken 2000 yılında 3.8 milyara (nüfusun %58'i) yükseldiği ortaya konmuştur [28]. Nijerya'nın Kuzeybatı ve Kuzeydoğu bölgelerindeki evlerin %78'inin içme suyu temini için korumasız kuyulara dayandığını ortaya koymuştur [29]. Ayrıca, yüksek su tedarik maliyeti nedeniyle, Nijerya Yenogoa'da da içme suyuna erişimin düşük olmasına yol açmıştır [30]. Omole [31], devlet kurumları tarafından yetersiz su tedariki nedeniyle Nijerya'da 162.5 milyondan fazla insanın günlük su ihtiyaçları için gelişigüzel yeraltı suyu çıkarılmasına yol açtığını ortaya koymuştur [31].

Su Çerçeve Direktifi (SÇD) 1991 tarihli AB Konseyi Direktifi önemli olan bir girişimdir [32]. 1991 yılında yayınlanan SÇD'ye göre 1991 ile 2025 yılları arasında, arıtılmış belediye atıksularının yeniden ve doğrudan kullanımında Avrupa'nın ikiye katlanması veya gelecekte artması beklenmektedir. Günümüzde atıksuyun yeniden kullanımı bir peri masalı değildir. İsviçre, Avustralya, Singapur, Güney Afrika, Tunus ve Kıbrıs gibi dünyanın dört bir yanındaki ülkeler atıksu yeniden kullanım projelerini en başarılı bir şekilde yürütmektedirler [33], [34]. İsrail, Suudi Arabistan, Katar ve Kuveyt gibi orta doğudaki birçok ülke kişi başı temel su taleplerinin karşılanması için atıksu yeniden kullanım tesislerini kurmaya yönelmiştir. Ve bu ülkeler arasındaki Suudi Arabistan atık suyunun %83'ünü arıtmaktadır [35]. Ancak Türkiye, İtalya, İspanya, Yunanistan, Kıbrıs gibi Akdeniz çevresindeki bazı ülkeler tatlı su sıkıntısı ve aynı zamanda yeniden kullanım uygulamasında zorluklar yaşamaktadır [36].

B. TÜRKİYEDE MEVCUR SU DURUMU

Türkiye coğrafi çeşitliliğe, farklı özellikteki yağış rejimlerine ve iklim tiplerine sahip bir ülkedir. Türkiye bilinenin aksine tatlı su kaynakları bakımından zengin bir ülke konumuna sahip değildir. Türkiye'nin su politikası mevcut su potansiyeli ile doğrudan ilişkili olup orta risk grubunda su stresi çeken bir ülke konumundadır [37]–[39].

Türkiye'deki toplam su miktarı Tablo 1'de gösterilmektedir. Ilıman-subtropikal iklim özelliğine sahip olan ülkemiz iklim özelliklerine bağlı olarak rüzgar, sıcaklık ve yağışlar farklılıklar gösterir [38]. Türkiye nüfusu 84,680.273 kişiye ulaşmış ve kişi başı kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında 1652 m³, 2009 yılında 1544 m³, 2020 yılında ise 1346 m³ olmuştur [40]. Su kıtlığı yaşayabilecek ülkeler arasında Türkiye'de bulunmaktadır. 2040 yılında Türkiye nüfusunun artarak 100 milyona ulaşacağını ve bu zaman diliminde kişi başın kullanılabilir su miktarının 1120 m³ olacağı öngörülmektedir. Nüfus ile kişi başı kullanılabilir su miktarı arasında doğrudan bir ilişki olup kaynaklarımızın sürdürülebilir biçimde yönetmek ülkenin tüm sektörlerine (kamu-özel) ait milli bir meseledir [41].

Tablo 1. Toplam su miktarı potansiyeli [42].

Yıllık ortalama yağış	643	mm/yıl
Türkiye'nin yüzölçümü	783.562	km ²
Yıllık kullanılabilir su miktarı	501	milyar m ³
Atmosfere geri dönen	274	milyar m ³
Yıllık yüzey akışı	158	milyar m ³
Yeraltı suyu beslenme	69	milyar m ³
Yıllık çekilebilir su miktarı	28	milyar m ³

Komşu ülkelerden gelen su	7	milyar m ³
Yerüstü su potansiyeli	193	milyar m ³
Yenilenebilir su potansiyeli	234	milyar m ³

İklim değişikliği ve havzalardaki su potansiyeli arasındaki bağlantıyı ortaya koymak amacıyla yapılan çalışmalarda 2050 yılına kadar Konya Havzası'nda %70, Akdeniz Bölgesi Havza'larında %37, Fırat-Dicle Havzası'nda %10'lara kadar su miktarlarında azalmalar olacağı öngörülmektedir [43] Türkiye'de yağışlardan kaynaklı baraj doluluk oranları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Barajlar doluluk oranları [44].

Havza Adı	Baraj	14.01.2022		29.03.2022		21.10.2022		Kaynak
		Yüz Ölçümü (km ²)	Aktif Doluluk	Aktif Doluluk	Aktif Doluluk	Aktif Doluluk		
Kızılırmak	HİRFANLI	263	19,8	17,0	-			
Kızılırmak	ALTINKAYA	118	24,4	33,4	44,3			
Yeşilirmak	KILIÇKAYA	64	17,3	12,4	44,1			
Sakarya	SARIYAR	83	52,3	59,4	60,6			
Antalya	KARACAÖREN I	45	7,7	46,8	25,3			[44]
Antalya	KARACAÖREN II		61,2	78,4	48,3			
Gediz	DEMİRKÖPRÜ	47	-	3,0	-			
Ceyhan	ASLANTAŞ	49	29,6	51,3	17,1			
Ceyhan	MENZELET	42	45,2	75,1	51,0			

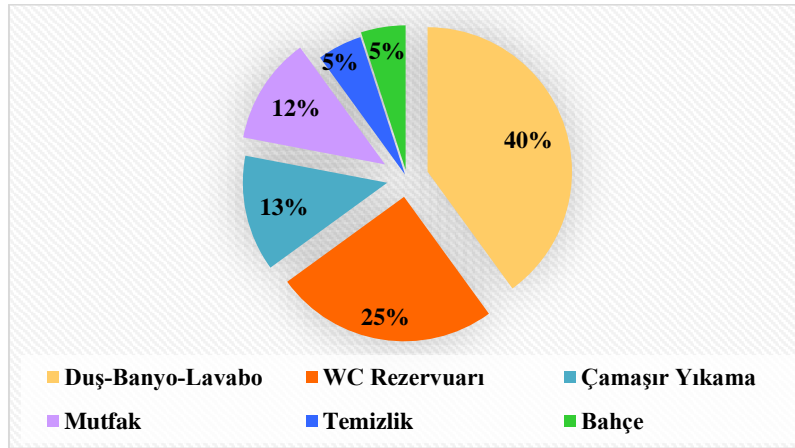
Su tüketiminde artış görülen, az yağışlı bir dönemden geçen Türkiye'de su sağlayan barajların yüzde 72'si boş durumda ve barajların doluluk oranları ise son 10 yılın en düşük seviyesindedir [42]. Bu bağlamda su kaynaklarının mevcut durumunu korumak ve gelecekte meydana gelmesi öngörülen su kıtlığına karşı alternatif su kaynaklarını araştırmak büyük önem arz etmektedir.

III. ATIKSUYUN GERİ KAZANIMI VE YENİDEN KULLANILMASININ ÖNEMİ

Su, herhangi bir toplumun sosyo-ekonomik ve endüstriyel gelişimini teşvik etmek için en önemli kaynaklardan biridir. Su kaynaklarının az olmasından dolayı kurak ve yarı kurak bölgelerde su daha da dikkat çekici bir hal almaktadır. Örneğin, tarım, hayvancılık ve sanayi türü doğrudan suyun mevcudiyetine bağlıdır [45]. Su, özellikle şu anda su kıtlığı yaşayan Akdeniz ülkeleri için sınırlı bir kaynaktır ve önümüzdeki yıllarda artan su talebi ve iklim değişikliği ile daha da kötüleşecektir [46]. Uluslararası hükümet kuruluşları, su kaynakları üzerindeki artan baskılara yüzey suyu ve yeraltı suyu kaynaklarından çıkarımı sınırlandırarak, arıtılmış atıksuyun su kaynaklarına deşarjını azaltarak ve kentsel atıksu için birden fazla kullanım yoluyla su tasarrufunu teşvik ederek yanıt vermiştir [47]. Mevcut su kaynaklarının tahribatını önlemek için arıtılmış atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı gündeme gelmiştir. İklim değişikliğinin etkisi altında, alternatif su kaynağı gibi suyun geri dönüşümü bir seçenek değil, bir gereklilik olarak görülmelidir. Türkiye, tatlı su kaynaklarını korumak için atıksu yeniden kullanımında ülkeler arasında gelecek vaat eden bir konumdadır. Bu bağlamda su yeniden kullanımı giderek artan ve önem kazanan bir konu haline gelmiştir. Fakat bazı faktörler büyük ölçüde engel teşkil etmektedir. Bunlar; kentsel yaşamın hızlı adaptasyonu, atıksu yeniden kullanım programları için yönergelerin yetersiz kalması, yapılan projelerin yavaş ilerlemesi, geri kazanılan suyun sınırlı ticari gelişimi, kamu bilinci eksikliği ve insanlarda farkındalığın oluşturulamamasıdır [35]. Su sonu olmayan bir kaynak olarak bilinmektedir ancak miktar ve kalitesinde düşüş olduğu zaman yeni bir

kaynak bulmak sorunlara yol açmakta ve buna karşın alternatif su kaynaklarının kullanımı önerilmektedir. Alternatifler arasında arıtılmış atıksuların kullanımı bulunmaktadır [48].

Su miktarlarına dikkat edildiğinde, tarımsal ve endüstriyel su kullanımı oranı yüksektir. Bu sebeple oluşan atıksuların yeniden kullanılabilmesi ve deniz sularının arıtılıp içme suyu olarak kullanılabilmesi fikri oluşmuştur. Evsel atıksu fosfor-azot içerdiği için gübre özelliği bulunmakta ve ürün gelişimine destek vermektedir. Bu durumlar dikkate alındığında ön arıtımı sağlanan atıksu yeniden kullanılabilir bir hale getirilip, ileri arıtım yöntemleri ile sulama suyu olarak tekrardan kullanımı sağlanabilir [49]. Şekil 3'te günlük su tüketim oranları gösterilmektedir.



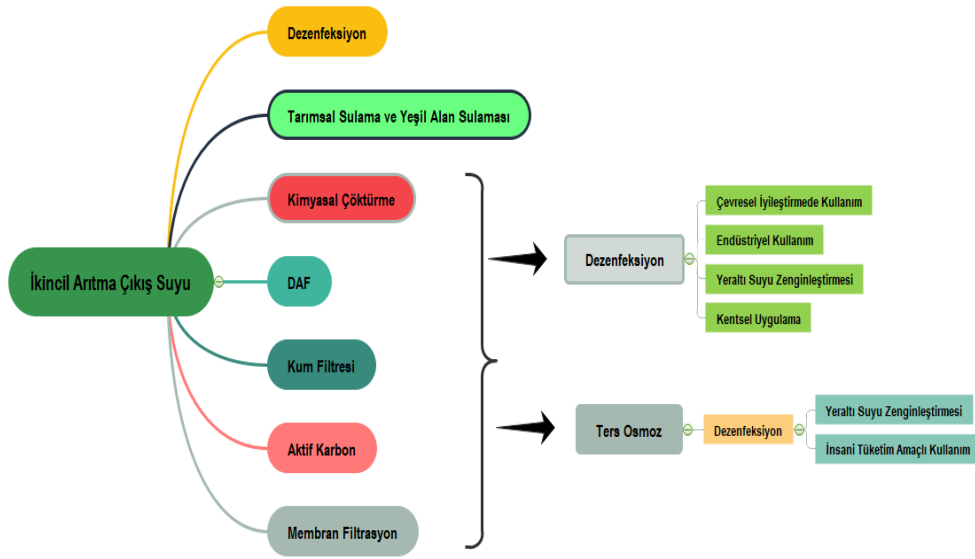
Şekil 4. Günlük su tüketim oranları [50].

Su temini, hızla artan su baskısı, doğa olaylarının olumsuz sonuçları ve iklim değişikliği yaşanan dünya çapında kaygılar arasında bulunmaktadır. Küresel ölçekte özellikle su kıtlığı çeken ülkelerde tarımsal sulama için su, daha önemli bir eleman olmaktadır [16].

Tüm bunlara baktığımız zaman alternatif bir su kaynağı olarak suyun geri dönüşümü bir seçenek değil, bir gereklilik olarak görülmelidir. Fakat bazı faktörler büyük ölçüde engel teşkil etmektedir. Bunlar; kentsel yaşamın hızlı adaptasyonu, atıksu yeniden kullanım programları için yönergelerin yetersiz kalması, yapılan projelerin yavaş ilerlemesi, geri kazanılan suyun sınırlı ticari gelişimi ve kamu bilinci eksikliği, insanlarda farkındalığın oluşturulamamasıdır. Bu engellerin aşılması için planlama, entegre yönetimi, yeniden kullanım ve geri dönüşüm için projeler geliştirme ve en önemlisi bilim insanlarının ve yöneticilerin bu önemli konuya dikkat etmeleri gerekmektedir [35].

IV. ATIKSU GERİ KAZANIM YÖNTEMLERİ

Atıksuların geri kazanılıp yeniden kullanılması amacına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Kentsel atıksular yeşil alan sulamasında veya tarımsal sulama amacı ile kullanılacak ise iyi bir şekilde dezenfekte edilmesi gerekmektedir. Doğrudan veya dolaylı geri kazanımdan bahsediliyor ise aktif karbon, ileri oksidasyon ve membran teknolojileri gibi ileri arıtma alternatifleri gerekmektedir [35]. Artan su taleplerini karşılayabilmek miktar ve mevcut kaliteyi geliştirmek için büyük bir emek gerekir. Dünya Bankası, atıksuların arıtılıp yeniden kullanılmasının su sorununa bir çözüm olabileceğini önermektedir [51]. Şekil 4'te arıtılmış atıksuların kullanım alanlarına göre uygulanan arıtım yöntemleri gösterilmiştir. Atıksuların arıtım kademeleri ise; birincil arıtma atıksuların fiziksel, mekanik ve/veya kimyasal yöntemler ile arıtılması, ikincil arıtma askıda katı madde ve organik maddenin biyolojik arıtma ile arıtılması, üçüncül arıtma (ileri arıtma) ikincil arıtıma ilave olarak atıksuda bulunan besin maddelerinin de arıtılması yöntemlerine dayanmaktadır. Konvansiyonel filtrasyon prosesleri: Yüzey filtrasyonu, membran filtrasyonu, derin yatak filtrasyonu uygulamaları: ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF), mikrofiltrasyon (MF), ters osmoz (RO), dezenfeksiyon ve ileri oksidasyondur [52].



Şekil 5. Arıtılmış atık suların kullanım alanlarına göre uygulanan arıtım yöntemleri [52].

Son zamanlarda, atıksu arıtımı için membran biyoreaktör (MBR) sistemleri ve elektrokimyasal reaktörler üzerinde araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte, bu reaktörlerin çalışması sırasında hala bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Mevcut zorluklar ise; MBR'de membran kirlenmesi, operasyonel hatalardan ve koşullardan geri dönüşler, elektrokimyasal sistemlerde enerji tüketimi, yüksek maliyet gereksinimi ve basitleştirilmiş modellere duyulan ihtiyaçtır [53].

Alternatifler arasında gri suların (banyo, lavabo, çamaşır ve bulaşık makine suları) kullanılmasına yer verilmektedir [54]. Ayrıca atıksular gibi gri sular da arıtılıp ev içinde (tuvalet, çamaşır, bulaşık makinelerinde) veya bahçe sulamasında da kullanılabilir. Özgüroğlu (2019), bu konuda yapılan çalışmada Fenton metodu olarak adlandırılan oksidasyon sisteminin optimizasyonu sonucu gri suda KOİ ve yüzey aktif madde gideriminde sırasıyla % 75 ve % 99 civarında giderim kaydederek gri suların yeniden kullanılabilirliğini kanıtlamıştır [55].

Yapay sulak alan sistemlerinde yüksek verim sağlamak için belirli şartların (atıksu karakterizasyonu, mevcut arazi durumu, taşkın riski, toprak geçirgenliği, doğru bitki seçimi vb.) sağlanması gerekmektedir. Arıtma verimini artırmak için uygun ön arıtmanın ardından ikincil arıtma uygulanması ile gerçekleştirilebilir [56].

Ma ve ark.[57] tarafından yapılan çalışmada; A²O-MBR proses teknolojisi ile evsel atıksular arıtılıp çeşitli alanlarda (yol yıkama, bahçe sulaması, sifon) kullanılması için bir havuzda tutulmuştur. Sistemden alınan örneklerde 58 organik mikro kirlenici, 13 PAH, 16 fenol, 3 pestisit ve 26 ilaç ve kişisel bakım ürünleri (PPCP) tespit edilmiştir. A²O prosesinde PAH [benzo(b)fluoranthene] dışındaki kirlenicilerin giderimi sağlanırken MBR prosesinde ise PAH giderimi (% 14,81) sağlanmıştır A²O-MBR proses uygulanması sonucu, pestisitler ve fenoller yüksek verimlilikle (>%80) giderimi sağlanırken, PPCP'lerin giderimi orta düzeydedir (%56,85). Genel olarak, pestisitler ve fenoller biyokimyasal arıtımla giderilirken, PPCP'lerin gideriminde peyzaj gölünün ekolojik ortamı etkili bir rol oynar [57].

Semreen ve ark.[58], "Biyolojik Arıtma + Hızlı Kum Filtrasyonu + UV Dezenfeksiyon Sistemi" ile Sharjah atıksu arıtma tesisi giriş ve çıkış su numunelerinde, ilaç oluşum ve konsantrasyonları değerlendirilmek üzere çalışma yapılmıştır. İncelenen tesiste arıtım sonrası farmasötik giderim verimleri %31-96 arasında değişmektedir [58].

Zhou ve ark.[59], Dört basit gelişmiş oksidasyon işlemi [heterojen fotokatalitik oksidasyon, sonolisis, ozonlama (O₃) ve H₂O₂ oksidasyonu] ve bunların kombinasyonları, ters osmoz (RO) prosesi ile belediye atıksu arıtma tesisi konsantresi içindeki organiklerin giderimi laboratuvar ölçeğinde incelenmiştir. Arıtım yöntemi ile en yüksek verim (%95), 6 saat sürede FeCl₃ koagülasyon + fotokataliz (UVC/TiO₂) entegrasyonu ile sağlanmıştır [59].

Atıksuyun geri kazanımı için geri kazanılan suyun kullanılacağı alan da göz önünde bulundurularak su kullanımı için miktar ve ihtiyaç tahmini, geri kazanım ihtiyaç ve amacı, alternatiflerin tanımlanması ve uygun alternatiflerin seçilmesi, karar verilmesi, finansal fizibilite ve projenin uygulanması kullanım amacına göre en ekonomik ve istenen sonuca götüren yöntem belirlenir [52].

V. ATIKSULARIN YENİDEN KULLANIMI VE GERİ KAZANIMI İLE İLGİLİ YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR

Atıksuların tekrar kullanılmasına ait ilk adım, 1940 yılında ABD’de çelik endüstrisinde klorlu evsel atıksu kullanılarak yapılmıştır. 20. Yüzyılın son çeyreğine kadar ilk olarak Avrupa ve Amerika gibi sanayileşmiş ülkelerde suyun tekrardan kullanımı gündeme gelmiştir. 1951 Japonya, Tokyo Mikawashima Atıksu Arıtma Tesisinde arıtılan atıksu, bir kağıt fabrikası için proses suyu olarak tekrardan kullanılması için bir geri dönüşüm programı başlatılmıştır [60].

Avustralya, Kuzey ve Güney Afrika, Orta Doğu, Kuzey Akdeniz ülkeleri, Çin’in bir bölümü ve ABD’de atıksuların tarımda tekrar kullanılması konvansiyonel bir uygulama olup su kaynaklarının yönetimi için önemlidir. Bu atıksuların yeniden kullanılması ile toplam su taleplerinin % 10-40’ını sulama suyu taleplerinin de % 30-70’ini karşılamaktadır [61].

Türkiye’de atıksu arıtımı ve yeniden kullanımı ile ilgili faaliyetler ilk olarak Avrupa-Akdeniz ortaklığı tarafından finanse edilen MEDAWARE Projesi ve daha özel olarak Yerel Su Yönetimi Bölgesel Programı tarafından açıklanmıştır [62], [63]. Bu projede 5. Görev kapsamında farklı üniversiteler ve araştırma enstitülerinin işbirliği ile Türkiye’de bulunan tüm kullanılabilir atıksu arıtma tesisleri kontrol edilmiştir, ülke çapında ayrıntılı araştırmalar yapılmış ve bunların güçlü ve zayıf yönleri raporda yer verilmiştir [64], [65]. Rapor bulguları özellikle atıksu arıtma tesislerinden çıkan düşük kaliteli atıksuların tarım için kullanılabilir bazı tesisler dışında yeniden kullanım için uygun olmadığını açıkça göstermiştir [62], [64]. Türkiye’deki kötü su kalitesi ve su kaynaklarının dengesiz dağılımı, Türkiye nüfusunun çoğunu içme amaçlı şişelenmiş su tüketimine zorlamıştır. Bu nedenle, atıksuyun yeniden kullanımını teşvik etmek ve geri kazanılan suyun ülke çapındaki su kaynakları yönetim planının kilit bir unsuru haline gelmesi için hükümet ve özel sektörün yardımıyla iddialı planlara hızlı bir şekilde ihtiyaç vardır. Türkiye, hedeflenen nüfusa bağlı olarak büyük şehirlerinin hemen hemen tamamında atıksu arıtma tesislerine sahiptir, ancak şehirlerin çoğunda ikincil arıtmanın ötesinde atıksu arıtımı ve yeniden kullanım için boru hattı ağlarının kurulması gerekmektedir [43]. Modern teknolojilerin yardımıyla daha bilinçli ve sürdürülebilir atıksu yeniden kullanımının uygulanmasını teşvik etmeyi, paydaşların suyun yeniden kullanım operasyonlarının tüm süreçlerine ilgisini ve entegre edilmesini önermiştir [66].

A. GERİ KAZANILMIŞ ATIKSULARIN SULAMA SUYU OLARAK KULLANIMI

Arıtılmış atıksuların gıda ürünlerinde kullanımı söz konusu olduğunda özel önlemler alınmalıdır. Geri kazanılan su, en azından ikincil arıtmadan geçen atıksu olarak tanımlanmalıdır. Arıtılan bu atıksular okul bahçeleri, spor alanları, park ve rekreasyon alanları, oyun alanları, otoyol kenarları, yeşil alan sulanması, araç yıkama, golf sahalarının sulanması, yangın söndürme ve inşaat sektöründe(kontrollü olarak yıkımı yapılan binalar vb.), çevre koşullarının iyileştirilmesinde kullanılabilir [67].

Ülkemizde arıtılmış atıksuların sulama suyu olarak kullanılması Tablo 3’de verilmiştir [52]. Türkiye’de su kaynaklarının büyük bir bölümü tarım sektöründe kullanılmakta olup 28 milyon ha tarım alanında sadece 5,6 milyon ha alanda bu su kullanılmaktadır. Bakanlık tarafından “Arıtılmış Atıksuların Yeniden

Kullanımı” projesi kapsamında 2017 yılında 15 kentsel/evsel atıksu arıtma tesisi geri kazanım oranı %1,2 ve bu tesislerden sağlanan yeniden kullanım suyu %0,78 olarak belirlenmiştir [16].

Tablo 3. Arıtılmış Atıksuların Sulama Suyu Olarak Geri Kullanım Kriterleri.

Sınıf	Kullanım Alanları	pH	BOI5	Bulanıklık	Fekal Koliform Oranı	Virüs-Protozoa-Helmin	Bakiye klor
A	-Park, bahçe, kentsel alanların sulanması -Ticari olarak işlenmeyen gıda ürünleri	6-9	<20 mg/L	<2 NTU	0ad/100 mL	Günlük Ölçüm	<1 mg/L
B	-Otlak hayvanları için mera ve saman yetiştiriciliği -Halk girişinin kısıtlı olduğu yerler - Gıda ürünleri (meyve bahçeleri ve üzüm bağları)	6-9	<30 mg/L	<2 NTU	200 ad/100 mL	Günlük Ölçüm	<1 mg/L

Bayrakdar vd. [68] tarafından yapılan çalışmada, sulamada yeniden kullanım için Fenton benzeri oksidasyon ve adsorpsiyon prosesleri ile tekstil atık suyunun arıtılması ve Türkiye’de minimum sulama standartlarına ulaşmak için optimum koşulları araştırmıştır. Arıtılmış atıksuyun bir sulama suyu olarak, tarımsal atığın adsorban olarak ve katalizör için destek malzemesi olarak değerlendirilmesi bu çalışmada vurgulanmıştır. Hibrit sürecin uygulanması, önerilen yöntemin gerçek tekstil atık sularının arıtılması için etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir [68].

Moretti vd. [69], tarafından yapılan çalışmada, arıtılmış belediye atıksuları ve yüzey suyu kullanarak nektarin bahçeleri sulamasının saha deneysel verilerine dayanan çevresel performansı incelenmiştir. Bu çalışma belediye atıksularının tarımda yeniden kullanımının potansiyel çevresel sonuçlarının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Ayrıca bu çalışma, suyun yeniden kullanımı uygulamalarının yaşam döngüsü analizi için fikir birliği ve standartlaştırılmış kılavuz geliştirme ihtiyacını ortaya koymaktadır [69].

Lahlou vd. [70], tarafından yapılan çalışmada, sürdürülebilir kalkınmanın bir parçası olan çiftçilerin çevreyi, ekonomiyi ve toplumu dengeleyen alternatif kaynakları benimsemek zorunda kalacağını vurgulanmıştır. Bu çalışmada sürdürülebilirlik, sosyal, çevresel ve ekonomik boyutlara dayalı atıksuyun hayvan yemi yetiştiriciliğinde yeniden kullanımını araştıran tüm çalışmaları bir araya getirmektedir [70].

B. GERİ KAZANILMIŞ ATIKSULARIN TARIMSAL SULAMADA KULLANIMI

Tarımda atıksuyun yeniden kullanımı, özellikle tarım için giderek artan tatlı su kirliliği ve talebi ile başa çıkmak için ekonomik ve çevresel olarak sağlıklı su kaynakları yönetimi tekniği olarak dünya çapında önemli bir ilgi görmektedir. Tarımsal sulama, 2030 yılına kadar % 15 ek geri çekilme ile küresel tatlı su arzının yaklaşık % 70’ini oluşturan ve küresel suyu daha da yoğunlaştıracak olan su tüketimi derecelendirmesinde özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde kıtlık krizleri en üst sırada yer almaktadır [71]–[74]. Bununla birlikte, gıda ürünlerine yönelik artan talep ve su kaynakları konusunda ortaya çıkan rekabet, tarım sektörünün sürdürülebilirliğini ve dayanıklılığını tehdit etmektedir ve araştırmacıları CO₂, gübreleme gibi tarımsal sistemlerde su kullanımını optimize etmek için yeni teknikler araştırmaya yönlendirmiştir[87]-[78]. Ayrıca, mevcut küresel gübre üretim kapasitesi, son 50 yılda altı kat artan talebi karşılayamamakta ve ekime ayrılmış arazilerle birlikte genişlemeye devam etmektedir [77]. Bu nedenle hükümetler, sürdürülebilir kalkınma içerisinde sosyal, ekonomik ve çevresel hedefleri karşılayan alternatif sürdürülebilir su kaynaklarını benimsemek zorunda kalacaklardır. Atıksuyun tarımsal faaliyetler için yeniden kullanılması, su kaynakları ve geleneksel gübreleme üzerindeki baskıyı

hafifletmek için bir fırsattır. Arıtılmış atıksu gübrelemesine geçiş, sürdürülebilir mahsul üretimine ulaşmaya yönelik bir adımı temsil ederken, yalnızca su sektöründeki değil, aynı zamanda enerji ve gıda sektörlerindeki stresi de hafifletir çünkü yeniden kullanım, ticari gübrelere ve konvansiyonel gübrelere olan talebi azaltmak için bir fırsattır. Aslında, seyreltilmiş veya arıtılmış atıksu, geleneksel su kaynaklarına kıyasla daha yüksek bir besin konsantrasyonuna sahiptir. Arıtılmış atıksu gübrelemesini kullanarak gübreleme ihtiyacını karşılamak her zaman mümkün olmasa da, uygulama ticari gübre talebinin en azından bir kısmını ikame edebilir [78].

Kardeş vd. [80], tarafından yapılan çalışmada, 4 farklı atıksu konsantrasyonlarının, 3 farklı mısır çeşidine etkisi incelenmiştir. Çalışmada arıtılmış evsel atıksu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda arıtılmış evsel atıksuyun mısır çeşitlerinde çimlenme yüzdesi üzerine %25, fide gelişimi üzerine %75 teşvik edici bir etki gösterdiği sonucuna varılmıştır. Arıtılmış atıksuların sulamada kullanımı ürün gelişimine katkı sağlarken sulama suyunda bulunan besin elementleri nedeniyle gübre kullanımındaki düşüş yeraltı su kirliliğinde de azalma sağlayacağı düşünülmektedir [80].

Egbuikwem vd. [72], tarafından yapılan çalışmada, yenilebilir mahsullerin (marul ve pancar) sulanması için musluk suyu, karışık atıksu, arıtılmış atıksu ve besin çözültüsü ile karıştırılmış musluk suyu kullanılmıştır. Bitkilerin çimlenmesi ve fenolojik özellikleri hidrofonik bir üniteye dört sulama rejimi altında bitkiler fenolojik parametrelerini ölçme göstergeleri olarak incelenmiştir. Kontrol olarak dört farklı sulama suyu ile 45 gün boyunca karıştırılarak incelenmiştir. Tohum çimlenmesi ve bitki büyümesi deneylerinin sonuçları, karışık atıksuyun tarımda yeniden kullanımı için olumlu bir gösterge olduğu görülmüştür [72].

Kaliforniya'da %48, Florida'da %19 oranında arıtılmış atıksular tarımsal sulamada kullanılmaktadır. Milano, Berlin, Paris, Londra gibi şehirler atıksularını geri kazanarak uzun zamandır tarımda kullanılmaktadır. Su kullanım miktarlarına bakıldığında tarımda (%73) ve endüstride (%11) su kullanım oranına sahiptir. Bu bağlamda oluşan atıksuların yeniden kullanılabilmesi ve deniz sularının arıtılıp içme suyu olarak kullanılabilmesi fikri oluşmuştur. Evsel atıksu fosfor-azot içeriğinden dolayı gübre özelliği bulunmakta ve ürün gelişimine destek vermektedir. Bu durumlar dikkate alındığında ön arıtımı sağlanan atıksu yeniden kullanılabilir bir hale getirilip ileri arıtım yöntemleri ile sulama suyu olarak tekrardan kullanımı sağlanabilir [80].

VI. ARITILMIŞ ATIKSULARIN YENİDEN KULLANIMI İLE İLGİLİ HALKIN GÖRÜŞÜ

Suyun yeniden kullanımı projelerini başarılı kılmak için, kamuoyu, risk analizi, parasal faydaların değerlendirilmesi ve geri dönüştürülmüş suyun çevresel etkilerinin yanı sıra ödeme istekliliği dahil olmak üzere birkaç kilit faktör dikkate alınmalıdır [81]. Bununla birlikte, sosyal faktörler, teknik faktörlere kıyasla daha etkili su yönetiminin ana zorlukları olarak kabul edilmiştir [82]. Geri kazanılmış atıksu için potansiyel pazarın değerlendirilmesi gereklidir, ancak potansiyel kullanıcılar hakkındaki sınırlı bilgi kısmen planlanan ve uygulanan yeniden kullanım arasındaki mevcut boşluğu açıklamaktadır [83].

Birkaç çalışma, arıtılmış atıksuların yeniden kullanımına ilişkin halkın algısını araştırmış ve farklı bulgular ortaya çıkarmıştır. Bu bulgular genellikle çalışma konumuna ve birçok durumda dikkate alınan topluluğun demografik bilgilerine dayanmaktadır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde Garcia-Cuerva vd. [84], tarafından yapılan çalışmada, geri kazanılan atıksuyun yeniden kullanımına yönelik genel bir tiksinden, ülkedeki arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı planlarının kabul edilebilirliğinde karşılaşılan ana zorluk olduğunu ortaya koymuştur. Katılımcıların arıtılmış atıksuyu, gıda mahsullerinin yetiştirilmesi için yeniden kullanmaya istekli olduğunu da ortaya koymuştur [84].

Akpan vd. [86], Nijerya'nın Ogun Eyaletinde yükselen bir kentsel topluluk olan Canaanland'in çeşitli amaçlarla arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımına ilişkin algılarını belirlemeyi amaçlayan bir çalışma

gerçekleştirilmiştir. Bulgular, şehrin atıksuyun yeniden kullanımının ekonomik ve çevresel faydalarının farkında olduğunu, ancak sifonlu tuvaletler, elektrik üretimi, bina inşaatı ve araba yıkama gibi daha az insan teması içeren yeniden kullanım planlarını tercih edeceğini ortaya koymuştur. En az tercih edilen seçenek ise içme amaçlı olmuştur. Topluluk ayrıca tıp doktorları, üniversite profesörleri ve uzmanlar tarafından onaylandığı sürece atıksuyun yeniden kullanımını kabul etmeye istekli olacaklarını belirtmişlerdir. Bununla birlikte araştırmaları mali teşviklerin, arıtılmış atıksuyu yeniden kullanma konusundaki genel kamu kararını etkilediğini ortaya koymuştur [85]. İtalya'nın güneydoğu bölgesinde yapılan bir araştırmada, sakinlerin özellikle de çiftçilerin yüksek bir oranı, arıtılmış atıksuyu tarımsal amaçlarla yeniden kullanmaya istekli olduklarını göstermiştir [86]. Tunus ve Ürdün'de yapılan bir algı çalışmasında ise çiftçilerin ve bölge sakinlerinin geri kazanılan atıksuyu gıda ürünlerinde kullanmayı yüksek düzeyde kabul ettiğini göstermiştir [87].

İsrail merkezli bir çalışmada, ankete katılanların yalnızca %49'unun arıtılmış atıksuyun meyve bahçesi sulaması için yeniden kullanılmasını desteklediğini ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmada, katılımcıların %95'inin arıtılmış atıksuyun kaldırım sulaması için, %96'sının yangınla mücadele için, %85'inin tuvalet sifonu için ve %62'sinin akiferlerin yeniden doldurulması için yeniden kullanılmasını desteklediğini ortaya koymuştur [88]. Ayrıca, başka bir araştırmadaki katılımcıların yalnızca içilemeyen amaçlarla arıtılmış atıksuların yeniden kullanımını desteklediklerini ortaya koymuştur [89]. Avustralya örneğinde, Dolnicar ve Schäfer [96], sıkı su kısıtlamaları ve ardından medyanın su kıtlığı çözümlerine gösterdiği ilginin eşlik ettiği beş yıllık bir kuraklık döneminin, Avustralyalıları artık arıtılmış atıksuyu bahçe sulama ve temizlik kullanımları için yeniden kullanmaya daha açık hale getirdiğini ortaya koymuştur [90]. Filistin topraklarında Deir Debwan'da, genel su kıtlığı, bölge sakinlerini alternatif su temini için kaynak aramaya zorlamıştır. Abu-Madi vd. [91], tarafından yürütülen bir araştırmada, katılımcıların %87'sinin arıtılmış atıksuyu kullanmaya istekli olduğunu, %85'inin ise arıtılmış atıksuyu ile sulanan ürünleri tüketmeye istekli olduğunu ortaya koymuştur [91]. Filistin bölgesinde tarımsal amaçlı geri dönüştürülmüş atıksuyun yüksek kabul edilebilirliği, bölgedeki sınırlı su kaynaklarının bir göstergesidir. Örneğin, Batı Şeria bölgesindeki su kıtlığı bölge sakinlerini arıtılmış atıksu gibi diğer su alternatiflerini benimsemeye ve arıtılmış atıksuyun %70'ini tarımsal üretim için kullanılmasına mecbur kılmaktadır [92].

Büyükkamaci ve Alkan [93], halkın farkındalığını ve Türkiye'de atıksu yeniden kullanım uygulamalarının kabul edilme potansiyelini araştırmıştır. Katılımcılar, sağlık riski endişeleri nedeniyle, yakın kişisel temas içermeyen uygulamalar için arıtılmış atıksuyun yeniden kullanılmasının kabul edilebilir olduğunu düşünmüşlerdir. Öte yandan, geri kazanılan suyun maliyeti Türkiye'deki bir diğer önemli kamu sorunu olmaktadır. Yanıt verenlerin çoğu yeniden kullanım alternatiflerine ilişkin olumlu bir anlayışa sahiptir. Bununla birlikte, katılımcıların bir kısmı arıtılmış suyla doğrudan insan teması durumunda, su kullanımına karşı çıkmaktadır. Konserve sebzelerin ve diğer yiyeceklerin hazırlanmasında ve içme amaçlarında geri kazanılmış su kullanımını desteklememişler [93].

VII. SONUÇ

Dünya genelinde nüfus artışı, iklim değişikliği, hızlı kentleşme, sanayileşme gibi faktörlerden dolayı su kaynaklarında ciddi oranda azalmalar görülmüş ve insanlar tarafından tatlı su tüketimi zirveye ulaşmıştır. Tüm bu nedenler alternatif su kaynaklarına olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır ve böylece atıksuların yeniden kullanımı konusu gündeme gelmiştir. Yapılan birçok çalışma arıtılmış atıksuların yeşil alan sulaması, tarımsal sulama ve endüstriyel alanda tekrar kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ancak arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı konusundaki araştırmalar halen birçok yönüyle eksiktir. Birçok ülke atıksu arıtma tesislerine sahiptir ancak arıtılmış atıksuların çoğu yeniden kullanıma uygun değildir. Bu durumda atıksu tesislerinin altyapısı düzenlenmeli ve arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili daha geniş kapsamda çalışmalar yapılmalıdır. Arıtılmış atıksuların yeniden kullanımının en büyük engellerinden biri de kamu bilinci eksikliğidir ve suyun yeniden kullanımı uygulamasının başarısı halkın kabulüne bağlıdır. Halkın suya karşı olumsuz tepkisi, su uygulamasında bazı sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle, planlama, yapım ve işletme aşamalarında kamuoyu önemlidir.

Yapılan çalışmalar sonucu göstermiştir ki halkın çoğunluğu arıtılmış atıksuların yakın temaslı yeniden kullanımına olumlu bakmamaktadır. Atıksuların yeniden kullanımı için var olan atıksu arıtma tesislerinin arıtılan atıksuların yeniden kullanılabilceği şekilde revize edilmeli yeni inşa edilecek tesisler de bu doğrultuda inşa edilmelidir. Ayrıca atıksuların yeniden kullanımı konusunda halk bilinçlendirilmelidir.

Dünyada birçok ülke deniz sularını arıtarak yaşanan su yetersizliğini aşmaya çalışmaktadır. Deniz suyu herhangi bir arıtmadan geçirilmeden sanayi tesislerinde, endüstriyel alanlarda, turizm sektöründe, maden çıkarımlarında, taş ve beton yıkamalarında, meskenlerin pisuarlarında kullanılabilir. Deniz suyu arıtılıp temiz su elde edildiği zaman endüstriyel, tarımsal, kentsel ve mekânsal alanlarda kullanılabilir.

Özetle, sürdürülebilirliğin sağlanması için atıksuların yeniden kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Bu konuda yapılacak çalışmalarda herkes üzerine düşen görevi yapmalı, eğitimler ile halkın bilinçlendirilmesi sağlanmalı ve mevzuatlarla gerekirse yaptırımların olması sağlanmalıdır.

Suyun gerçek değeri kaybedilince anlaşılacak ancak biz bu değerli emaneti kaybetmeden korumalı ve gelecek nesillere aktarmalıyız. Var olan sularımız korunmalı, tasarruflu kullanılmalı ve kullanım alanına göre arıtımı yapılarak geri dönüşümü sağlanmalıdır.

VIII. KAYNAKLAR

- [1] M. A. Baran, “Dünyanın mevcut su potansiyeli ve deniz suyu arıtımı,” *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, c. 12, s. 45, ss. 71–84, 2017.
- [2] Ö. Demir, M. Yıldız, Ü. Sercan ve C. Ş. Arzum, “Atıksuların geri kazanılması ve yeniden kullanılması,” *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, c. 2, s. 2, ss. 1–14, 2017.
- [3] I. C. Escobar, “An overview of the global water situation,” In *Sustainability Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 3–5, 2010.
- [4] S. Adalı ve M. Yalılı Kılıç, “Arıtılmış atıksuların tarımsal sulamada kullanımı: İznik örneği,” *Uluslararası Biyosistem Mühendisliği Dergisi*, c.1, s. 1, ss. 12–23, 2020.
- [5] Keith Kennedy, "The united nations world water development report 2," UNESCO, London, Paris, Nov. 2006.
- [6] A. Katip, “Arıtılmış atıksuların yeniden kullanım alanlarının değerlendirilmesi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 7, s. 2, ss. 541–557, 2018,
- [7] Bilim ve Aydınlanma Akademisi. (2020, 19 Mayıs). *Su kaynaklarının mevcut durumu*, Kolektif Yaşamı Kurgulama Bilim Alanı Su Politikaları Komisyonu, [Çevrimiçi]. Erişim: <http://bilimveaydinlanma.org/su-kaynaklarinin-mevcut-durumu>.
- [8] Çevre TV. (2022, 10 Ocak). *Tuvaletten lavaboya su döngüsü , atıksular içme suyu olarak kullanılır mı?*, [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.youtube.com/watch?v=jnkxcnpsxok>
- [9] R. Ilgar, “Dünya su yönetimi ve su eğitimi,” *20. Usenix Güvenlik Sempozyumu*, San Francisco, CA, Amerika Birleşik Devletleri, 2011, ss 395–410.
- [10] İnsamer. (2022, 30 Ocak). *Küresel su sorunu* [Çevrimiçi]. Erişim: https://insamer.com/tr/kuresel-su-sorunu_3479.html

- [11] Tarım ve Orman Bakanlığı 1. Su Şurası, Su güvenliği ve atıksu hizmetleri grubu çalışma belgesi, Türkiye, 2021.
- [12] M. Ak and İ. Top, “Use of treated municipal wastewater for agricultural irrigation,” *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, Vol. 24, No. 6, Pp. 1161–1168, 2018.
- [13] DHA. (2015, 28 Ağustos). *Türkiye su kıtlığı çekecek ülkeler arasında* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.hurriyet.com.tr/dunya/turkiye-su-kitligi-cekecek-ulkeler-arasinda-29933101>
- [14] T. Çakmakçı ve Ü. Şahin, “Evaluation of treated wastewater quality in terms of irrigation water within the framework of related legislation : the case of van province,” *Mustafa Kemal University Journal of Agricultural Sciences*, vol. 24, pp. 249–256, 2019.
- [15] F. O. Topaç ve Ö. Ö. Acar, “Paket atıksu arıtma tesisi çıkış sularının sulama suyu olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknol. Dergisi*. s. 19, pp. 858–865, 2020.
- [16] S. Arıman ve S. Koyuncu, “Geri kazanılmış atıksuların yeşil alan sulamasında kullanımı,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, c. 9, s. 1, ss. 48–56, 2020.
- [17] İnsamer. (2021, 23 Nisan). *Su kıtlığı* [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.insamer.com/tr/su-kitligi_3928.html
- [18] United Nations. (2022, Mar 08). *Sustainable development goal 6 on water and sanitation (sdg 6)* [Online]. Available: <https://www.sdg6data.org/>.
- [19] F. Dalstein ve A. Naqvi, “21st century water withdrawal decoupling: a pathway to a more water-wise world?,” *Water Resour. Econ.*, vol. 38, p. 100197, 2022.
- [20] Dünya Gazetesi. (2011, 02 Nisan). *Kullanılabilir su kaynaklarına ilişkin dünya ve türkiye gerçekleri* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.dunya.com/gundem/kullanilabilir-su-kaynaklarina-iliskin-dunya-ve-turkiye-gercekleri-haberi-141922>.
- [21] GZT. (2018, 17 Ekim). *Dünyadaki tatlı su rezervleri: ‘su’ bir savaşın sebebi olabilir mi?* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.gzt.com/jurnalist/dunyadaki-tatli-su-rezervleri-su-bir-savas-in-sebebi-olabilir-mi-3458472>.
- [22] Eurostat. (2020, May 10). Environment-Water. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/water>.
- [23] United Nations. (2022:) *Progress on drinking water (sdg target 6.1)* [Online]. Available: <https://www.sdg6data.org/indicator/6.1.1>.
- [24] Sustainable Development Goals. (2021, Jul 11). *Water and sanitation* [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>.
- [25] J. Busby, “Water and u.s. national security.council on foreign relations”, Council on Foreign Relations, New York, America, Rep. 18, 2017.
- [26] T. Luo, R.S. Young, P. Reig, “Aqueduct projected water stress country rankings,” World Resources Institute, Washington, DC, Rep. 08, 2015.
- [27] D. M. Degefu, H. Weijun, L. Zaiyi, Y. Liang, H. Zhengwei, And A. Min, “Mapping monthly water scarcity in global transboundary basins at country-basin mesh based spatial resolution,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 2144, 2018.

- [28] M. Kummu, J. H. A. Guillaume, H. de Moel, S. Eisner, M. Flörke, M. Porkka, S. Siebert, T. I. E. Veldkamp and P. J. Ward “The world’s road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, pp. 38495, 2016.
- [29] N. D. Mu’azu, I. R. Abubakar, And N. I. Blaisi, “Public acceptability of treated wastewater reuse in saudi arabia: implications for water management policy,” *Sci. Total Environ.*, vol. 721, pp. 137659, 2020.
- [30] O. Ohwo and A. Abotutu, “Access to potable water supply in nigerian cities evidence from yenagoa metropolis,” *Am. J. Water Resour.*, vol. 2, no. 2, pp. 31–36, 2014.
- [31] D. O. Omole, “Sustainable groundwater exploitation in nigeria,” *J. Water Resour. Ocean Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 9, 2013.
- [32] R. Hochstrat, T. Wintgens, T. Melin and P. Jeffrey, “Assessing the european wastewater reclamation and reuse potential — a scenario analysis,” *Desalination*, vol. 188, no. 1–3, pp. 1–8, 2006
- [33] M. Salgot, “Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues,” *Desalination*, vol. 218, no. 1–3, pp. 190–197, 2008.
- [34] D. Bixio, C. Thoeye, J. De Koning, D. Joksimovic, D. Savic, T. Wintgens, T. Melin, “Wastewater Reuse in Europe,” *Desalination*, vol. 187, no. 1–3, pp. 89–101, 2006,
- [35] B. Maryam and H. Büyükgüngör, “Wastewater reclamation and reuse trends in turkey: opportunities and challenges,” *J. Water Process Eng.*, vol. 30, pp. 100501, 2019.
- [36] B. Kendirli, B. Çakmak, and Z. Gökalp, “Assessment of water quality management in turkey, water international,” *Water Int.*, vol. 30, no. 4, pp. 446–455, 2005
- [37] B. Sarımeahmetoğlu, “Su güvenliği,” *Erciyes Üniversitesi Vet. Fakültesi Dergisi.*, c. 13, s. 3, ss. 141–146, 2019.
- [38] DSİ. “Faaliyet raporu,” T.C. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye, Rap. 2012.
- [39] M. Karataş ve S. Çevik, “Stratejik doğal kaynak olarak su ve türkiye’nin konumunun değerlendirilmesi,” *Akademik Araştırmalar Dergisi*, c. 45, s. 12, ss. 1–29, 2010.
- [40] DSİ. (2022, 14 Aralık). *2022 Yılı resmi su kaynakları istatistikleri* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.dsi.gov.tr/sayfa/detay/754>.
- [41] T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı. (2019). *Ulusal Su planı* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.tarimorman.gov.tr/sygm/belgeler/nhyp%20deniz/ulusal%20su%20planı.pdf>
- [42] M. Ay, Ö. Kişi, “Türkiye’deki yüzey sularının durumu ve kalitesi,” *5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2011, ss. 418-428.
- [43] Ö. L. Şen, “Türkiye’de iklim değişikliğinin bütünsel resmi,” *II. Türkiye iklim değişikliği kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2013, ss. 1-7.
- [44] Epiaş Şeffaflık Platformu. (2022, 20 Nisan). *Aktif doluluk* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://seffalik.epias.com.tr/transparency/>.
- [45] X. Li, C. Liu, W. Yin, T. H. Chong and R. Wang, “Design and development of layer-by-layer

based low-pressure antifouling nanofiltration membrane used for water reclamation,” *J. Memb. Sci.*, vol. 584, pp. 309–323, 2019,

[46] G. Mancuso, S. Lavrnić and A. Toscano, “Reclaimed water to face agricultural water scarcity in the mediterranean area: an overview using sustainable development goals preliminary data,” vol. 5, 2020, pp. 113–143.

[47] Ec, “European commission. regulation (ec) no 2020/741 of the european parliament and of the council of 25 may 2020 on minimum requirements for water reuse, ” The Official Journal Of The European Union L, vol. 177, no. 63, pp. 32–55, 2020.

[48] B. Züleyha and A. Aysun, “Evsel Nitelikli Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularının Tarımsal Sulamada Kullanılabilirliği,” *Iğdır Üni. Fen Bilimleri Inst. Dergisi*, c. 7, s. 4, ss. 69–75, 2017.

[49] F. İlhan, “Geleceğin dünyasında membran prosesler ve su / atıksu arıtımında kullanımı,” *Geleceğin Dünyasında Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar 2020 Doğa Bilimleri Ve Ziraat*, 1. Baskı Ekin Yayınevi, Bursa, Türkiye, ss.37-55, 2020

[50] G. E. Üstün, T. Can, G. Küçük, “Binalarda yağmur suyu hasadı,” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 25, ss. 1593-1610, 2020.

[51] A. Pekşen, “Dünyadaki su kıtlığına çözüm: atık suların güvenli arıtımı ve kullanılması mümkündür,” *Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi*, c. 142, ss.48-55. 2015.

[52] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2014, Eylül 24-25). Türkiye’de atıksu yönetimi [Çevrimiçi]. Erişim: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/tay/webmenu/webmenu13378.pdf>

[53] A. Giwa, A. Dindi and J. Kujawa, “Membrane bioreactors and electrochemical processes for treatment of wastewaters containing heavy metal ions, organics, micropollutants and dyes: recent developments,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 370, pp. 172–195, 2019.

[54] M. Y. Kılıç, “Atıksuların arıtımı ve yeniden kullanımında halkın görüşü: bursa örneği araştırması,” *Doğal Afetler Ve Çevre Derg.*, vol. 90, no. 224, pp. 123–132, 2018.

[55] G. Özgüroğlu, “Gri suyun fenton prosesi ile arıtımı,” Yüksek Lisans, Çevre Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, Türkiye, 2019.

[56] Z. Ş. Ayas, M. Türkmenoğlu ve A. Aşan, “Atıksuların yeniden kazanımında, yapay sulak alanların önemi ve işletme problemleri,” *13. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, Van, Türkiye,2018, ss.7491-7498

[57] X. Y. Ma, Q. Li, X. C. Wang, Y. Wang, D. Wang and H. H. Ngo, “Micropollutants removal and health risk reduction in a water reclamation and ecological reuse system,” *Water Res.*, vol. 138, pp. 272–281, 2018.

[58] M. Semreen, A. Shanableh, L. Semerjian, H. Alniss, M. Mousa, X. Bai and Kumud Acharya “Simultaneous determinationof pharmaceuticals by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry: a case study from sharjah sewage treatment plant,” *Molecules*, vol. 24, vo. 3, pp. 633, 2019.

[59] T. Zhou, T.-T. Lim, S.-S. Chin and A. G. Fane, “Treatment of organics in reverse osmosis concentrate from a municipal wastewater reclamation plant: feasibility test of advanced oxidation processes with/without pretreatment,” *Chem. Eng. J.*, vol. 166, no. 3, pp. 932–939, 2011.

[60] B. Van Der Bruggen, “Chapter 3 the global water recycling situation,” In *Sustainability Science*

and *Engineering*, vol. 2, no. C, Elsevier, 2010, pp. 41–62.

[61] E. H. Murathan, “Suların geri kazanımı ve yeniden kullanımı,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.

[62] İ. Arslan-Alaton, A. Tanik, S. Ovez, G. İskender, M. Gürel, D. Orhon. “Reuse potential of urban wastewater treatment plant effluents in Turkey: a case study on selected plants,” *Elsevier, Desalination*, vol. 215, no. 1-3, pp. 159-165, 2007.

[63] D. Fatta, I.A. Alaton, G. Gökçay, M.M. Rusan, O. Assobhei, M. Mountadar and A. Papadopoulos, “Wastewater reuse: problems and challenges in cyprus, turkey, jordan, and morocco,” *Eur. Water*, vol. 11, no. 12, pp. 63–69, 2005,

[64] A. Tanik, A. Ekdal, F. G. Babuna and D. Orhon, “Recent practices on wastewater reuse in turkey,” *Water Sci. Technol.*, vol. 51, no. 11, pp. 141–149, 2005.

[65] D. Fatta and S. Anayiotou, “Medaware project for wastewater reuse in the mediterranean countries: an innovative compact biological wastewater treatment system for promoting wastewater reclamation in cyprus,” *Desalination*, vol. 211, no. 1–3, pp. 34–47, 2007.

[66] T. Asano, A. Bahri, “Global challenges to wastewater reclamation and reuse.on water front,” *Journal Of Water Process Engineering*, vol. 2, pp. 64–72, 2011.

[67] T. Başkan, “Arıtılmış evsel atıksuların tarımda sulama amaçlı yeniden kullanılması, ” Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Programı: Çevre Bilimleri ve Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye 2006.

[68] M. Bayrakdar, S. Atalay and G. Ersöz, “Efficient treatment for textile wastewater through sequential photo fenton-like oxidation and adsorption processes for reuse in irrigation,” *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 7, pp. 9679–9690, 2021.

[69] M. Moretti, S. Van Passel, S. Camposeo, F. Pedrero, T. Dogot, P. Lebailly and G.A. Vivaldi “Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the mediterranean coastal region,” *Sci. Total Environ.*, vol. 660, pp. 1513–1521, 2019.

[70] F.-Z. Lahlou, H. R. Mackey and T. Al-Ansari, “Wastewater reuse for livestock feed irrigation as a sustainable practice: a socio-environmental-economic review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 294, 126331, 2021.

[71] P. N. Egbuikwem, J. C. Mierzwa and D. P. Saroj, “assessment of suspended growth biological process for treatment and reuse of mixed wastewater for irrigation of edible crops under hydroponic conditions,” *Agric. Water Manag.*, vol. 231, 106034, 2020.

[72] Food and Agriculture Organization of the United Nations, (2022, Nov 18). International conference on agricultural statistics [Online]. Availabl: <https://www.fao.org/food-agriculture-statistics/resources/events/icas/en/>

[73] The World Bank. (2022, Oct 05). *Water in Agriculture* [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>

[74] United Nations. (2017). *The sustainable development goals report* [Online]. Available: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2017/the-sustainable-development-goals-report-2017.pdf>

[75] I. Ghiat, R. Govindan, S. Namany and T. Al-Ansari, “Network optimization model for a sustainable supply network for greenhouses,” *In Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 48, pp.

1885–1890, 2020.

- [76] I. Ghiat, F. Mahmood, R. Govindan, and T. Al-Ansari, “CO₂ utilisation in agricultural greenhouses: a novel ‘plant to plant’ approach driven by bioenergy with carbon capture systems within the energy, water and food nexus,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 228, p. 113668, 2021.
- [77] K. Chojnacka, A. Witek-Krowiak, K. Moustakas, D. Skrzypczak, K. Mikula and M. Loizidou, “A transition from conventional irrigation to fertigation with reclaimed wastewater: prospects and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 130, p. 109959, 2020.
- [78] A. F. Da Fonseca, U. Herpin, A. M. De Paula, R. L. Victória and A. J. Melfi, “Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for brazil,” *Scientia Agricola*, vol. 64, no. 2. *Scientia Agricola*, pp. 194–209, 2007.
- [79] Y. M. Kardeş, M. Karaer, Ö. D. E. Köse, Z. Mut, “Arıtılmış atıksu uygulamalarının üç farklı mısır (zea mays l.) çeşidinde çimlenme ve fide gelişim özelliklerine etkisi,” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cl. 7, s. 1, ss. 113–120, 2020.
- [80] F. İlhan, “Geleceğin dünyasında membran prosesler ve su/atıksu arıtımında kullanımı,” *Geleceğin Dünyasında Bilimsel Ve Mesleki Çalışmalar 2020 Doğa Bilimleri Ve Ziraat*, 1. Baskı. Bursa, Türkiye:Ekin Yayınevi, 2020, ss.37–55.
- [81] V. Lazarova, B. Levine, J. Sack, G. Cirelli, P. Jeffrey, H. Muntau, M. Salgot and F. Brissaud “Role of water reuse for enhancing integrated water management in europe and mediterranean countries,” *Water Science and Technology*, vol. 43, no. 10, pp. 25–33, 2001.
- [82] S. Ricart, A. Rico and A. Ribas, “Risk-yuck factor nexus in reclaimed wastewater for irrigation: comparing farmers’ attitudes and public perception,” *Water*, vol. 11, no. 2, pp. 187, 2019.
- [83] M. Abu Madi, O. Braadbaart, R. Al-Sa’ed and G. Alaerts, “Willingness of farmers to pay for reclaimed wastewater in jordan and tunisia,” *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 3, no. 4, pp. 115–122, 2003.
- [84] L. Garcia-Cuerva, E. Z. Berglund, and A. R. Binder, “Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for water reuse in the u.s.,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 113, pp. 106–115, 2016.
- [85] V. E. Akpan, D. O. Omole, And D. E. Bassey, “Assessing the public perceptions of treated wastewater reuse: opportunities and implications for urban communities in developing countries,” *Heliyon*, vol. 6, no. 10, p. E05246, 2020.
- [86] R. Saliba, R. Callieris, D. D’agostino, R. Roma and A. Scardigno, “stakeholders’ attitude towards the reuse of treated wastewater for irrigation in mediterranean agriculture,” *Agric. Water Manag.*, vol. 204, pp. 60–68, 2018.
- [87] M. Abu-Madi, R. Al-Sa’ed, O. Braadbaart, G. Alaerts, “Perceptions of farmers and public towards irrigation with reclaimed wastewater in jordan and tunisia,” *Arab Water Council Journal*, vol. 1, c. 2, pp. 18-31, 2008.
- [88] E. Friedler, O. Lahav, H. Jizhaki and T. Lahav, “Study of urban population attitudes towards various wastewater reuse options: israel as a case study,” *J. Environ. Manage.*, vol. 81, no. 4, p. 360–370, 2006.
- [89] M. Oteng-Peprah, M. A. Acheampong and N. K. Devries, “Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—a review,” *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 229, no. 8, pp.

1–16, 2018.

[90] S. Dolnicar and A. I. Schäfer, “Desalinated versus recycled water: public perceptions and profiles of the accepters,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 2, pp. 888–900, 2009.

[91] M. Abu-Madi, Z. Mimi, and N. Abu-Rmeileh, “Public perceptions and knowledge towards wastewater reuse in agriculture in deir debwan,” *First Symposium on Wastewater Reclamation and Reuse for Water Demand Management in Palestine*, Palestine, Israel, 2008, pp. 1-9.

[92] L. S. Mcneill, M. N. Almasri and N. Mized, “A sustainable approach for reusing treated wastewater in agricultural irrigation in the west bank - palestine,” *Desalination*, vol. 248, no. 1–3, pp. 315–321, 2009.


[93] N. Buyukkamaci and H. S. Alkan, “Public acceptance potential for reuse applications in turkey,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 80, no. 1, Pp. 32–35, 2013.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Contact Lens that Enabled Early Diagnosis for Diseases Induced by Oxidative Stress and Potassium Ion (K⁺) in Ocular Tissues

 Yaşar ŞEN^{a,*}

^a Department of Biomedical Engineering Faculty of Düzce University, Düzce, TURKEY

* Corresponding author's email address: first.yasarsen@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1352248

ABSTRACT

The present study used sensor technology to design a lens that could replace a doctor. It consists of an oxidative stress sensor, a (K⁺) ion sensor and a pressure sensor placed on a Lotrafilcon A silicone hydrogel lens for early diagnosis, as well as a recording and display device that the user can use on their own, recording 24 hours a day and alerting when needed. Additionally, power will be provided to the sensors for data transmission via an external wireless power transfer device. The oxidative stress sensor detects oxidative stress in the structures of the eye and indicates that the patient may have an abnormal condition like diabetic retinopathy, glaucoma and cataracts. Likewise, the (K⁺) ion sensor detects the (K⁺) ion concentration in the ocular cells and detects abnormal conditions where the concentration is elevated. The pressure sensor allows the intraocular pressure of patients diagnosed with glaucoma to be kept under control. This way, diseases can be diagnosed early, and continuous monitoring and control of the disease will be ensured. This will prevent the user from having to make frequent visits to the hospital, while also reducing the workload.

Keywords: Cataract, Contact lens, Diabetic retinopathy, Migraine, Oxidative stress, Potassium ion (K⁺) sensor.

Oküler Dokularda Oksidatif Stres ve Potasyum İyonunun (K⁺) Tetiklediği Hastalıklarda Erken Teşhis İmkânı Sağlayan Kontakt Lens

ÖZ

Çalışmada, bir doktorun yerini alabilecek bir lens tasarlamak için sensör teknolojisi kullanıldı. Erken teşhis için silikon hidrojel lens olan Lotrafilcon A üzerine yerleştirilecek oksidatif stres sensörü, (K⁺) iyon sensörü ve basınç sensörünün yanı sıra kullanıcının kendi başına kullanabileceği bir kayıt ve görüntüleme cihazından oluşur, 24 saat kayıt yapar ve gerekirse uyarı verir. Ek olarak, harici bir kablosuz güç aktarım cihazı aracılığıyla veri iletimi için sensörlere güç sağlanacaktır. Kullanılan oksidatif stres sensörü ile göz yapılarında oksidatif stres saptanır, hastada diyabetik retinopati, glökom ve katarakt için anormal bir durumun ortaya çıkabileceği anlaşılır. Aynı şekilde (K⁺) iyon sensörü de oküler hücrelerdeki (K⁺) iyon konsantrasyonunu tespit eder, konsantrasyonun arttığı anormal durumları tespit eder. Kullanılacak basınç sensörü ile glökom tanısı alan hastaların basıncı kontrol altında tutulur. Oluşabilecek hastalıkların erken teşhisi, eğer bir hastalık varsa hastalığın sürekli izlenmesi ve kontrolü sağlanacaktır. Bu, kullanıcının sürekli hastaneye gitmesini önlerken aynı zamanda iş yükünü de azaltacaktır.

Anahtar Kelimeler: Katarakt, Kontakt lens, Diyabetik retinopati, Migren, Oksidatif stres, Potasyum iyon (K⁺) sensörü

I. INTRODUCTION

People's desire for individualized healthcare has grown dramatically as their living levels and quality of life have improved. Despite this desire, proper illness diagnosis and therapy are presently available. [1]

Since the eye is a structure directly connected to nerve cells, the damage caused by these diseases in the body is usually irreversible. For this reason, the early detection opportunity provided by the use of lenses is a promising method to prevent these damages. Wearable medical gadgets that are personalized to the individual, convenient, and capable of getting real-time information about the health of the human body are in high demand.[2-7]

Previous studies on electronic contact lenses have generally focused only on the pressure parameter in the eye and aimed to control glaucoma, not diagnose it.

For example, in the 11th issue of *Clinical Ophthalmology* published in 2017, Grace E. Dunbar, Bailey Yuquan Shan and Ahmad A. Aref used a CLS Triggerfish device with a soft silicone contact lens that remained on the ocular surface for 24 hours. They used pigs in their experiments and showed a high correlation between CLS output and intraocular pressure. The working principle of the Triggerfish cls is simply stated as follows; the contact lens receives information from the power meter and transmits it to an adhesive antenna placed on the patient's eye area, and the antenna in turn sends information to the wearable recorder worn by the patient. [8]

Because magnesium homeostasis is so tightly linked to calcium, sodium, and potassium homeostasis, any changes in magnesium homeostasis are bound to be associated with calcium, sodium, and potassium homeostasis, and vice versa. Clearly, changes in magnesium homeostasis can have a major impact on cellular and molecular activities, as well as constitute the basis of various clinical diseases. The lens, in particular, is as vulnerable to alterations in magnesium homeostasis as any other organ in the body. The structural and functional integrity of the lens, which is critical in transmitting light to the retina, is heavily reliant on the preservation of intracellular and extracellular ionic homeostasis. [9]

As a result, failure of Na^+/K^+ -ATPase in the presence of magnesium deprivation results in intracellular potassium depletion (Bara et al. 1993; Iezhitsa 2005; Iezhitsa and Spasov 2008) and intracellular sodium buildup. [10-11]. Oxidative stress is known to play a significant role in the pathogenesis of age related macular degeneration . [12]

The ocular disorders related to the anterior segment of the eye, including dry eye, keratoconus, conjunctiva, uveitis, and cataract, share similar characteristics that facilitate their diagnosis. Moreover, these diseases present a complex pathophysiology related to oxidative stress, tissue damage, and inflammatory pathway. [13]

The aim of this study is to enable early diagnosis of diseases such as diabetes, glaucoma, migraine and cataracts that cause specific symptoms in the eye, as well as diseases caused by specific reactions in the structures of the eye, using sensors embedded in a silicone hydrogel lens implanted in the eye.

In this study, the initial symptoms of diseases that can be diagnosed, the progression of the diseases and the damages to the person as a result of the diseases are explained in detail under the section titled literature summary. The equipment used in the lens and its principle of operation are detailed in the section titled materials and method.

Thanks to the lens designed in this study, it will be possible to develop more personalized treatment methods for users and improve the quality of their lives.

II. SUBJECT, SCOPE AND LITERATURE SUMMARY

The accuracy of IOP measured by conventional techniques such as Goldmann applanation tonometry is highly dependent on corneal stiffness.

In addition, it usually requires a visit to the doctor's office. Therefore, multiple or continuous measurement of IOP in glaucoma patients may better aid in the diagnosis, monitoring and management of the disease [14].

In such cases, telemetric detection is a viable way to meet this requirement. Thanks to telemetry, data can be collected externally from implanted sensor devices without wires.[15]

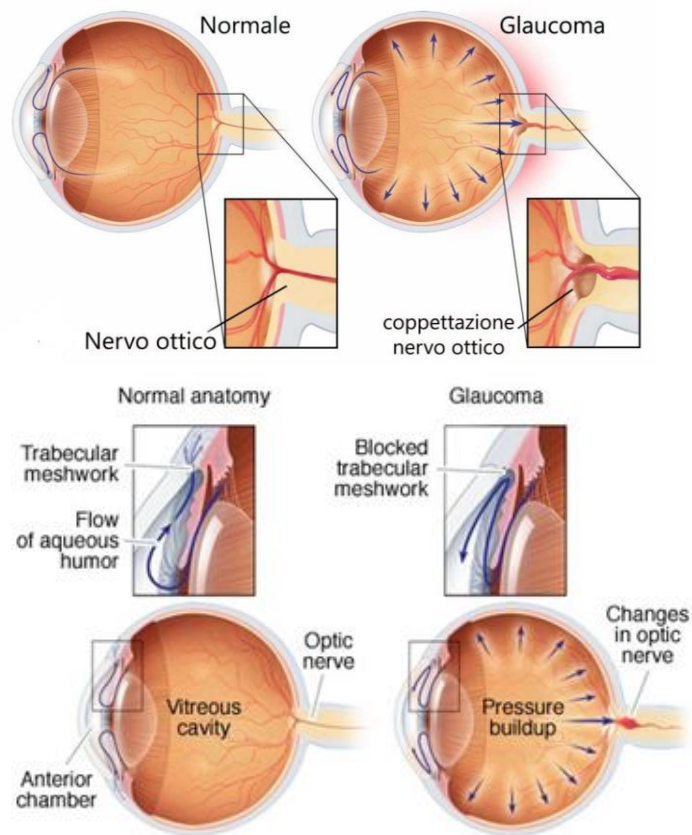


Figure 1. The appearance of the optic nerve in the normal eye and the eye with glaucoma [15]

In most glaucoma patients, when fluid intake is less than the flow rate, intraocular pressure rises above the normal range due to increased resistance to fluid flow in the exit pathway, which leads to the loss of optic nerve tissue. Untreated peripheral vision problems can cause blindness [16]. This condition is painless and cannot be recognized directly or indirectly without pressure measurements. Therefore, accurate measurement of intraocular pressure is important in glaucoma patients [17].

Advanced diagnostic tools utilizing novel Micro-Electromechanical Systems (MEMS) have been pursued to provide detailed and continuous IOP histories[18]. However, from a practical point of view, the most difficult obstacle to clinical use is the surgical piercing of the cornea by the practicing clinician. Due to this, there is a demand for a minimally invasive sensor. Tonometry-like systems for IOP measurement that can be placed in the echocardiographic field have emerged as a new and exciting research area for MEMS applications. [19].

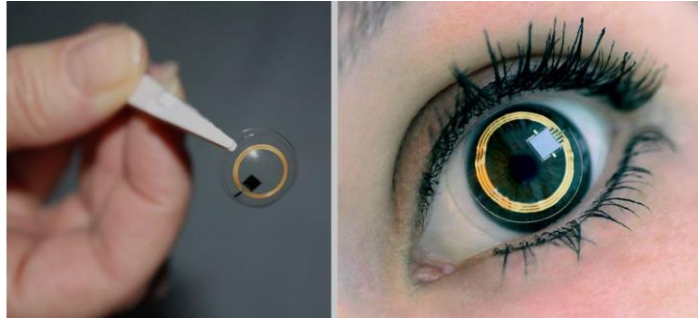


Figure 2. A lens study with Bio-MEMS sensors .[18]

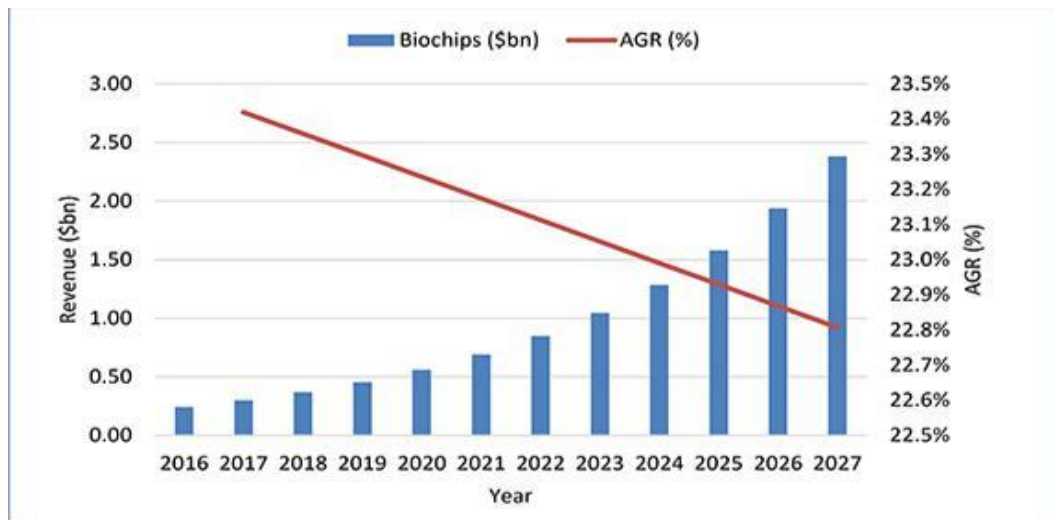


Figure 3. Graph of Global implantable Bio-MEMS and Biochip usage.[19]

Studies in Iran have shown that the mortality rate from some common diseases is very high and most of the deaths in these patients are due to lack of timely medical attention. It was concluded that the risk of death would be greatly reduced if patients were diagnosed or given medical care in a timely manner [20]. Using the Internet of Things, we developed glasses that have sensors inside to detect your eyes and send relevant information such as blood flow and eye fatigue to your smartphone. Based on appropriate algorithms, the smartphone detects optic nerve hypoperfusion, congestion or damage and sends an alert to the patient's mobile device.

This information, together with patient data, can be sent to doctors and emergency hospitals. Emergency hospitals can take immediate initiatives for patients. The patient can then be transferred to a medical center. Based on the information that the Internet of Things sends to health centers, doctors can take the necessary steps before patients reach the hospital. It can protect patients from the risk of blindness and complications. The glasses use voice alerts to notify you of the results. The color of the glasses frame indicates the patient's condition. Green: good condition; yellow: warning; red: danger for emergency patients. The glasses can also detect eye diseases such as cataracts, intraocular pressure, glaucoma and age-related macular degeneration (AMD). [20] Eye disease notifications and data analyzed over time can be displayed graphically, along with information about the patient's condition. In an emergency, the data can be sent to an ophthalmologist.

The advantages of this method are as follows.

1. Identifies possible eye problems.
2. Cheap and easy to use; allows everyone to get information at every level.
3. Prolongs healthy vision.
4. Reduces medical costs.

5. Language assistance can be provided for the visually impaired.
6. Accurate communication of information regarding eye health to ophthalmologists, emergency patients and their relatives.
7. Specification of the geographical location of patients and their relatives using GPS for emergencies.
8. Early detection of stroke and macular degeneration risk, preventing blindness and complications. [20]

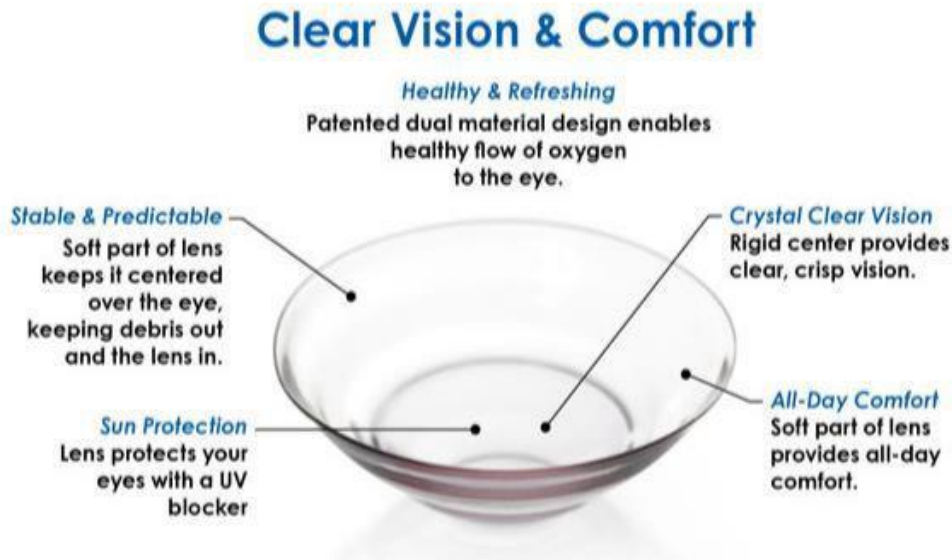


Figure 4. The convenience and advantages of the lens to be used in the Project .[20]

Diabetic eye disease is a group of eye diseases that affect people with diabetes. These diseases include diabetic retinopathy, diabetic macular edema (DME), cataracts, glaucoma and others. All types of diabetic eye disease can lead to severe vision loss and blindness. Diabetic retinopathy is a change in the blood vessels of the retina that causes bleeding, leaking and blurred vision. Diabetic retinopathy is the leading cause of blindness in diabetics and working-age adults. DME is a result of diabetic retinopathy, which causes swelling of the macula, a region of the retina. Early detection, treatment, regular check-ups and care can prevent vision loss due to diabetic eye disease. [21]

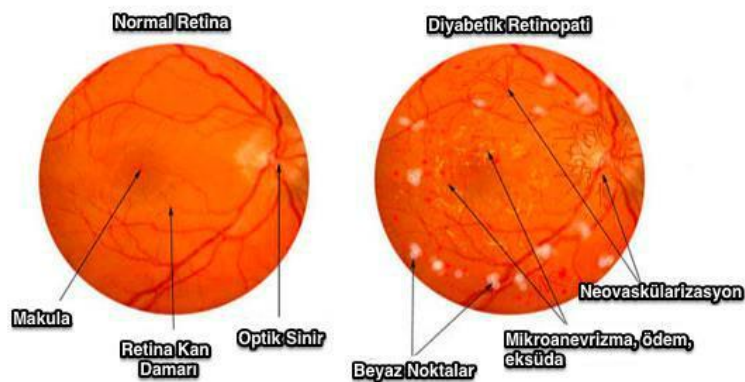


Figure 5. Retina image in normal eye and diabetic eye [21]

Since migraine and glaucoma are two diseases in which vascular and neurologic factors are effective, we think that CCT (central corneal thickness) value in migraine patients is a point that should be paid special attention in the evaluation of glaucoma.[22.23].

CCT value has gained great importance in the clinical examinations of patients with glaucoma and OHT in recent years. The IOP value has been found to be lower than normal in patients with thin corneas and higher in patients with thick corneas.[24,26].

When determining the corneal thickness of the patient, taking at least 3 measurements close to each other, performing the measurements at approximately the same time of the day and excluding corneal pathologies in patient selection may increase the reproducibility of pachymetry. Age and corneal curvature may affect corneal thickness over the years. Studies have shown that patients with ocular hypertension have a thicker CCT and those with normotensive glaucoma have a thinner than normal CCT [27,28].

Past literature and related scientific data shed light on the importance of this particular subject and the growing interest around it. Studies on the diagnosis of eye disease are generally focused on glaucoma, and there is a lack of studies regarding the use of lenses in diagnosing other eye diseases.

Lenses, one of the most common and comfortable to use medical devices today, will become even more useful when intergrated with the features focused on in this study and will soon be a life-saving device for patients who have a genetic predisposition or are in an at-risk group.

III. UNIQUE VALUE

Our work draws attention to international research in related scientific fields and seeks solutions to current problems It focuses on early diagnosis of diseases such as diabetes, glaucoma, migraine and cataracts, which are frequently encountered in certain age groups due to genetic predisposition. This study also focuses on designing a system that is easy to use while providing accurate data efficiently.

Since the lens used in the study is a silicone hydrogel contact lens suitable for continuous use, it will be very easy for users to integrate this lens into their daily lives. As a result, patients who need to visit the hospital frequently for disease control will be able to reduce the frequency of visits, which will reduce the workload of doctors. Furthermore, patients will not need to visit the hospital as often during treatment and follow-up, which will help prevent overcrowding in hospitals. This will also provide an effective solution to combat infections and diseases that can be transmitted within the hospital, preventing the spread of infectious diseases in these environments. It is expected that there may be some problems that may arise due to the customization, cost and in-vivo use of the lens. Previous studies on electronic contact lenses have drawn attention to problems such as the need for power supply when a wireless antenna is not used.

IV. MATERIALS AND METHOD

Certain calculations need to be performed to accurately measure, identify and diagnose various problems such as retinal detachment, gas bubbles in the eye, etc. and to develop good treatment plans.

Classically, the eye P-V relationship is characterized by the Friedenwald coefficient of eye hardness, K. According to Gloster (1965), it correlates relative changes in intraocular pressure (P) with relative changes in intraocular volume (V).

$$\frac{DP}{P} = k \frac{DV}{V} = KDV$$

(1)

The relationship between corneal cupping pressure and volume can be defined in terms of ocular compliance as follows:

$$\phi = \frac{DV_{\phi}}{DP} \approx \frac{V_{\phi}}{P}$$

(2)

In other words $\phi = DV_{\phi}DP \approx V_{\phi}P$

In these formulas, intraocular pressure (P) represents the change in intraocular volume (V ϕ) per unit change in intraocular pressure (P). ϕ can also be interpreted as the slope of the relationship between eye volume and pressure. A smaller slope indicates a less flexible or stiffer corneal shell. $\phi = 1/(KP)$. As can be seen in the Friedenwald model (equation 1), eye alignment is highly dependent on intraocular pressure.

Alternatives to the Friedenwald model describing the P-V relationship of the eye can be derived from first principles (McEwen and St. Helen, 1965; Woo et al., 1972; Collins and van der Werff, 2013). For example, using Laplace's law and Fung's structural equation for the collagen keratoscleral envelope $\sigma = A(e^{\alpha \epsilon} - 1)$ (Fung, 1967), and assuming small stresses and uniform mechanical properties, one obtains the formula for ocular compatibility.

$$\phi = \phi_R \left(\frac{P_r, \phi + \gamma}{P + \gamma} \right)$$

(3)

Here ϕ_r is defined as the reference application that has passed on the basis of P_r, ϕ reference [see Figure (Etik et al., 2004) and Material S1]. P_r, ϕ can be selected as desired, but the physical value of intraocular pressure is a natural choice. In equation (3) (Sect. Material S1), the term γ is a function of material properties and eye shape, but in this study it is considered as an empirically specified parameter. In the special case $\gamma = 0$ (equation 3), the Friedenwald model reduces to the following: $\phi = r r (P r , \phi / P)$. where $K = 1/(\phi r P r, \phi)$.

This study aims to use a Lotrafilcon lens fitted with three bio-sensors to provide early diagnosis and monitoring of diabetic retinopathy, glaucoma, migraine and cataracts triggered by oxidative stress formation, increased pressure and extracellular potassium ion (K⁺) accumulation in the eye.

A sensor that can detect free radicals that cause oxidative stress will be used for early diagnosis of diabetic retinopathy, glaucoma and cataracts, a potassium (K⁺) sensor that can detect increased extracellular ion concentrations will be used for early diagnosis of migraine, and a pressure sensor will be used sensor to ensure control in diagnosed glaucoma patients.

The Lotrafilcon A silicone hydrogel lens was considered to be the most suitable lens for this study. This is due to many reasons, such as advances in the manufacturing processes of Lotrafilcon A lenses, their continuously improving design, low cost and sharp image properties. Furthermore, this lens has the highest oxygen permeability among silicone hydrogel lenses. The fact that it is a widely used and highly biocompatible material was another reason for choosing Lotrafilcon A.

Data detection can be performed externally, without the use of wires, via telemetry from an implanted detection device.

The sensors inside the lens will store the received data in an Arduino-based recording device for 24 hours, and then provide an easy-to-understand warning to the user via the biotelemetry system system in the case a warning is required. The telemetry system used transmits this information to the user via radio frequency. Recent technological advances have also made it possible to integrate microelectronic circuit structures into silicone hydrogel contact lenses such as Lotrafilcon A and to use the lens continuously.

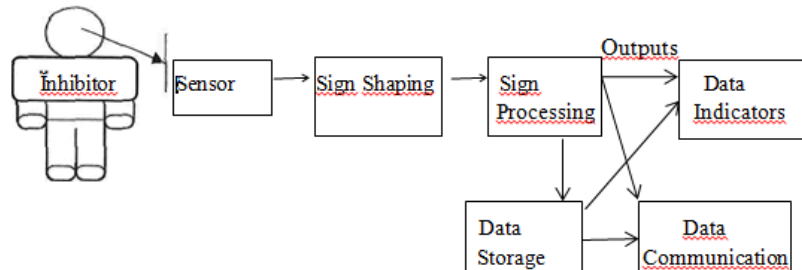


Figure 6. Block diagram of the simple telemetry system that will also be used in the Lotrafilcon A Lens

The recording device uses a wireless antenna to read sensor data, and the power required by the sensors is provided by a wireless power transmission device. Power will also be transmitted through the antenna placed on the lens to send data, providing two channels in one. Power will be provided to the sensor by wirelessly charging it for a certain period of time per day via a charger.

The lens design was carried out with the Progeiner program. The codes for the 3 sensors to be used in the lens were written using the Arduino program.

A. ARDUINO CODE FRAGMENT FOR THE OXIDATIVE STRESS SENSOR;

```

If(analogRead (Oxydative stress=0) )
{ Console.WriteLine("Normal Seviye");
Else
Console.WriteLine("Tehlikeli Durum");
Return(Oxydative stres);

```

B. ARDUINO CODE FRAGMENT FOR THE (K+) SENSOR;

```

If(analogRead((K+)>50))
Console.WriteLine("Potassium concentration is rising.");
Else If(analogRead((K*)<50 &&(K+)<40))
Console.WriteLine("Potassium concentration is at a normal level");
Else(("K*)<40)
Conso le. WriteLine("Potassium concentration is falling.");
Return (K*);

```

C. ARDUINO CODE FRAGMENT FOR THE PRESSURE SENSOR;

```

If(analogRead (Eye pressure>12 && Eye pressure<18))
Console.WriteLine("Normal Level");
Else
Conso le.WriteLine("Dangerous Situation");
Return(Eye pressure);

```

In addition, with three sensors to be placed in the contact lens for the study, the lens will be designed to complete its work in such a way as to communicate with the patient or doctor by transmitting the signals it receives about changes in pressure, color and shape in the eye to a telemetry system. The sensors to be used in the study are MEMS sensors. The lens design will be carried out using the Solidworks 2016 program.

V. CONCLUSION

With the lens developed in this study, changes in parameters such as oxidative stress, potassium ions (K⁺) and pressure, which are involved in the pathophysiology of many eye-related diseases, will be detected at an early stage. This will be a new and promising step for preventive medicine and treatment methods, which have become increasingly important in recent years. The study can be produced using mobile patient systems and Internet of Things (IoT) technology.

When put into the service of patients, it is an application that will improve the quality of life of patients, especially those in at risk groups. The study, intended to advance the field of electronic contact lens applications, will shed light on future studies on this subject.

Along with the developing technology, a biocompatible micro-sized power supply can be developed and integrated into the lens without an external charger. The functions of the different types of sensors can be combined in a single sensor and the work can be carried out at lower cost.

Although cataract surgery is one of the the most common and successful ophthalmic procedures with recent advances in recent years, methods to prevent or delay tar formation still remain a hot area of research, as previous studies in the literature have shown. In addition to possible postoperative complications, cataract surgery itself is highly stressful [29].

With this study, early diagnosis and medicated treatment will be possible, which will be more economical and reduce workload for medical staff and facilities, and patients will regain their health earlier.

Thanks to this lens, which is designed for preventive purposes in case of genetic predisposition, patients can recognize the disease and apply preventive treatments while they are still at the onset of these diseases.

It is thought that this is a study that will help the country stand out in the international arena and take a leading position in health.

VI. RESOURCES

[1] Hunky Seo, Won Gi Chung, Yong Won Kwon, Sumin Kim, Yeon-Mi Hong, Wonjung Park, Enji Kim, Jakyoun Lee, Sanghoon Lee, Moohyun Kim, Kyeonghee Lim, Inhea Jeong, Hayoung Song, and Jang-Ung Park, “Smart Contact Lenses as Wearable Ophthalmic Devices for Disease Monitoring and Health Management”, *Chem. Rev.* vol.123, no19, pp 11488–11558, 2023

[2] Shirzaei Sani, E. Xu, C. Wang, C. Song, Y. Min, J. Tu, J. Solomon, S. A. Li, J. Banks, J. L. Armstrong, D. G. Gao, W. “ A Stretchable Wireless Wearable Bioelectronic System for Multiplexed Monitoring and Combination Treatment of Infected Chronic Wounds”. *Science Advances*, 2023. 9 (12), No. eadf7388,

- [3] Wang, M.; Yang, Y.; Min, J.; Song, Y.; Tu, J.; Mukasa, D.; Ye, C.; Xu, C.; Heflin, N.; McCune, J. S.; Hsiai, T. K.; Li, Z.; Gao, W. A “Wearable Electrochemical Biosensor for the Monitoring of Metabolites and Nutrients”. *Nat. Biomed. Eng.* 2022, 6 (11), 1225–1235.
- [4] De la Paz, E.; Maganti, N. H.; Trifonov, A.; Jeerapan, I.; Mahato, K.; Yin, L.; Sonsard, T.; Ma, N.; Jung, W.; Burns, R.; Zarrinpar, A.; Wang, J.; Mercier, P. P. A “Self-Powered Ingestible Wireless Biosensing System for Real-Time in Situ Monitoring of Gastrointestinal Tract Metabolites”. *Nat. Commun.* 2022, 13 (1), 7405.
- [5] Song, J. W.; Ryu, H.; Bai, W.; Xie, Z.; Vázquez-Guardado, A.; Nandoliya, K.; Avila, R.; Lee, G.; Song, Z.; Kim, J.; Lee, M.-K.; Liu, Y.; Kim, M.; Wang, H.; Wu, Y.; Yoon, H.-J.; Kwak, S. S.; Shin, J.; Kwon, K.; Lu, W.; Chen, X.; Huang, Y.; Ameer, G. A.; Rogers, J. A. “Bioresorbable, Wireless, and Battery-Free System for Electrotherapy and Impedance Sensing at Wound Sites”. *Science Advances* 2023, 9 (8), No. eade4687.
- [6] Jiang, Y.; Trotsyuk, A. A.; Niu, S.; Henn, D.; Chen, K.; Shih, C.-C.; Larson, M. R.; Mermin-Bunnell, A. M.; Mittal, S.; Lai, J.-C.; Saberi, A.; Beard, E.; Jing, S.; Zhong, D.; Steele, S. R.; Sun, K.; Jain, T.; Zhao, E.; Neimeth, C. R.; Viana, W. G.; Tang, J.; Sivaraj, D.; Padmanabhan, J.; Rodrigues, M.; Perrault, D. P.; Chattopadhyay, A.; Maan, Z. N.; Leeolou, M. C.; Bonham, C. A.; Kwon, S. H.; Kussie, H. C.; Fischer, K. S.; Gurusankar, G.; Liang, K.; Zhang, K.; Nag, R.; Snyder, M. P.; Januszyk, M.; Gurtner, G. C.; Bao, Z. “Wireless, Closed-Loop, Smart Bandage with Integrated Sensors and Stimulators for Advanced Wound Care and Accelerated Healing”. *Nat. Biotechnol.* 2023, 41 (5), 652–662.
- [7] An, B. W.; Shin, J. H.; Kim, S.-Y.; Kim, J.; Ji, S.; Park, J.; Lee, Y.; Jang, J.; Park, Y.-G.; Cho, E.; Jo, S.; Park, J.-U. “Smart Sensor Systems for Wearable Electronic Devices”. *Polymers* 2017, 9 (8), 303.
- [8] Grace E Dunbar Bailey Yuguan Shen Ahmad A Aref . “The Sensimed Triggerfish contact lens sensor: efficacy, safety, and patient perspectives”. *Clinical Ophthalmology* 2017:11 875–882 8 May 2017
- [9] Renu Agarwal, Igor Iezhitsa, Puneet Agarwal, Alexander Spasov, “Magnesium deficiency: Does it have a role to play in cataractogenesis?”, *Experimental Eye Research* 101 (2012) 82-89.
- [10] Bara M, Guet-Bara A, Durlach J (1993) “Regulation of sodium and potassium pathways by magnesium in cell membranes.” *Magnes Res* 6(2):167–177
- [11] Iezhitsa IN (2005) “Potassium and magnesium depletions in congestive heart failure—pathophysiology, consequences and replenishment.” *Clin Calcium* 15(11):123–133
- [12] Renu Agarwal, Igor Iezhitsa, Puneet Agarwal, “Pathogenetic role of magnesium deficiency in ophthalmic diseases”, *Biometals* (2014) 27:5–18
- [13] Azza Dammak, Cristina Pastrana, Alba Martin-Gil, Carlos Carpena-Torres, Assumpta Peral Cerda, Mirjam Simovart, Pilar Alarma, Fernando Huete-Toral and Gonzalo Carracedo, “Oxidative Stress in the Anterior Ocular Diseases: Diagnostic and Treatment”, *Biomedicines* 2023, 11, 292.
- [14] R. A. Moses, “The Goldmann applanation tonometer,” *Amer. J. Ophthalmol.*, vol. 46, no. 6, pp. 865–869, Dec. 1958.

- [15] K. C. Katuri, S. Asrani, and M. K. Ramasubramanian, "Intraocular pressure monitoring sensors," *IEEE Sensors* 1., vol. 8, no. 1, pp. 12 - 19, Jan. 2008.
- [16] L. Martinez, R. Giannetti, M. Rodriquez, "Design of a system for continuous intraocular pressure monitoring," *In: Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Como, Italy, 2004.
- [17] K. C. Katuri, M K. Ramasubramanian, S. Asrani, " A Surface Micromachined Capacitive Pressure Sensor for Intraocular Pressure Measurement, " *IEEE ASME Int. Conf. on Mechatronics and Embedded Systems and Applications* , pp. 149-154, 2010.
- [18] C. Collin, "Miniature passive pressure transensor for implanting in the eye," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* (Volume: BME-14, Issue: 2, April 1967)
Page(s): 74 - 83
- [19] P. Walter, U Schnakenberg, "Development of a completely encapsulated intraocular pressure sensor," *Ophthalmic Research*, vol. 32, no. 26, pp. 278-284, 2000.
- [20] Internet of Things in Eye Diseases, Introducing a New Smart Eyeglasses Designed for Probable Dangerous Pressure Changes in Human Eyes (2017 International Confarence on Computer and Applications)
- [21] The National Eye Institute (NEI) (September 2015)
- [22] Migren Hastalarında Merkezi Kornea Kalınlığının Değerlendirilmesi. Mehmet COŞKUN . Karabük Üniversitesi Göz Hastalıkları Anabilim Dalı, Karabük (*Bozok Tıp Derg* 2017;7(1):59-63)
- [23] Coşkun, Mehmet. "Migren Hastalıklarında Merkezi Kornea Kalınlığının Değerlendirmesi".www.dergipark.gov.tr/dergipark.gov.tr/article-file/292642 Access Address on March 25, 2019
- [24] Argus VA: Ocular hypertension and central corneal thickness.*Ophthalmology*. 1995;102:1810-1812.
- [25] Ventura AC, Bohnke M, Mojon DS: "Central corneal thickness measurements in patients with normal tension glaucoma, primary open angle glaucoma, pseudoexfoliation glaucoma, or ocular hypertension". *Br J Ophthalmol*. 2001;85:792-795.
- [26] Ko Y-C, Liu CJ-I, Hsu W-M: "Varying effects of corneal thickness on intraocular pressure measurements with different tonometers".*Eye*. 2005;19:327-332
- [27] Brandt JD, Beiser JA, Kass MA, et al.: "Central corneal thickness in the Ocular Hypertension Treatment Study (OHTS)". *Ophthalmology*. 2001;108:1779-1788.
- [28] Gordon MO, Baiser JA, Brandt JE, et al.: "The ocular hypertension treatment study: Baseline factors that predict the onset of primary open-angle glaucoma". *Arch Ophthalmol*. 2002;120: 714-720.
- [29] Hasim, Z., Zarina, S., " Osmatik Stress induced oxidative damage; Possible machansim of cataract formation in diabetes " *Journal of Diabetes and its Compilcations*, 2012.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Synthesis, Characterization, and Photophysical Properties of 2-Quinolone-Based Compounds

 Tahir SAVRAN ^{a*}

^a Department of Chemistry, Faculty of Science Kamil Ozdag, Karamanoglu Mehmetbey University, Karaman, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: tahir.savran@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1377215

ABSTRACT

2-Quinolone (1,2-dihydroquinoline) and 1-aza coumarin derivatives are quinoline class pharmacophore structures known for their versatile bioactive and stable photophysical properties. In the present study, *N*-amino (**2**) and *N*-acetamido (**3**) derivatives of 2-quinolone-based 1-aza Coumarin-3-carboxylic acid were synthesized. Structure characterizations of the synthesized compounds were performed using ¹H NMR, IR, ¹³C NMR spectral techniques. The synthesized compounds are thought to be precursor structures for the development of new bioactive agents because of their structural similarity. The photophysical sensitivities of compounds (**2** and **3**), which have the 1-Aza coumarin skeleton, in different solvents were examined by ultraviolet–visible (UV–Vis) absorption spectroscopy and fluorescence spectroscopy methods. In addition, the compounds synthesized in this study could serve as fluorophores, fluorescently active and bioactive new Schiff base sensors in different fluorescence studies.

Keywords: 1, 2-Dihydroquinoline, 2-Quinolone-3-carboxylic acid, 1-Azacoumarin, Photophysical properties

2-Kinolon Temelli Bileşiklerin Sentezi, Karakterizasyonu ve Fotofiziksel Özellikleri

ÖZ

2-Kinolon (1,2-dihidrokinolin) ve 1-aza kumarin türevleri çok yönlü biyoaktif ve kararlı fotofiziksel özellikleriyle bilinen kinolin sınıfı farmakofor yapılarıdır. Sunulan çalışmada 2-kinolon temelli 1-aza kumarin-3-karboksilik asit'in *N*-amino (**2**) ve *N*-asetamido (**3**) türevlerinin sentezi yapılmıştır. Sentezlenen bileşiklerin yapı karakterizasyonu ¹H NMR, IR, ¹³C NMR spektral teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen bileşiklerin yapı benzerliğinden dolayı yeni biyoaktif ajanların geliştirilmesinde öncü yapılar olabileceği düşünülmektedir. 1-Aza kumarin iskeletine sahip bu bileşiklerin (**2** ve **3**) farklı çözücülerdeki fotofiziksel duyarlılıkları mor ötesi-görünür bölge (UV-GB) absorpsiyon spektroskopisi ve floresans spektroskopisi yöntemleriyle incelenmiştir. Ayrıca çalışmada sentezlenen bileşikler, farklı floresans çalışmalarda florofor, floresan aktif ve biyoaktif yeni Schiff bazı algılayıcı gibi görevler alabilir.

Anahtar Kelimeler: 1,2-Dihidrokinolin, 2-Kinolon-3-karboksilik asit, 1-Azakumarin, Fotofiziksel özellikler

I. INTRODUCTION

Quinolines belong to the class of heteroaromatic compounds with a two-ring structural skeleton consisting of pyridine bonded to benzene. Although they have names such as benzo[b]pyridine or 1-aza-naphthalene, these heterocyclic molecules are more commonly known as quinoline (Figure 1).

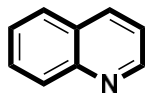


Figure 1. Quinoline

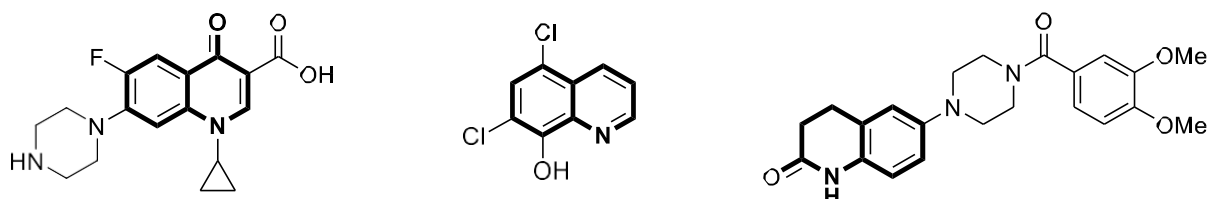


Figure 2. Some drugs containing a quinoline ring

Quinolines, which are very popular in the field of pharmaceutical chemistry, have antibacterial, antifungal, antiviral, antituberculous, anti-inflammatory, anticonvulsant, analgesic or antimalarial, anticancer, etc. properties [1],[2]. They are representative of a privileged and superior class that attracts the attention of organic chemists because of their biological properties. Many drugs containing the quinoline ring are known to have the biological properties listed above (Figure 2). Therefore, the quinoline structural skeleton, in addition to being a natural product, is characterized as a highly potential, preferred, and versatile pharmacophore for drug discovery [1],[2].

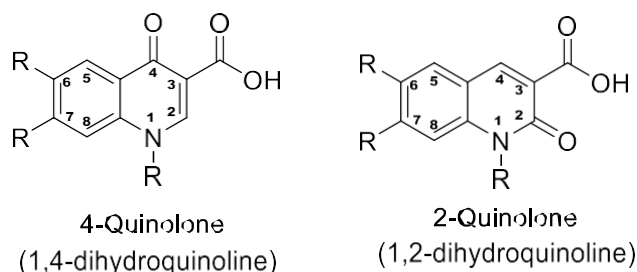
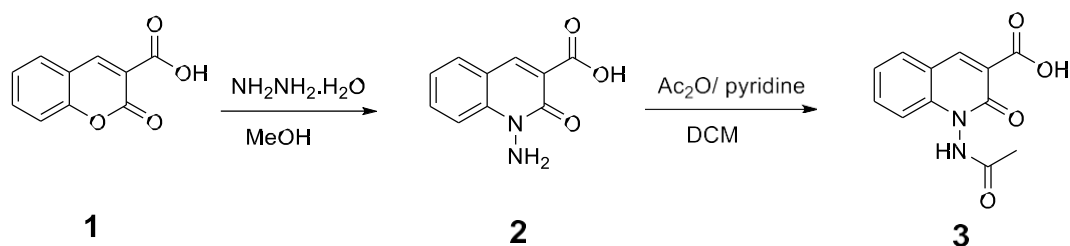


Figure 3. Quinolone scaffold

In contrast, quinolones constitute a subclass of quinoline derivatives. The two-ring structure has ketone and carboxylic acid functional groups in the nitrogen-containing ring. These structures are called 4-quinolones or 2-quinolones depending on the position of the ketone group [3],[4]. The quinolone structures are also chemically referred to as 1,4-dihydroquinolines (4-quinolones) and 1,2-dihydroquinolines (2-quinolones) [3],[5]–[6] (Figure 3).

Quinolones, unlike quinolines, are not natural products. The development and use of these compounds began after their first synthetic discovery in the 1960s and have attracted increasing clinical, and scientific attention [3],[7]. Since there are various drugs with quinolone rings that exhibit activities such as antituberculosis [8], anti-HIV [9], antimalarial [10], antibacterial [11], antibiotic [12], antitumor, antidepressant, antiulcer, antioxidant, and herbicide [4],[13], new modifications and bioactivities of dihydroquinoline derivatives have been intensively studied at the point of drug discovery [5],[8],[9],[13]–[19].



Scheme 1. Synthesis of *N*-amino-2-quinolone-3-carboxylic acid (**2**) and *N*-acetamido-2-quinolone-3-carboxylic acid (**3**)

A.1.1. Synthesis of 1-amino-2-oxo-1,2-dihydroquinoline-3-carboxylic acid (**2**)

To the solution of 2-oxo-coumarin-3-carboxylic acid (**1**) (190.16 mg, 1 mmol) in 5 mL absolute ethanol, hydrazine monohydrate (98%) (1.5 mL, 30 mmol) was added. The mixture was stirred under reflux for 1 h and then cooled to room temperature. After adding dilute HCl to the resulting mixture until the pH reached 4, 1-amino-2-quinolone-3-carboxylic acid (**2**) was obtained in 49% yield (101 mg) by washing the precipitate with plenty of water and drying it in the oven (Scheme 1). ^1H NMR (CDCl_3) δ (ppm) 11.40 (s, 1H, $-\text{CO}_2\text{H}$), 8.70 (s, 1H, $-\text{H}_4$), 7.39 (dt, $J = 16.1, 7.2$ Hz, 2H, $-\text{ArH}$), 7.01 (dt, $J = 23.8, 7.9$ Hz, 2H, $-\text{ArH}$). ^{13}C NMR (CDCl_3) δ (ppm) 164.96, 160.02, 133.69, 133.55, 132.81, 132.73, 119.98, 119.89, 117.51, 117.39. IR (cm^{-1}) 3072, 3044, 3018, 2974, 2917, 2846, 2754, 2711, 2639, 1618, 1571, 1486, 1447, 1386, 1331, 1316, 1269, 1197, 1115, 1032, 984, 893, 782, 747, 727, 682 (Figures 5,6 ve 7).

A.1.2. Synthesis of 1-acetamido-2-oxo-1,2-dihydroquinoline-3-carboxylic acid (**3**)

Acetic anhydride (10 mmol, 0.95 mL) was added dropwise to an ice-bath stirred solution of 1-amino-2-quinolone-3-carboxylic acid (**2**) (205 mg, 1 mmol) in dichloromethane (20 mL) containing three drops of pyridine. After stirring the mixture at room temperature overnight, it was separated into phases by adding dichloromethane and water. The organic phase was washed sequentially with dilute HCl (3x25 mL) and brine (3x25 mL). The combined organic phases were then dried with Na_2SO_4 , filtered, and concentrated under low vacuum to give 1-acetamido-2-quinolone-3-carboxylic acid (**3**) as a light brown solid in 99% yield (247 mg) (Scheme 1). ^1H NMR (CDCl_3) δ (ppm) 8.67 (s, 1H, $-\text{H}_4$), 8.06 (dd, $J = 6.8, 2.7$ Hz, 1H, $-\text{ArH}$), 7.58 – 6.87 (m, 3H, $-\text{ArH}$), 2.34 (s, 3H, $-\text{NHCOCH}_3$). ^{13}C NMR (CDCl_3) δ (ppm) 169.14, 157.19, 150.29, 132.16, 128.53, 126.32, 126.27, 123.09, 122.96, 122.51, 109.99, 21.02. IR (cm^{-1}) 3515, 3060, 3017, 2963, 2927, 2854, 1763, 1622, 1601, 1574, 1481, 1450, 1370, 1323, 1280, 1227, 1194, 1165, 1151, 1093, 1045, 1037, 1012, 967, 907, 855, 818, 765, 677 (Figures 8,9 ve 10).

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. SYNTHESSES

Within the scope of this study, two 2-quinolone-based compounds were synthesized from the coumarin compound, and their structures were elucidated using spectral techniques (^1H and ^{13}C NMR, IR). First, *N*-amino-coumarin-3-carboxylic acid (**2**) was successfully synthesized by treating the compound coumarin-3-carboxylic acid (**1**) with hydrazine monohydrate under reflux conditions in absolute EtOH [12] (Scheme 1). ^1H NMR, IR, and ^{13}C NMR spectra of compound **2** are given in Figures 5, 6, and 7, respectively.

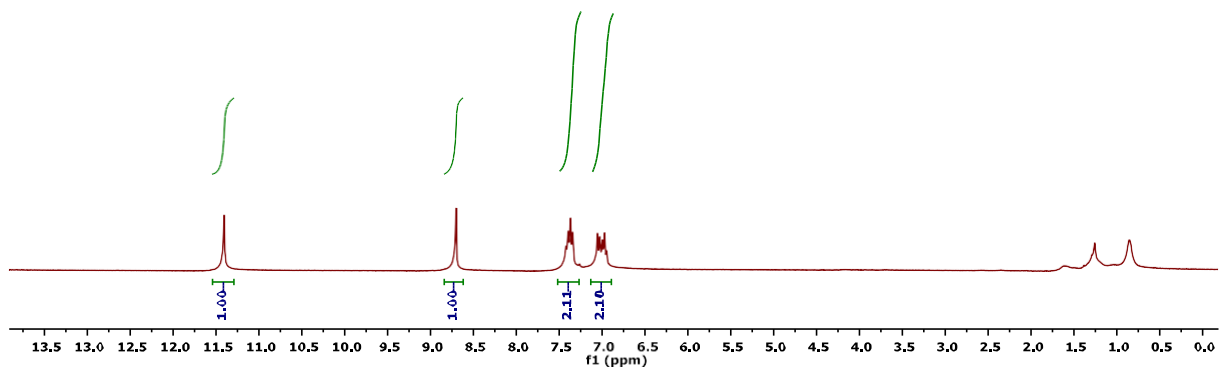


Figure 5. ^1H NMR spectrum of compound 2

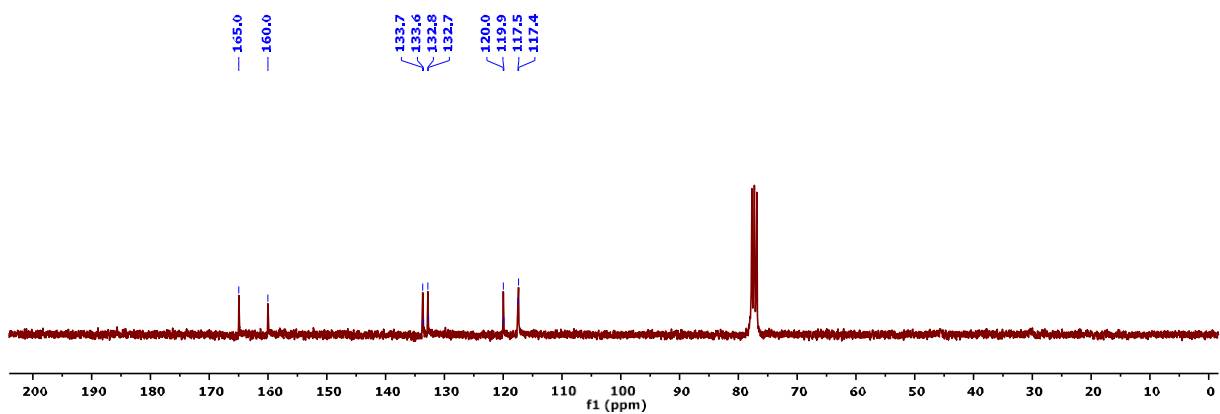


Figure 6. ^{13}C NMR spectrum of compound 2

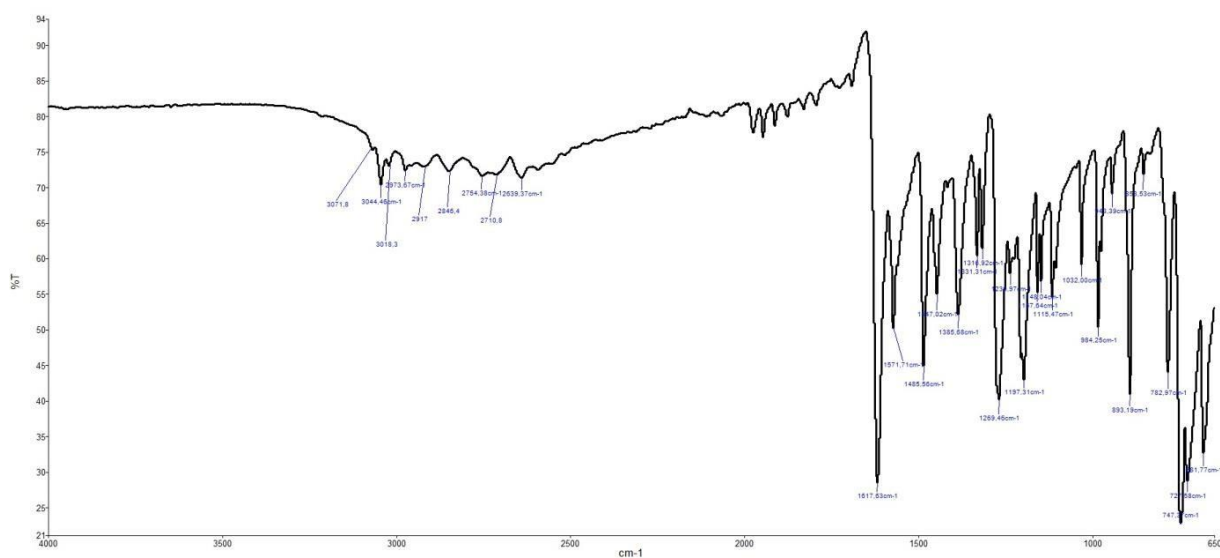


Figure 7. IR spectrum of compound 2

Moreover, because amide groups have very stable and neutral properties, they are generally located in the backbones of many natural and synthetic bioactive substances [6]. Based on this, 1-amino-2-quinolne-3-carboxylic acid (**2**) was reacted with pyridine-catalyzed Ac₂O in DCM and subjected to the amidation reaction of the amino group in the quinolone ring, resulting in an *N*-acetamido-substituted *N*-(*N*-acyl)-coumarin-3-carboxylic acid (**3**) (Scheme 1). ¹H, ¹³C NMR, and IR spectra of compound **3** are depicted in Figures 8, 9, and 10, respectively.

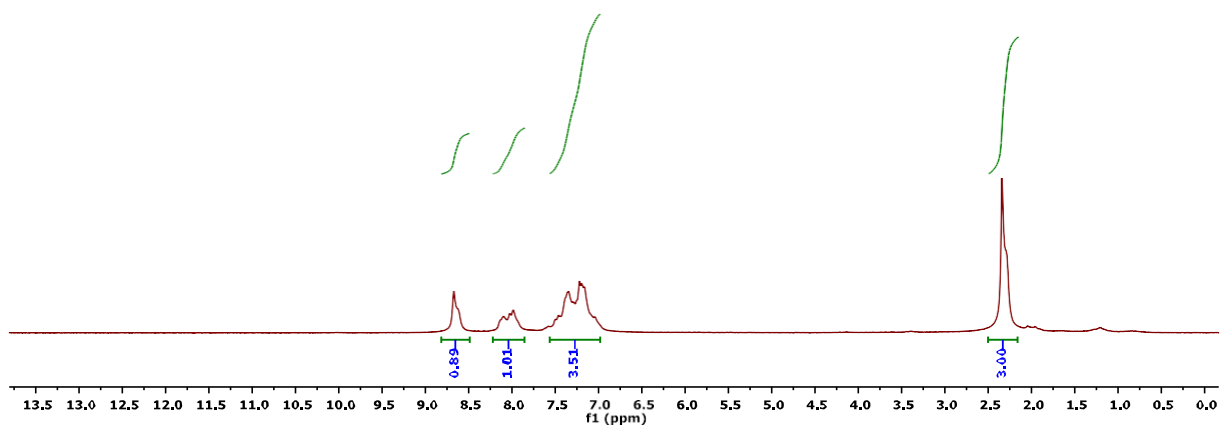


Figure 8. ¹H NMR spectrum of compound **3**

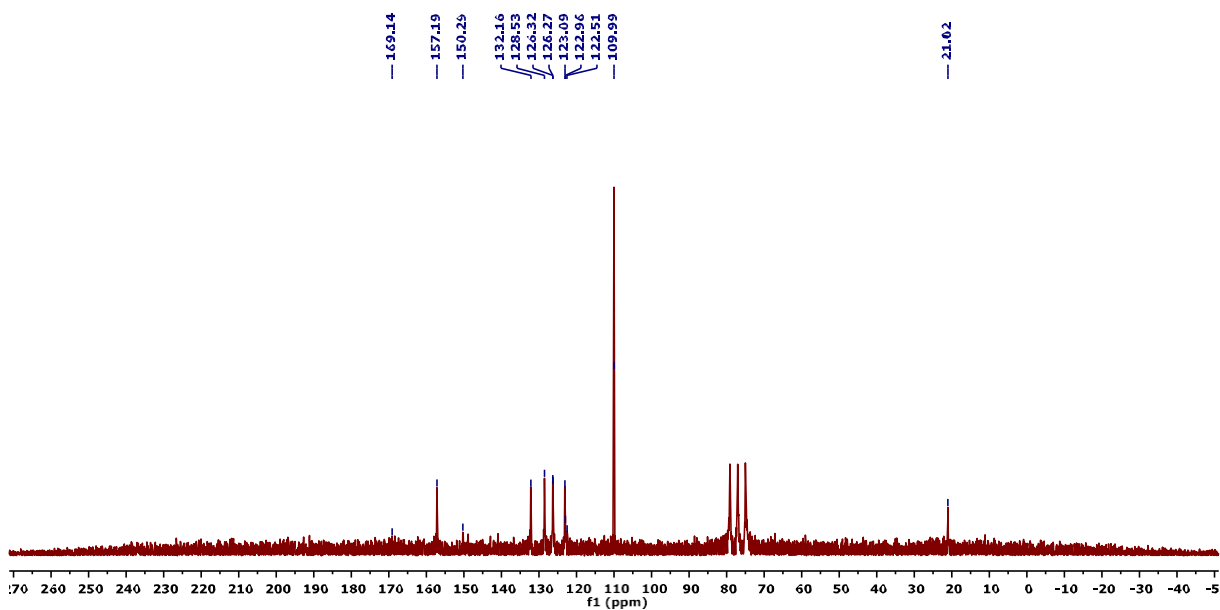


Figure 9. ¹³C NMR spectrum of compound **3**

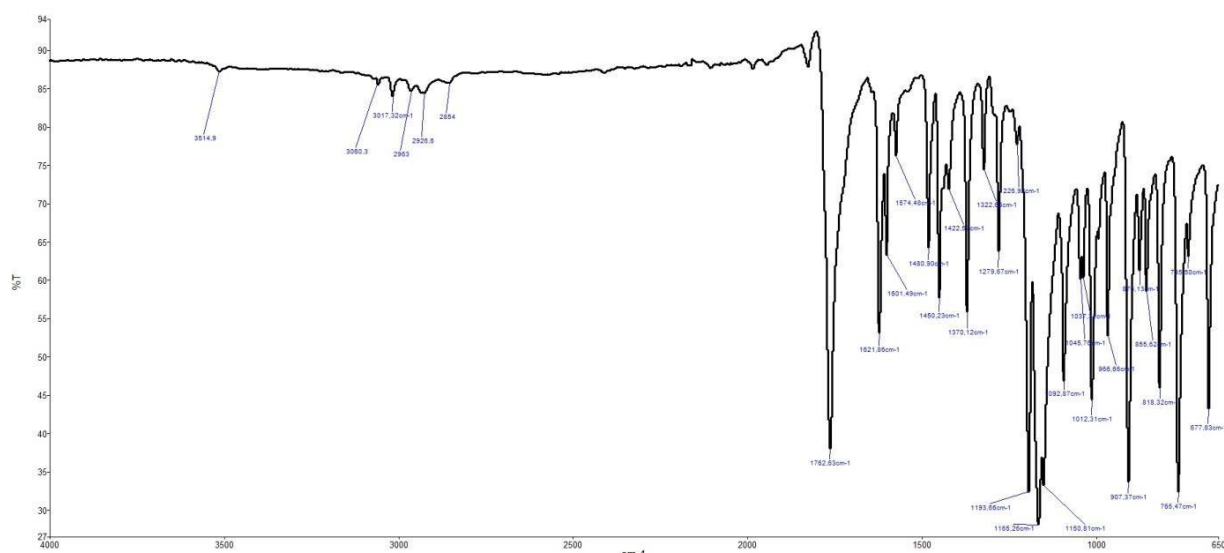


Figure 10. IR spectrum of compound 3

B. CHARACTERIZATION

When the ^1H NMR spectrum of 1-amino-2-quinolone-3-carboxylic acid (**2**) was examined, the singlet peak monitored at 11.40 ppm was the proton signal belonging to the $-\text{CO}_2\text{H}$ group located in the position 3 of the structure. In addition, the beta proton ($\beta\text{-H}$) at position 4 of the structure resonated with the singlet peak at 8.70 ppm, while the signals of aromatic protons were observed as the doublet of the triplet at 7.39 ppm and 7.01 ppm, respectively. The integration values on the spectrum were consistent with the proton numbers of compound **2** (Figure 5). The $-\text{NH}_2$ protons of compound **2** were not observed because of intramolecular hydrogen bonds, resonance formations, and conjugation, [26] (Figure 5 and 11). In the ^{13}C NMR spectrum of compound **2**, the $-\text{C}=\text{O}$ peak in the carboxylic acid and lactam ring resonated at 165 and 160 ppm, respectively. Signals of other aromatic carbons, quaternary carbons, and beta carbon ($\beta\text{-C}$) were observed in the range of 110–140 ppm (Figure 6). In the IR spectrum of the structure, the stretching vibrations of $-\text{NH}_2$ protons gave weak and broad peaks below 3200 cm^{-1} due to intra- and intermolecular hydrogen bond interactions [26],[27] (Figure 7 and 11). Similarly, because of intermolecular hydrogen bond interactions, the frequency of the $-\text{CO}_2\text{H}$ group in compounds (**2** and **3**) was seen as a broad peak in the range of $2500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ [26] (Figure 7, 10, and 11).

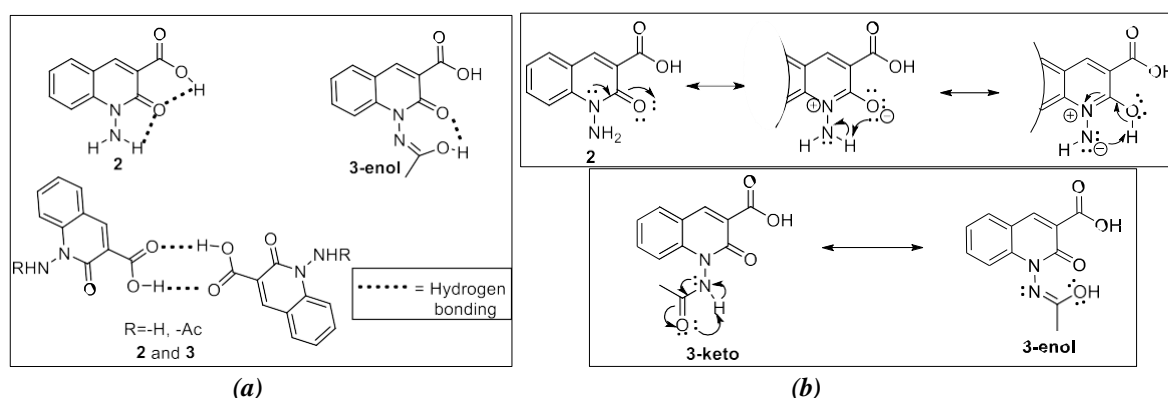


Figure 11. (a) Intramolecular and intermolecular hydrogen bonding for compounds **2** and **3** (b) resonance formation for compounds **2** and **3**

In the IR spectra of the starting compounds (**1** and **2**), the $-\text{C}=\text{O}$ vibration peaks of $-\text{CO}_2\text{H}$, lactone (for **1**), and lactam (for **2**) shifted to low frequencies. In other words, the peak at 1736 cm^{-1} belonging to the $-\text{C}=\text{O}$ of compound **1** $-\text{CO}_2\text{H}$ shifted to 1618 cm^{-1} and was seen as the peak belonging to the $-\text{C}=\text{O}$ of

compound **2** –CO₂H. Additionally, the peak at 1670 cm⁻¹ belonging to the –C=O of lactone **1** was observed at 1572 cm⁻¹ as the –C=O peak of lactam **2**, indicating that compound **2** was formed (Figure 12).

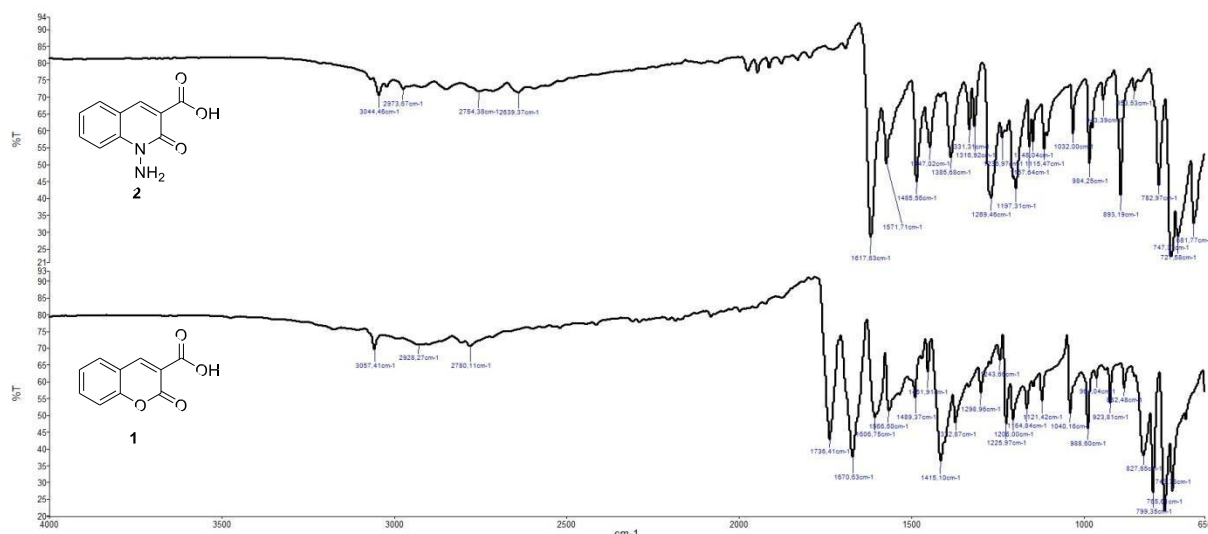


Figure 12. IR spectra of the starting compound (**1**) and the compound (**2**)

Furthermore, when the ¹H NMR spectrum of the other target compound 1-acetamido-2-quinolone-3-carboxylic acid (**3**) was elucidated, β-H of the compound with a singlet peak at 8.67 ppm, the aromatic proton at position 5 with a doublet of doublets peak at 8.06 ppm, other aromatic protons with multiplet peak in the range of 6-8 ppm were observed to resonate (Figure 8). When the ¹³C-NMR spectrum of compound **3** is interpreted that the –C=O peaks and other carbon peaks in the structure are compatible with the structure. In particular, the peak at 21 ppm belonging to the –CH₃ carbon of the –N-acyl group (–NHCOCH₃) attached to the nitrogen atom at position 1 confirmed that the compound was acetylated (Figure 9). The weak peak at 3513 cm⁻¹ in the IR spectrum of the compound belonged to –OH in the enol form, which was formed because of intramolecular tautomerization of the –NH stretching peak (Figure 11). In the IR spectrum of compound **3**, the peaks of –C=O group stretching vibrations belonging to carboxylic acid, lactam, and –NHCOCH₃ groups were observed at 1762 cm⁻¹, 1621 cm⁻¹ and 1601 cm⁻¹, respectively. In addition, the peaks in the 1300-1500 cm⁻¹ region belonged to the vibrations of Ar–H (Figure 10).

In terms of structural similarity, compounds (**2** and **3**) in the study could be described as 4-quinolone isomers and 2-quinolone derivative analogs [6],[12],[28]. Also, these compounds were similar to the coumarin derivative 1-azacoumarins [22]. When investigated under the framework of quinoline, both quinolone derivatives and 1-azacoumarin derivatives form the backbone of many pharmaceutical active compounds with a very wide bioactive spectrum [20]–[22]. In addition, amine, amide, and carboxylic acid functional groups can promote bioactivity [6],[14],[19],[28].

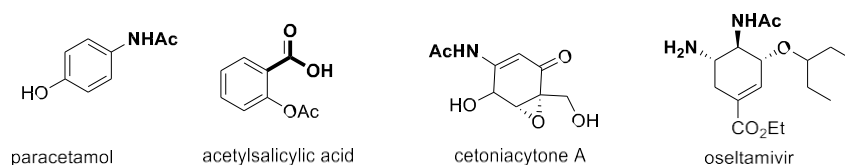


Figure 13. Effective bioactive agents with small molecular structures containing amino, acetamido, and carboxylic acid units.

The structures of the analgesic and antipyretic paracetamol and acetylsalicylic acid used in daily life, the antibacterial and antitumor agent cetoniacyton A, and the antiviral drug oseltamivir are small and

highly effective and contain amino, acetamido, and carboxylic acid units [29],[30] (Figure 13). Therefore, the target molecules presented in this study were capable of leading to the synthesis of many new compounds that exhibit important bioactivities that can be used both drug-active agents and cures for various diseases. For this purpose, different approaches could be planned such as deriving these compounds from carboxylic acid and amino groups and including groups that will support bioactivity at positions 6 and 7 (such as -F, -piperazine, -CF₃) [14],[28]. Regarding the structures in the study as 1-aza coumarin and the very stable photophysical properties of coumarins, compounds **2** and **3** could serve as both a fluorophore, a fluorescent sensor, and a bioactive and fluorescent active Schiff base in fluorescence studies [4],[13],[24],[25].

C. PHOTOPHYSICAL PROPERTIES

Considering the photophysical stability of the *N*-amino (**2**) and *N*-acetamido (**3**) substituted 3-carboxylic acid as quinolone derivatives synthesized in this study, their UV absorption and fluorescence behaviors were determined in equal concentrations (10⁻⁵ M) and different solvents (hexane, dichloromethane, chloroform, acetonitrile, ethanol, methanol, *N,N*-dimethyl formamide, dimethyl sulfoxide and water).

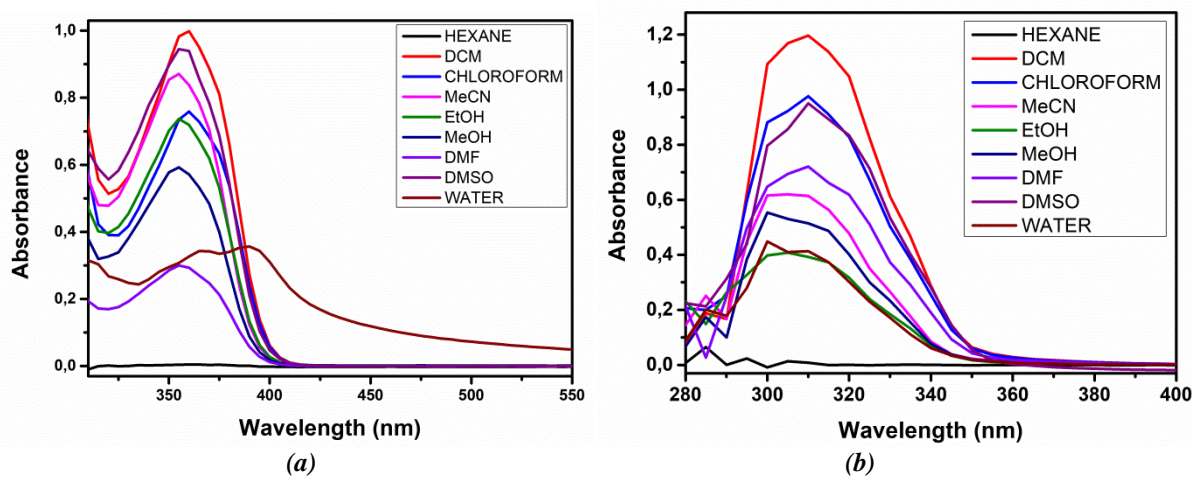


Figure 14. (a) Absorption spectra of compound (2) and (b) compound (3) in different solvents

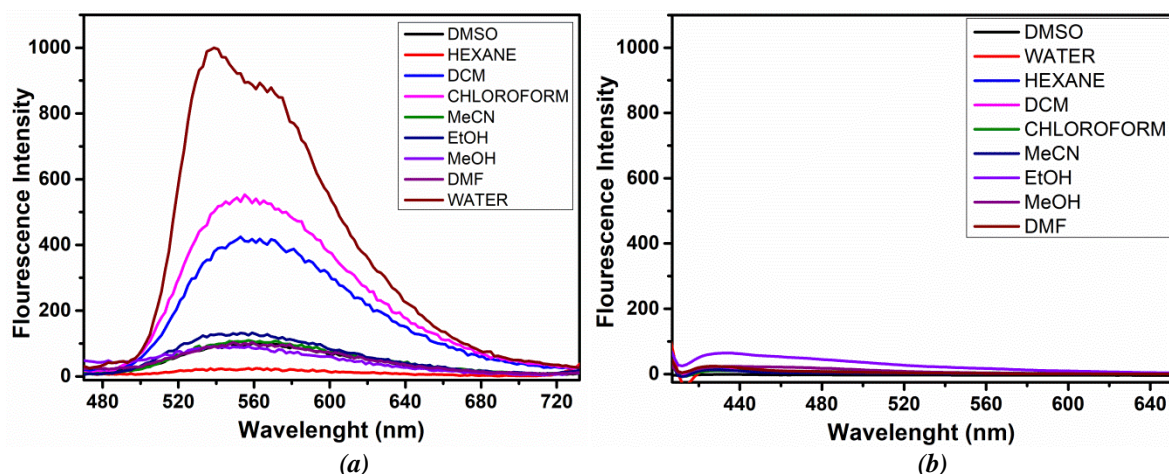


Figure 15. (a) Fluorescence spectra of compound (2) and (b) compound (3) in different solvents

When the UV–Vis absorption spectrum of compound **2** was examined, the wavelength signals of $n-\pi^*$ and $\pi-\pi^*$ transitions were observed in the 320–400 nm band (Figure). In the UV absorption spectrum of compound **3**, the wavelength values of the signals of $n-\pi^*$ and $\pi-\pi^*$ transitions were observed in the range of 280–360 nm (Figure 14). While both compounds did not give a signal in hexane due to the

intermolecular and intramolecular hydrogen bond effects due to the solvent effect, they gave a low intensity and broad signal in water [26] (Figure 15). While compound **2** showed a very high fluorescence intensity at 538 nm in water, compound **3** did not show an obvious fluorescence response under the same conditions (Figure 14). The high intensity fluorescence response of compound **2** in water is a promising development for intracellular imaging studies.

IV. CONCLUSION

In this study, *N*-amino-2-quinolone-3-carboxylic acid (**2**) and *N*-acetamido-2-quinolone-3-carboxylic acid (**3**) compounds were synthesized from coumarin-3-carboxylic acid (**1**) and their structures were characterized by ¹H-NMR, IR, and ¹³C-NMR spectrometry. The photophysical behaviors of the compounds were investigated using UV-visible and fluorescence Spectroscopy methods. It has been observed that the compounds absorb in the visible wavelength range in different solvents in the UV-Vis spectrum. Furthermore, in the fluorescence spectrum, compound **2** exhibited a strong fluorescence increment in the presence of water, whereas compound **3** did not show a significant fluorescence response in different solvents. Because of their isomeric similarities with active pharmaceutical agents containing quinolone rings, the compounds obtained in this study could be considered as precursors of new drugs to be developed within the framework of drug discovery. In this respect, it is possible to obtain compounds similar to the quinolone-3-carboxylic acids in the literature [19],[28] with the target molecules synthesized in the study. On the other hand, because these compounds are 1-azacoumarin derivatives, they could be used in the design and development of new fluorescent probes/fluorophores for the determination of critical species for living organisms and the environment in fluorescence spectroscopy studies. Besides, because the compounds in the study are 1-azacoumarin derivatives, they would be utilized in the design and development of new fluorescent probes/fluorophores to be used to identify critical species for living things and the environment in fluorescence spectroscopy studies. Further studies planned in this context are in progress.

ACKNOWLEDGEMENTS: This work was supported by the Karamanoglu Mehmetbey University.

V. REFERENCES

- [1] S. M. Prajapati, K. D. Patel, R. H. Vekariya, S. N. Panchal, and H. D. Patel, "Recent advances in the synthesis of quinolines: A review," *RSC Adv.*, vol. 4, no. 47, pp. 24463–24476, 2014, doi: 10.1039/c4ra01814a.
- [2] P. Yadav and K. Shah, "Quinolines, a perpetual, multipurpose scaffold in medicinal chemistry," *Bioorg. Chem.*, 109, 2021, doi: 10.1016/j.bioorg.2021.104639.
- [3] B. Suh and B. Lorber, "From the Section of Infectious Diseases, Temple University Health Sciences Center, School of Medicine, Philadelphia, Pennsylvania MEDICAL CLINICS OF NORTH AMERICA," *Antimicrob. Ther. II*, vol. 79, no. 4, pp. 869–894, 1995.
- [4] R. I. H. Al-bayati and M. F. Radi, "Synthesis of novel 2-quinolone derivatives," *African J. Pure Appl. Chem.*, vol. 4, no. November, pp. 228–232, 2010.
- [5] A. R. Syniugin *et al.*, "Design, synthesis and evaluation of 3-quinoline carboxylic acids as new inhibitors of protein kinase CK2," *J. Enzyme Inhib. Med. Chem.*, vol. 31, no. September, pp. 160–169, 2016, doi: 10.1080/14756366.2016.1222584.
- [6] J. Prathyusha and C. A. Deepti, "Synthesis, Antimicrobial, and Antitubercular Activities of

- Novel N-Pyrazolylbenzamide Derivatives,” *Rasayan J. Chem.*, vol. 15, no. 4, pp. 2407–2416, 2022, doi: 10.31788/RJC.2022.1547092.
- [7] M. I. Andersson and A. P. MacGowan, “Development of the quinolones,” *J. Antimicrob. Chemother.*, vol. 51, no. SUPPL. 1, pp. 1–11, 2003, doi: 10.1093/jac/dkg212.
- [8] G. Kumar, A. Sathe, V. S. Krishna, D. Sriram, and S. M. Jachak, “Synthesis and biological evaluation of dihydroquinoline carboxamide derivatives as anti-tubercular agents,” *Eur. J. Med. Chem.*, vol. 157, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1016/j.ejmech.2018.07.046.
- [9] O. Tabarrini *et al.*, “Studies of anti-HIV transcription inhibitor quinolones: Identification of potent N1-vinyl derivatives,” *ChemMedChem*, vol. 5, no. 11, pp. 1880–1892, 2010, doi: 10.1002/cmdc.201000267.
- [10] V. T. Andriole, “The quinolones: Past, present, and future,” *Clin. Infect. Dis.*, vol. 41, no. 2 SUPPL., pp. 113–119, 2005, doi: 10.1086/428051.
- [11] A. M. Emmerson and A. M. Jones, “The quinolones: Decades of development and use,” *J. Antimicrob. Chemother.*, vol. 51, no. SUPPL. 1, pp. 13–20, 2003, doi: 10.1093/jac/dkg208.
- [12] A. A. Al-Amiery, R. I. H. Al-Bayati, K. Y. Saour, and M. F. Radi, “Cytotoxicity, antioxidant, and antimicrobial activities of novel 2-quinolone derivatives derived from coumarin,” *Res. Chem. Intermed.*, vol. 38, no. 2, pp. 559–569, 2012, doi: 10.1007/s11164-011-0371-2.
- [13] M. Radi, A. Al-Amiery, and R. AL-Bayati, “Synthesis, spectroscopic and antimicrobial studies of transition metal complexes of N-amino quinolone derivatives,” *Br. J. Pharmacol. Toxicol.*, vol. 2, no. 1, pp. 5–11, 2019, doi: 10.3390/ecsoc-14-00435.
- [14] M. P. Wentland, D. M. Bailey, J. B. Cornett, R. A. Dobson, R. G. Powles, and R. B. Wagner, “Novel Amino-Substituted 3-Quinolonecarboxylic Acid Antibacterial Agents: Synthesis and Structure-Activity Relationships,” *J. Med. Chem.*, vol. 27, no. 9, pp. 1103–1108, 1984, doi: 10.1021/jm00375a003.
- [15] F. Ushiyama *et al.*, “Lead identification of 8-(methylamino)-2-oxo-1,2-dihydroquinoline derivatives as DNA Gyrase Inhibitors: hit-to-lead generation involving thermodynamic evaluation,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 17, pp. 10145–10159, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c00865.
- [16] I. Tomassoli *et al.*, “Synthesis, biological assessment and molecular modeling of new dihydroquinoline-3-carboxamides and dihydroquinoline-3-carbohydrazide derivatives as cholinesterase inhibitors, and Ca channel antagonists,” *Eur. J. Med. Chem.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–10, 2011, doi: 10.1016/j.ejmech.2010.08.054.
- [17] M. Sechi *et al.*, “Design and synthesis of novel dihydroquinoline-3-carboxylic acids as HIV-1 integrase inhibitors,” *Bioorganic Medicine and Chemistry*, vol. 17, no. 7, pp. 2925–2935, 2009, doi: 10.1016/j.bmc.2008.10.088.
- [18] E. Stern *et al.*, “Pharmacomodulations around the 4-oxo-1,4-dihydroquinoline-3-carboxamides, a class of potent CB2-selective cannabinoid receptor ligands: Consequences in receptor affinity and functionality,” *J. Med. Chem.*, vol. 50, no. 22, pp. 5471–5484, 2007, doi: 10.1021/jm070387h.
- [19] R, R, Deore; G,S, Chen; C-S, Chen,; P-T. Chang; M-H. Chuang; T-R. Chern; H-C, Wang; J-W. Chern, “2-Hydroxy-1-oxo-1,2-dihydroisoquinoline-3-carboxylic Acid with Inbuilt β -NHydroxy- γ -keto-acid Pharmacophore as HCV NS5B Polymerase Inhibitors,” *Curr. Med. Chem.*, vol. 19,

no. 4, pp. 613–621, 2012.

- [20] R. G. Kalkhambkar, G. M. Kulkarni, C. M. Kamanavalli, N. Premkumar, S. M. B. Asdaq, and C. M. Sun, “Synthesis and biological activities of some new fluorinated coumarins and 1-aza coumarins,” *Eur. J. Med. Chem.*, vol. 43, no. 10, pp. 2178–2188, 2008, doi: 10.1016/j.ejmech.2007.08.007.
- [21] M. Kulkarni, G. Kulkarni, C.-H. Lin, and C.-M. Sun, “Recent Advances in Coumarins and 1-Azacoumarins as Versatile Biodynamic Agents,” *Curr. Med. Chem.*, vol. 13, no. 23, pp. 2795–2818, 2006, doi: 10.2174/092986706778521968.
- [22] S. B. Bakare, “Synthesis and anticancer evaluation of some coumarin and azacoumarin derivatives,” *Polish J. Chem. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 27–34, 2021, doi: 10.2478/pjct-2021-0013.
- [23] H. Ji *et al.*, “Synthesis and anticancer activity of new coumarin-3-carboxylic acid derivatives as potential lactate transport inhibitors,” *Bioorganic Medicine and Chemistry*, vol. 29, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.bmc.2020.115870.
- [24] H. Katerinopoulos, “The Coumarin Moiety as Chromophore of Fluorescent Ion Indicators in Biological Systems,” *Curr. Pharm. Des.*, vol. 10, no. 30, pp. 3835–3852, 2005, doi: 10.2174/1381612043382666.
- [25] N. A. Al-Masoudi, N. J. Al-Salihi, Y. A. Marich, and T. Markus, “Synthesis, and Fluorescence Properties of Coumarin and Benzocoumarin Derivatives Conjugated Pyrimidine Scaffolds for Biological Imaging Applications,” *J. Fluoresc.*, vol. 25, no. 6, pp. 1847–1854, 2015, doi: 10.1007/s10895-015-1677-z.
- [26] Erdik, E. *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry, Seventh Edition*. 2020.
- [27] E. Pretsch, P. Bühlmann, and M. Badertscher, *Structure Determination of Organic Compounds: Tables of Spectral Data, Fifth Edition*. 2000.
- [28] S. Batari, G. Timari, A. Messmer, B. Potanyi, L. Vavari-Debreczy, “Synthesis of N-(1-aziridinyl)-6-fluoro-1,4-dihydro-4-oxoquinoline-3-carboxylic acids,” *Heterocycles*, vol. 45, no. 6, pp. 1097–1110, 1997.
- [29] R. Lahiri, A. A. Ansari, and Y. D. Vankar, “Recent developments in design and synthesis of bicyclic azasugars, carbasugars and related molecules as glycosidase inhibitors,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no. 12, pp. 5102–5118, 2013, doi: 10.1039/c3cs35525j.
- [30] C. Chakraborty, V. P. Vyavahare, V. G. Puranik, and D. D. Dhavale, “Synthesis of five and six membered aminocyclitols: stereoselective Michael and Henry reaction approach with d-glucose derived α,β -unsaturated ester,” *Tetrahedron*, vol. 64, no. 40, pp. 9574–9580, 2008, doi: 10.1016/j.tet.2008.07.049.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Optimization of Surface Roughness and Cutting Temperature in Turning of 1.4534 Stainless Steel under Sustainable Conditions

 Emine ŞİRİN^{a,*}

^a Department of Machine and Metal Technologies, Gümüşova Vocational School, Düzce University, Düzce, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: eminesirin@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1359478

ABSTRACT

1.4534 stainless steel, which is produced especially for aerospace applications, is frequently preferred in aircraft landing sets under high load and in highly corrosive environments. In addition to its superior properties, its machinability rate is low compared to other stainless steels. Moreover, improving 1.4534 stainless steel's machining performance is crucial since its formability problems. In this study, 1.4534 stainless steel was tested in a series of experiments under sustainable conditions (hBN, CO₂, and hBN+CO₂). Taguchi techniques were used in the experimental design to save cost and time. Three cooling levels (hBN, CO₂, and hBN+CO₂), three cutting speeds (140, 200, and 260 m/min), three feed rates (0.12, 0.16, and 0.20 mm/rev), and a constant cutting speed (0.8 mm) were used in the current study. Analysis of variance (ANOVA) was performed in the current study to determine the extent of the components' effects since cutting temperature and surface roughness were chosen as the performance standard. According to the test results obtained; hBN+CO₂ condition showed the best performance for surface roughness and cutting temperature.

Keywords: DIN 1.4534, Sustainable Manufacturing, Nanofluid, Cryogenic Cooling, Turning

1.4534 Paslanmaz Çeliğin Sürdürülebilir Koşullarda Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığının Optimizasyonu

ÖZ

Özellikle havacılık uygulamaları için üretilen 1.4534 paslanmaz çeliği, yüksek yük altındaki uçak iniş takımlarında, yüksek korozyon ortamlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Üstün özelliklerinin yanında diğer paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında işlenebilirlik oranı düşük mertebelerdedir. Dahası şekillendirilebilirliği merak konusu olan 1.4534 paslanmaz çeliğinin işleme verimliliğini artırmak son derece önemlidir. Bu çalışmada 1.4534 paslanmaz çeliği sürdürülebilir koşullar (hBN, CO₂ ve hBN+CO₂) altında bir dizi deneye tabi tutulmuştur. Maliyet ve zaman tasarrufu adına deney tasarımında Taguchi teknikleri kullanılmıştır. Deneyler üç farklı soğutma seviyesinde (hBN, CO₂ ve hBN+CO₂), üç farklı kesme hızı seviyesinde (140, 200 ve 260 m/dak), üç farklı ilerleme oranı seviyesinde (0,12 - 0,16 ve 0,20 mm/dev) ve sabit kesme hızında (0,8 mm) yürütülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının performans kriteri olarak tercih edildiği güncel çalışmada, faktörlerin etki düzeyinin anlaşılmasında varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için en iyi performansı hBN+CO₂ koşulu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: DIN 1.4534, Sürdürülebilir İmalat, Nanoakışkan, Kriyojenik Soğutma, Tornalama

I. INTRODUCTION

Stainless steels are alloys containing iron, carbon, molybdenum, chromium, and nickel. Since steels get their stainless properties from chromium, they must have at least 12% chromium in their composition. Due to its strong resistance to corrosion, retention of mechanical capabilities at high temperatures, environmental friendliness, ease of manufacture, and clean qualities, stainless steels are widely preferred materials [1,2]. Depending on their composition, these steels are either austenitic, semi-austenitic, or martensitic [3]. It has excellent mechanical properties, good toughness, and high resistance to surface cracking in harsh environments. Additionally, DIN 1.4534 Mo steel considerably maintains its mechanical qualities in adverse environmental conditions because of its superior corrosion resistance and strength compared to other precipitation-hardening stainless steels [4]. Due to its superior properties, 1.4534 stainless materials are used in the defense industry, aerospace components, food industry, petrochemical industry, and nuclear industry [3]. The extensive machining of these materials is necessary for the use of these stainless steels in a wide range of applications. During the machining process, cooling/lubrication is required for machining efficiency. Since the use of cutting fluid has detrimental impacts on both operator health and the environment, it is important to use environmentally friendly cooling and lubricating approaches [5]. Minimum quantity lubrication (MQL), nanofluid-based MQL, and cryogenic cooling conditions are the base characteristics of sustainable cooling conditions [6]. The MQL method involves using compressed air to atomize a tiny amount of cutting fluid into the cutting zone as an aerosol [7]. The cutting fluid is more efficient in this application since it is applied directly to the cutting zone. In addition, since it evaporates quickly, it does not leave residual oil, and the chips are easy to dispose of. However, the MQL method can be weak under heavy machining conditions [8]. In this situation, nanoparticles are employed to boost the MQL method's effectiveness [9]. Nanofluids are obtained by adding nanosized lubricant solid particles with different ratios and properties into the cutting fluid. MoS₂, hBN, Al₂O₃, SiO₂, CNTs, TiO₂, CuO, GNP, graphite, etc., are generally used as nanoparticles. According to the added nanoparticle properties, nanofluids improve the cutting fluid's physical, tribological, and thermal properties [10]. Studies on MQL and NanoMQL methods were reviewed in the literature. Under dry, MQL, and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) added nanofluid cutting conditions, Öndin et al. turned PH13-8 Mo stainless steel material. As experimental outcomes, measurements for surface roughness, tool wear, and cutting temperature were examined. The researchers found that the nanofluid cutting condition with the addition of MWCNTs) showed good performance in the experimental outputs [3]. Şirin and Kırak milling Inconel X-750 under dry, MQL, and nanofluid cutting conditions with the addition of hBN and MoS₂ for the machining performance of the superalloy material. Surface roughness, cutting temperature and force, tool wear and life were all researched by the investigators. At the conclusion of the tests, it was found that the cutting condition with hBN-added nanofluid demonstrated the best machining performance [11].

Hastelloy X superalloy material was exposed to machining tests by Şirin et al. in dry, MQL, SDS, and GA surfactant added graphene (GNP), and hBN nanofluid conditions. In terms of hole quality, cutting force, surface roughness, tool wear, tool life, and burr height, the researchers discovered that the hBN+GNP nanofluid condition with SDS surfactant performed better than other conditions [12]. In order to evaluate the tool life, surface roughness, cutting temperature, and tool wear characteristics, Yıldırım et al. turned Inconel 625 superalloy material under dry, MQL, and hBN added nanofluid cutting conditions. According to the study's outcomes, the hBN-added nanofluid cutting condition demonstrated good machining performance [8].

Cryogenic cooling is another form of sustainable cooling lubrication. Cryogens such nitrogen, carbon dioxide, helium, neon, and argon are injected into the cutting zone during the cryogenic cooling process to assure cooling [13]. Cryogenic cooling is preferred, especially in materials with high temperatures during machining. However, the cryogenic cooling method reduces the temperature value, which helps the plastic deformation of metals too much, making chip removal difficult and negatively affecting the surface quality [14,15]. In order to avoid all these disadvantages, hybrid cooling/lubrication conditions are among the ecological methods used recently. Hybrid methods increase machining efficiency by cooling and lubrication at the same time. Some of the studies conducted by researchers are given below.

Gupta et al. examined the tool wear criterion in detail by turning AA2024-T351 alloy material under MQL and cryogenic cutting conditions. They found that cryogenic conditions resulted in significant improvements in tool wear [16]. Ross et al. machined Monel 400 material on a lathe under dry MQL, CO₂ and CO₂+MQL (CMQL) cutting conditions and investigated the surface roughness, cutting temperature, tool wear, chip morphology and microhardness criteria. They found that CMQL cooling condition showed positive performance in cutting temperature, tool wear and surface roughness outputs [17]. Çelik et al. turned AISI 2507 duplex stainless steel using MQL, cryogenic, and hybrid (MQL+cryogenic) cutting conditions in order to study the surface quality of the material. According to the experimental findings, hybrid cutting conditions were the best for cutting in terms of surface quality [15]. Şirin, turned Haynes 25 super alloy materials under dry, MQL, GNP, MWCNT, MWCNT and hybrid GNP/MWCNT added nanofluid and N₂ cryogenic and GNP/MWCNT+N₂ cutting conditions. As a result of the experimental study, it was determined that while the N₂ condition showed superior performance in terms of cutting temperature, the hybrid GNP/MWCNT+N₂ cutting condition showed superior performance in terms of surface roughness and tool wear [18]. Pereira et al. turned an AISI 304 stainless steel sample under dry, MQL, cryogenic, and MQL+cryogenic cutting conditions to examine cutting force, surface integrity, and tool wear. The researchers discovered that the hybrid cutting condition produced superior machining efficiency outcomes [19]. Şirin studied the surface roughness and topography, cutting temperature, vibration, tool wear, tool life, and hBN added nanofluid and cryogenic cutting conditions when turning AISI 904L stainless steel alloy. As a result of the research, the author found that hBN+Cryogenic cutting condition showed good performance [20].

An in-depth review of the literature reveals that cryogenic treatment and MQL conditions improve machinability efficiency. However, it is understood that studies on 1.4534 stainless steel material are insufficient. In particular, there are no studies on cryogenic and hybrid cooling / lubrication of 1.4534 stainless steel material. Thanks to this study, it is aimed to bring the study in which 1.4534 stainless steel material is turned under sustainable cooling / lubrication conditions to the literature. Cutting settings included three different cooling/lubrication conditions (hBN, CO₂, and hBN+CO₂), three distinct cutting speeds (140, 200, and 260 m/min), three distinct feed rates (0.12, 0.16, and 0.20 mm/rev), and a constant depth of cut of 0.8 mm. Cutting temperature and Ra values of the machined surfaces were evaluated in turning experiments. In the current study using Taguchi L9 experimental design, the impact of cutting settings on surface roughness and cutting temperature was studied using the ANOVA approach.

II. MATERIALS and METHODS

The Accuway JT150 CNC lathe, which has a highest speed of 4500 rpm, was used for the turning tests. For the tests, a piece of stainless steel with a DIN 1.4534 specification and

dimensions of 250 mm in length and 50 mm in diameter was employed. Material denominations, chemical properties, and physical and mechanical properties of 1.4534 Mo steel are given in Table 1.

Table 1. 1.4534 Stainless steel denominations, chemical properties, and physical and mechanical properties

Material denominations	AMS 5629, AMS 2300, AMS 2315, DIN 1.4534, X3CrNiMoAl13-8-2, S13800
Chemical composition	Al: 1.06, C: 0.044, Cr: 12.51, Ni: 8.09, Si: 0.07, Mo: 2.1, Mn: 0.04, P: 0.005
Physical and Mechanical specifications	Tensile strength : 1413 MPa
	Yield strength : 1310 MPa
	Elongation : 10%
	Hardness : 43 HRc

Sandvik ISO SNMG 120404-MF 2220 coded insert cutting tools were used in turning experiments. Ti+Al₂O₃+TiN coating of the insert cutting tools was performed by the CVD method and specially produced for stainless steels. A Sandvik holder with the code PSB NR 2525 M 12 was used to mount the cutting tools on the CNC lathe. 1.4534 stainless steel test material was rigidly clamped between the chuck and tailstock. SKF Vario device was used in MQL experiments, and pressure (air: 8 bar), flowrate (60 mL/h), nozzle specification (specially produced from stainless steel material, nozzle diameter 2 mm), nozzle distance (20 mm) were kept constant in all experiments. Falcon K 151 high-performance oil was used as pure oil in MQL experiments. Table 2 lists the details of the MQL base oil that was utilized.

Table 2. MQL basefluid specifications

Appearance	Light yellow
Viscosity at 40 °C (*)	8.5 cSt
Viscosity at 100 °C (*)	2.5 cSt
Density at 20 °C (*)	0.860 g/cm ³
Flashpoint (DIN EN ISO 2592)	200 °C
Note: (*) ASTM D 7042	

Pure oil was mixed with 0.6% by volume of hBN nanoparticles (Nanografi Turkey) to generate nanofluid combinations. hBN nanoparticles are 99.95% pure and have an average size of 70 nm. The two-step process was chosen to generate the nanofluids because it is simple to use and less expensive. In the two-step method, nanoparticles are directly mixed in solid form with a base liquid. In the mixing process, it is seen that different approaches are applied in the literature. The most widely used mixing process was preferred and used in the current study. Firstly, solid dry nanoparticles were added directly to pure oil and mixed with a Daihan mechanical mixer HS 100D at 800 rpm for 1 hr. Secondly, a Termal magnetic stirrer N11151 M was used for 1 hr and 1550 rpm. Thirdly, it was mixed with a Bandelin ultrasonic mixer SonoPuls Hd3200 at 20 kHz for 0.5 hr. After mixing, the experiments were started without keeping the fresh nanofluids. No surfactant was preferred in the mixing process due to its disadvantages (foaming, decreasing thermal conductivity, increasing viscosity, etc.).

Snowy CO₂ was preferred for cryogenic cooling. CO₂ was stored in a storage cylinder (Özoto) at 50 bar pressure. During the experiments, 20 mL/h flow rate, 8 bar pressure, and nozzle values (30 degrees angle, stainless steel material, 2 mm diameter, 20 mm distance) were taken constant.

During the turning experiments, an Optris infrared (IR) camera PI 450 was used to capture the hotpoint temperature value in the cutting zone online. The calibration was completed online, and the IR camera was placed 300 mm away from the cutting zone. The manufacturer's catalog value was used to determine the emissivity value, which came to be 0.6. In the industrial sector, the degree of surface roughness on machined surfaces is crucial. Since professionals in academia and in the industrial sector regularly employ a typical surface roughness (Ra) value, Ra roughness characteristic values were taken into account in this study. According to ISO 4287:1997, measurements of surface roughness were taken. Ra measurements were performed using a mobile Mahr Marsurf PS10 equipment, which was calibrated initially. The information was gathered by averaging three separate values obtained from the machined surface's beginning, middle, and end. The sampling width and evaluation distance for evaluating surface roughness were measured 0.8 mm, 4.8 mm, respectively. Figure 1 illustrates the experimental configuration.

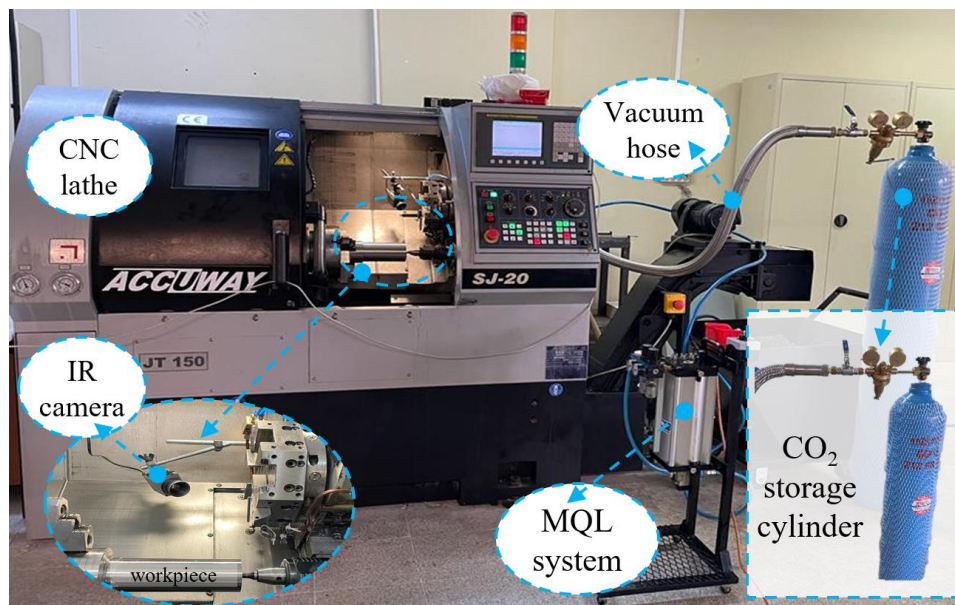


Figure 1. Details and main components of the experimental setup

III. TAGUCHI OPTIMIZATION

The experimental designs were prepared by considering Taguchi methods. Taguchi's experimental design method is an effective optimization method used to reduce processing costs by performing the minimum number of experiments. Taguchi method successfully analyzes optimization problems by predicting the results in advance. This optimization method saves time and cost by avoiding unnecessary experiments [21].

The metal forming industry frequently prefers the Taguchi optimization method to use time efficiently and reduce costs. In this study, Taguchi L9 experimental design was selected. In the optimization technique, cutting speed, cooling/lubrication conditions, feed rate were expressed by the abbreviation V_c , CL , and f respectively and were determined as factors. One of the crucial factors in operating components is surface quality. One of the other factors affecting surface quality is cutting temperature. For this reason, surface quality and cutting temperature were determined as output parameters. Table 3 lists the control variables and levels.

Table 3. Levels of the controls in the Taguchi experimental design

Factors	Symbol	Unit	Levels		
			1	2	3
Cooling/Lubrication	A	(CL)	hBN	CO ₂	hBN+CO ₂
Cutting speed (V _c)	B	(m/min)	140	200	260
Feed rate (f)	C	(mm/rev)	0.12	0.16	0.20

The Taguchi optimization approach produces functions that are translated into signal-to-noise (S/N), and the deviations between the required data and the experimental data are analyzed. Depending on the kind of function, the nominal best, biggest best, and smallest best approaches are employed to calculate S/N ratios. In this study, since the Ra and cutting temperature values are required to be low, the smallest best function equation (Equation 1) is used.

$$\eta = \frac{S}{N_s} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

The number of experiments and observed data are expressed as η and y in the equation, respectively. Following each test, the arithmetic average of three measurements taken from the machined surface was utilized to determine Ra values. Table 4 lists the values of Ra, cutting temperature, and S/N ratios that were determined.

Table 4. Ra, T values, and S/N ratios obtained from the experiments

No	A CL	B (V _c , m/min)	C (f, mm/rev)	Ra (μm)	Ra - S/N (db)	T (°C)	T - S/N (db)
1	hBN	140	0.12	1.054	-0.45681	170	-44.6090
2	hBN	200	0.16	1.187	-1.48901	186	-45.3903
3	hBN	260	0.20	1.812	-5.16157	191	-45.6207
4	CO ₂	140	0.16	1.031	-0.26236	133	-42.4770
5	CO ₂	200	0.20	1.987	-5.96541	145	-43.2274
6	CO ₂	260	0.12	0.794	2.00359	152	-43.6369
7	hBN+CO ₂	140	0.20	1.790	-5.05706	143	-43.1067
8	hBN+CO ₂	200	0.12	0.516	5.75262	152	-43.6369
9	hBN+CO ₂	260	0.16	0.965	0.31245	166	-44.4022

If the Table 4 is checked, Ra, T, Ra -S/N, and T-S/N are determined as 1.237 μm, 159.78 °C, -1.14706 dB, and -44.0119 dB, respectively. As a result of the analysis, the S/N response chart of the Ra quality characteristic is given in Table 5.

Table 5. Table of S/N responses for Ra values

Levels	Control factors		
	Cooling/lubrication (CL)	Cutting speed (V _c , m/min)	Feed rate (f, mm/dev)
	A	B	C
1	-2.3691	-1.9254	-2.4331
2	-1.4081	-0.5673	-0.4796
3	0.3360	-0.9485	-5.3947
Delta	2.7051	1.3581	7.8278

The values bolded in Table 5 give the highest orders of S/N values and the optimum conditions for the control factors. Ra surface roughness values, control factors, and optimum conditions for the factors are given in Figure 2.

When Figure 2 and Table 5 are evaluated together, it can be concluded that the optimum value of Ra surface roughness (0.516 μm) is obtained in A3, B2 and C1 conditions. To put it another way, the ideal circumstances for average roughness Ra in the machining of stainless steel material 1.4534 were identified as hBN+CO₂ hybrid cooling/lubrication condition, 200 m/min cutting speed, and 0.12 mm/rev feed rate.

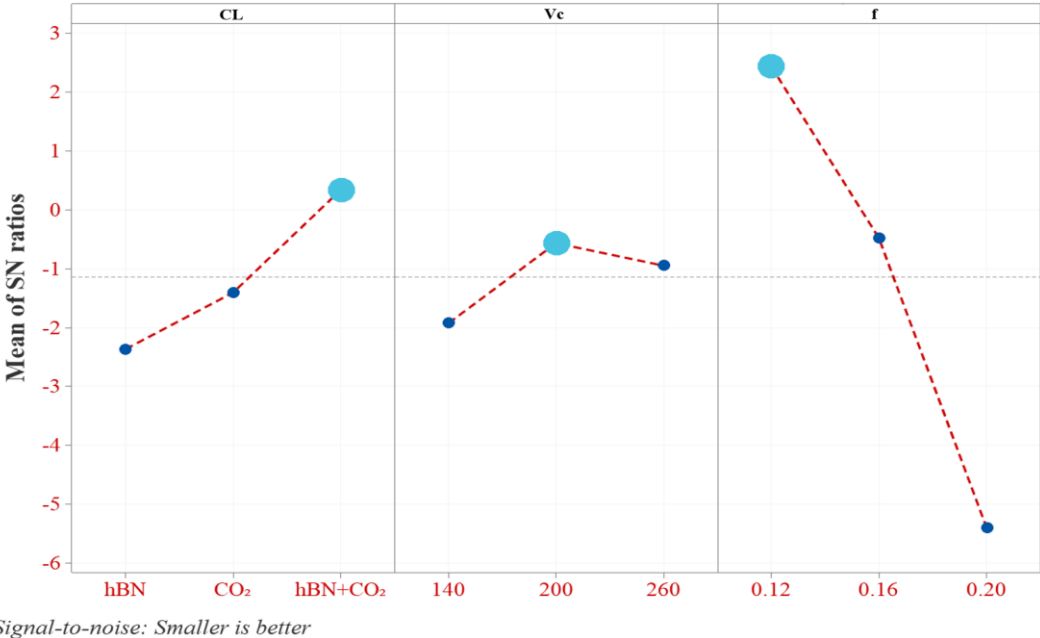


Figure 2. S/N ratio effect graph of Ra values

As a result of the optimization, the S/N response chart of the T quality outputs are given in Table 6. The values bolded in Table 5 give the highest orders of S/N values and the optimum conditions for the control factors.

Table 6. S/N response table for T values

Levels	Control factors		
	Cooling/lubrication (CL)	Cutting speed (V _C , m/min)	Feed rate (f, mm/dev)
	A	B	C
1	-45.21	-43.40	-43.96
2	-43.11	-44.08	-44.09
3	-43.72	-44.55	-43.98
Delta	2.09	1.16	0.13

T cutting temperature values, control factors, and optimum conditions for the factors are given in Figure 3.

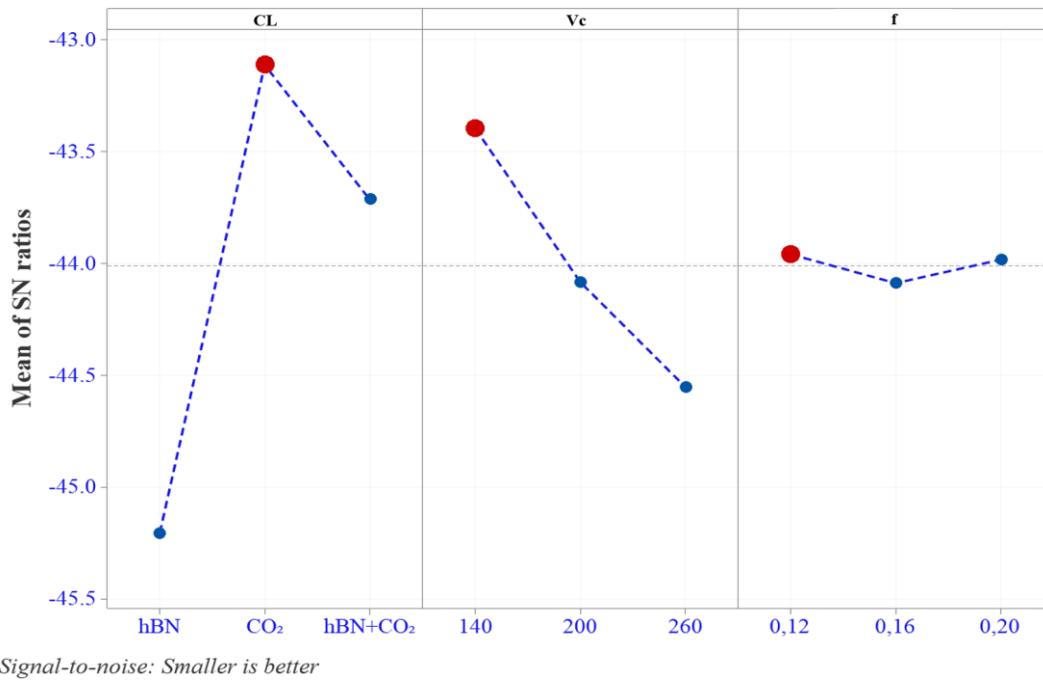


Figure 3. S/N ratio effect graph of T values

When Figure 3 and Table 6 are evaluated together, it can be concluded that the optimum value of T cutting temperature is obtained in A2, B1, and C1 conditions. The optimum conditions for cutting temperature in the machining of 1.4534 stainless steel material were determined as CO₂ hybrid cooling/lubrication condition, Vc 140 m/min cutting speed, and f 0.12 mm/rev feed rate.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. ASSESSMENT OF EXPERIMENTAL RESULTS

A. 1. Assessment of Surface Roughness Ra

The Ra variation due to cutting speed and feed rate in turning of DIN 1.4534 stainless steel is given in Figure 4. When the graph is analyzed, Ra diminished as cutting speed arose before increasing once again. The most effective value on Ra in terms of cutting speed was obtained at a cutting speed of 200 m/min, which is the medium cutting speed. When Figure 4 is examined further, it is seen that the lowest Ra value is obtained at a feed rate of 0.12 mm/rev, and the highest feed rate value is obtained at a feed rate of 0.20 mm/rev. When the feed rate is increased, Ra levels are shown to rise, indicating a decline in surface quality. Larger machining gaps occur on the workpiece surfaces as a result of an increase in the cutting tool's path during a given period of time [22]. Accordingly, feed rate is more efficient than cutting speed in terms of surface roughness [23]. The feed rate is the most efficient parameter for Ra, according to studies in the literature [24,25]. Given that a higher feed rate will result in a smaller tool radius for the nose to create more surface area on the workpiece [26], it can be inferred that it will result in an increase in the surface roughness value.

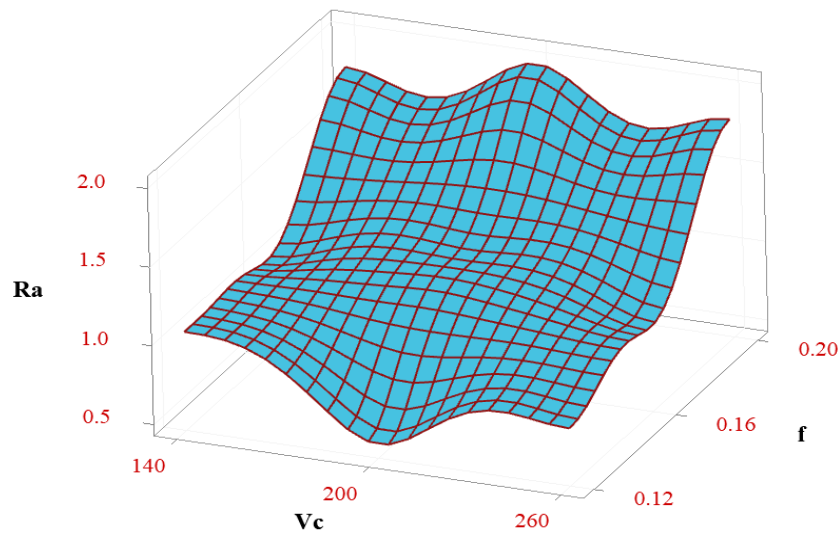


Figure 4. Ra surface roughness, cutting speed, and feed rate variations.

A. 2. Assessment of Ra Results under Different Conditions

In this phase of the investigation, the Ra values of the cooling/lubrication conditions were compared to the dry cutting condition. Several tests were run for this purpose at a constant cutting speed of 260 m/min and a feed rate of 0.20 mm/rev. Figure 5 displays the Ra values that the experiments achieved.

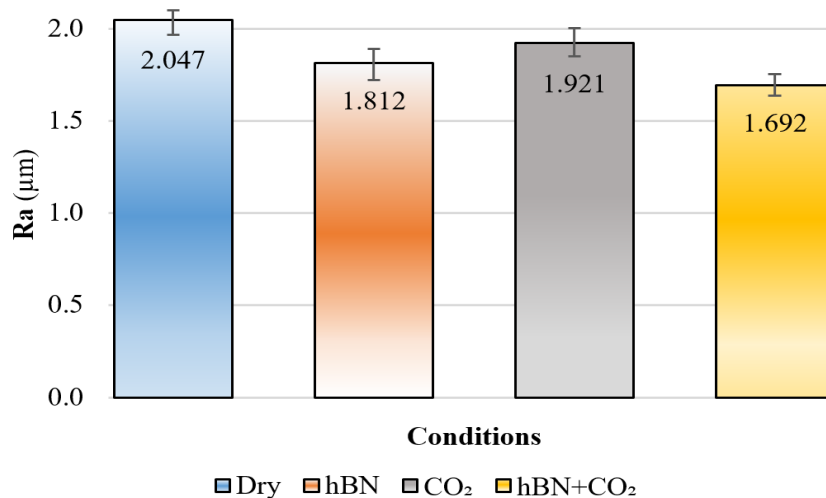


Figure 5. Ra surface roughness varies depending on the cooling and lubrication conditions.

Figure 5 indicates that the greatest (2.047 μm) and lowest (1.692 μm) surface roughness outputs were derived in dry and hBN+CO₂ hybrid conditions, respectively. In other words, compared to the dry cutting condition, the Ra surface roughness value tended to drop by 17.34% in the hBN+CO₂ hybrid cutting condition. Contrasted with the dry cutting situation, the hBN and CO₂ cutting conditions were reduced by 11.48% (1.812 μm) and 6.15% (1.921 μm), respectively.

Because the nanofluid with spherical hBN nanoparticles added offers excellent lubrication on the surface of the workpiece by having both polishing and mending effects on the surface, the hBN condition may be improved than dry cutting condition [11,12].

The low temperature values measured in the cryogenic cutting condition made the plastic deformation that helps chip formation difficult. Therefore, since the chip is difficult to separate from the cutting zone, it negatively affects the surface quality [27]. According to research published in the literature, cryogenic situations create problematic chip separation from the workpiece by lowering the cutting temperature below the plastic deformation limit [27,28]. In hybrid conditions, it is seen that a good surface quality is obtained due to effective lubrication by the nanofluid condition and cooling by the cryogenic condition. Similar situation was emphasized in the literature studies [20,29].

A. 3. Assessment of Cutting Temperature T Results

The variance of the highest temperatures recorded in the cutting zone while turning of 1.4534 stainless steel material depending on the cooling/lubrication condition and cutting speed is given in Figure 6. When analyzing the graph, it is seen that the cutting temperature tends to increase as the cutting speed increases. The lowest value in terms of cutting temperature was observed at the lowest cutting speed of 140 m/min, while the highest value was observed at the cutting speed of 260 m/min. It can be interpreted that the increase in cutting temperature increases in direct proportion to the increase in cutting speed.

Since it has been shown via literature research that as cutting speed increases, it also increases the cutting temperature [25,30]. The evaluation of the cooling and lubricating situations reveals that the CO₂ condition yields the lowest cutting temperature. Then came the hBN+CO₂ condition and the hBN condition, respectively. A cooling environment of around -80 °C may be created using only liquid CO₂ [31]. As a result, the CO₂ cryogenic cooling condition performed best in the cutting zone. This circumstance is supported by studies in the literature, which claim that CO₂ cryogenic cooling settings exhibit high performance [32].

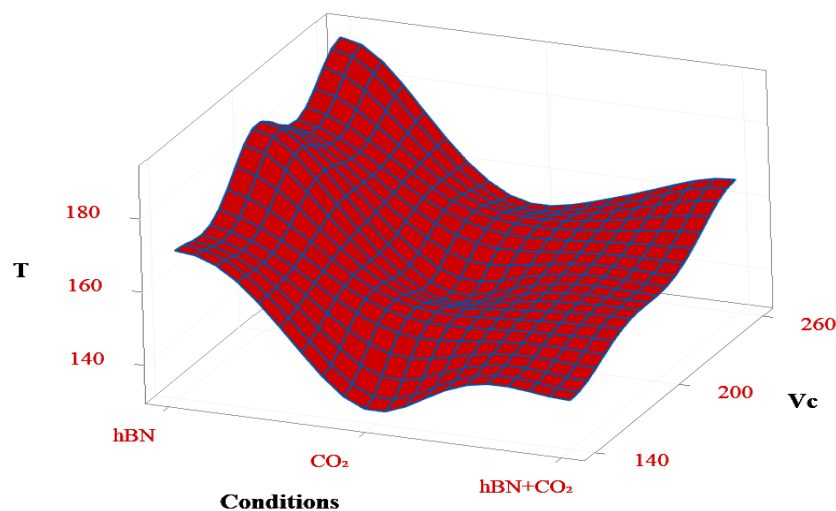


Figure 6. Cutting temperature variation depends on cooling conditions and cutting speed.

A. 4. Assessment of Cutting Temperature T Results under Different Conditions

Heat is created during machining as a result of the friction between the cutting tool and the workpiece [33]. These temperatures affect chip formation and surface quality. These temperature values, which help plastic deformation during chip formation, are evaluated. The values showing the maximum cutting temperature measured with an infrared camera in the cutting zone are given in Figure 7.

Figure 7 presented that, as predicted, cryogenic (CO₂) cutting condition had the lowest cutting temperature value (158 °C), whereas the dry condition without either cooling or lubrication had the highest temperature value (243 °C). Cutting temperature values were found to be lower when the hBN nanoparticle-containing nanofluid was employed, contrasted with the dry cutting situation. Depending on the circumstance of the dry cutting, a decrease of 21.39% and 30.49% was observed compared to hBN and CO₂+hBN hybrid cutting conditions, respectively. hBN nanoparticles' high thermal conductivity coefficient allows them to be useful in lowering the temperature in the cutting zone [34]. After the CO₂ (158 °C) cutting situation, the lowest recorded temperature (169 °C) was measured in the hybrid (hBN+CO₂) cutting condition with an increase of 6.96%. In cryogenic cutting conditions, the cutting zone is effectively cooled. A similar situation was emphasized in the studies conducted in the literature [28].

In hybrid conditions, cutting temperatures showed a small rise, due to the effect of the lubrication provided by the nanofluids and the decrease in the effect of cryogenic cooling. Similar results were observed in previous studies [29].

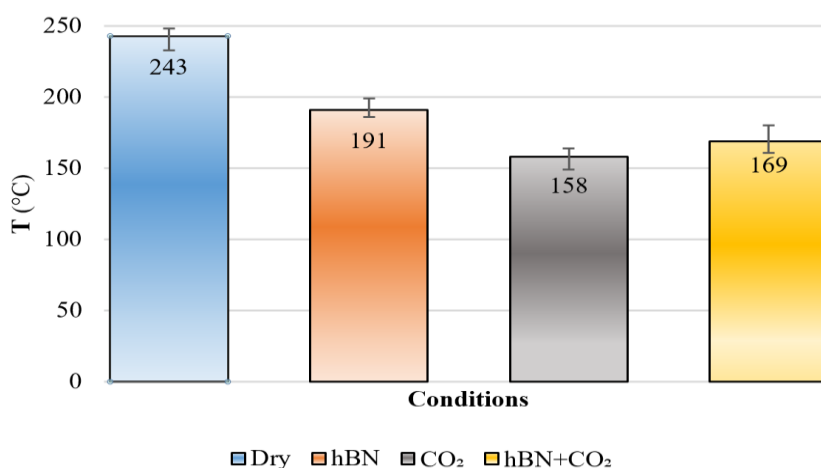


Figure 7. Variation in cutting temperature according to cooling/lubrication conditions.

B. ANOVA RESULTS

B. 1. Surface Roughness Ra ANOVA Results

The interactions between the control factors utilized in the experimental design were ascertained using the ANOVA approach. The surface roughness ANOVA findings are displayed in Table 7. P-values, DF (degrees of freedom), SS (sum of squares), MS (mean squares), F-values, and % effect ratios. The amount of significance of each variable on the findings is shown by PCR [35].

95% confidence and 5% significance limits were used for this study. F values are used to compare the effects of control variables in an ANOVA. The factor that affects the result the most is the factor with the largest F value [36].

The ANOVA findings show that the feed rate (C), at a rate of 90.60%, is the parameter that has the greatest impact on surface roughness. The findings of the ANOVA showed that the control parameters influencing surface roughness are C (feed rate-f) 90.60%, A (cooling method-CL) 5.18%, and B (cutting speed-Vc) 0.76%, respectively. The error in the calculation of the analysis was 3.47%.

Table 7. Results of surface roughness from analysis of variance.

Factors	Degree of Freedom [DF]	Sum of Squares [SS]	Mean of Squares [MS]	F Ratio	P Value	Impact Ratio [PCR] (%)
A	2	0.10704	0.053520	1.49	0.401	5.18
B	2	0.01567	0.007836	0.22	0.821	0.76
C	2	1.87389	0.936946	26.12	0.037	90.60
Error	2	0.07174	0.035872			3.47
Total	8					100.00

B. 2. Cutting Temperature ANOVA Results

As in the case of surface roughness, ANOVA method was used for the interactions between the control factors in the experimental design. Table 8 displays the ANOVA findings for cutting temperature. The significant level of each variable on the outcomes is shown by the P-values, degrees of freedom (DF), sum of squares (SS), mean squares (MS), F-values, and percent effect ratios (PCR) [35]. 95% confidence and 5% significance limitations were used for this study.

The impact of the control variables in the ANOVA is assessed by examining the F values. The variable with the highest F value is the component that has the most impact on the outcome. According to the ANOVA results, cooling method (A) is the most effective parameter, with 77.92% at cutting temperature. According to the ANOVA results, the control factors that are effective in cutting temperature are A (cooling method-CL) 77.92%, B (cutting speed-Vc) 21.26%, and C (feed rate-f) 0.64%, respectively. The error detected in the calculation of the analysis is 0.18%.

Table 8. Analysis of variance results of cutting temperature.

Control Factors	Degree of Freedom [DF]	Sum of Squares [SS]	Mean of Squares [MS]	F Ratio	P Value	Impact Ratio [PCR] (%)
A	2	2449.56	1224.78	440.92	0.002	77.92
B	2	668.22	334.11	120.28	0.008	21.26
C	2	20.22	10.11	3.64	0.216	0.64
Error	2	5.56	2.78			0.18
Total	8					100.00

IV. CONCLUSION

In the present study, 1.4534 Mo stainless steel turned under dry, hBN doped nanofluid, CO₂ and hBN+CO₂ hybrid cryogenic cooling/lubrication conditions. Performance criterias were preferred: surface roughness and cutting temperature during the turning process. The turning process was carried out at three different cutting speeds (140, 200, and 260 m/min), feed rates (0.12, 0.16, and 0.20 mm/rev), and constant depth of cut (0.8 mm). The optimum machining conditions were determined using Taguchi optimization method. The effect ratios of the experimental elements were ascertained using the ANOVA approach. The general findings obtained at the end of the sustainable turning process are given below.

- As a result of the evaluation of Ra values, the best surface quality was obtained under hBN+CO₂ hybrid cutting condition, 200 m/min cutting speed, and 0.12 mm/rev feed rate conditions. Compared to dry conditions, hBN, CO₂, and hBN+CO₂ cutting conditions reduced Ra values by 11.48%, 6.15%, and 17.34%, respectively.
- A2, B1, and C1 were the best configuration for the cutting temperature results. In other words, the optimum condition of cutting temperature for turning DIN 1.4534 stainless steel was CO₂ condition, 140 m/min cutting speed, and 0.12 mm/rev feed rate. Compared to the dry condition, hBN, CO₂, and hBN+CO₂ conditions reduced the cutting temperature values by 21.39%, 35%, and 30.49%, respectively.
- According to the results of ANOVA analysis Ra, the most effective parameter was feed rate with 90.6%, followed by cooling/lubrication conditions with 5.18% and cutting speed with 0.76%.
- When the ANOVA results of the temperature in the cutting zone were analyzed, the most effective parameter was the cooling/lubrication condition with 77.92%. Cooling/lubrication conditions were followed by cutting speed with 21.26% and feed rate with 0.64%. In ANOVA analysis, the error rates for Ra and T were 3.47% and 0.18%, respectively.

Overall evaluation of the study: The 1.4534 Mo stainless steel workpiece sustained turning experiments were successful. Moreover, it can be said that cryogenic CO₂ cooling was very successful in reducing the temperature in the cutting zone. For surface finish Ra, it was discovered that the hybrid hBN+CO₂ condition outperformed all other conditions.

V. REFERENCES

- [1] Y. Kayır, S. Aslan, A. Aytürk. "AISI 316Ti paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesici uç etkisinin taguchi yöntemi ile analizi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c.28, s.2, ss.363-372, 2013.
- [2] İ. Ercan, "Ph13-8 Mo paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2020.
- [3] O. Öndin, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç.V.Yıldırım, "Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel," *Tribology International*, vol.148, pp.10632, 2020.
- [4] Z. Guo, W. Sha, D. Vaumousse, "Microstructural evolution in a PH13-8 stainless steel after ageing," *Acta Materialia*, vol. 51, no.1, pp.101-116, 2003.
- [5] S. Akincioğlu, Ş. Şirin. "Evaluation of the tribological performance of the green hBN nanofluid on the friction characteristics of AISI 316L stainless steel," *Industrial Lubrication Tribology*, vol. 73, pp.1176-1186, 2021.
- [6] P. Shah, N. Khanna, "Comprehensive machining analysis to establish cryogenic LN2 and LCO2 as sustainable cooling and lubrication techniques," *Tribology International*, vol. 148, pp.106314, 2020.
- [7] M. Hadad, M. A. Beigi M, "Novel approach to improve environmentally friendly machining processes using ultrasonic nozzle–minimum quantity lubrication system," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp.741-756, 2021.

- [8] Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvak, Ş. Şirin, “The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625,” *Tribology International*, vol. 134, pp. 443-456, 2019.
- [9] E. Şirin, Ş. Şirin, “ Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel,” *Manufacturing Technologies and Applications*, vol.2, no.1, pp. 75-84, 2021.
- [10] H. Singh, V.S. Sharma, M. Dogra, “Exploration of graphene assisted vegetable oil base Minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI,” *Tribology International*, vol. 144, pp.106113, 2020.
- [11] Ş. Şirin, T. Kıvak, “ Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy,” *Tribology International*, vol. 137, pp. 180-92, 2019.
- [12] E. Şirin, T. Kıvak, Ç.V. Yıldırım, “ Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X,” *Tribology International*, vol. 157, pp.106894, 2021.
- [13] Ş. Şirin, “ Sustainability in manufacturing: future trends,” in *Sustainable Materials and Manufacturing Technologies*, 1st ed., vol. 1, London, İngiltere: CRC Press, 2023,ch. 9, pp.125–51.
- [14] Ç. V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvak, H. Ercan, M. Sarıkaya, “ An attempt towards green machining of Ni-based Hastelloy C4 alloy: Effect of vegetable oils and their combination with TiO₂ and SiO₂ nanoparticles on outputs,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 37, pp.e00668, 2023.
- [15] E. Çelik, Ş. Şirin, T. Kıvak, “AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin hibrit soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9 ss.929–42, 2021.
- [16] M. K. Gupta, P. Niesłony, M.E. Korkmaz, G.M. Królczyk, M. Kuntoğlu, P. Pawlus, “Potential use of cryogenic cooling for improving the tribological and tool wear characteristics while machining aluminum alloys,” *Tribology International*, vol. 183, pp.108434, 2023.
- [17] N.S. Ross, M. Ganesh, D. Srinivasan, M.K. Gupta, M.E. Korkmaz, J. B. Krolczyk, “Role of sustainable cooling/lubrication conditions in improving the tribological and machining characteristics of Monel-400 alloy,” *Tribology International*, vol. 176, pp.107880, 2022.
- [18] Ş. Şirin, “Investigation of the performance of cermet tools in the turning of Haynes 25 superalloy under gaseous N₂ and hybrid nanofluid cutting environments,” *Journal Manufacture Process*, vol. 76, pp. 428–43, 2022.
- [19] O. Pereira, A. Rodríguez, Al. Fernández-Abia, J. Barreiro, L. N. López de Lacalle, “Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, pp. 440–9, 2016.
- [20] Ş. Şirin, “AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliğin tornalanmasında mmy, hbn ve n₂ soğutma/yağlama koşullarının performans değerlendirmesi,” *International Journal of Innovation Engineering Application*, c.6, ss. 103-110, 2022.
- [21] D. Taylan, “Taguchi deney tasarımı uygulaması,” Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
- [22] A. Ercetin, K. Aslantaş, Ö. Özgün, M. Perçin, M.P.G. Chandrashekarappa, “Optimization of machining parameters to minimize cutting forces and surface roughness in micro-milling of mg13sn

alloy,” *Micromachines*, vol. 14, no. 8, pp. 1590-1602, 2023.

[23] H. Akkuş, H. Yaka, “Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy,” *Measurement*, vol. 167, pp.108465, 2021.

[24] C. Boga, T. Koroglu, “Proper estimation of surface roughness using hybrid intelligence based on artificial neural network and genetic algorithm,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 560-9, 2021.

[25] Ş. Şirin, T. Kıvak, “Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp.163–76, 2021.

[26] Y. Hua, Z. Liu, “Effects of cutting parameters and tool nose radius on surface roughness and work hardening during dry turning Inconel 718,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 2421–30, 2018.

[27] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ş. Şirin, “Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no.2, pp. 2079-92, 2020.

[28] E. Şirin, “Evaluation of tribological performance of MQL technique combined with LN₂, CO₂, N₂ ecological cooling/lubrication techniques when turning of Hastelloy C22 superalloy,” *Tribology International*, vol.188, pp.108786, 2023.

[29] Ç.V. Yıldırım, “Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625,” *Tribology International*, vol. 137, pp. 366-78, 2019.

[30] Ş. Şirin, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, “Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL,” *Tribology International*, vol. 153, pp.106673,2021.

[31] O. Pereira, A. Celaya, G. Urbikain, A. Rodríguez, A. Fernández-Valdivielso, L. Noberto López de Lacalle, “CO₂ cryogenic milling of Inconel 718: cutting forces and tool wear,” *Journal of Materials Research Technology*, vol. 9, pp. 8459-8468, 2020.

[32] D. M. Kim, H. I. Kim, H. W. Park, “Tool wear, economic costs, and CO₂ emissions analysis in cryogenic assisted hard-turning process of AISI 52100 steel,” *Sustainable Materials Technology*, vol. 30, pp. e00349, 2021.

[33] C. Devi, S.K. Mahalingam, R. Cep, K. Kouril, “Effect of cryo-treated cutting tool end milling on custom 450 stainless steel,” *Materials*, vol.16, no.13, pp. 4744, 2023.

[34] S. Bayır, E. Semerci, T. E. Bedri, “Preparation of novel thermal conductive nanocomposites by covalent bonding between hexagonal boron nitride nanosheet and well-defined polymer matrix. Compos Part A,” *Applied Science and Manufacturing*, vol. 146, pp.106406, 2021.

[35] M. Günay, E. Yücel, “Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron,” *Measurement*, vol. 46, pp.913–9, 2013.

[36] E. Şirin, Ş. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonu,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c.3, ss.132–44, 2015.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Exploring the Multifaceted Dynamics of Cartilage: A Comparative Modeling Study

 Sabri UZUNER ^{a,*}

^a Department of Mechatronics, Faculty of Engineering, Düzce University, Düzce, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: sabriuzuner@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1347207

ABSTRACT

Cartilage numeric models play a vital role in advancing our understanding of cartilage mechanics, disease progression, and the development of clinical interventions. The aim of this study is to investigate the influence of different mathematical models on cartilage mechanical behavior over time. A comparative analysis was conducted across three scenarios: the single-phase, biphasic, and fibril-reinforced poroelastic models. To understand how cartilage behaves over time, a 1000-second ramp relaxation displacement was applied. The findings reveal that the single-phase model falls short of capturing the time-dependent characteristics of cartilage. Conversely, the inclusion of fluid and collagen fibrils within the cartilage model significantly enhances cartilage resilience and enables the cartilage to behave non-linearly. The results presented herein make a substantial contribution to a deeper and more holistic comprehension of cartilage's dynamic behavior under compressive loads, shedding light on the intricate interplay between fluid pressure and fibril reinforcement.

Keywords: Single-phase, Biphasic, Fibril-reinforced, Cartilage, Finite Element Analysis

Kıkırdağın Çok Yönlü Dinamiklerinin İncelenmesi: Karşılaştırmalı Modelleme Çalışması

ÖZ

Kıkırdak sayısal modelleri, kıkırdak mekaniği, hastalık ilerlemesi ve klinik müdahalelerin geliştirilmesi konusundaki anlayışımızı ilerletmede hayati bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı, farklı matematiksel modellerin zaman içinde kıkırdak mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Üç senaryoda karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır: tek fazlı model, bifazik model ve fibril takviyeli poroelastik model. Kıkırdağın zaman içinde nasıl davrandığını anlamak için 1000 saniyelik bir rampa gevşeme deplasmanı uygulanmıştır. Bulgular, tek fazlı modelin kıkırdağın zamana bağlı özelliklerini yakalamakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, kıkırdak modeline sıvı ve kolajen fibrillerin dahil edilmesi kıkırdak direncini önemli ölçüde artırmakta ve kıkırdağın doğrusal olmayan bir şekilde davranmasını sağlamaktadır. Burada sunulan sonuçlar, sıvı basıncı ve fibril takviyesi arasındaki karmaşık etkileşime ışık tutarak, kıkırdağın basınç yükleri altındaki dinamik davranışının daha derin ve daha bütünsel bir şekilde anlaşılmasına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek-fazlı, Bifazik, Fibril-takviyeli, Kıkırdak, Sonlu Elemanlar Analizi

I. INTRODUCTION

Knee cartilage, a remarkable connective tissue, is pivotal in maintaining joint function and supporting load-bearing activities in the human body [1]. Cartilage, comprising a complex matrix of solid and fluid phases, exhibits intricate mechanical properties [2, 3]. The solid phase predominantly comprises proteoglycans and collagen [4]. Collagen fibrils interlace with proteoglycans, forming a porous scaffold accommodating the fluid phase [5]. The fluid phase within cartilage plays a multifunctional role, influencing its mechanical properties, nutrient exchange, and lubrication [6]. The interactions between the solid and fluid phases are essential for maintaining the tissue's compressive stiffness and distributing loads efficiently [7]. Collagen fibrils provide resistance against tensile forces, while proteoglycans in the matrix retain water, creating a swelling pressure that counteracts compressive loads. This dynamic equilibrium ensures cartilage resilience under various physiological conditions. Understanding the interplay between the solid and fluid phases, particularly the role of collagen, is crucial for unravelling the mechanisms behind cartilage biomechanics [8]. For this reason, many experimental [9-12] and numerical studies [13-15] have been conducted on cartilage.

Cartilage mechanics has been extensively illuminated through the amalgamation of finite element (FE) models and empirical evidence [16-18]. Predominantly, the mathematical underpinnings of these investigations have involved single-phase models, where the tissue is perceived as a solid entity [19-21]. These models, albeit elementary, encapsulate the foundational behaviour of articular cartilage by considering solely its solid phase. This approach, however, falls short of encapsulating the intricate fluid exudation dynamics intrinsic to cartilage. Nonetheless, this model finds utility in situations characterized by instantaneous loading, where the tissue promptly attains equilibrium. The biphasic and poroelastic models, derived from the Biot theory of soil consolidation [22], represent second-generation models for capturing flow-dependent phenomena like fluid exudation and imbibition [23]. In biphasic/poroelastic renditions, the cartilage's collagen fibrils and proteoglycan matrix, constituting the solid matrix, are encompassed by a solitary stiffness coefficient. However, a fibril-reinforced biphasic/poroelastic framework imparts distinction, calculating solid matrix stiffness across two constituents: the fibrillar network (collagen fibrils) and the non-fibrillar matrices (proteoglycan) [24]. The non-fibrillar matrix forms a continuous porous element, symbolizing the proteoglycan matrix, whereas the fibril network mirrors the collagen fibrils. Notably, the fibril architecture's role is limited to resisting tensile forces, not compression loads. Conversely, the non-fibrillar matrix shoulders tensile and compressive loads within the tissue.

This study compared the efficacy of cartilage numerical models, single-phase, biphasic, and fibril-reinforced poroelastic, using a 2D FE axisymmetric tissue model subjected to compressive forces. Incorporating various mathematical models to represent cartilage mechanics provides a comprehensive understanding of its behaviour under physiological conditions. This diversity of models enriches our insights, enables more accurate predictions, and facilitates advancements in diagnostics, treatment strategies, and biomechanical research.

II. MATERIAL and METHOD

A. CONSTITUTIVE EQUATIONS for CARTILAGE MODELS

Derived from Hooke's linear elastic model for solid materials, the single-phase model embodies a fundamental relationship between stress and strain [25]. This relationship parallels a spring anchored at one end and subjected to compression or elongation at the other. The essence of Hooke's model can be concisely encapsulated as follows:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

where σ is stress, ε is strain, and E is elastic (Young's) modulus. The biphasic model represents a longstanding approach to fluid-saturated tissue dynamics, encompassing the intricate motion of intra-articular fluid [25]. Within the framework of biphasic theory, both the solid matrix and the fluid are posited as intrinsically incompressible and non-dispersive. The main aspect of the theory lies in the fluid flow dynamics within the tissue. The constitutive equations governing this interplay, encompassing the stress-strain relationships for the solid, fluid, and holistic tissue, are encapsulated as follows:

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_f = -pI + \sigma_E \quad (2)$$

where σ_s , σ_f and σ_t are the solid, fluid, and total stress tensors, respectively. p symbolizes the fluid pressure, I represent the unit tensor, and σ_E denotes the effective solid tensor. In the context of the fibril-reinforced biphasic model, the mechanical response of tissues under loading is influenced not only by the isotropic biphasic matrix but also by the presence of the fibril network (collagen network) [23]. Consequently, the cumulative stress can be succinctly expressed as follows:

$$\sigma_t = \sigma_{nf} + \sigma_{fibril} - pI \quad (3)$$

where σ_{nf} and σ_{fibril} are the non-fibril and fibril network tensions, respectively.

$$\sigma_{fibril} = A\varepsilon + B\varepsilon^2 \quad (4)$$

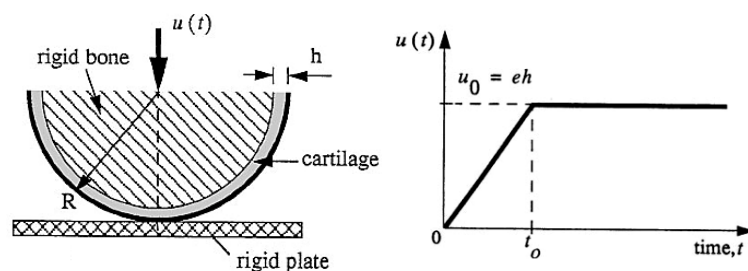
A and B represent material constants. These are numerical values that characterize a material's behavior under uniaxial (tensile) tests. These constants are typically determined through experimentation and analysis [26, 27].

B. 2D FE AXISYMMETRIC GEOMETRY and SOFT TISSUE MATERIAL PROPERTIES

The 2D axisymmetric geometry described by Wu et al. [28] was used in this study to symbolize the knee joint (

Figure 1a). The 2D knee joint model comprises a rigid bone and a rigid plate, along with a deformable sheet with a thickness of $h=1\text{mm}$ to represent the soft cartilage. The spherical cartilage radius (R) was 399mm and was connected to the rigid plate with the *ABAQUS/Standard 2020* tie option. The rigid plate remained stationary, while the rigid bone was permitted to move vertically concerning the plate. Within the simulated stress-relaxation tests, the spherical bone's motion against a rigid plane adheres to a predetermined displacement history, as exemplified by the controlled movement depicted in

Figure 1b). This movement entails a ramp compression phase at $t_0=100\text{s}$, succeeded by a subsequent relaxation period spanning $t=900\text{s}$. The maximum displacement achieved was $0.08 (u_0)$, corresponding to compression ratios expressed as $e = 8\%$. The same load and boundary conditions in the study [28] were applied in the present study. This approach was to compare our FE results with the analytical results of the study [28].



(a) (b)

Figure 1. (a) 2D axisymmetric geometry, (b) History of rigid bone motion [28].

As depicted in

Figure 1a, the contact area lies on the axis of symmetry, which enables us to simulate only half of the model to achieve meaningful results, thus saving unnecessary computational time; consequently, the horizontal length of the three sections was established at 35mm (

Figure 2).

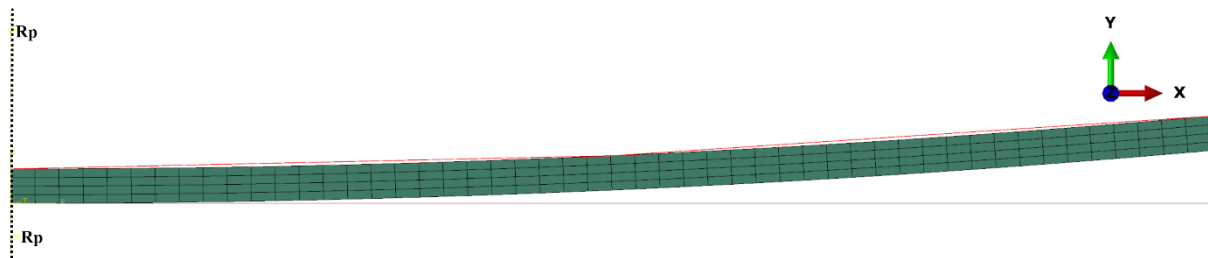


Figure 2. In the finite element model's geometry, the bone and the rigid plate are denoted by the red line, and the cartilage by the green mesh, with yellow reference points (R_p) affixed to each rigid segment.

The foundational model comprised 8 layers of elements radially and 100 elements circumferentially, resulting in a combined count of 800 elements. While the single-phase model employed linear quadrilateral elements (CAX4R), the biphasic and fibril-reinforced poroelastic models for quadratic quadrilateral porous elements (CAX8P). The number of elements was selected based on previous mesh density analysis [29] to ensure dependable results.

The bone was treated as rigid due to its considerable stiffness compared to the cartilaginous tissue. To replicate the cartilage's mechanical response during time-dependent compressive motion, single-phase, biphasic, and fibril-reinforced poroelastic models for soft tissue were discussed in the present study. The cartilage was regarded as an elastic isotropic material in the single-phase model. However, the biphasic model considers it viscoelastic to accommodate the fluid and solid phases. A porous permeability of $0.002\text{mm}^4/\text{Ns}$ was assumed, being isotropic. In contrast, the fibril-reinforced poroelastic model introduced fibrils along both horizontal and vertical axes to incorporate the effects of collagen. These fibrils were assumed to be orthotropic. Table 1 provides the respective material properties of cartilage for each model, and material properties were obtained in the literature [3].

Table 1. Cartilage material properties (The fibril orientation was considered orthotropic. The horizontal axis is represented by "x", while the vertical axis is represented by "y".)

Cartilage model	Single-phase (Eq. 1)	Biphasic (Eq. 2)	Fibril-reinforced poroelastic (Eq. 3 and 4)
Young's Module (MPa)	0.50	0.50	0.50
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Permeability (mm^4/Ns)	-	0.002	0.002
Void ratio	-	4	4
Material constant A (MPa)	-	-	1.38 (x) 0.41 (y)
Material constant B (MPa)	-	-	367.14 (x) 110.14 (y)

The method of surface-to-surface discretization was chosen for contact identification, with the *ABAQUS/Standard* small sliding option employed for the slide formulation, enabling substantial deformations of contacting bodies; this choice is predicated on the assumption of relatively small sliding between surfaces. Notably, the NLGEOM option was omitted in the *ABAQUS/Standard* finite element analysis to adhere to the small deformation theory, while a kinematic constraint was approximated to prevent contact overclosure, achieved through the linear penalty method that assigns contact pressure values to each surface node. A surface friction coefficient of 0.02 was adopted as a value within the typical range observed in human articular joints [30].

The *ABAQUS/Standard* analysis incorporated a soil consolidation procedure to replicate the biphasic and fibril-reinforced poroelastic models' behaviour involving solid-fluid interactions. Cartilage surfaces were chosen to be sealed to facilitate comparison with theoretical solutions [28].

III. RESULTS and DISCUSSIONS

In the present study, three commonly employed cartilage models within the existing literature, namely the single-phase, biphasic, and fibril-reinforced poroelastic models, were subjected to a comparative analysis of their mechanical responses under an 8% compression strain.

The fibril-reinforced poroelastic model exhibited the highest recorded reaction force within the range of models (

Figure 3). At the 100th second, corresponding to the maximal displacement, the reaction forces were measured at 5.37N for the single-phase model, 109N for the biphasic model, and notably higher at 369N for the fibril-reinforced poroelastic model, which these results are consistent with the results of the literature [31]. These findings highlight the magnifying impact of integrating fluid effects into the cartilage model, resulting in an increased reaction force, and the supplementary enhancement achieved through the introduction of fibril effects, further amplifying the reaction force. Similarly, the peak of contact pressure (3.18MPa) was attained within the fibril-reinforced model, in contrast to the pressures of 0.06MPa observed in the single-phase model and 0.8 MPa in the biphasic model. These findings demonstrate that the interplay of fluid and collagen within the cartilage contributes to an augmented resilience of the cartilaginous tissues.

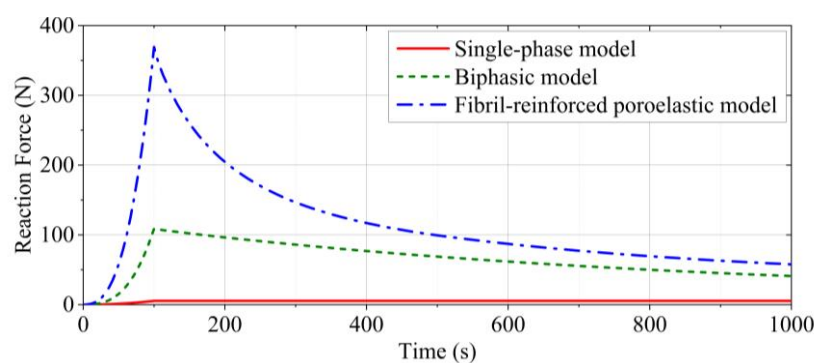


Figure 3. Reaction forces on the reference point of the rigid plate after applying the compression force.

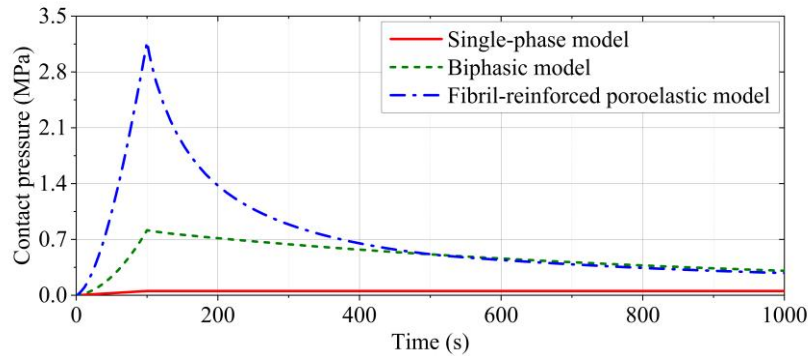


Figure 4. Temporal Variations in Contact Pressure.

Figure 4 shows the maximum contact variations over time for each model. The maximum contact pressures were obtained by the *ABAQUS* CPRESS query option from the element of each model where the contact pressure reached the maximum. Since biphasic and fibril-reinforced poroelastic models account for the fluid effect, the maximum contact pressure decreased with time in these models thanks to fluid exudation from cartilage. In contrast, contact stress reduction was not observed in the single-phase model, which only considers the solid phase of soft tissue.

Notably, while

Figure 3 and

Figure 4 could not encapsulate the temporal dynamics inherent in the single-phase model, the biphasic and fibril-reinforced poroelastic models effectively showcased the intricate temporal variations characterizing cartilage mechanics. This phenomenon became evident through the distinct manifestation of a relaxation effect, where the mechanical response of the cartilage demonstrated a gradual and noticeable decline in force over time. In

Figure 3 and

Figure 4, when examined in terms of relaxation times, it is observed that the fibril-reinforced model had a faster relaxation time despite generating higher stress. This intriguing observation may be attributed to the influence of collagen fibers in soft tissues arising from their different structural characteristics. Collagen fibers play a crucial role in imparting structural resilience to tissues. They exert a constraining effect on the mobility and deformation of tissues. Moreover, collagen fibrils provide the greatest resistance against tensile forces [32-34]. This collective effect, possibly facilitated by the complex collagen fibril network, could contribute to a faster relaxation response, enhancing the tissue's intrinsic ability to return to its initial configuration after deformation. However, as the fluid flows move the collagen fibrils, it applies drag forces on them. These forces are expected to cause the fluid to move more slowly and have a longer relaxation period [35]. The reason for this significant difference in our results may be interesting to investigate.

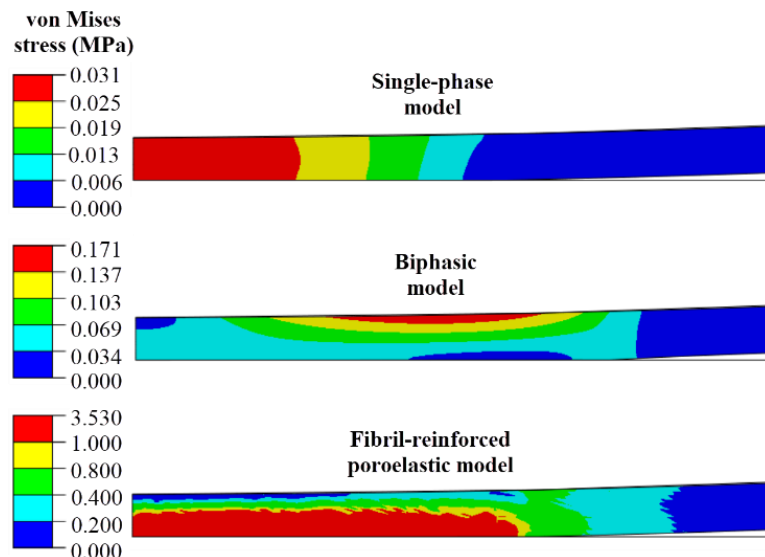


Figure 5. von Mises stress distributions in cartilage models under 0.08mm compression at 100th seconds. For the convenience of readers, only the partial, where the pressure occurred, has shown instead of the whole cartilage. The reference axis is on the left side.

There were also significant differences in von Mises stress distribution between the models (

Figure 5). The high-pressure distribution was centred around the reference axis in the single-phase, while in the other two models, it occurred in different regions of the cartilage. In addition, as with the contact pressure and reaction force, the highest von Mises stress value occurred in the fibril-reinforced model, followed by the biphasic and the single-phase models, respectively. These results show that the single-phase model fails to capture the time-dependent non-linear behaviour of the cartilage under the relaxation scenario. However, the fluid flow considered in the other two models allowed for stress distribution throughout the tissue, ensuring the nonlinear behaviour of the cartilage. This finding aligns with previous studies emphasizing the non-linear behaviour of cartilage under compressive forces [3, 23]. It is worth noting that in the biphasic model, the highest stress distribution occurred in the upper region of the cartilage, away from the reference region. Conversely, in the fibril-reinforced model, the maximum stress distribution began in the lower region of the cartilage, extending from the reference line. This distinction may be attributed to the downward movement of fluid as displacement increases over 100 seconds. During constant displacement (100s-1000s), collagen fibrils restrict fluid passage to the upper layers through drag forces.

Table 2. Contact length between cartilage and rigid plate at the 100th second.

Maximum contact length	
Single-phase	195mm
Biphasic	318mm
Fibril-reinforced poroelastic	227mm

Table 2 shows the contact length between the cartilage surface and the rigid plate when the compression force reaches its maximum. The remarkable result occurred in the biphasic model. The reaction force, contact pressure, and von Mises stress in the biphasic model are less than in the fibril-reinforced poroelastic model, but the contact length is 40% greater. This result proves collagen fibrils are an important inhibitory factor in cartilage deformation. Collagen fibrils prevented the transverse elongation of the cartilage under compressive force, resulting in less contact length.

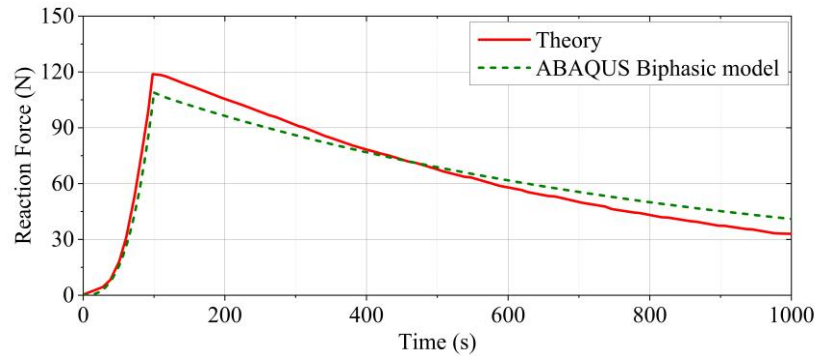


Figure 6. Comparison of the theoretical results [28] with the analysis results predicted in the presented study.

In this study, various mathematical models were applied to the cartilage model derived from the research conducted by Wu et al. [28]. In their investigation, they examined the behaviour of the biphasic cartilage model under a 0.08mm compression displacement through theoretical calculations. Figure 6 demonstrates a substantial alignment between the reaction force obtained from our finite element analysis and the theoretical reaction force outlined in their study.

The limitation of this study may be the use of 2D cartilage models instead of 3D cartilage models. A 2D model represents cartilage as a flat, two-dimensional structure, neglecting the complex 3D geometry of real cartilage tissue. Moreover, in some areas of cartilage, collagen fibril is crucial in its mechanical behaviour. 3D models can better represent the orientation and reinforcement effect of these fibrils. Despite all these, the reason for choosing a 2D dimensional model in our study was to increase the reliability of the FE analysis results by comparing them with the theoretical results in the literature. Moreover, it has been clearly emphasized in the studies on 3D cartilage models that taking fibril and fluid into account significantly affects cartilage mechanics. Using a 2D model may be a simple way to compare mathematical model performances.

IV. CONCLUSION

A comparative analysis was performed in three cases to investigate the mathematical cartilage model effect: single-phase model, biphasic model, and fibril-reinforced poroelastic model. To capture the behaviour of the cartilage concerning time, a ramp relaxation displacement of 1000 seconds was applied. The obtained results have demonstrated that the single-phase model fails to capture the time-dependent behavior of cartilage. However, incorporating the effects of fluid and collagen fibrils in the cartilage model has clearly shown a significant increase in cartilage resilience. The results presented herein contribute significantly to an enhanced and comprehensive comprehension of the dynamic behavior exhibited by cartilage under compressive loads, furnishing insights into the intricate interplay between fluid pressure and fibril reinforcement.

V. REFERENCES

- [1] A. Maroudas, "Physicochemical properties of cartilage in the light of ion exchange theory", *Biophysical Journal*, vol. 8, no. 5, pp. 575-595, 1968.
- [2] V.C. Mow, M.H. Holmes, and W.M. Lai, "Fluid transport and mechanical properties of articular cartilage: a review", *Journal of Biomechanics*, vol. 17, no. 5, pp. 377-394, 1984.

- [3] S. Uzuner, L. Li, S Kucuk, and K. Memisoglu, "Changes in knee joint mechanics after medial meniscectomy determined with a poromechanical model", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 142, no. 10, pp. 101006, 2020.
- [4] J. Eschweiler, N. Horn, B. Rath, M. Betsch, A. Baroncini, M. Tingart, and F. Migliorini, "The biomechanics of cartilage—An overview", *J Life*, vol. 11, no. 4, pp. 302, 2021.
- [5] E. Kheir and D. Shaw, "Hyaline articular cartilage", *Orthopaedics and Trauma*, vol. 23, no. 6, pp. 450-455, 2009.
- [6] Z. Abusara, M. Von Kossel, and W. Herzog, "In vivo dynamic deformation of articular cartilage in intact joints loaded by controlled muscular contractions", *J PloS One*, vol. 11, no. 1, pp. e0147547, 2016.
- [7] S. Uzuner, G. Kuntze, L. Li, J. Ronsky, and S. Kucuk, "Creep behavior of human knee joint determined with high-speed biplanar video-radiography and finite element simulation", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 125, no. pp. 104905, 2022.
- [8] J.A. Buckwalter, H.J. Mankin, and A.J. Grodzinsky, "Articular cartilage and osteoarthritis", *Instructional Course Lectures-American Academy of Orthopaedic Surgeons*, vol. 54, no. pp. 465, 2005.
- [9] K. Boettcher, S. Grumbein, U. Winkler, J. Nachtsheim, and O. Lieleg, "Adapting a commercial shear rheometer for applications in cartilage research", *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, no. 9, pp. 093903, 2014.
- [10] J. Stolberg-Stolberg, P. Foehr, I. Pflieger, L. Kuntz, C. Von Deimling, A. Obermeier, P.M. Proding, C.U. Grosse, and R. Burgkart, "Analysis of cartilage creep recovery using a highly dynamic closed-loop test system", *Journal of Bionic Engineering*, vol. 15, no. 6, pp. 1057-1066, 2018.
- [11] J.J. Elsner, S. Portnoy, F. Guilak, A. Shterling, and E. Linder-Ganz, "MRI-based characterization of bone anatomy in the human knee for size matching of a medial meniscal implant", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 132, no. 10, pp. 2010.
- [12] S. Uzuner, M.L. Rodriguez, L.P. Li, and S. Kucuk, "Dual fluoroscopic evaluation of human tibiofemoral joint kinematics during a prolonged standing: A pilot study", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 794-800, 2019.
- [13] F. Galbusera, M. Freutel, L. Dürselen, M. D'aiuto, D. Croce, T. Villa, V. Sansone, and B. Innocenti, "Material models and properties in the finite element analysis of knee ligaments: a literature review", *Frontiers in Bioengineering Biotechnology*, vol. 2, no. pp. 54, 2014.
- [14] M. Freutel, H. Schmidt, L. Dürselen, A. Ignatius, and F. Galbusera, "Finite element modeling of soft tissues: material models, tissue interaction and challenges", *J Clinical Biomechanics*, vol. 29, no. 4, pp. 363-372, 2014.
- [15] A.E. Peters, R. Akhtar, E.J. Comerford, and K.T. Bates, "Tissue material properties and computational modelling of the human knee: A critical review", *PeerJ Preprints*, pp. 1-48, 2018.
- [16] V.C. Mow, S. Kuei, W.M. Lai, and C.G. Armstrong, "Biphasic creep and stress relaxation of articular cartilage in compression: theory and experiments", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 102, no. 1, pp. 73-84, 1980.

- [17] G. Ateshian, W. Lai, W. Zhu, and V. Mow, "An asymptotic solution for the contact of two biphasic cartilage layers", *Journal of Biomechanics*, vol. 27, no. 11, pp. 1347-1360, 1994.
- [18] L.P. Li, M.D. Buschmann, and A. Shirazi-Adl, "Strain-rate dependent stiffness of articular cartilage in unconfined compression", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 161-168, 2003.
- [19] H. Atmaca, A. Özkan, İ. Mutlu, T. Çelik, L. Ugur, and Y. Kisioglu, "The effect of proximal tibial corrective osteotomy on menisci, tibia and tarsal bones: a finite element model study of tibia vara", *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 10, no. 1, pp. 93-97, 2014.
- [20] J.M. Colletti Jr, W.H. Akeson, and S.L. Woo, "A comparison of the physical behavior of normal articular cartilage and the arthroplasty surface", *JBJS*, vol. 54, no. 1, pp. 147-160, 1972.
- [21] G. Kempson, M. Freeman, and S. Swanson, "The determination of a creep modulus for articular cartilage from indentation tests on the human femoral head", *Journal of Biomechanics*, vol. 4, no. 4, pp. 239-250, 1971.
- [22] M.A. Biot, "General theory of three-dimensional consolidation", *Journal of Applied Physics*, vol. 12, no. 2, pp. 155-164, 1941.
- [23] M. Kazemi and L. Li, "Computational Poromechanics of Human Knee Joint", in *Journal of Physics: Conference Series, presented at IOP Publishing*, vol. 341, no. 1, pp. 0120142012, 2012.
- [24] L. Li, J. Soulhat, M. Buschmann, and A. Shirazi-Adl, "Nonlinear analysis of cartilage in unconfined ramp compression using a fibril reinforced poroelastic model", *Clinical Biomechanics*, vol. 14, no. 9, pp. 673-682, 1999.
- [25] R.K. Korhonen and S. Saarakkala, "Biomechanics and modeling of skeletal soft tissues", *Theoretical Biomechanics*, vol. 6, pp. 113-132, 2011.
- [26] J.J. Sarver, P.S. Robinson, and D.M. Elliott, "Methods for quasi-linear viscoelastic modeling of soft tissue: application to incremental stress-relaxation experiments", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 125, no. 5, pp. 754-758, 2003.
- [27] L. Yoo, H. Kim, V. Gupta, and J.L. Demer, "Quasilinear viscoelastic behavior of bovine extraocular muscle tissue", *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, vol. 50, no. 8, pp. 3721-3728, 2009.
- [28] J. Wu, W. Herzog, and M. Epstein, "Evaluation of the finite element software ABAQUS for biomechanical modelling of biphasic tissues", *Journal of Biomechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 165-169, 1997.
- [29] S. Uzun, E. Zurnacı, M. Rodriguez and S. Kucuk, "Investigation of the effect of mesh density and element type on behavior of biphasic soft tissues in finite element analysis", in *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES'18)*, Karabuk, Türkiye, May 11-13, 2018, pp. 693-697.
- [30] V.C. Mow, G.A. Ateshian, and R.L. Spilker, "Biomechanics of diarthrodial joints: a review of twenty years of progress", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 115, no. 4B, pp. 460-467, 1993.

- [31] M. Kazemi, Y. Dabiri, and L.P. Li, "Recent advances in computational mechanics of the human knee joint", *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2013, no. Special Issue, pp. 27, 2013.
- [32] H. Tang, M.J. Buehler, and B. Moran, "A constitutive model of soft tissue: from nanoscale collagen to tissue continuum", *J Annals of Biomedical Engineering*, vol. 37, no. pp. 1117-1130, 2009.
- [33] J. Soulhat, M. Buschmann, and A. Shirazi-Adl, "A fibril-network-reinforced biphasic model of cartilage in unconfined compression", *J Biomech Eng.*, vol. 121, no. 3, pp. 340-347, 1999.
- [34] L.P. Li, J.T.M. Cheung, and W. Herzog, "Three-dimensional fibril-reinforced finite element model of articular cartilage", *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 47, no. 6, pp. 607, 2009.
- [35] P.L. Chandran and V.H. Barocas, "Microstructural mechanics of collagen gels in confined compression: poroelasticity, viscoelasticity, and collapse", *J. Biomech. Eng.*, vol. 126, no. 2, pp. 152-166, 2004.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Design, Manufacturing, and Comparative Analysis of a Mini Extruder for Polymer Flow Characterization: A Case Study on HDPE and PMMA Polymers

 Emin USLU ^{a,*},  Galip YILMAZ ^a

^a Department of Electronics and Automation, Bayburt University, Bayburt, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: euclu@bayburt.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1272683

ABSTRACT

Polymer extrusion is one of the most widely used polymer processing methods and the sole option for many standard products. The modern extrusion machine has a very sophisticated design; for example, the extrusion screw has different zones and complex geometry. Determining the proper processing settings is always a challenge for engineers. Additionally, complex rheological properties of the polymers in extrusion sometimes yield challenging and unpredictable problems to troubleshoot. For convenience, a small-scale extrusion machine can be used to troubleshoot and analyze the polymers rather than the large manufacturing machines that are hard to work with. This study has produced a small-scale extrusion machine that is easy to manufacture without deviating from the extrusion process's nature. The extruder, whose production details are given, was tested with two different polymers: HDPE and PMMA. The correct temperature and screw rotation speed were determined with the extruder for the proper process parameters. In addition, the temperature-viscosity relationship of the polymers' flow nature was also determined.

Keywords: On-site viscosity testing, Extrusion, Polymer processing, Equipment designing, HDPE, PMMA

Polimer Akış Karakterizasyonu için Bir Mini Ekstrüderin Tasarımı, Üretimi ve Karşılaştırmalı Analizi: HDPE ve PMMA Polimerleri Üzerine Bir Uygulama

ÖZ

Polimer ekstrüzyon, en yaygın kullanılan polimer işleme yöntemlerinden biridir ve birçok standart ürün için tek seçenektir. Modern ekstrüzyon makinesi çok karmaşık bir tasarıma sahiptir; örneğin ekstrüzyon vidasının farklı bölgeleri ve karmaşık geometrisi vardır. Doğru proses ayarlarını belirlemek, mühendisler için her zaman bir zorluk olmuştur. Ek olarak, polimerlerin karmaşık reolojik özellikleri bazen çözülmesi zor ve öngörülemeyen sorunlara yol açar. Kolaylık sağlamak için, çalışması zor olan büyük imalat makinelerinden ziyade polimerlerin sorunlarını gidermek ve analiz etmek için küçük ölçekli bir ekstrüzyon makinesi kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında, ekstrüzyon işleminin doğasından sapmadan üretimi kolay, küçük ölçekli bir ekstrüzyon makinesi üretilmiştir. Üretim detayları verilen ekstrüder, HDPE ve PMMA olmak üzere iki farklı polimer ile test edilmiştir. Uygun proses parametreleri için ekstrüder ile doğru sıcaklık ve vida dönüş hızı belirlenmiştir. Ayrıca bu polimerlerin akış özelliklerinin tayini sıcaklık-viskozite ilişkisi belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yerinde viskozite testi, Ekstrüzyon, Polimer işleme, Ekipman tasarımı, HDPE, PMMA

I. INTRODUCTION

Among engineering polymers, thermoplastics hold particular significance. Unlike other types, thermoplastics can be reshaped through reheating and therefore able to possess a suitable structure for recycling [1]. Polymer recycling has become increasingly crucial due to growing environmental pollution and human population [2, 3]. Three primary methods are used in the processing of thermoplastic polymers: injection molding, extrusion, and compression molding [4, 5]. Extrusion offers a continuous production approach where the material is fed into a machine barrel and passed through a die at the outlet. As such, it is considered one of the most essential polymer processing technologies in the industry, enabling highly economical and rapid production [6]. Examples of extrusion applications include plastic pipes, PVC profiles for windows and doors, cable coatings, and more [7-9].

Extrusion machines, available in various sizes, from mini desktop types to industrial ones, are used for different purposes [10]. The modern extrusion screw with a helical structure crushes and moves the material forward within the barrel, generating heat through internal friction [11]. Additionally heating the barrel allows the polymer material to reach the correct processing temperature [12]. The design of the extrusion screw ensures the expulsion of unwanted substances and results in a high-quality molten polymer [13]. Different screw designs can further enhance polymer melt quality by creating low-pressure points for moisture and free radicals removal [14]. To simplify polymer behavior analysis, working with simpler screw and barrel designs for testing purposes can be beneficial.

Regardless of the screw design, the production in the extruder should not be interrupted [15]. Various issues can disrupt the continuous process of extrusion. For instance, heating problems can lead to incorrect product geometry, while the presence of permanent moisture or trapped air may cause bubbles in the product. Polymer degradation or overheating can make the melt strength sensitive to gravity. When such problems arise, the product being extruded is wasted [16]. In addition, when a new material and a new production are used, the extrusion material can be wasted due to too much trial and error [6]. For this reason, a small-scale test extruder can assist the operator in quick problem-solving and setting the correct parameters.

Even if a polymer material is purchased from the same company, it may vary in viscoelastic properties from package to package [17]. In addition, manufacturers benefit from developing composites [18] and recycling by adding scrap materials to the virgin polymer in low proportions (e.g., 25 %) [19, 20]. Therefore, the melt properties of the polymer material may change. It has also been reported that some polymers are very moisture sensitive [21]. For example, the increase in humidity in summer compared to winter can change the material's behavior due to its sensitivity to humidity. Monitoring possible changes in the melt behavior of the polymer is very important for the success of the extruder process. It is necessary to observe the viscosity values of the polymer periodically in terms of quality control and reliability of production. However, these values are measured with expensive and inaccessible rheometers [22]. Using rheometers requires expertise, and on-site use is not always practical. This is why a test extrusion is needed to perform material and process evaluation alongside the larger machines active in production. This way, material and process parameters can be evaluated in this test extrusion without stopping the production. There is a lack of a study in the literature that details the production and use of a test extrusion for this need.

Within the scope of this study, a small-scale single screw extruder was designed and manufactured to be used as on-site test equipment for analyzing the process. The engineering designs of the extruder were given in detail, and its repeatability was ensured. The extruder was tested with a widely used polymer, high-density polyethylene grade (HDPE), and a unique polymer, polymethyl methacrylate (PMMA) polymer, for the purpose of the trial. Representative viscosity and shear rate were calculated according to the instantaneous power requirement of the motor. The effect of pressure on the melt properties was determined by operating the extruder with and without a die. Thus, the effectiveness of the extruder as a test equipment has been demonstrated successfully.

II. MATERIALS AND METHOD

A. MATERIAL

A general-purpose High-density polyethylene (HDPE) from LyondellBasell (grade: 990498) was used in this study since it is a commonly known polymer. It was decided to use polymethyl methacrylate (PMMA) as an alternative polymer due to its distinctive and unique properties. An extrusion grade of PMMA resin (grade: Acrypet VG01) was used.

Figure 1 shows pictures of the virgin granule forms of these two polymers. HDPE has a very low hardness and a more spherical granule geometry, while PMMA has a much higher hardness [23] and a cylindrical granule structure with sharper corners. Since these two different granules were expected to exhibit two different behaviors while moving in the barrel, it was decided to compare them in this study.

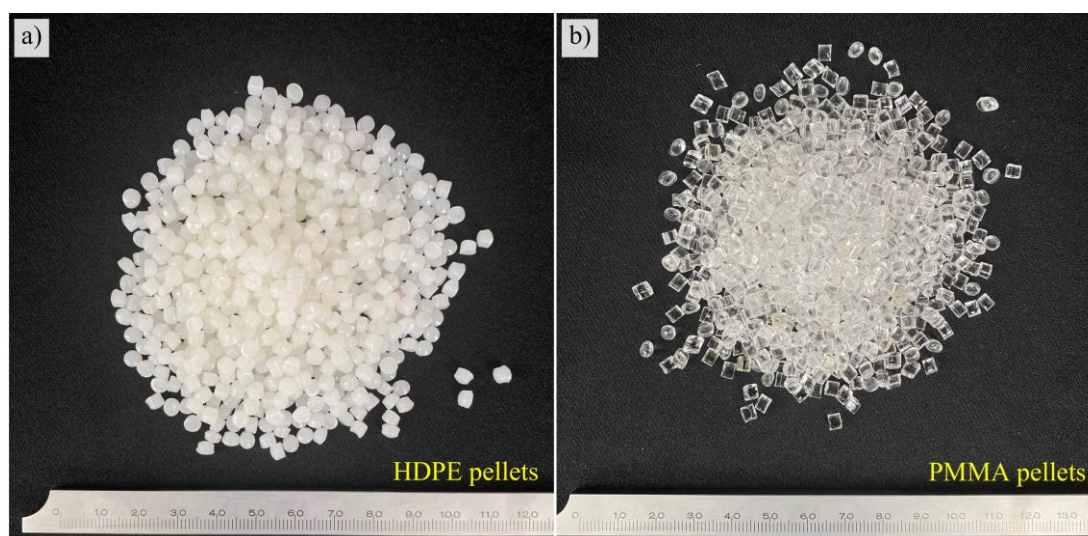


Figure 1. Polymer pellets (granules) pictures a) HDPE and b) PMMA pellets

B. PROCESSING PARAMETERS

The granule feed rate was set at 0.8 grams/minute for 3.5 volts, precisely adjusted by a step motorized feeder. The material flow was automatically increased proportionally to the increased voltages and rotation speed. The temperature setting was adjusted according to the manufacturers' recommendation for both polymers. Table 1 shows the temperature setting. Figure 2 shows the graph of temperature settings for both polymers. Also, the temperature measurement points have been indicated on the inserted model image. Similarly, the die temperature for both materials was set at three levels of 220, 240, and 260 °C. The temperature of the hopper area was deliberately kept high for PMMA, as seen in Figure 2. Since PMMA is a harder polymer [23], it is beneficial to heat it earlier than the HDPE.

Table 1. Extruder temperature setting. T_1 is from the die, and T_5 is from the hopper root

Sample name	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
HDPE at 220 °C	220	220	154	45	30
HDPE at 240 °C	240	240	169	50	32
HDPE at 260 °C	260	260	183	52	35
PMMA at 220 °C	220	220	181	90	40
PMMA at 240 °C	240	240	196	95	42
PMMA at 260 °C	260	260	209	97	45

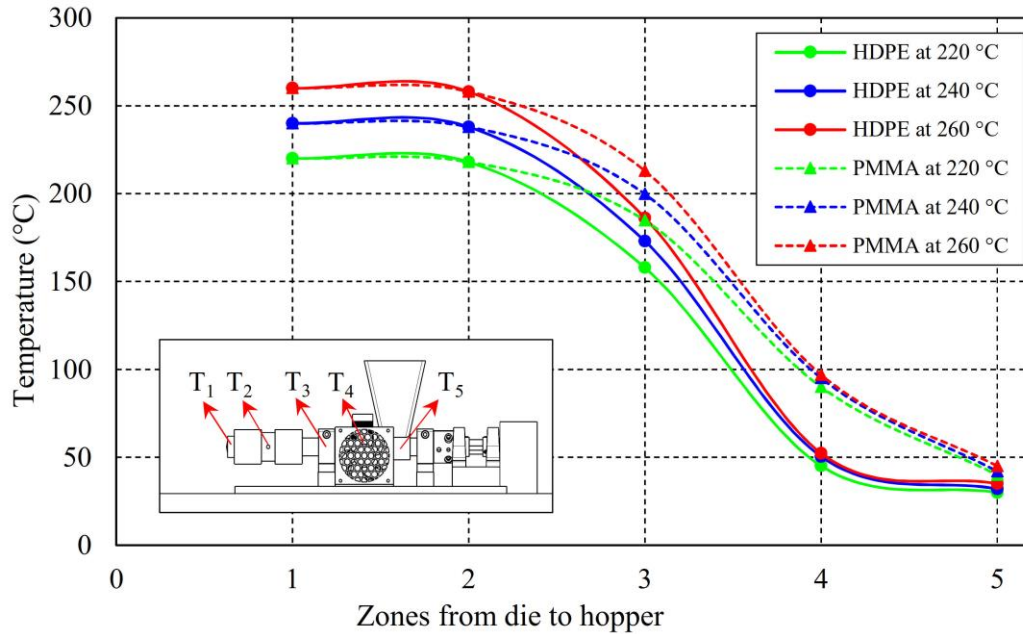


Figure 2. The temperature profile of the extruder from the die to the hopper.

C. COLLECTING PROCESSING DATA

A current and volt meter installed in the machine body monitored the motor's load. For each data point, the data was collected after the process became stable after waiting at least 5 minutes. At the first start-up of the extruder, the temperature was allowed to stabilize for 30 minutes, and then after purging for 10 minutes, data collection was started. Since the behavior of the polymer melt changes more at low shear rates and then follows a more uniform trend at high shear rates, data collection was performed more frequently at low voltages. After 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 9.0, 11, 15, and, 20 volt values were set individually, current values were collected for at least five times. The rotational speed of the screw was recorded for each volt value with a laser tachometer. To ensure accurate volt and current measurements, the multimeter unit was tested with a standard power supply and confirmed to be sufficiently accurate with a maximum deviation of $\pm 2.0\%$.

D. DATA PROCESSING

The relationship between viscosity and the shear rate was obtained from the extruder motors volt and current with the following equations obtained according to the literature [24, 25] and the dimensional compatibility analysis. Equation 1 shows the motor torque relation with viscosity and rotational speed.

$$T = g \times \mu \times n \quad (1)$$

Here, T is the motor torque, g is the geometric constant, μ is the viscosity, and n is the rotational speed. A representative viscosity equation is given in Equation 2. It was assumed that the torque and rotation speed ratio approximately represents the viscosity.

$$\mu_{rep} \propto \frac{T}{n} \quad (2)$$

μ_{rep} is representative viscosity and n is the rotational speed. In Equation 3, it was assumed that the screw rotation speed was proportional to the electrical voltage since the speed of DC motors are directly proportional to the back emf or impressed voltage.

$$n \propto V \quad (3)$$

In Equation 4, it was assumed that the torque value was primarily related to the current. In addition, when the dimensional analysis is performed, the unit of the torque is Nm, and the multiplication of the electric power by revolutions yields the same unit, which supports this assumption.

$$T \propto \frac{I \times V}{V} = I \quad (4)$$

Using Equations 2, 3, and 4, the representative viscosity can be calculated as in Equation 5.

$$\mu_{rep} \propto \frac{I}{V} \quad (5)$$

Finally, the shear rate was assumed to be related to the voltage in Equation 6. Thus, the relationship between viscosity and shear rate could be plotted with the current and voltage values obtained from the extruder.

$$\gamma \propto V \quad (6)$$

Equation 7 shows the energy required per weight of the polymer. By multiplying voltage and current, the energy consumption can be calculated. Dividing this energy value by material output rate, the efficiency of the process was determined.

$$E = \frac{(V \times I)}{\text{Output rate}} \quad (7)$$

E. FEEDER CALIBRATION

Instead of typical feeders with a spiral wire inside, a special one with a piston connected to a linear guideway was designed for this study. The granule feeding rate of this feeder, controlled by a stepping motor, was measured for four different points, and the linear fit equation was established. Figure 3 shows the linear fit graph. This way, the extruder's feeding was established precisely thanks to the motor driver code and linear fit equation installed on an Arduino board.

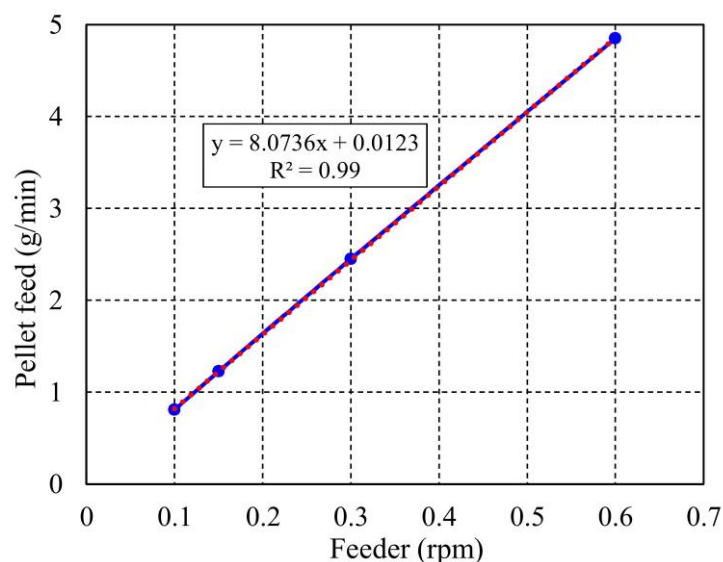


Figure 3. Feeder calibration for pellet feed rate based on the stepper rpm

Equation 8 shows the linear fit equation. The experimentally obtained equation was added to the program written for the Arduino board, and the feeder was programmed. In addition, thanks to the

stepping motor and reciprocating mechanism, a very high precision feeding rate was achieved. The only disadvantage of using this type of feeder is the need for recharging when the material in front of the piston runs out. This problem is easily solved by keeping the piston capacity large enough.

$$y = 8.0736x + 0.0123 \quad (8)$$

F. EXTRUDER DESIGN DETAILS

This study aims to design and prototype a low-cost, small-scale plastic extrusion machine. The rendered three-dimensional image of the designed machine is given in Figure 4. In the image, each section/part was described in detail. The overall dimensions of the machine are 250×800×356 mm. The machine's design was realized using standard and easy-find parts preferentially used for low cost and easy reproducibility.

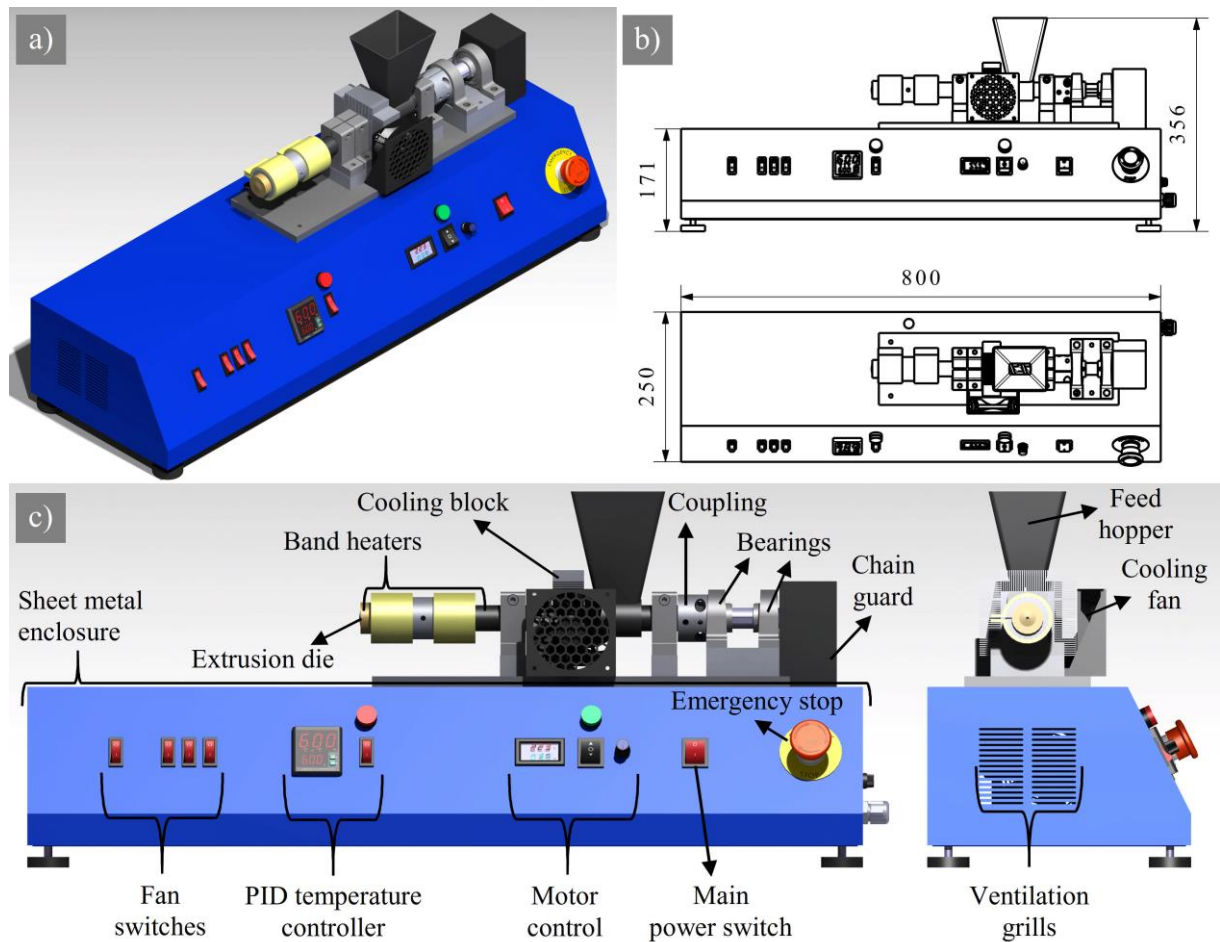


Figure 4. Extruder design details *a)* an overall view of the CAD model, *b)* technical drawing for major dimensions, and *c)* components' names

The blue-colored enclosure of the extrusion machine was made of a standard and affordable 2 mm steel sheet plate. Mechanical parts were mounted on the body following the CAD data. An 8 mm thick sheet steel plate was placed on the enclosure to assemble the production line. Aluminum blocks, barrel holders, and rolling bearings were placed respectively and fastened with bolts. Cold-drawn steel tube with a 20 mm inner diameter was used for the barrel. Heating bands, die, cooler (aluminum block with fin structure), and feed hopper were placed and mounted on the barrel. A chiller block and fan were used to prevent the overheating of the feeding zone.

The die was designed to be interchangeable for different diameters and made of easy-to-machine brass material. A screw made of a solid steel shaft was machined on a lathe. DC motor and sprocket mechanism was used to drive the screw. The motion taken from the motor with the sprocket was transferred to the shaft connected to the ball bearings. The rotational motion taken from this shaft was transferred to the screw with a coupling connection.

Electrical components were placed on/inside the body of the extruder after the mechanical assembly was completed. An emergency stop button, switches, motor control elements (speed control button, direction switch, signal lamp), voltmeter/ammeter, and temperature control elements (PID control unit, on-off switch, signal lamp) were installed on the body, respectively. Inside the enclosure, a fuse, cooling fan, DC motor, speed control element, 24-volt adapter, 12-volt adapter, SSR relay, 12-volt relay, fuse, and terminals were mounted respectively. In order to determine the temperature of the heating zone, a J type of thermocouple was connected to the barrel between the heating bands.

G. SCREW DESIGN AND DIMENSIONS

The technical drawing of the screw produced for the extruder and the screw picture produced in accordance with it are given in Figure 5. The screw geometry was deliberately kept simple. In this way, it was aimed to obtain more consistent polymer melt behavior in experimental studies. It was also intended that other researchers and companies could easily manufacture the screw.

The design of the screw was initiated by modeling it in a CAD (Computer-Aided Design) package program. The following specifications were considered during the design process. A pitch of 22 mm was selected for the screw. This measurement determines the distance between consecutive threads on the screw. The fin thickness was designed to be 4 mm. This dimension was chosen to ensure a thinner design, as it would result in less compression on the polymer casing surface. The screw's root diameter was determined to be 10 mm. This measurement refers to the diameter at the base of the screw where it connects with the surface. The wing diameter of the screw was set to 20 mm. This dimension represents the maximum diameter of the screw threads. The total length of the screw is specified as 250 mm. This measurement indicates the overall length from the tip of the screw to the base of the root diameter. By considering these measurements and utilizing a CAD package program, the design of the screw was effectively developed.

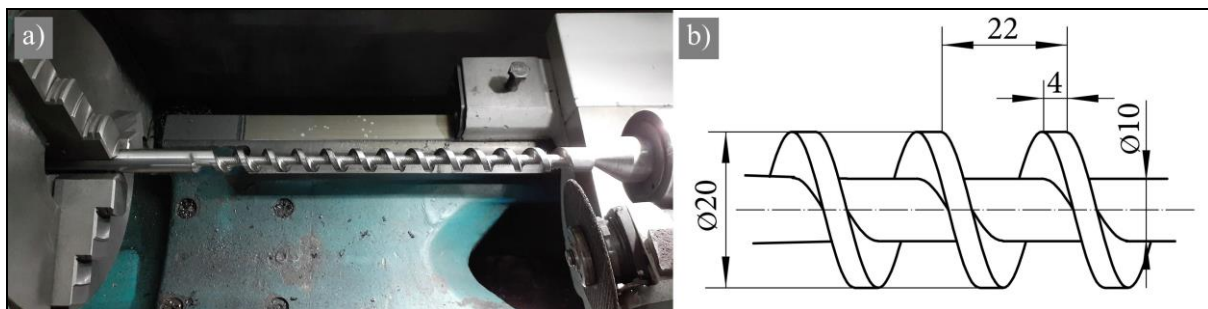


Figure 5. Screw details, *a)* a picture of produced screw on a regular lathe and *b)* technical drawing of the designed screw

H. MOTOR AND GEAR DETAILS

The characteristics of the motor used for the rotation of the screw are as follows: common in the market, cost-effective, easily usable in different projects, high torque, DC 24 V operating voltage (Operating current: 2 A, Forcing current: 10 A, Motor power: 240 W), and 55 rpm maximum rotational speed. A speed control driver with 9 – 60 V and 20 A specifications was used for the speed control of this motor. In order to monitor the current and volt data passing through the motor during operation, an electronic circuit element operating between 4.5 – 100 V and 0 – 10 A was integrated into the front panel.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. TESTING THE PRODUCED EXTRUDER

The design and prototype of a low-cost laboratory-scale prototype extrusion machine were completed as planned without any revision needed. Photographs of the general view of the extruder and the electrical enclosure are given in Figure 6. The preliminary test runs were then conducted to confirm that the extrusion ran smoothly as intended. Heating temperatures up to 300 °C and engine speeds of 55 rpm were applied to the extruder to test its performance. The experimental studies and measurements showed that the extruder is reproducible and works smoothly.

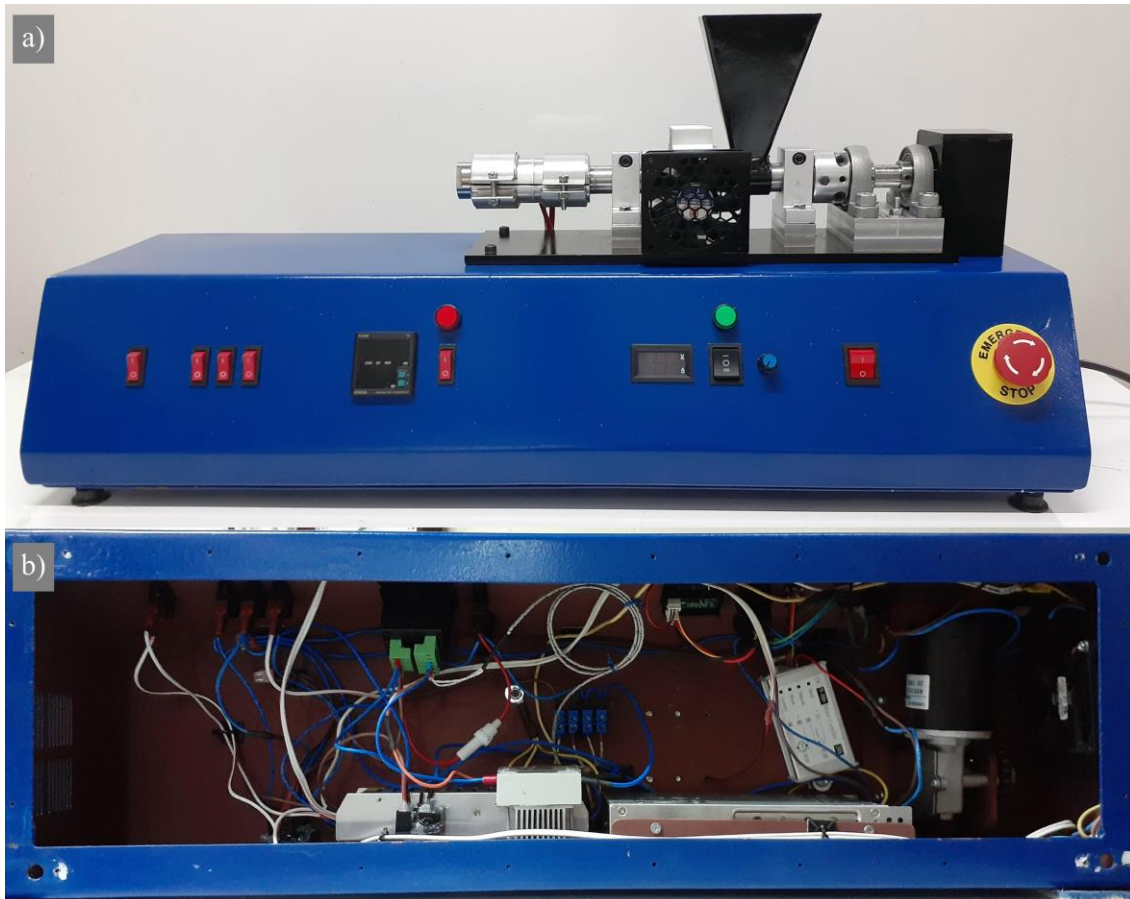


Figure 6. Final extruder, a) an overall view and b) when bottom sheet removed

B. HDPE EXTRUDING RESULTS

For a specific type of experiment, the die outlet of the extruder was removed to observe the effect of the polymer moving along the screw without being affected by the pressure buildup and therefore only by the viscous forces. Figure 7a gives a picture showing this disassembly. Figure 7b shows a picture of the screw removed from the machine to show the feed problem at 260 °C when the die was attached back. A discussion on this problem will follow later.

Figure 8 shows the data obtained for the no-die condition. The data collected for monitoring the current draw, if it is high which is the most challenging factor for the electrical circuit, is given in Figure 8a. In Figure 8b, rpm values are given against volt values. The data was also collected current values after the feeding was disconnected when no more material came from the end. Creating a baseline with this data collection at the last stage made it easier to observe the current spikes for the situations where the material was fed.

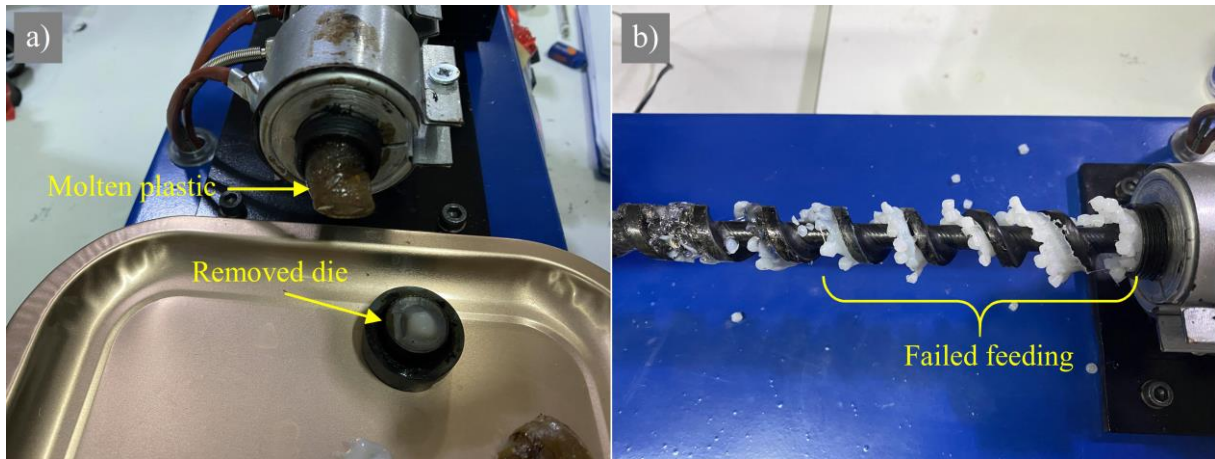


Figure 7. Experimental details of HDPE, **a)** removing the die and molten plastic picture and **b)** failed feeding of 260 °C case

As can be seen in the Figure 8a, a higher current was drawn at a lower temperature value. This was an expected behavior. Because the temperature increase generally facilitates the polymer's flow [26, 27]. It was observed that the effect of temperature on the current draw increased when the screw speeds increased. Especially in the low-speed region, it has been observed that the current rose faster with the increase in voltage and showed a more horizontal rise after passing approximately 10 volts. This generally means that the material can be processed more reliably between 15 rpm and 25 rpm, away from sudden current spike regions. The relationship between volt and rpm in Figure 8b, shows that the energy consumption was spent mainly by viscous forces. This proved that the machine causes no significant energy efficiency problem.

Figure 8c shows representative viscosity and representative shear rate values. It was seen that the viscosity value, which started high for all cases at low shear values, decreased rapidly with increasing shear rate value. This was a natural consequence of the shear-thinning effect for polymers [27]. At high shear rate values, it was seen that the viscosity values were close to each other, and the temperature did not have a severe effect as expected for HDPE.

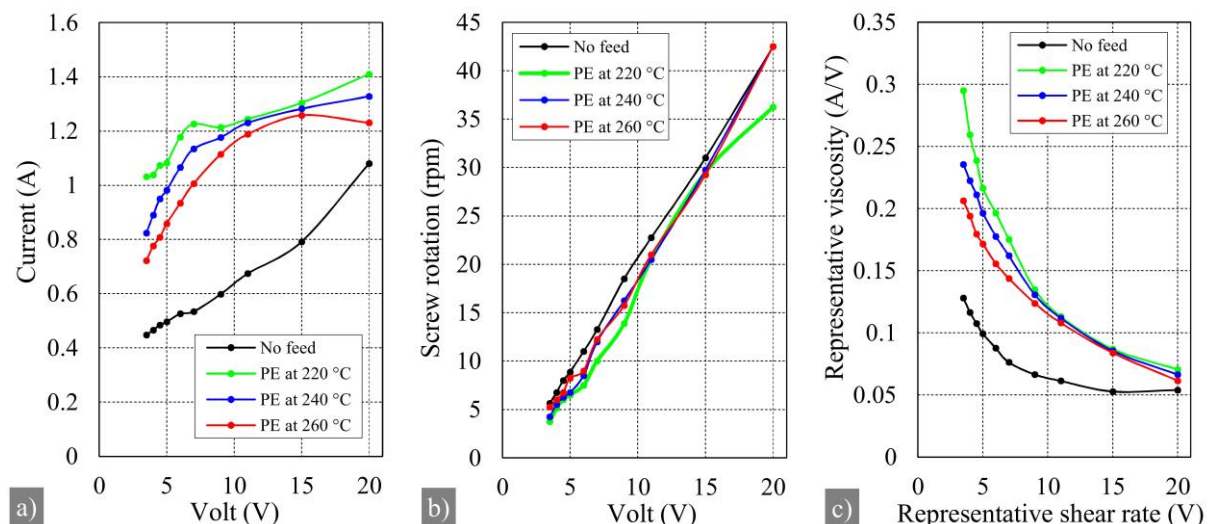


Figure 8. No-die case for HDPE **a)** current draw of the motor **b)** rpm vs. volt and **c)** representative viscosity plots of HDPE

Figure 9 shows the data representing a real production process where the die is used and the pressure increases along the screw. It should be noted that in the case of HDPE 260 °C, only the first 3 data points

could be obtained as there was a feeding problem. Figure 9a illustrates the current draw value. Similar to the case without a die, noticeable fluctuations in the current were observed. These fluctuations can be attributed to pressure variations on the screw, which were associated with irregular polymer flow. The irregular flow may occur due to the lack of constant simple shear on the polymer at the screw root, leading to occurrences of stick-slip phenomenon. Furthermore, as the polymer progresses through the barrel and becomes hotter, temperature irregularities may also contribute to these stick-slip events, ultimately affecting the current drawn by the motors.

Figure 9b shows the screw rotational speed values depending on the volt values. It can be seen that the linear relationship shifts to slightly lower RPM values with the addition of material. This decrease can be attributed to motor heat loss and friction inefficiencies. It can be seen that this inefficiency, which increases with the addition of the material, is still negligible. In other words, it can be concluded that most of the energy given to the motor was exported to the polymer melt.

Figure 9c shows the representative viscosity value. The viscosity values tended to acquire a different character according to the no-die condition. The viscosity, which is very high in the region close to the zero-shear value, shows a downward trend until the rpm values correspond to 5 volts. Subsequently, it is observed that the viscosity increases abruptly between approximately 5 and 10 volts. No publication has been found to explain the exact reason for this behavior.

Similar to the no-die case, the viscosity decreased with increasing volt values. However, a lower viscosity was measured at higher voltages at 220 °C than at 240 °C. This means that the ability of the screw to grip the material and transmit it forward decreased with increasing temperature. In other words, using 240 °C means that the coefficient of friction of the barrel with the PE granules decreases as it gets hotter and less material is transmitted forward. Thus, the motor was subjected to more stress at 240 °C due to the late melting of the material. The data supporting this conclusion was also observed in Figure 9. Increasing rpm values and temperature allows less material to be grasped and advanced. A further increase in temperature to 260 °C stopped the material flow completely.

The efficiency value in Figure 9d exhibited a highly fluctuating pattern for HDPE polymer extrusion, depending on the increasing rpm values. Characteristically, there was an interesting similarity between the two temperature values. Interestingly, increasing the temperature did not improve but instead reduced the efficiency. This behavior is intriguing because an increase in temperature should facilitate polymer flow, thus increasing efficiency. However, HDPE demonstrated the opposite behavior. This can be attributed to the need for the polymer to be semi-solid in the feeding zone to enable its forward movement.

HDPE is known for its rapidly decreasing viscosity when heated and then exhibiting a relatively stable viscosity with temperature variations. Therefore, excessive heating may increase the melting rate and decrease adhesion. To further enhance the understanding of these observations, more in-depth analysis is required. Factors such as the specific rheological properties of HDPE, the influence of temperature on its viscoelastic behavior, and the interplay between the feeding zone and melting characteristics need to be carefully considered. By gaining a better understanding of these factors, it is possible to optimize the extrusion parameters for HDPE and achieve improved efficiency and stability in the extrusion process.

Thus, the interpretation that the polymer flow rate will increase with increasing temperature is not always a valid argument for the extrusion of HDPE polymer. Choosing the right temperature, neither too hot nor too cold, can increase the success and efficiency of the process. Overall, it can be concluded that HDPE should be processed at 220 °C and 15 volts.

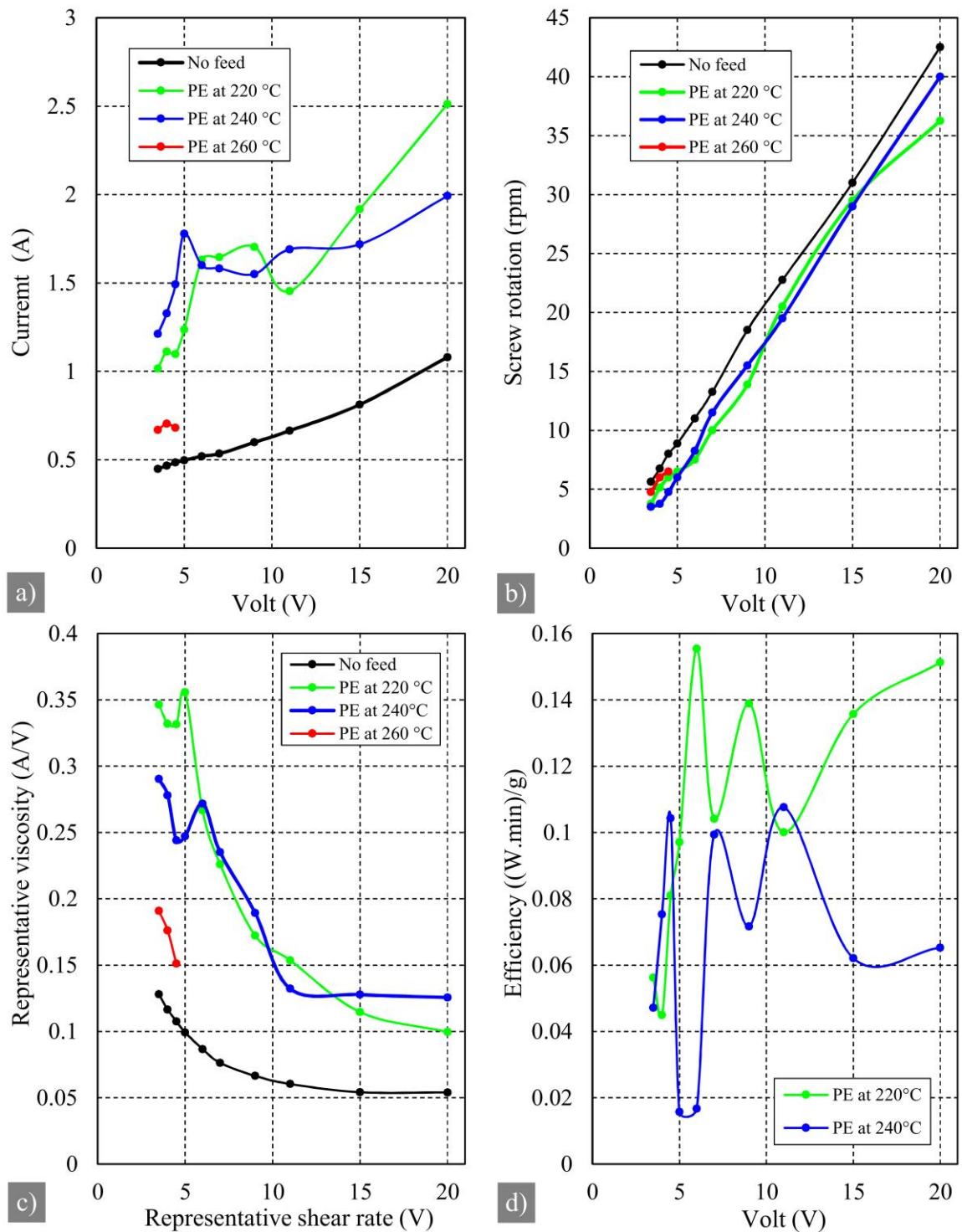


Figure 9. Die case with HDPE polymer, **a)** current draw of the motor, **b)** rpm vs. volt, **c)** representative viscosity and **d)** efficiency values

C. PMMA EXTRUDING RESULTS

Figure 10a shows the current draw values corresponding to volt values. A fluctuating profile structure was observed. It became more irregular, especially with decreasing temperature. As expected, PMMA at low temperatures increased the motor energy requirement. Figure 10b shows the screw rotational speed measured with a tachometer against volt values. Compared to the case without material, the speed

decrease was negligible. Thus, it can be assumed that the energy spent in the extrusion process in PMMA polymer, as in HDPE polymer, was mostly spent on viscous forces.

Figure 10c shows representative viscosity values obtained without pressure effect (no-die). As expected, the viscosity decreased with increasing temperature. It can be seen that PMMA was more sensitive to temperature changes compared to HDPE. This effect is more noticeable when looking at the region with a low representative shear rate. In the region where the shear rate increases a lot, the viscosity values for all temperature points drop to the degree that the feeding is completely stopped. This may be evidence that the material could not heat up and purge before it could melt due to the lack of pressure.

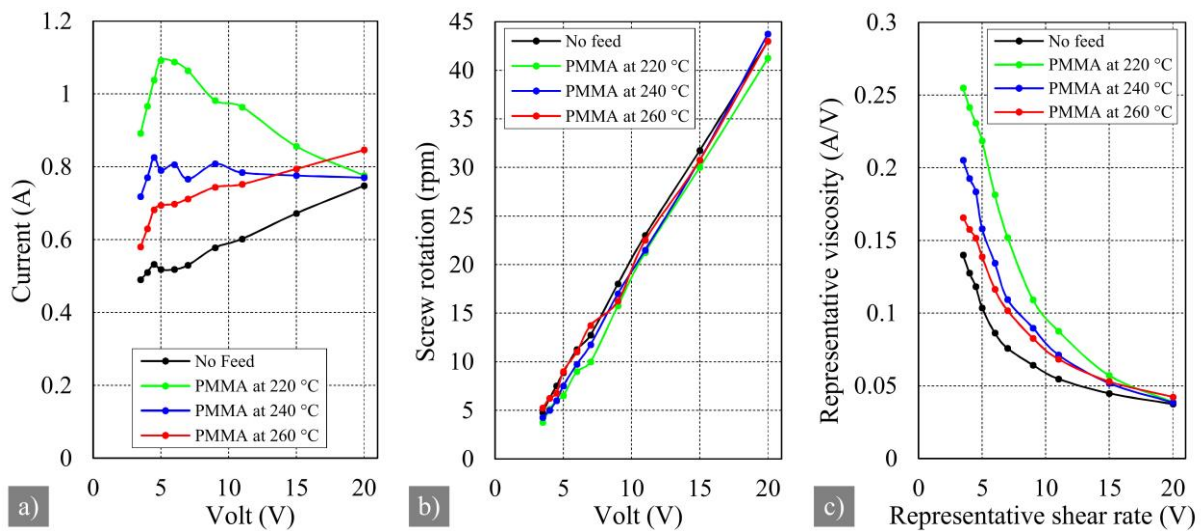


Figure 10. No-die case for PMMA a) current draw of the motor b) rpm vs. volt and c) representative viscosity plots of PMMA

Figure 11 shows the results obtained by adding the die to the extrusion tip. Figure 11a shows the current drawn according to the increasing rotation speed. At low rotation speeds, the current was strongly affected by the increase in speed, while at high-speed values, it responds to the speed change with a more horizontal course. It can be concluded that increasing the temperature is beneficial to reduce the current in PMMA extrusion.

Figure 11b shows the rotation speed variation depending on the volt. As in the previous results, it can be concluded that there is no significant RPM decrease with the addition of the material. Figure 11c shows the variation of representative viscosity with representative shear rate. At 260 °C, PMMA melt resisted flowing the most at 5 volts, contrary to the expected behavior. This can be attributed to agglomeration, especially in the feed zone, and the high temperature causing the material to stick to the screw and block the new material from behind. This can be overcome by increasing the rotation speed. Similar to HDPE, a significant increase in resistance to flow at low rotation speeds can be achieved in PMMA. Looking at high shear rates, it can be seen that PMMA was more sensitive to temperature than HDPE. This indicated that the flow characteristics of HDPE material was more reliable.

Figure 11d shows the energy and efficiency values. Like HDPE, efficient processing of PMMA material showed a complex and fluctuating character, especially at low rotation values. Increasing speed made the yield value more predictable. Overall, it is seen that the proper parameter settings for PMMA were 260 °C and 12 volts. At these parameters, PMMA can be processed with less energy expenditure, the current was not allowed to fluctuate too much, and the viscosity was kept low. The observed fluctuations in the processing of PMMA material can be attributed to several factors. Firstly, the complex and varying nature of PMMA's rheological behavior plays a significant role. PMMA exhibits non-Newtonian flow characteristics, meaning its viscosity is dependent on the shear rate. This behavior can lead to inconsistent flow patterns and fluctuations in the extrusion process.

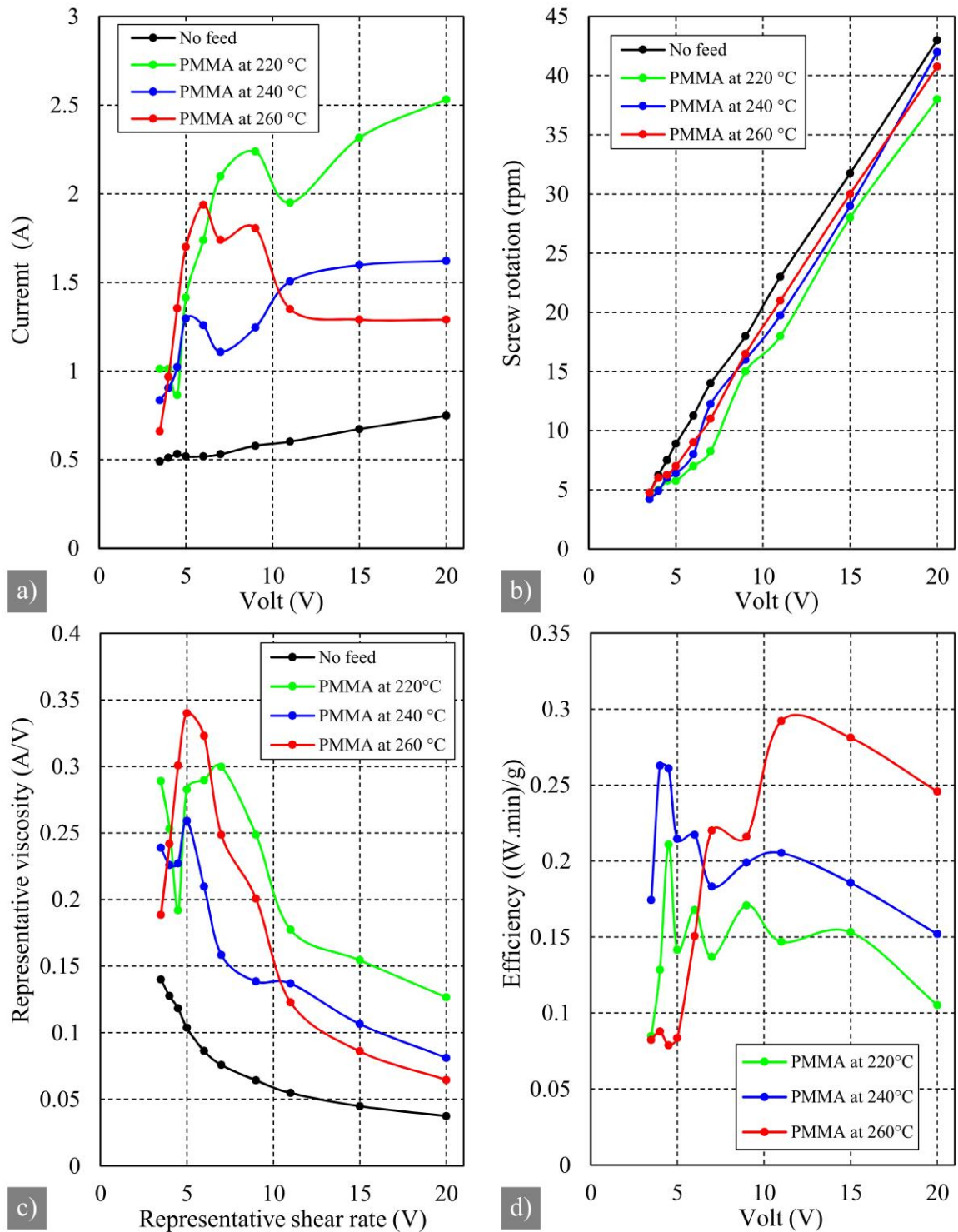


Figure 11. Die case with PMMA polymer, **a)** current draw of the motor, **b)** rpm vs. volt **c)** representative viscosity and **d)** efficiency values

IV. CONCLUSIONS

An easy-to-manufacture, low-cost extruder that can be used as test equipment has been successfully produced. The extruder, which is deliberately simple in screw design and can operate with little material, has been tested with two sample polymers. The main findings of this study are listed below.

- The temperature sensitivity of the polymer material used with this extruder was determined. For example, it was observed in representative viscosity values that PMMA polymer is more sensitive to temperature than HDPE.
- The optimum temperature of the process was determined according to the energy efficiency value. It was found beneficial to use a low temperature of 220 °C for HDPE and a high temperature of 260 °C for PMMA.
- The optimum rotation speed of the process could be determined. For HDPE, the speed corresponding to 15 volts and for PMMA the speed corresponding to 12 volts were beneficial.
- In order to set the process with more reliable values where the current drawn is more stable can be observed, and the volt value that can avoid problems such as overheating and shortening the life of the motor driver has been determined.

In future studies, developing a software interface where the machine can determine these values fully automatically would be helpful. In this way, the software can realize manually set rotation and temperature values. Therefore, much faster results can be obtained, and a convenient use of the machine can be facilitated. In addition, the scope of the extruder's ability to test the polymer by providing real physical conditions can be fully revealed by testing different polymers.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors would like to thank Hakan Dogru for his labor in manufacturing the extruder.

V. REFERENCES

- [1] M. Yousfi, C. Samuel, J. Soulestin, and M.-F.Lacrampe, "Rheological considerations in processing self-reinforced thermoplastic polymer nanocomposites: A review," *Polymers*, vol. 14, no. 3, pp. 637, 2022.
- [2] P. Jagadeesh, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, M. Puttegowda, S.M.K. Thiagamani, G. Rajeshkumar, M.H. Kumar, O.P. Oladijo, V. Fiore, and M.M.M. Cuadrado, "Sustainable recycling technologies for thermoplastic polymers and their composites: A review of the state of the art," *Polymer Composites*, vol. 43, no. 9, pp. 5831-62, 2022.
- [3] S. Boran Torun, M. Özdemir, E. Peşman, and A. Dönmez Çavdar, "Evaluation of vegetable waste oil and old newspaper fibers in waste polypropylene composites," *Duzce University Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 936–957, 2023.
- [4] H. Fu, H. Xu, Y. Liu, Z. Yang, S. Kormakov, D. Wu, and J. Sun, "Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites." *ES Materials & Manufacturing*, vol. 8, no. 3, pp. 23, 2020.
- [5] C.E. Montilla-Buitrago, R.A. Gómez-López, J.F. Solanilla-Duque, L. Serna-Cock, and H.S.Villada-Castillo, "Effect of Plasticizers on properties, retrogradation, and processing of extrusion-obtained thermoplastic starch: A review," *Starch - Stärke*, vol. 73, pp. 2100060, 2021.
- [6] M. Hyvärinen, R. Jabeen, and T. Kärki, "The Modelling of extrusion processes for polymers— A review," *Polymers*, vol. 12, no. 6, pp. 1306, 2020.
- [7] V.J.R.R. Pita, E.E.M. Sampaio, and E.E.C Monteiro, "Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing," *Polymer Testing*, vol. 21, no. 5, pp. 545-550, 2002.
- [8] H. Yin, X. Huang, T. Liu, and M. Song, "Effects of gas-assisted extrusion on slip in the cable coating process," *Journal of Polymer Engineering*, vol. 41, no. 4, pp. 329-337, 2021.

- [9] P. Pongthong, C. Kolutawong, and A.J. Giacomini, "Cooling and annealing of plastic pipe," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, pp. 100970, 2021.
- [10] A.L. Kelly, E.C. Brown, and P.D. Coates, "The effect of screw geometry on melt temperature profile in single screw extrusion," *Polymer Engineering & Science*, vol. 46, no. 12, pp. 1706-1714, 2006.
- [11] J. Wang, "Influence of helical grooved structure on mixing process in a single screw extruder," *Key Engineering Materials*, vol. 561, pp. 212-217, 2013.
- [12] A. La Gala, R. Fiorio, M. Erkoç, L. Cardon, and D.R. D'hooge, "Theoretical evaluation of the melting efficiency for the single-screw micro-extrusion process: The case of 3D printing of ABS," *Processes*, vol. 8, no. 11, pp. 1522, 2020.
- [13] C. Capone, L. Di Landro, F. Inzoli, M. Penco, and L. Sartore, "Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing," *Polymer Engineering & Science*, vol. 47 no. 11 pp. 1813-1819, 2007.
- [14] S.M. Alshahrani, J.T. Morott, A.S. Alshetaili, R.V. Tiwari, S. Majumdar, and M.A. Repka, "Influence of degassing on hot-melt extrusion process," *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 80, pp.43-52, 2015
- [15] K.A. Crookston, T. Mark Young, D. Harper, and F.M. Guess, "Statistical reliability analyses of two wood plastic composite extrusion processes," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 1, pp. 172-177, 2011.
- [16] G. Hsiang Loh, E. Pei, J. Gonzalez-Gutierrez, and M. Monzón, "An overview of material extrusion troubleshooting," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 14, pp. 4776, 2020.
- [17] G.M. Gübitz, and A.C. Paulo, "New substrates for reliable enzymes: enzymatic modification of polymers," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 14, no. 6, pp. 577-582, 2003.
- [18] H. Ünal, S.H. Yetgin, and V.F. Ünal, "The Effect of glass beads content on the mechanical and microstructural behavior of glass beads filled polyamide-6.6 composites," *Duzce University Journal of Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 157-169. 2023
- [19] A. Oromiehie, and A. Mamizadeh, "Recycling PET beverage bottles and improving properties," *Polymer International*, vol. 53, no. 6, pp. 728-732, 2004.
- [20] S. Tall, A-C. Albertsson, and S. Karlsson, "Recycling of mixed plastic fractions: Mechanical properties of multicomponent extruded polyolefin blends using response surface methodology," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 70, no. 12, pp. 2381-2390, 1998.
- [21] J.M. Lagaron, and E. Núñez, "Nanocomposites of moisture-sensitive polymers and biopolymers with enhanced performance for flexible packaging applications," *Journal of Plastic Film & Sheeting*, vol. 28, no. 1, pp. 179-189, 2012.
- [22] S. Raha, H. Sharma, M. Senthilmurugan, S. Bandyopadhyay, and P. Mukhopadhyay, "Determination of the pressure dependence of polymer melt viscosity using a combination of oscillatory and capillary rheometer," *Polymer Engineering & Science*, vol. 60, no. 3, pp. 517-523, 2020.
- [23] I.L. Ali, N. Yunus, and M.I. Abu-Hassan, "Hardness flexural strength, and flexural modulus comparisons of three differently cured denture base systems," *Journal of Prosthodontics*, vol. 17, no. 7, pp. 545-549, 2008.



- [24] S-H. Chiu, and S-H. Pong, "In-line viscosity fuzzy control," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 79, no.7, pp. 1249-1255, 2001.
- [25] A. Marquez, J. Quijano, and M. Gaulin, "A calibration technique to evaluate the power-law parameters of polymer melts using a torque-rheometer," *Polymer Engineering & Science*, vol. 36, no. 20, pp. 2556-2563, 1996.
- [26] G. Janardhana Reddy, M. Kumar, and O. Anwar Beg, "Effect of temperature dependent viscosity on entropy generation in transient viscoelastic polymeric fluid flow from an isothermal vertical plate," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 510, pp. 426-445, 2018.
- [27] J-s. Wang, and R.S. Porter, "On the viscosity-temperature behavior of polymer melts," *Rheologica Acta*, vol. 34, no. 5, pp. 496-503, 1995.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Investigation on the Effect of Parasitic Elements on PID Control of DC-DC Buck Converter

 Mustafa İNCİ^{a,*},  Yusuf ALTUN^b

^aVolta Motor Industry and Trade Inc. Design Center, Cumayeri Factory, Düzce/Türkiye.

^bDüzce University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering, Düzce/Türkiye.

* Corresponding author's e-mail address: yusufaltun@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1454306

ABSTRACT

DC-DC converter circuits are used in many electronic devices to adjust the voltage to a certain level such as Electric Vehicle. DC-DC Buck converters, which are the most used type of DC-DC converters, reduce the input voltage and keep the output voltage constant at a desired reference voltage value. In this study, the effect of parasitic elements in Buck DC-DC converters is examined on the PID controllers. Parasitic elements cause a non-linear effect on the Buck converter system model. Studies in the literature generally control the output voltage by designing controllers on the Buck converter model without parasitic elements. Alternatively, linear controllers such as PID are designed according to the linearizing model, taking into account the effect of parasitic elements. In addition, nonlinear controllers are designed on the full model with the effect of parasitic elements. In this study, the effect of parasitic elements on linear controllers, especially PID, is examined.

Keywords: DC-DC converter, Buck converter, Parasitic elements, PID controller

Parazitik Elemanların DC-DC Buck Dönüştürücünün PID Kontrolüne Etkisinin İncelenmesi

ÖZ

DC-DC dönüştürücü devreleri Elektrikli Araçlar gibi birçok elektronik cihazda gerilimi belirli düzeye ayarlamak için kullanılmaktadır. DC-DC dönüştürücülerin yaygın kullanılan türü olan Buck DC-DC dönüştürücüler giriş gerilimini düşürerek çıkış gerilimini istenen bir referans gerilim değerinde sabit tutar. Bu çalışmada, Buck DC-DC dönüştürücülerdeki parazitik elemanların PID kontrolcüler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Parazitik elemanlar Buck dönüştürücü sistem modeli üzerinde lineer olmayan etkiye neden olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar genellikle parazitik elemanlar olmaksızın Buck dönüştürücü modeli üzerinde kontrolcüler tasarlanarak çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Alternatif olarak, parazitik elemanların etkisi de dikkate alınan model doğrusallaştırılarak lineer kontrolcüler tasarlanmaktadır. Bunlara ek olarak, parazitik elemanların etkisiyle birlikte tam model üzerinde lineer olmayan kontrolcüler tasarlanmaktadır. Bu çalışmada ise parazitik elemanların özellikle PID gibi lineer kontrolcü üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: DC-DC dönüştürücü, Buck dönüştürücü, Parazit elemanlar, PID kontrolör

I. INTRODUCTION

DC-DC converters are widely used in electronic devices to regulate DC voltage. They are capable of converting voltage from one level to another. Their objective is to regulate and manage the transfer of electrical energy between input and output by adjusting voltages and currents to be compatible with loads. Switches, diodes, inductors, and capacitors play crucial roles as energy storage elements within converter circuits. Modern DC-DC converters are advanced power electronic devices that utilize high-frequency switching circuits with pulse width modulation (PWM) technique. These converters are utilized for numerous applications in industry and academia [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9]. The extraordinary increase in their benefits is particularly obvious in sustainable energy systems such as wind turbines, photovoltaics, AC transmission and battery storage [10]. The growth of DC microgrids [4], [9], [11] is encouraging larger applications of DC-DC converters in next power systems. DC microgrids are becoming increasingly popular and a more suitable alternative to AC microgrids due to their simpler power converter stages, flexible control algorithms etc. However, DC microgrids can face instability issues due to non-linear loads like constant power loads (CPL), which have a higher negative impedance, leading to potential voltage collapse on the primary DC Bus. DC voltages produced by fuel cells, batteries or photovoltaic systems change in amplitude; input voltages of power-factor adjustment applications change with sinusoidal grid voltages; and large-scale reconfiguration of battery packs causes voltage spikes [12], [13], [14]. Therefore, good control design requires adjusting the output voltage. DC-DC converters play a crucial role in Electric Vehicles, which are extensively utilized today, leading to ongoing research on different circuits and controls, as evidenced in the studies mentioned in [1], [15], [16], [17].

One type of commonly used of DC-DC converters are Buck (step down) converter. Buck converters utilize a straightforward yet highly efficient circuit configuration to reduce the input voltage to a lower output level. They are electronic circuits that play a significant role in electrical power systems and have a wide range of applications. Their application areas are in the various electronic devices such as cell phones, televisions, and computers. Also, they are widely used in solar energy systems, where they convert high-voltage DC power from solar panels to lower voltage levels suitable for use and integration with the electrical grid or battery banks such as DC microgrids [18], [19], [20], photovoltaic systems/solar panels [21], [22]. In addition, it is used for DC motor control such as [23], [24], [25]. Additionally, they are frequently found in the power systems of electric vehicle and hybrid vehicle, where they are employed to meet the power demands of onboard electronic systems and lighting by reducing the voltage from the battery [25], [26], [27], [28], [29]. Moreover, in the telecommunications industry, DC-DC Buck converters are often utilized to enhance energy efficiency and optimize power distribution [30]. Finally, they play a crucial role in power conversion and control in industrial equipment and automation systems. DC-DC Buck converters are regarded as essential components in various applications, contributing to energy efficiency, voltage regulation, and effective power distribution in modern electronic systems. Finally, they contribute significantly to power conversion and control, facilitating the efficient operation of many industrial systems.

The presence of parasitic elements, such as resistance, in DC-DC buck converters can have significant effects on their performance. These parasitic elements, often inherent in real-world components, can lead to power loss, reduced efficiency, and decreased voltage regulation. Studies have shown that even small amounts of resistance, particularly in high-power applications, can significantly sap the converter's ability to deliver power efficiently. Additionally, they can cause instability in the converter's dynamic response, impacting its ability to quickly adjust to changes in load or input voltage. Researchers have investigated methods to mitigate these effects, including careful component selection, layout optimization, and advanced control techniques. By addressing parasitic elements, engineers can improve the overall performance and reliability of DC-DC buck converters such as in [31], [32], [33], [34]. For example, in [35], the effect of parasitic resistances on the input resistance in Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems of photovoltaic (PV) systems has been investigated. [31] introduces a new method utilizing Adaptive Backstepping for developing a current controller in buck-boost converters by including influence of parasitic elements. [36] discusses the fixed diode duty

cycle operation of Buck converter, considering the parasitic resistances. A simple circuit-level model is presented to explain how undesirable trigger signals occur at the input voltage of a MOSFET in a synchronous converter. [37]. It considers the parasitic inductances and capacitances of both the control and the synchronous MOSFETs, as well as the reverse recovery properties of the synchronous MOSFET's body diode. In [32], a new approach is proposed for the passivity-based nonlinear control design of the buck converter, where the design considers the full converter model, including the impacts of parasitic elements such as equivalent series resistance (ESR) of inductor, ESR of MOSFET. In [38], a nonlinear way/model is proposed to model Buck and Boost converters for both without parasitic elements and with parasitic elements. In [39], the effect of parasitic elements on the output voltages has been investigated. In [40], the effects of parasitic elements have been investigated on power loss in buck converter-based GaN. Finally, parasitic elements can significantly impact the performance of DC-DC buck converters. By understanding their effects and employing proper design techniques, such as minimizing parasitic resistance and inductance, optimizing layout, and selecting appropriate components, converter efficiency, stability, and transient response can be improved.

The aforementioned-works and other relevant studies in the literature are generally related to the effects of parasitic elements on the circuits. However, their effects on control design are not comprehensively examined. This paper presents a comprehensive analysis of control performance and control design challenges caused by parasitic elements in DC-DC Buck converters. As seen in [34], the Buck converter system becomes nonlinear although the values of parasitic elements are low. Therefore, the major problem is that parasitic elements cause nonlinearity due to switching duty ratio. Different controller or different modelling have been proposed to overcome the difficulties. For example, to develop the controller response, the inductor parasitic resistance is modelled for Boost converter in [41]. Additionally, a PID controller is employed to remove any steady-state error of the system. An adaptive nonlinear controller is developed for a DC-DC buck/boost converter, ensuring robustness and stability even with changes in converter load, fluctuations in input voltage, and uncertainties in parameters in [42]. On the other hand, the controller design endures the linearized model of the converter as in [43], where employing this method across a broad spectrum of input voltage fluctuations, load resistances, and desired voltage variations may lead to instability in the converter. Similarly, [44] use the linearized DC-DC boost converter model. Alternatively, nonlinear controllers such as model feedback linearisation, sliding mode, predictive control, fuzzy control are designed for the nonlinear converter model with parasitic elements such as [31], [33], [41], [45], [46], [47]. Therefore, the nonlinear controller design is usually needed if the model is not linearized. However, linear control such as PID is simpler and cheaper. Hence, it depends on linearizing the converter model with parasitic elements or without parasitic elements. As for the analysis in this paper, the effects of PID controllers on the full model containing parasitic elements are investigated.

II. BUCK CONVERTER MODEL

A. DC-DC BUCK CONVERTER CLASSIC/LINEAR MODEL (WITHOUT PARASITIC ELEMENTS))

Figure 1 shows the circuit model of DC-DC Buck converter without parasitic elements. Let's consider the on-state of the MOSFET. According to the equation $v_o = v_c$, when Kirchhoff's voltage law is applied, Equation (1) is obtained, and when it is rearranged, Equation (2) is obtained.

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + v_c \quad (1)$$

$$V_{in} - L \frac{di_L}{dt} - v_c = 0 \quad (2)$$

When Kirchhoff's current law is applied, Equation (3) is obtained, and when it is rearranged, Equation (4) is obtained.

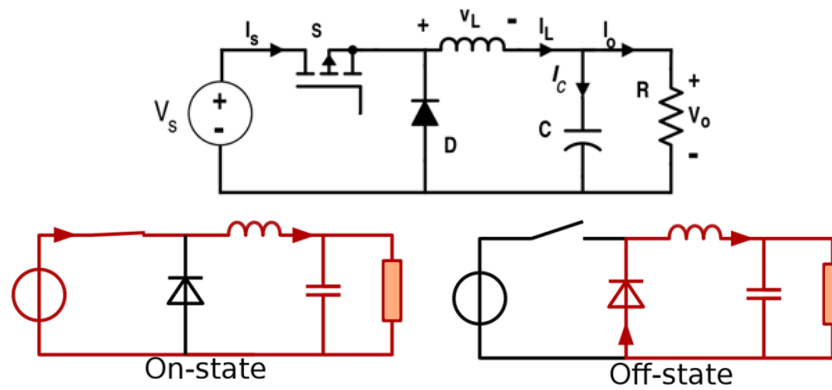


Figure 1. Buck converter on-off state

$$i_o + i_c - i_L = 0 \quad (3)$$

$$\frac{v_c}{R} + C \frac{dv_c}{dt} - i_L = 0 \quad (4)$$

When Equation (2) and Equation (4) are rearranged, Equation (5) is obtained.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in} - v_c) \quad (5)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{v_c}{R}\right)$$

Using Equation (5) and Equation $v_o = v_c$, the state space matrices in Equation (6) are obtained as in Equation (7).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{Rc} \end{bmatrix}}_{A_{on}} \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{on}} \underbrace{[V_{in}]}_u \quad (7)$$

$$y = \underbrace{[0 \quad 1]}_{C_{on}} \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x$$

Similarly, we get the state space equation in (8).when we consider the off-state of the MOSFET in Figure 1.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \\ c & Rc \end{bmatrix}}_{A_{off}} \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{off}} \underbrace{[V_{in}]}_u \quad (8)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_{off}} \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x$$

Now let's derive the state space average model. Since the duty ratio (d) of the period is in conduction and the $(1-d)$ ratio is in cutoff, the average model is obtained as in Equation (9), where d is MOSFET switching duty ratio ranging between 0 and 1.

$$\begin{aligned} A &= d \times A_{on} + (1-d) \times A_{off} \\ B &= d \times B_{on} + (1-d) \times B_{off} \\ C &= d \times C_{on} + (1-d) \times C_{off} \end{aligned} \quad (9)$$

If we apply the average model approach in Equation (9), we get (10) state space average model.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix}}_x = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -1 \\ c & cR \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_B [d] \quad (10)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}}_x$$

B. DC-DC BUCK CONVERTER FULL MODEL (WITH PARASITIC ELEMENTS)

In electrical circuits, a parasitic element is a circuit element (such as resistance, inductance or capacitance) that is present in an electrical component but occurs outside its intended purpose and is not desired. For example, a resistor may have undesirable parasitic capacitance at high frequencies beyond its specification. Figure 2 shows the converter circuit including parasitic elements (parasitic resistances). r_m , r_D , r_L and r_C are the parasitic resistances of the MOSFET, diode, inductor, and capacitor, respectively. In addition, the diode forward voltage is V_D . It is supposed that the forward voltage is zero.

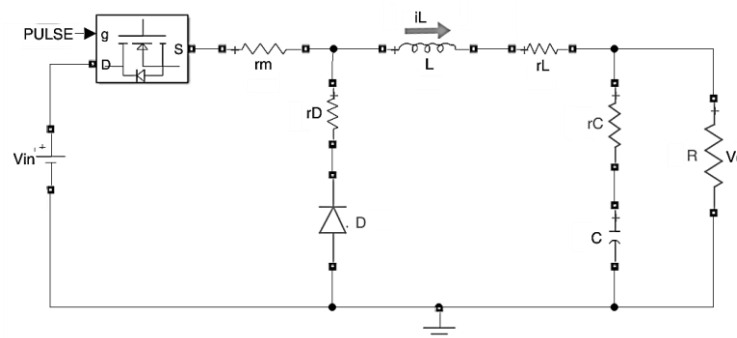


Figure 2. Buck converter circuit with parasitic resistances

Similar to the modelling steps in Section A can be applied for this circuit. After the steps, we get state space average model (11). (12) is obtained from full model (11) for $r_m = r_D = 0$. Therefore, the system model is linearized.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} \left(d(r_m - r_D) + r_D + r_L + \frac{r_c R}{(r_c + R)} \right) & \frac{-1}{L} \frac{R}{(r_c + R)} \\ \frac{1}{c} \frac{R}{(r_c + R)} & \frac{-1}{c} \frac{1}{(r_c + R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_m}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [d] \quad (11)$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{r_c R}{(r_c + R)} & \frac{R}{(r_c + R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} \left(r_L + \frac{r_c R}{(r_c + R)} \right) & \frac{-1}{L} \frac{R}{(r_c + R)} \\ \frac{1}{c} \frac{R}{(r_c + R)} & \frac{-1}{c} \frac{1}{(r_c + R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [d] \quad (12)$$

$$y = \begin{bmatrix} \frac{r_c R}{(r_c + R)} & \frac{R}{(r_c + R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}$$

III. SIMULATION RESULTS

Accordingly, we compare between (10), (11) and (12) which are without parasitic elements, full model with parasitic elements and with partial parasitic elements (r_c and r_L). Hence, we present the results of open loop model according to Parameters 1 and Parameters 2 in Table 1. Figure 3 represents that the output voltages of Buck converter for $d=0.2$. Figure 4 shows that the output voltages for $d=0.5$. The transfer functions are as in (13) according to Parameters 1.

$$G_{ideal/classic} = \frac{V_o}{d} = \frac{3.507 \times 10^8}{s^2 + 152s + 2.338 \times 10^7} \quad (\text{from Eq.10})$$

$$G_{(r_m=r_D=0)} = \frac{V_o}{d} = \frac{1614s + 3.505 \times 10^8}{s^2 + 951.8s + 2.347 \times 10^7} \quad (\text{from Eq.12}) \quad (13)$$

$$G_{(d=0.5)} = \frac{V_o}{d} = \frac{1614s + 3.505 \times 10^8}{s^2 + 9221s + 2.473 \times 10^7}, \quad G_{(d=0.2)} = \frac{V_o}{d} = \frac{1614s + 3.505 \times 10^8}{s^2 + 4952s + 2.408 \times 10^7} \quad (\text{from Eq.11})$$

From Figure 3 and 4, as d decreases, the difference between linearized models and the full model with parasitic elements increases. Therefore, it can be deduced that the difference between models increases as the difference between output voltage and input voltage increases. From state space form, the pole-zero map is obtained as in Figure 5, where the poles vary significantly. Especially for Parameters 1, the poles vary significantly more.

Table 1. Different Circuit Parameters

	Parameters 1	Parameters 2
R	2 Ω	10 Ω
V_{nin}	15 V	24 V
L	13 μH	120 μH
c	3290 μF	330 μF
V_D	0.4 V	0.8 V
r_m	0.2 Ω	0.012 Ω
r_c	1.4 m Ω	0.3 Ω
r_L	9 m Ω	0.08 Ω
r_D	15 m Ω	0.141 Ω

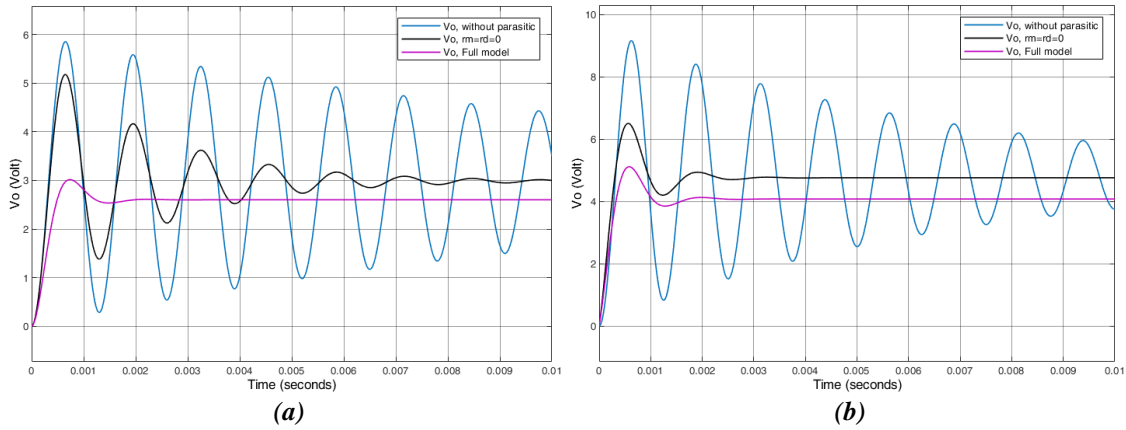


Figure 3. Output voltages for $d=0.2$ (a) Parameters 1 and (b) Parameters 2

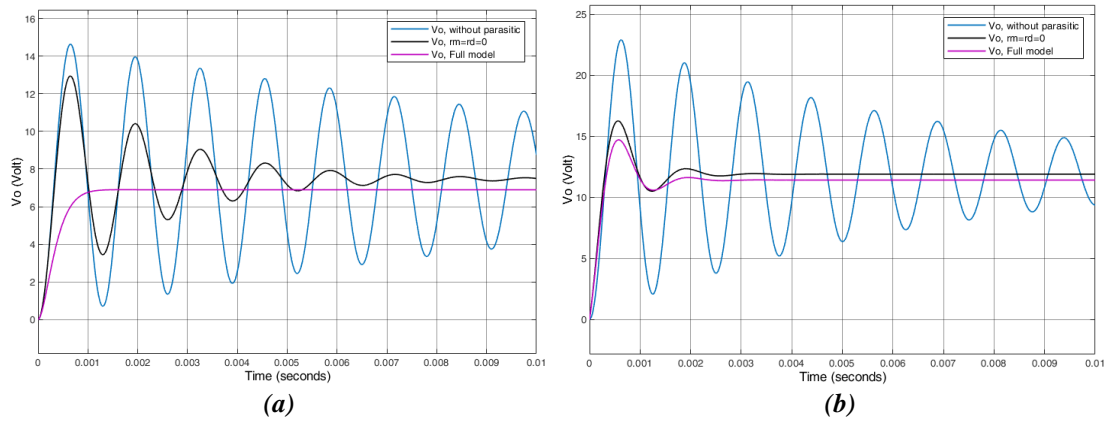


Figure 4. Output voltages for $d=0.5$ (a) Parameters 1 and (b) Parameters 2

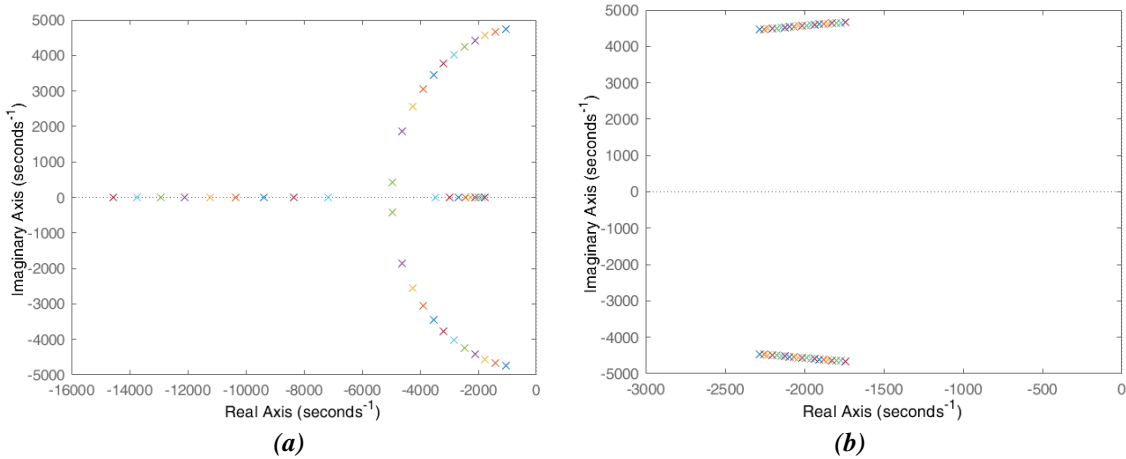


Figure 5. Pole-zero map for (a) Parameters 1 and (b) Parameters 2

Today, classic, and modern control systems are widely used in the literature. Among the classic control techniques, we can say that the PID control technique is the most widely used in industry. The reasons for this can be listed as its simplicity, low cost, not requiring high processing capacity, and easy implementation. However, this control technique is ineffective in systems that require high performance such as nonlinear systems, systems with a large parameter change range, or systems with sudden disturbances. PID control is a feedback control technique. Although PID control can yield better results, PI is not preferred in practice since the derivative effect can introduce noise. However, the derivative can be derived from integrator with filter N . The PID control system is presented in

Figure 6. The mathematical equation of the PID controller is as follows. Where e is the error signal, and u is the control input signal.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \right) E(s) \rightarrow U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right) E(s)$$

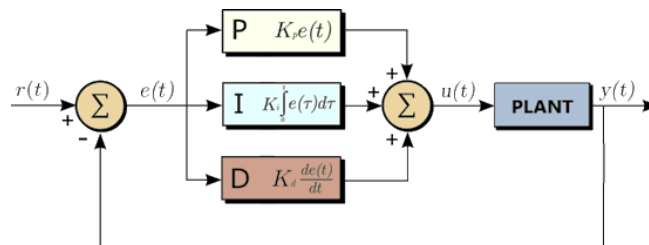


Figure 6. PID Control block diagram

In PI/PID control design, finding the optimum values of P , I and D parameters is important for control success. Different methods have been proposed in the literature for this purpose. Some of them are Ziegler-Nichols, Cohen and Coon method, Tyreus-Luyben, IMC (Internal Model Control), C-H-R (Chien, Hrones, Reswick) method, Fertik method [48], [49], [50]. Some optimization methods are also utilized [50]. Since the focus of this study is not on PID design, the PID parameters are obtained by using the "PID Tuner" tool in MATLAB Simulink. The block diagram created for this is shown in Figure 7. Clicking on the PID block opens the PID block parameters screen in Figure 7. When the "Tune" button is pressed here, the "PID Tuner" tool screen appears.

Accordingly, the parameters are arranged and adjusted according to behaviour due to input saturation after PID is designed by the tool. According to this, the PID control is designed for Parameters 1 and Parameters 2 as follows.

$$U(s) = \left(5 + \frac{700}{s} + 0.001 \frac{34926000}{1 + 34926000 \frac{1}{s}} \right) E(s), \quad U(s) = \left(1 + \frac{280}{s} + 0.00018 \frac{12585586}{1 + 12585586 \frac{1}{s}} \right) E(s)$$

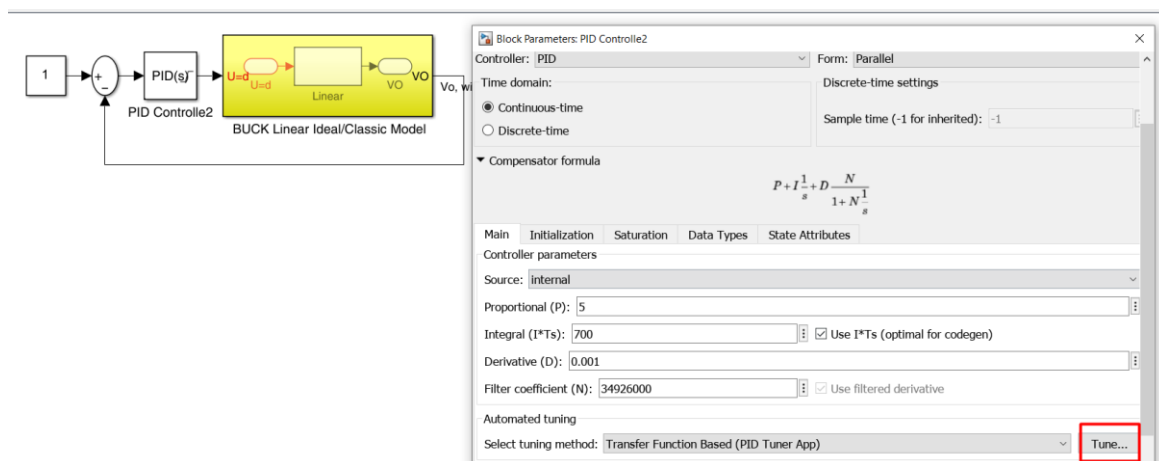


Figure 7. "PID Tuner" Tool Screen

Let's compare the performance of the PI controller without and with the inclusion of parasitic elements. Figure 8 shows the output voltages for a reference of 5V. The simulation results demonstrate that the designed PID control in regard to ideal/classic model in Equation (10) is successful for the

nonlinear/full model. Hence, ideal/classic model in (10) can be used for the linear controller design like PID design. However, PID is of short-time steady state error for Parameters 2.

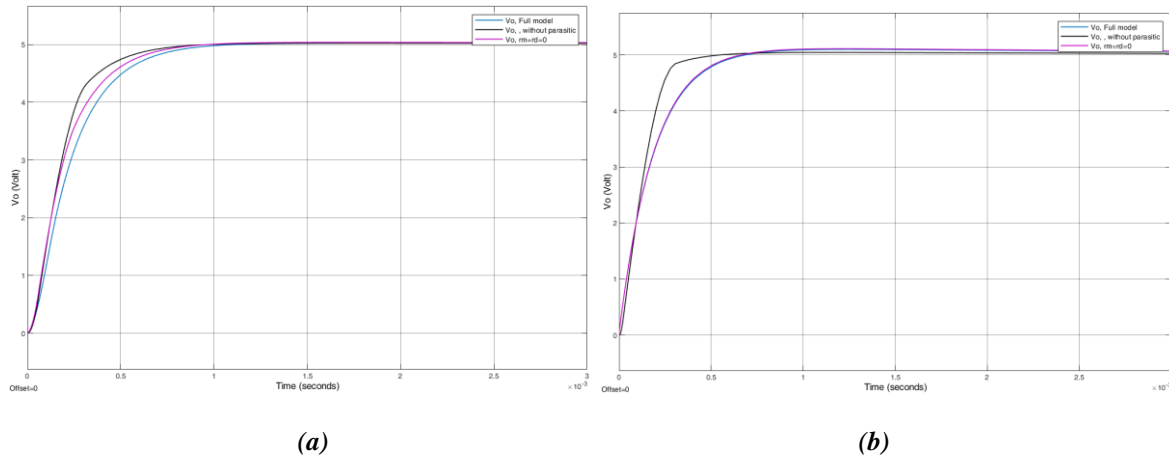


Figure 8. The output voltages for (a) Parameters 1 and (b) Parameters 2

We can remark on the simulation results from different perspectives as follows.

Remark 1: However, the effect of d in (11) should be analyzed for frequency, just as analysis is made in time domain. Therefore, bode analysis can be made to d . In addition, if a specific topic will not be addressed such as disturbance rejection or observer, linearized models can be utilized for PID controller design.

Remark 2: The simulation tests are conducted for only two different parameters. So, it should not be ignored that the designed PID may not be successful according to ideal/classic model in (10) when the effects of d in (11) are much more to the poles/zeros. This entirely depends on the values of parameters. For instance, if the input voltage of V_{in} in (11) is quite bigger than the output voltage V_O , d is more effective to the poles/zeros. Hence, the PID may not succeed.

Remark 3: In general, it can be interpreted that linear controller design, like PID, according to the linearized model, can be used under certain conditions. In addition, it should be applied to the full model to test its performance after PID design according to the linearized model. Moreover, the more suitable control techniques should be focused on for topics such as disturbance rejection, disturbance observer, and sensorless control.

Remark 4: The model considered in this study is valid for low and medium frequency. In this study, PWM is tried at medium frequencies such as 150-200 kHz and similar results are obtained. Since capacitance and inductance effects may also be involved at high frequencies, they need to be examined separately.

IV. CONCLUSION

This study examines the PID control design performance for a simple buck converter. For this purpose, the analysis is performed both on the effect of parasitic elements and the ideal/classical model where parasitic elements are neglected. The findings indicate that, under certain conditions, PID and similar low-order linear controllers designed according to the linearized model can be implemented to the full/non-linear model containing parasitic elements. Simulation results reveal that PID performance may be weakened in circuits where the difference between input and output voltage is large, and the values of the circuit parameters increase the effect of d . In general, it can be interpreted that linear controller designs such as PID based on linearized models can often be

implemented under certain conditions. However, it is imperative to verify their performance on the fully nonlinear model after PID design using the linearized model. Additionally, emphasis should be placed on investigating more appropriate control techniques to overcome challenges such as rejection of disturbances, use of disturbance observers, and implementation of sensorless control. Consequently, it can be concluded that designing PID control and similar low-order linear controllers based on linear Buck models depends on design priorities and effect of Buck converter parameters on duty cycle d .

V. REFERENCES

- [1] S. Mukherjee, J. M. Ruiz, and P. Barbosa, "A high power density wide range DC–DC converter for universal electric vehicle charging," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 1998–2012, 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3217092.
- [2] A. S. *et al.*, "Distinguished DC-DC converter for an electric vehicle," in *2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2022, pp. 578–582. doi: 10.1109/ICCMC53470.2022.9753880.
- [3] C. González-Castaño, C. Restrepo, F. Flores-Bahamonde, and J. Rodriguez, "A composite DC–DC converter based on the versatile buck–boost topology for electric vehicle applications," *Sensors*, vol. 22, no. 14. 2022. doi: 10.3390/s22145409.
- [4] M. Abdolahi, J. Adabi, and S. Y. M. Mousavi, "An adaptive extended kalman filter with passivity-based control for DC-DC Converter in DC microgrids supplying constant power loads," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 5, pp. 4873–4882, 2023, doi: 10.1109/TIE.2023.3283686.
- [5] W. Gil-González, S. Riffo, O. D. Montoya, C. Restrepo, and J. C. Hernández, "Adaptive voltage control for second-order DC–DC Converters supplying an unknown constant power load: a generalized PBC plus damping injection design," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47390–47409, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3275083.
- [6] R. M. Fuentes *et al.*, "Gain-scheduled control design applied to classical dc–dc converters in photovoltaic systems and constant power loads," *Mathematics*, vol. 10, no. 19. 2022. doi: 10.3390/math10193467.
- [7] J. Hu and Z. Wang, "Sliding mode control for DC-DC converters with unknown constant power load in renewable energy systems," in *2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 2022, pp. 325–330. doi: 10.1109/ICPRE55555.2022.9960700.
- [8] A. Khaligh and A. Emadi, "Modified pulse adjustment technique with variable states to control dc-dc converters operating in discontinuous conduction mode and driving constant power loads," in *2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIEA.2006.257140.
- [9] N. Sarrafan, N. Horiyat, J. Zarei, R. Razavi-Far, M. Saif, and T. Dragičević, "A novel fixed-time dynamic surface DC/DC SEPIC converter controller loaded by uncertain buck-based constant power loads," *IET Power Electronics*, vol. 15, no. 16, pp. 1831–1842, Dec. 2022, doi: 10.1049/PEL2.12350.
- [10] L. Palma and P. N. Enjeti, "A modular fuel cell, modular dc–dc converter concept for high performance and enhanced reliability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1437–1443, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2012498.
- [11] M. Babazadeh and H. Karimi, "A robust two-degree-of-freedom control strategy for an

- islanded microgrid,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1339–1347, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2254138.
- [12] G.-J. Jeong, I.-H. Kim, and Y.-I. Son, “Application of simple adaptive control to a DC/DC boost converter with load variation,” in *2009 ICCAS-SICE*, 2009, pp. 1747–1751.
- [13] C. Yao, X. Ruan, W. Cao, and P. Chen, “A two-mode control scheme with input voltage feed-forward for the two-switch buck-boost DC–DC converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 2037–2048, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2270014.
- [14] F. Misoc, M. M. Morcos, and J. Lookadoo, “Effect of DC-DC converter topologies and operation on the electrical performance of fuel cells,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 38, no. 7, pp. 851–861, May 2010, doi: 10.1080/15325000903489777.
- [15] J. Han, X. Gu, Y. Yang, and T. Tang, “Dynamic improvement with a feedforward control strategy of bidirectional dc-dc converter for battery charging and discharging,” *Electronics*, vol. 9, no. 10. 2020. doi: 10.3390/electronics9101738.
- [16] M. S. H. Lipu *et al.*, “Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: challenges and suggestions,” *Electronics*, vol. 10, no. 4. 2021. doi: 10.3390/electronics10040477.
- [17] S. Chakraborty, H.-N. Vu, M. M. Hasan, D.-D. Tran, M. E. Baghdadi, and O. Hegazy, “DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: state of the art and future trends,” *Energies*, vol. 12, no. 8. 2019. doi: 10.3390/en12081569.
- [18] S. Mandal and D. Mishra, “Robust control of buck converter using h-infinity control algorithm,” *Proceedings of 2018 IEEE Applied Signal Processing Conference, ASPCON 2018*, pp. 163–167, 2018, doi: 10.1109/ASPCON.2018.8748623.
- [19] M. Srinivasan and A. Kwasinski, “Control analysis of parallel DC-DC converters in a DC microgrid with constant power loads,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 122, 2020, doi: 10.1016/J.IJEPES.2020.106207.
- [20] A. A. Saafan, V. Khadkikar, M. S. El Moursi, and H. H. Zeineldin, “A new multiport dc-dc converter for dc microgrid applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 1, pp. 601–611, Jan. 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3213235.
- [21] A. Benzaouia, F. Mesquine, M. Benhayoun, H. Schulte, and S. Georg, “Stabilization of a buck converter: a saturated LMI approach,” *2015 4th International Conference on Systems and Control, ICSC 2015*, pp. 37–42, 2015, doi: 10.1109/ICoSC.2015.7152762.
- [22] K. K. Pandey, M. Kumar, A. Kumari, and J. Kumar, “Bidirectional DC-DC buck-boost converter for battery energy storage system and PV panel” B. Das, R. Patgiri, S. Bandyopadhyay, and V. E. Balas, Eds., Singapore: Springer Singapore, vol. 206, pp. 681–693, 2021.
- [23] A. A. A. Ismail and A. Elnady, “Advanced drive system for dc motor using multilevel dc/dc buck converter circuit,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 54167–54178, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912315.
- [24] E. Guerrero, E. Guzmán, J. Linares, A. Martínez, and G. Guerrero, “FPGA-based active disturbance rejection velocity control for a parallel DC/DC buck converter-DC motor system,” *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 356–367, 2020, doi: 10.1049/IET-PEL.2019.0832.
- [25] M. R. Haque and M. A. Razzak, “A buck converter-based battery charging controller for electric vehicles using modified pi control system,” in *2021 IEEE International IOT*,

- Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422646.
- [26] I. A. Aden, H. Kahveci, and M. E. Sahin, “Design and implementation of single-input multiple-output DC-DC buck converter for electric vehicles,” *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 30, no. 13, 2021, doi: 10.1142/S0218126621502285.
- [27] T. Hong, Z. Geng, K. Qi, X. Zhao, J. Ambrosio, and D. Gu, “A wide range unidirectional isolated DC-DC converter for fuel cell electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 7, pp. 5932–5943, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2998758.
- [28] R. Araria, K. Negadi, M. Boudiaf, and F. Marignetti, “Non-linear control of dc-dc converters for battery power management in electric vehicle application,” *Przełąd Elektrotechniczny*, vol. 2020, no. 3, pp. 82–88, 2020.
- [29] M. S. Bhaskar *et al.*, “Survey of DC-DC non-isolated topologies for unidirectional power flow in fuel cell vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 178130–178166, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027041.
- [30] X. Ren, Z. Tang, X. Ruan, J. Wei, and G. Hua, “Four switch buck-boost converter for telecom DC-DC power supply applications,” in *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008, pp. 1527–1530. doi: 10.1109/APEC.2008.4522927.
- [31] M. Salimi, J. Soltani, and A. Zakipour, “Adaptive nonlinear control of DC-DC buck/boost converters with parasitic elements consideration,” in *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, 2011, pp. 304–309. doi: 10.1109/ICCIAutom.2011.6356674.
- [32] M. Salimi and A. L. Eghlim, “Passivity-based control of the DC-DC buck converters in high-power applications,” in *TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference*, 2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/TENCON.2014.7022387.
- [33] M. Csizmadia and M. Kuczmann, “Feedback linearization with integrator of DC-DC buck converter taking into account parasitic elements,” in *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2021, pp. 97–101. doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432632.
- [34] M. A. Qureshi, S. Musumeci, F. Torelli, A. Reatti, A. Mazza, and G. Chicco, “A novel model reference adaptive control approach investigation for power electronic converter applications,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 156, p. 109722, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.IJEPES.2023.109722.
- [35] M. Walczak and L. Bychto, “Influence of parasitic resistances on the input resistance of buck and boost converters in maximum power point tracking (MPPT) systems,” *Electronics*, vol. 10, no. 12, 2021. doi: 10.3390/electronics10121464.
- [36] A. Luchetta, S. Manetti, M. C. Piccirilli, A. Reatti, and M. K. Kazimierczuk, “Effects of parasitic components on diode duty cycle and small-signal model of PWM DC-DC buck converter in DCM,” *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 772–777, 2015.
- [37] J. Wang and H. S. Chung, “Impact of parasitic elements on the spurious triggering pulse in synchronous buck converter,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 480–487. doi: 10.1109/ECCE.2013.6646740.
- [38] A. Reatti, F. Corti, A. Tesi, A. Torlai, and M. K. Kazimierczuk, “Effect of parasitic

- components on dynamic performance of power stages of DC-DC PWM buck and boost converters in CCM,” in *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISCAS.2019.8702520.
- [39] S. Bhat and H. N. Nagaraja, “Effect of parasitic elements on the performance of buck-boost converter for PV systems,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 4, no. 6, pp. 831–836, 2014, doi: 10.11591/IJECE.V4I6.6855.
- [40] W. Chen *et al.*, “Impact of parasitic elements on power loss in GaN-based low-voltage and high-current dc-dc buck converter,” in *2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)*, 2018, pp. 294–298. doi: 10.1109/WiPDAAsia.2018.8734534.
- [41] Y. I. Son and I. H. Kim, “Complementary PID controller to passivity-based nonlinear control of boost converters with inductor resistance,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 826–834, 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2134099.
- [42] M. Salimi, J. Soltani, G. A. Markadeh, and N. R. Abjadi, “Indirect output voltage regulation of DC–DC buck/boost converter operating in continuous and discontinuous conduction modes using adaptive backstepping approach,” *IET Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 732–741, 2013, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2012.0198>.
- [43] R. Patel and R. Chudamani, “Stability analysis of the main converter supplying a constant power load in a multi-converter system considering various parasitic elements,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, no. 5, pp. 1118–1125, 2020, doi: 10.1016/j.jestch.2020.03.007.
- [44] C. Olalla, R. Leyva, A. El Aroudi, P. Garcés, and I. Queinnec, “LMI robust control design for boost PWM converters,” *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 75–85, 2010, doi: 10.1049/iet-pel.2008.0271.
- [45] F. Mumtaz, N. Zaihar Yahaya, S. Tanzim Meraj, B. Singh, R. Kannan, and O. Ibrahim, “Review on non-isolated DC-DC converters and their control techniques for renewable energy applications,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3747–3763, 2021, doi: 10.1016/J.ASEJ.2021.03.022.
- [46] N. Bajoria, P. Sahu, R. K. Nema, and S. Nema, “Overview of different control schemes used for controlling of DC-DC converters,” in *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, 2016, pp. 75–82. doi: 10.1109/ICEPES.2016.7915909.
- [47] D. Bhattacharyya, S. Padhee, and K. C. Pati, “Modeling of DC–DC converter using exact feedback linearization method: a discussion,” *IETE Journal of Research*, vol. 65, no. 6, pp. 843–854, 2019, doi: 10.1080/03772063.2018.1454345.
- [48] S. Anusha, G. Karpagam, and E. Bhuvanesarwarri, “Comparison of tuning methods of PID controller,” *International Journal of Management, Information Technology and Engineering*, vol. 2, no. 8, pp. 1–8, 2014.
- [49] M. Shahrokhi and A. Zomorodi, “Comparison of PID controller tuning methods,” *Department of Chemical & Petroleum Engineering Sharif University of Technology*, pp. 1–2, 2013.
- [50] F. Alhayami, A. S. Jaber, Ç. Aydın, And D. Ç. Atilla, “Tuning of PI controller for four-area load frequency control using elephant herding optimization,” *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, vol. 3, no. 2, pp. 215–225, 2019.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Türkiye Özelinde Ekonomik Yük Dağıtım Problemi için Sürüngen Arama Algoritmasının Geliştirilmiş Versiyonu

 Ayşe ERDOĞAN YILDIRIM^{a,*}

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ayseerdogan@firat.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1185476

Öz

Sürüngen Arama Algoritması, sürüngenlerin avlanma kalıplarının modellenmesiyle geliştirilmiş yeni nesil sürü tabanlı bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, özellikle timsah türleri için tasarlanmıştır. Algoritmada timsahların yüksekte yürüme, göbekte yürüme, avlanma koordinasyonu, avlanma işbirliği gibi davranışları farklı operatörler olarak modellenmiştir. Sürüngen Arama Algoritması daha önce kıyaslama fonksiyonlarına ve gerçek dünya mühendislik tasarım problemlerine uygulanmıştır. Bu alanlarda, bu yeni nesil buluşsal yöntem başarılı sonuçlar elde etmiştir. Termik santrallerde enerji üretim maliyetlerinin düşürülmesi çok önemli bir konudur. Enerji verimliliğini sağlamak için bu alanda birçok optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu makalede, Türkiye'deki güç sistemleri için ekonomik yük dağıtım problemine Sürüngen Arama Algoritması ve algoritmanın geliştirilmiş versiyonu ayrı ayrı uygulanarak bu yaklaşımların başarısı değerlendirilmektedir. Bu çalışma, Sürüngen Arama Algoritmasının performansının yapılan güncellemelerle geliştirildiğini ve algoritmanın yeni versiyonunun termik santrallerde yakıt maliyet optimizasyonu alanında daha etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürüngen arama algoritması, Ekonomik yük dağıtım problemi, Güç sistemleri, Optimizasyon, Meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları

Improved Version of Reptile Search Algorithm for Economic Load Dispatch Problem in Turkey

ABSTRACT

Reptile Search Algorithm is a new generation swarm-based optimization method developed by modeling the hunting patterns of reptiles. The algorithm is designed specifically for the crocodile species. Behaviors of crocodiles such as high walking, belly walking, hunting coordination, hunting cooperation are modeled as different operators in the algorithm. Reptile Search Algorithm has been previously applied to benchmark functions and real world engineering design problems. In these fields, this new generation heuristic method achieved successful results. Reducing energy production costs in thermal power plants is a very important issue. Many optimization methods have been used in this area to provide energy efficiency. In this article, the success of the approaches are evaluated by applying the Reptile Search Algorithm and the improved version of the algorithm separately to the economic load dispatch problem for power systems in Turkey. This study reveals that the performance of the Reptile Search Algorithm has been improved with the updates and the new version of the algorithm is a more effective method in the field of fuel cost optimization in thermal power plants.

Keywords: Reptile search algorithm, Economic load dispatch problem, Power systems, Optimization, Meta-heuristic optimization algorithms

I. GİRİŞ

Elektrik, her alanda yaygın kullanımıyla günümüzün vazgeçilmez ihtiyaçlarından. Bu nedenle, çağımız için elektrik enerjisi üretimi büyük öneme sahip bir konudur. Elektrik enerjisi üretimini en ekonomik şekilde gerçekleştirmek, hem üreticisi hem de tüketicisi açısından faydalıdır. Ekonomik Yük Dağıtım (EYD) problemi tam bu noktada karşımıza çıkmaktadır. EYD, elektrik enerjisi üretimi yapılan termik güç santrallerinde, üretim sürecinde kullanılan biyo-yakıt miktarında tasarruf sağlayarak elektrik üretim maliyetini düşürmek amacıyla ortaya konmuş bir optimizasyon problemidir. Literatürdeki birçok çalışma, matematiksel ya da meta-sezgisel yöntemler kullanarak bu probleme çözüm aramıştır. Son yıllarda, sağladığı avantajlar nedeniyle meta-sezgisel yöntemlerin kullanımı daha çok tercih edilmektedir.

Yalçınöz vd. [1] yapmış oldukları çalışmada, 6 generatörlü sistem için EYD problemini Tabu Araştırması yöntemiyle çözümlenerek, FLCGA (Bulanık mantık tabanlı genetik algoritma), AECGA (Gelişmiş mühendislik koşullandırılmış genetik algoritma), IHNN (Geliştirilmiş Hopfield Sinir Ağı) ve AHNN (Aiyer'in Hopfield Sinir Ağı) yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Kurban ve Başaran [2] çalışmalarıyla Türkiye'de bulunan 14 baralı 6 termik santralli güç sisteminin gerekliliklerini belirleyerek EYD problemini Lagrange yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Duman ve Öztürk [3] gerçekleştirdikleri çalışmayla, Türkiye'deki 6-termik santral için elektrik enerjisi üretiminin minimum yakıt tüketimi ile gerçekleştirilmesi amacıyla, Tavlama Benzetimi, Tabu Arama Algoritması ve Genetik Algoritmayı kullanmışlardır. Rahmani vd. [4] çalışmalarında, evrimsel olarak değiştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonuna dayalı olarak geliştirdikleri yöntemi kullanarak EYD problemini 3-, 6-, 15- ve 40-üniteli test sistemleri için çözümlenmişlerdir. Bindu ve Reddy [5] 3- ve 6- üniteli test sistemleri için yakıt maliyet optimizasyonu problemine Guguk Kuşu Arama Algoritmasını uygulamışlardır. Banerjee vd. [6] EYD probleminin çözümünde Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon yöntemini valf noktası yükleme etkisini dikkate aldıkları 3-, 13- ve 40-üniteli sistemler için kullanmışlardır. Turgut ve Demir [7], Yapay İşbirlikçi Algoritmasını kullanarak 13 ve 40 üniteli test sistemleri için EYD problemine çözüm aramışlardır. Akkaş vd. [8] yaptıkları çalışmayla VIKOR yöntemini kullanarak 6 generatörlü sistem için EYD problemine çözüm getirmeye çalışmışlardır. Ali ve Abd Elazim [9] çalışmalarında, EYD problemini 6 generatörlü test sistemi için ve çift amaçlı kombine ekonomik emisyon dağıtım (KEED) problemini 10 generatörlü test sistemi için Mayın Patlatma Algoritması kullanarak çözmeye çalışmışlardır. Reddy ve Reddy [10] yaptıkları çalışmada, 6-üniteli test sisteminde EYD probleminin çözümü için, valf noktası yükleme etkisini dikkate alan, dikkate almayan, emisyon minimizasyonu yapan ve yasak işletim bölgeleri ile rampa hız sınırını dikkate alan üzere 4 farklı sistem için Karınca Aslanı Optimizasyon Algoritmasını uygulamışlar ve önerdikleri yöntemi literatürdeki diğer meta-sezgisel algoritmalar ile karşılaştırarak, üstünlüğünü ortaya koymuşlardır. Malik vd. [11] çalışmalarında, 3-, 6- ve 15-generatörlü test sistemleri için EYD probleminin çözümünü Modifiye edilmiş Balina Optimizasyon Algoritmasını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Fu vd. [12] yaptıkları çalışmayla, 6- ve 15- generatörlü test sistemleri için Geliştirilmiş Kuş Sürü Algoritması ile yakıt maliyeti optimizasyon problemini çözmüşlerdir. Andıç vd. [13] ise çalışmalarıyla, Türkiye'deki güç sistemleri için EYD problemini meta-sezgisel bir algoritma olan Karga Arama Algoritmasıyla çözmeyi önermişlerdir. Önceki çalışmalara kıyasla daha iyi bir performans elde etmişlerdir. Deb vd. [14] çalışmalarında, 6-üniteli test sistemi için hem EYD hem de KEED problemlerine meta-sezgisel bir algoritma olan Türbülanslı Su Akışı Optimizasyonu ile çözüm aramışlardır. Elde ettiği sonuçları, Guguk Kuşu Arama Algoritması, Gri Kurt Algoritması, Sinüs Kosinüs Algoritması, Toprak Solucanı Optimizasyon Algoritması, Tulumlu Sürü Algoritması, Güve Arama Algoritması ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon yöntemleri ile karşılaştırarak üstünlüğünü ortaya koymuşlardır. Al-Betar vd. [15] çalışmalarında, 3-, 13- ve 40-üniteli test sistemleri için rampa hızı limitleri ve yasaklanmış çalışma bölgesi kısıtlamaları olmaksızın geliştirdikleri Hibrit Sinüs-Kosinüs yöntemini uygularken, 6- ve 15-üniteli sistemler için bu kısıtlamaları dikkate almışlardır. Aribowo [16] çalışmasında, 3- ve 6-üniteli sistemler için Martı Optimizasyon Algoritması, Deniz Yırtıcı Algoritması, Sinüs Ağaç-Tohum Algoritması, Şempanze Optimizasyon Algoritması, Denge Optimize Edici ve Giza Piramitleri İnşaatı olmak üzere 6 farklı meta-sezgisel yöntemi EYD probleminin çözümü için uygulayarak karşılaştırmalı sonuçları sunmuşlardır. Said vd. [17], EYD ve

KEED problemlerinin çözümü için Arama ve Kurtarma Optimizasyon Algoritmasını kullanarak 6- üniteli ve 10- üniteli test sistemlerinin maliyet optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Solucan Optimizasyon Algoritması, Gri Kurt Optimizasyonu, Sinüs-Cosinüs Optimizasyonu gibi çeşitli meta-sezgisel yöntemlerde karşılaştırma yaparak önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermişlerdir.

Önerilen çalışmada, daha önce Lagrange yöntemi [2], Genetik Algoritma [18], Tavlama Benzetimi, Tabu Arama Algoritması [3] ve Karga Arama Algoritması [13] ile çözüm aranan Türkiye’de bulunan 14-baralı ve 6- termik santral içeren güç sisteminin gereksinimlerine uygun olarak tasarlanmış EYD problemine, Sürüngen Arama Algoritmasının (SAA) ve geliştirilmiş versiyonu ile çözüm aranmıştır. Önerilen yöntem, önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar Geliştirilmiş Sürüngen Arama Algoritmasının (GSAA) EYD probleminin çözümü için uygun bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmanın anlatımı aşağıdaki şekilde planlanmıştır: 2.Bölüm EYD probleminin anlatımı ve formüllerle tanıtımını içermektedir. Ayrıca SAA ve önerilen geliştirilmiş versiyonu bu bölümde açıklanmıştır. 3. Bölümde GSAA kullanılarak 14 baralı 6 termik santrali bulunan Türkiye’deki güç sistemleri özelinde gerçekleştirilen uygulamanın sonuçları verilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç bölümünde, geliştirilen yöntemin ilgili problemdeki başarısı tartışılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

A. EKONOMİK YÜK DAĞITIM PROBLEMİ

Ekonomik Yük Dağıtım (EYD) problemi, güç sistemlerinde elektrik üretim sürecinde, farklı termik santraller arasında yükün optimum şekilde dağıtımını ile kullanılan biyo-yakıt miktarını düşürmeyi ve böylece üretim maliyetini azaltmayı amaçlayan bir çeşit optimizasyon problemidir. Termik santraller arasındaki yük dağıtım maliyeti, generatörlerin çıkış gücüne bağlı denklemlerle hesaplanmaktadır. Yük dağıtım maliyetini düşürmek için termik santrallerin generatör çıkış güçlerini optimize etmek gerekmektedir. Bu doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Termik santrallerin yakıt maliyetleri Denklem 1’deki formülasyon ile hesaplanmaktadır.

$$F_i = c_i + b_i P_i + a_i P_i^2 \quad (1)$$

Burada, P_i her bir generatörün taşıdığı yükü gösterirken a_i , b_i ve c_i değişkenleri yük dağıtım sabitlerini göstermektedir [19-21].

Güç sistemi içerisinde çalışan tüm termik santrallerdeki toplam yakıt maliyeti ise, Denklem 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_K \quad (2)$$

Toplam yakıt maliyetinin minimizasyonu amacıyla kullanılan yük sabitlerini içeren EYD probleminin amaç fonksiyonu Denklem 3’de verilmektedir.

$$C = \text{Min} \sum_{i=1}^N F_i(P_{Gi}) = \text{Min} \sum_{i=1}^N c_i + b_i P_{Gi} + a_i P_{Gi}^2 \quad (3)$$

Denklem 1 ve Denklem 3, valf noktası yükleme etkisini dikkate almayan sistemler için geçerlidir. Ayrıca, bu çalışmada, sistem içerisinde meydana gelen güç kayıpları da göz ardı edilmektedir. Sistem içerisindeki her termik santralin yük kapasitesi birbirinden farklıdır. Bu sınırlamalar aşağıdaki eşitlik ile belirlenir (Denklem 4).

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (4)$$

Burada P_i^{min} ve P_i^{max} sırasıyla generatörlerin yüklenebileceği alt sınır ve üst sınırları göstermektedir [1].

B. SÜRÜNGEN ARAMA ALGORİTMASI

Sürüngen Arama Algoritması (SAA) [22], sürüngenler arasında özellikle timsah türü için modellenmiş bir algoritmadır. Timsahların avlarını yakalamak için gerçekleştirdikleri hareket ve davranışları modelleyerek geliştirilmiştir. Timsahların avlanma stratejileri iki temel adımdan oluşmaktadır. Bunlar; Keşif (Çevreleme) ve Sömürü (Avlanma) aşamalarıdır. Çevreleme aşaması da kendi içerisinde Yüksekte Yürüyüş ve Göbekte Yürüyüş olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Bunlar SAA'nın operatörlerini oluşturmaktadır. Benzer şekilde; Avlanma aşaması da iki bölüme ayrılmaktadır. Bunlar; Avlanma Koordinasyonu ve Avlanma İşbirliğidir. Bu dört operatör algoritmanın iterasyon sayısına göre Tablo 1.'deki şekilde işletilirler [22-23].

Tablo 1. SAA'nın Operatörleri

Şart	Operatör	Denklemleri
$t \leq \frac{T}{4}$	Yüksekte Yürüyüş	$Best_j(t) \times -\eta_{ij}(t) \times \beta - R_{ij}(t) \times rand$
$t > \frac{T}{4}$ ve $t \leq 2\frac{T}{4}$	Göbekte Yürüyüş	$Best_j(t) \times x_{r_1j} \times ES(t) \times rand$
$t > 2\frac{T}{4}$ ve $t \leq 3\frac{T}{4}$	Avlanma Koordinasyonu	$Best_j(t) \times P_{ij}(t) \times rand$
$t > 3\frac{T}{4}$ ve $t \leq T$	Avlanma İşbirliği	$Best_j(t) - \eta_{ij}(t) \times \varepsilon - R_{ij}(t) \times rand$

Tablo 1.'deki t , şu anki iterasyon değerini gösterirken, T , algoritma için maksimum iterasyon sayısını belirtmektedir. Burada $Best_j$, popülasyonun j . sütunundaki en iyi değeri belirtmektedir. η_{ij} algoritmanın arama operatörüdür. β , keşif aşamasında doğruluğu kontrol eden bir parametredir. R_{ij} , arama alanını küçültmek amacıyla kullanılan bir fonksiyondur. r_1 , 1 ile N arasında rastgele üretilen bir tamsayıdır. ES , [-2,2] aralığında değerler alan Evrimsel Algı parametresidir. ε , küçük bir değerdir. ε (eps) değeri harici olarak tanımlanmadığı zaman, MATLAB tarafından 2^{-52} olarak atanmaktadır. Ancak GSAA yöntemi için 10^{-2} olarak belirlenmiştir. P_{ij} ise, mevcut konum ile en iyi konum arasındaki yüzdesel farkı göstermektedir. P_{ij} değeri Denklem 5'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır.

$$P_{ij}(t) = \alpha_1 + (x_{i,j}(t) - mean(x_i(t))) / (Best_j(t) * (UB - LB) + \varepsilon) \quad (5)$$

Burada, $x_{i,j}$ mevcut konumu gösterirken, $mean()$ fonksiyonu ile tüm konumların ortalaması hesaplanmaktadır. $Best_j$, popülasyonun j . sütunundaki en iyi değeri belirtmektedir. α_1 ise sabit bir değerdir. Genellikle $\alpha_1=0.1$ olarak alınmaktadır. Ayrıca, UB ve LB sırasıyla, problemin parametre değerlerinin üst limit ve alt limitlerini belirtmektedir. ε ise küçük bir değer olarak belirlenir [22].

C. GELİŞTİRİLMİŞ SÜRÜNGEN ARAMA ALGORİTMASI

SAA'nın optimizasyon problemlerindeki etkililiğini arttırmak amacıyla operatörleri üzerinde bazı güncellemeler yapılmıştır. Öncelikle performans üzerindeki etkisinin düşük olduğu tespit edilen Yüksekte Yürüyüş Operatörü, algoritmanın başlangıç adımındakine benzer şekilde, sınır şartları gözetilerek rastgele değerler üreten bir operatörle değiştirilmiştir.

İkinci olarak, yine etkisi düşük olan Avlanma İşbirliği operatörünün yerine Bal Porsuğu Algoritmasının bir operatörü eklenerek geliştirilmiştir [24]. Bal Porsuğu Algoritması, bal porsuğu adı verilen memeli hayvan türünün avlarına ve bala ulaşma davranışlarını modelleyen, doğadan

esinlenerek geliştirilmiş bir meta-sezgisel yöntemdir. Bu algoritma, bal porsuğunun yiyecek arama şekli olarak tanımlanan kazma ve bal modu adında iki operatöre sahiptir. Kazma operatörü, bal porsuğunun böcek, kurbağa, kaplumbağa, kertenkele gibi avlarını yakalamak için kullandığı çevreleme, kazma ve yakalama aşamalarından esinlenerek tasarlanmıştır. Bal modu ise, bal porsuğunun, kovana götüren kuşu takip etmesinin modellendiği operatördür [24-25]. Bal Porsuğu Algoritmasının Bal modu operatörü, SAA' nın yeni versiyonu için performansı artırıcı olarak eklenmiştir. Problem için algoritmanın tüm operatörleri tek tek uygulanarak performansları test edilmiştir. Buna göre, performans üzerinde etkisinin düşük olduğu görülen GSAA' nın Avlanma İşbirliği operatörü, Bal Porsuğu Algoritmasının Bal Modu operatörü ile değiştirilmiştir. Bal Modu operatörünün matematiksel ifadesi Denklem 6'de verilmektedir.

$$x_{i,j}(t+1) = Best_j(t) + F * rand() * \alpha_2 * d_i \quad (6)$$

Burada, $Best_j(t)$, j . pozisyon için şu ana kadar elde edilen en iyi sonucu belirtmektedir. F , arama yönünü değiştirmek amacıyla kullanılan bayrağı ifade etmektedir. F bayrağını hesaplamak için Denklem 7 kullanılmaktadır.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{if } r_2 \leq 0.5 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

Burada r_2 , $rand()$ fonksiyonu ile rastgele hesaplanan $[0,1]$ arasında bir sayıdır. Denklem 5'de α_2 , yoğunluk faktörünü belirtmektedir. α_2 'nın hesaplanması için Denklem 8 kullanılmaktadır. Burada, t , mevcut iterasyon değerini gösterirken, T , algoritma için maksimum iterasyon sayısını belirtmektedir. C ise bir sabittir. $C \geq 1$ olmalıdır.

$$\alpha_2 = C \times \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (8)$$

d_i , i . konum için en iyi değerle mevcut değer arasındaki farkı göstermektedir [24].

Son olarak, algoritmanın mevcut iterasyon değeri (t) ile maksimum iterasyon değerine (T) bağlı olarak hesaplanan operatörlerin yürütülme şartları, $mod(t)$ 'ye göre hesaplanmıştır. Böylece operatörleri işletirken, iterasyon sayısını %25'lik dilimlere ayrılmak yerine; ilk iterasyondan itibaren her operatör sırayla işletilmiştir. İterasyon adımları arasında, uygulanacak işlem çeşitliliği artırılmıştır. Bu da performansı olumlu yönde etkilemiştir. GSAA' nın operatörleri Tablo 2.'de gösterilmektedir.

Tablo 2. GSAA' nın Operatörleri

Şart	Operatör	Denklemleri
$mod(t, 4) == 0$	Geliştirilmiş Yüksekte Yürüyüş	$rand(1,1) * (UB - LB) + LB$
$mod(t, 4) == 1$	Göbekte Yürüyüş	$Best_j(t) \times x_{r_1j} \times ES(t) \times rand$
$mod(t, 4) == 2$	Avlanma Koordinasyonu	$Best_j(t) \times P_{ij}(t) \times rand$
$mod(t, 4) == 3$	Geliştirilmiş Avlanma İşbirliği	$Best_j(t) + F * rand() * \alpha_2 * d_i$

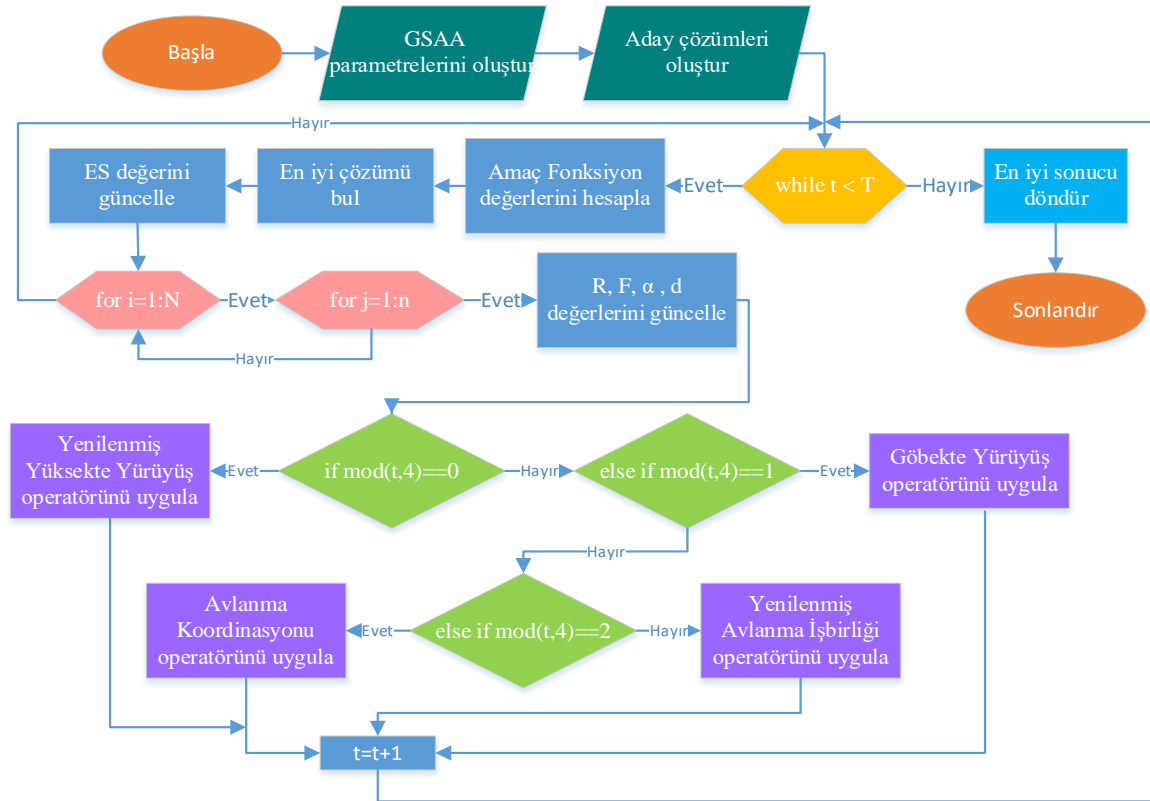
Burada, UB ve LB sırasıyla EYD probleminin parametre değerlerinin üst limit ve alt limitlerini belirtmektedir. F , arama yönünü değiştirmek amacıyla kullanılan bir bayraktır. α_2 , yoğunluk faktörüdür. Bu yolla, iterasyon sayısı arttıkça randomizasyon azalır [24].

GSAA'nın sözde (pseudo) kodu aşağıda verilmektedir.

Algoritma 1 GSAA'nın Sözde Kodu

```
1: Başlangıç
2: GSAA parametrelerini oluştur ( $\beta, \varepsilon, T, N$ )
3: Aday çözümleri rastgele(random) değerlerle oluştur ( $X: i = 1, \dots, N$ )
4: while ( $t < T$ )
5:   Aday çözümler (X) için Amaç Fonksiyon değerlerini hesapla
6:   En iyi çözümü bul
7:   ES değerini güncelle
8:   for ( $i=1$ 'den  $N$ 'e kadar) (N: Aday çözüm sayısı (Sürüngen sayısı))
9:     for ( $j=1$ 'den  $n$ 'e kadar) (n: Problemin parametre sayısı)
10:       $R_{ij}, F, \alpha_2, d_i$  değerlerini güncelle
11:      if ( $\text{mod}(t, 4) == 0$ ) ise,
12:         $\text{rand}(1,1) * (UB - LB) + LB$ 
13:      else if ( $\text{mod}(t, 4) == 1$ ) ise,
14:         $Best_j(t) \times x_{r_1j} \times ES(t) \times \text{rand}$ 
15:      else if ( $\text{mod}(t, 4) == 2$ ) ise,
16:         $Best_j(t) \times P_{ij}(t) \times \text{rand}$ 
17:      else
18:         $Best_j(t) + F * \text{rand}() * \alpha_2 * d_i$ 
19:      end if
20:    end for
21:  end for
22:   $t=t+1$ 
23: end while
24: En iyi sonucu geri döndür (Best(X))
```

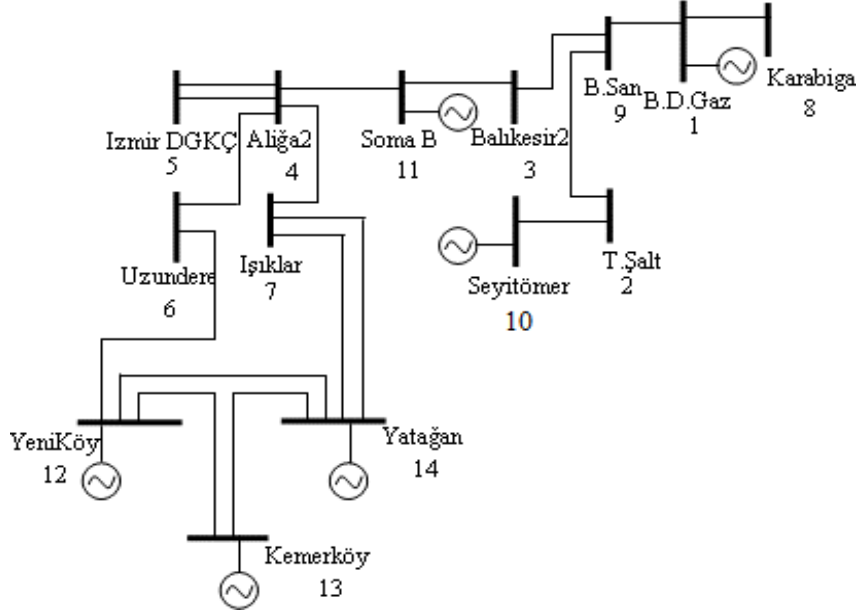
Şekil 1.'de GSAA için akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 1. GSAA'nın akış diyagramı

III. BULGULAR

Türkiye’de bulunan 14 baralı, 380kV’luk 6 generatörlü bir güç sistemi Şekil 2.’de gösterilmiştir. Yapılan çalışmada, bu sistemin generatörleri arasında optimum yük dağılımı sağlamak ve mümkün olan en ekonomik şekilde elektrik üretim sürecini tamamlamak amacıyla GSAA kullanılmıştır.



Şekil 2. Türkiye’de bulunan 14 baralı 6 generatörlü güç sistemi örneği [13]

Türkiye özelinde tasarlanan bu sistemin yük dağıtım sabitlerini ve yük talebini de içeren sistem gereklilikleri Tablo 3.’de verilmektedir. Sistemin yük talebi 2734.9 MW olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu problemde valf noktası yükleme etkisi ve sistem içerisinde meydana gelen güç kayıpları dikkate alınmamıştır.

Tablo 3. Türkiye’deki generatörlerin yük dağıtım sabitleri ve sistemin yük talebi [13]

Generatörler	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	a	b	c
Bursa D. Gaz	318	1432	6780.5	5.682	0.0106
Seyitömer	150	600	1564.4	3.1288	0.0139
Soma B.	210	990	5134.1	6.2232	0.0168
Yeniköy	110	420	1159.5	3.3128	0.0210
Kemerköy	140	630	1697	3.2324	0.0137
Yatağan	140	630	1822.8	3.472	0.0147
Sistemin Yük Talebi (MW)					2734.9

Sistem gereksinimleri alındıktan sonra, SAA ve GSAA için parametre değerleri ayarlanmıştır. Bu problem için sürüngen (timsah) sayısı 100 ve iterasyon sayısı 10.000 olarak belirlenmiştir. SAA ve GSAA için parametre değerleri Tablo 4.’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4. EYD problemi için SAA ve GSAA parametreleri

Açıklamaları	Parametreler	Değerleri
Parametre sayısı	n (Ortak)	6
Aday çözüm sayısı (Sürüngen sayısı)	N (Ortak)	100
Maksimum iterasyon sayısı	T (Ortak)	10000
Keşif doğruluk sabiti	α_1 (Ortak)	0.1
Keşif doğruluk sabiti	β (SAA)	0.005
Sabit bir değer	C (GSAA)	2
Küçük bir değer	ε (Ortak)	10^{-2}

SAA ve GSAA ile Türkiye'deki güç sistemleri için EYD probleminin çözümü, MATLAB 2018b kullanılarak Intel Core-i5 işlemcili 2.5 GHz ve Turbo 3.1 GHz PC üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. SAA ve GSAA ile Türkiye'deki 14 baralı 6 generatörlü güç sistemi için EYD probleminin çözümü

Algoritma			SAA	GSAA
Generatörler	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	P_i (MW)	P_i (MW)
Bursa D. Gaz	318	1432	413.08843	553.71409
Seyitömer	150	600	600	517.15158
Soma B.	210	990	210	334.31148
Yeniköy	110	420	252.06404	335.69595
Kemerköy	140	630	630	520.79677
Yatağan	140	630	630	473.23011
Sistemin Yük Talebi (MW)			2734.9	2734.9
Toplam Üretim Maliyeti (\$/h)			49160.82201	47661.10055

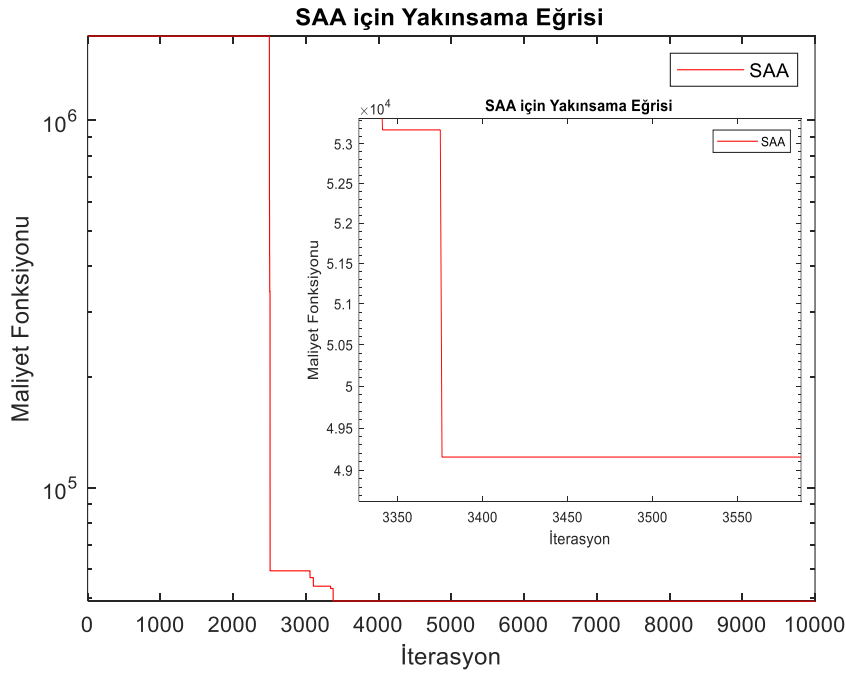
SAA ve GSAA ile Türkiye'deki 14 baralı 6 generatörlü 380kV'luk güç sisteminin EYD probleminin çözümü neticesinde Tablo 5.'de gösterilen generatör güç değerleri elde edilmiştir. Buna göre, SAA ile toplam üretim maliyeti 49160.822\$/h olarak elde edilirken, GSAA ile toplam üretim maliyeti 47661.100 \$/h olarak elde edilmiştir. Buna göre, GSAA, SAA'ya nazaran toplam üretim maliyetinde % 3.15'lik bir iyileştirme sağlamıştır. Tablo 5.'deki sonuçlara göre, SAA'nın geliştirilmiş yeni versiyonunun EYD probleminin çözümünde, ilk versiyonuna nazaran oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, daha önce Türkiye'deki güç sistemleri için EYD probleminin çözümünde kullanılan Benzetilmiş Tolama yöntemi, Genetik Algoritmalar, Tabu Arama Algoritması ve Karga Arama Algoritması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 6.'da verilmektedir.

Tablo 6. Türkiye'deki 14 baralı 6 generatörlü güç sistemi için EYD probleminin çözümünün karşılaştırmalı sonuçları

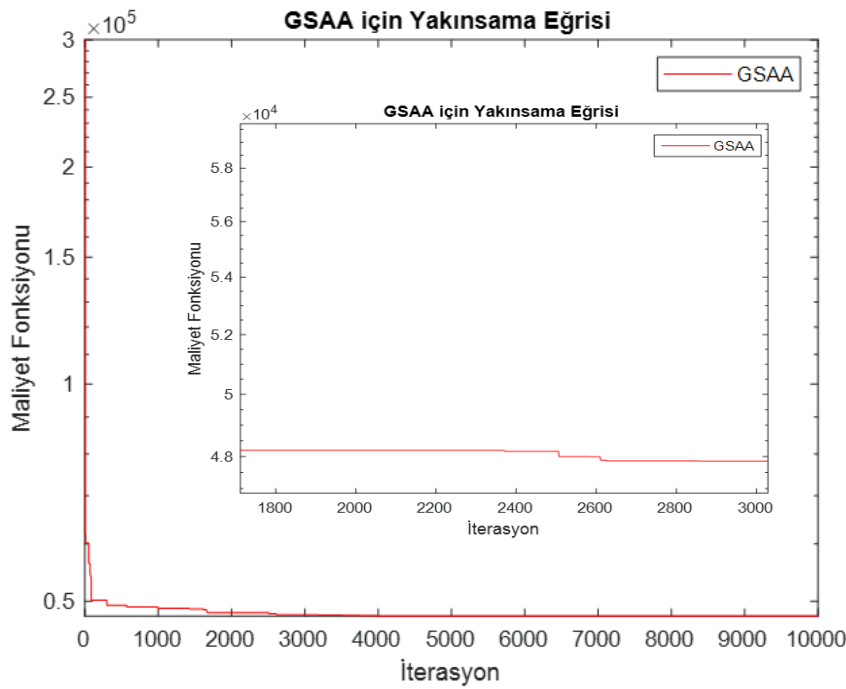
Generatörler	Benzetilmiş Tavlama Yöntemi [3]	Genetik Algoritma [18]	Tabu Arama Algoritması [3]	Karga Arama Algoritması [13]	GSAA
Bursa D. Gaz	483.5981	554.0455	553.6206	557.3107	553.7140
Seyitömer	478.4897	496.9588	503.5243	519.3833	517.1515
Soma B.	294.8322	320.8097	358.3317	330.1128	334.3114
Yeniköy	374.3331	357.1712	321.1134	336.7874	335.6959
Kemerköy	582.2331	519.2502	519.5332	519.3440	520.7967
Yatağan	521.4198	486.6204	478.7977	471.9617	473.2301
Toplam Üretim Maliyeti(\$/h)	47876	47679.2861	47678	47661.6375	47661.1005

Buna göre, Türkiye özelindeki bu güç sisteminin optimum yük dağılımını sağlamak amacıyla ortaya konmuş bu problem için, GSAA' nın Benzetilmiş Tavlama [3], Genetik Algoritma [18], Tabu Arama [3] ve Karga Arama Algoritmasından [13] daha iyi bir sonuç elde ettiği görülmektedir. GSAA, toplam üretim maliyeti bakımından Benzetilmiş Tavlama Yöntemine göre %0.45'lik bir iyileştirme sağlarken, Karga Arama Algoritmasına göre %0.001 iyileştirme sağlamıştır.

Şekil 3. ve Şekil 4. sırasıyla, SAA ve GSAA ile Türkiye özelindeki EYD probleminin çözümü için maliyet fonksiyonunun iterasyon sayısına bağlı değişimini gösteren yakınsama grafiğini vermektedir.



Şekil 3. Türkiye özelindeki EYD probleminin SAA ile çözümüne ait yakınsama grafiği



Şekil 4. Türkiye özelindeki EYD probleminin GSAA ile çözümüne ait yakınsama grafiği

Toplam üretim maliyeti bakımından en iyi performansı gösteren GSAA' nın algoritma yürütme zamanı 17.14 sn. olarak hesaplanmıştır. SAA' nın yürütme zamanı ise 21.54 sn. olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Tablo 6.'daki sonuçlar elde edilirken, SAA ve GSAA yöntemleri 20 kez koşturularak ulaşılan en iyi sonuçlar alınmıştır.

IV. SONUC

Bu makalede, timsah türünün avlanma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş bir meta-sezgisel yöntem olan SAA için yeni bir versiyon önerilmiştir. Buna göre; SAA' nın performans üzerindeki etkisi düşük olan Yüksekte Yürüyüş operatörünün içeriği, parametrelerin sınır şartlarına uygun olarak rastgele değerler üreten bir operatör ile güncellenmiştir. Ayrıca, performans üzerinde olumlu katkısının az olduğu belirlenen Avlanma İşbirliği operatörü de, başka bir meta-sezgisel algoritma olan Bal Porsuğu algoritmasının bir operatör ile değiştirilmiştir. Son olarak, algoritmanın hangi operatörünün ne zaman uygulanacağına karar verilen şart güncellenmiştir. Eski versiyonunda, mevcut iterasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısına bağlı olarak hangi operatörün uygulanacağı belirlenirken [22], yeni versiyonda sadece mevcut iterasyon değerine göre mod alma yöntemiyle belirlenmektedir. Yapılan bu değişiklik ve güncellemelerle, SAA' nın yeni versiyonu optimizasyon problemleri için daha etkin bir yöntem haline gelmiştir.

SAA'nın ilk versiyonu ve önerilen yeni versiyonu kullanılarak Türkiye'de bulunan 14 baralı 6 generatörlü güç sistemi için EYD probleminin çözümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, GSAA' nın Türkiye'deki güç sistemi için EYD probleminin çözümünde SAA'ya nazaran oldukça iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, daha önce aynı problemin çözümünde kullanılan Benzetilmiş Tavlama [3], Genetik Algoritma [18], Tabu Arama [3] ve Karga Arama Algoritması [13] ile karşılaştırılmıştır. Toplam üretim maliyeti bakımından en iyi sonucun GSAA ile elde edildiği görülmüştür. Bu sonuçlar, SAA'da yapılan iyileştirmelerin etkili sonuçlar verdiğini ve önerilen yeni versiyonun EYD alanındaki optimizasyon problemleri için daha etkili bir yöntem olarak literatüre katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Gelecekte yapılması öngörülen çalışmalarda, SAA ve GSAA' nın kıyaslama problemleri için performans analizinin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, daha büyük güç sistemleri için GSAA yönteminin kullanılarak başarısının değerlendirilmesi hedeflenmektedir. Buna ek olarak, Bal Porsuğu Algoritması ile GSAA' nın hibrit bir yaklaşımının tasarlanması ve farklı optimizasyon problemleri için denemesi mümkündür.

V. KAYNAKLAR

- [1] T. Yalçınöz, T. Yavuzer ve H. Altun, "Tabu araştırma algoritması kullanılarak ekonomik yük dağıtım probleminin çözümü," *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 2002.
- [2] M. Kurban ve Ü. Başaran, "Türkiye'deki 380 kV'luk 14 baralı güç sisteminde ekonomik yüklenme analizi," *Elektrik-Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [3] S. Duman ve A. Öztürk, "Türkiye'deki güç sisteminde tavlama benzetimi, genetik algoritma ve tabu araştırma algoritmaları kullanılarak ekonomik dağıtım," *Eng. Sci.*, c. 5, s.1, ss. 64-78, 2010.
- [4] R. Rahmani, M.F. Othman, R. Yusof, and M. Khalid, "Solving economic dispatch problem using particle swarm optimization by an evolutionary technique for initializing particles," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 526-536, 2012.

- [5] A.H. Bindu, and M.D. Reddy, "Economic load dispatch using cuckoo search algorithm," *Int. J. Eng. Res. Appl. (IJERA)*, vol. 3, no. 4, pp. 498-502, 2013.
- [6] S. Banerjee, D. Maity, and C.K. Chanda, "Teaching learning based optimization for economic load dispatch problem considering valve point loading effect," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 456-464, 2015.
- [7] M.S. Turgut ve G.K. Demir, "Ekonomik yük dağıtım problemi için yapay işbirlikçi algoritması ile çözümü," *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 19, s. 55, ss. 16-27, 2017.
- [8] Ö.P. Akkaş, Y. Arıkan, and E. Çam, "Load dispatch for a power system in terms of economy and environment by using VIKOR method," *Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, vol. 19, no. 57, pp. 733-741, 2017.
- [9] E.S. Ali, and S.M. Abd Elazim, "Mine blast algorithm for environmental economic load dispatch with valve loading effect," *Neural Comput & Applic*, vol. 30, pp. 261-270, 2018.
- [10] Y.V.K. Reddy and M.D. Reddy, "Economic load dispatch problem with ant lion optimization using practical constraints," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 524-542, 2019.
- [11] M.U. Malik, M.M. Zaid and A. Ahmad, "Solution of economic load dispatch problem by modified whales optimization algorithm," *2019 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering (RAEE)*, Islamabad, Pakistan, 2019.
- [12] C. Fu, S. Zhang, and K-H. Chao, "Energy management of a power system for economic load dispatch using the artificial intelligent algorithm," *Electronics*, vol. 9, no. 108, pp. 1-19, 2020.
- [13] C. Andiç, A. Öztürk ve S. Tosun, "Türkiye'deki güç sisteminde karga arama algoritması kullanılarak ekonomik yük dağıtım," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, s. 2020, ss. 428-436, 2020.
- [14] S. Deb, E.H. Houssein, M. Said and D.S. Abdelminaam, "Performance of turbulent flow of water optimization on economic load dispatch problem," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 77882-77893, 2021.
- [15] M.A. Al-Betar, M.A. Awadallah, R.A. Zitar, and K. Assaleh, "Economic load dispatch using memetic sine cosine algorithm," *J. Ambient Intell. Hum. Comput.*, vol. 14, pp. 11685-11713, 2023.
- [16] W. Aribowo, "Comparison study on economic load dispatch using metaheuristic algorithm," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 26-40, 2022.
- [17] M. Said, E. H. Houssein, S. Deb, R. M. Ghoniem and A. G. Elsayed, "Economic load dispatch problem based on search and rescue optimization algorithm," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 47109-47123, 2022.
- [18] M.K. Döşoğlu, S. Duman ve A. Öztürk, "Genetik algoritma kullanılarak ekonomik dağıtım analizi: Türkiye uygulaması," *J. Polytech.*, c. 12, s. 3, ss. 167-172, 2009.
- [19] I. Ahmed, A.R. Rao, A. Shah, E. Alamzeb, and J.A. Khan, "Performance of various metaheuristic techniques for economic dispatch problem with valve point loading effects and multiple fueling options," *Adv. Electr. Eng.*, vol. 2014, no. 765053, pp. 1-14, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/765053>.
- [20] A.E. Yıldırım, "Optimization of fuel cost in electric power systems using harmony search algorithm," *Int. J. Eng. Res. Dev.*, vol. 13, no. 2, pp. 531-544, 2021.

- [21] I. Ahmed, U-E-H. Alvi, A. Basit, T. Khursheed, A. Alvi, K-S. Hong, and M. Rehan, "A novel hybrid soft computing optimization framework for dynamic economic dispatch problem of complex non-convex contiguous constrained machines," *PLoS ONE*, vol. 17, no. 1, pp. 1-32, 2022.
- [22] L. Abualigah, M. Abd Elaziz, P. Sumari, Z.W. Geem, and A.H. Gandomi, "Reptile search algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer," *Expert Syst. Appl.*, vol. 191, no. 116158, 2022.
- [23] A.E. Yıldırım, "Solving optimum load dispatch problem with valve-point loading effect using reptile search algorithm," *The Hodja Akhmet Yassawi International Conference of Scientific Research*, Lankaran, Azerbaijan, 2022, pp. 510-516.
- [24] F.A. Hashim, E.H. Houssein, K. Hussain, M.S. Mabrouk, and W. Al-Atabany, "Honey badger algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems," *Math. Comput. Simul.*, vol. 192, pp. 84-110, 2022.
- [25] Y. Xiao, X. Sun, Y. Guo, H. Cui, Y. Wang, J. Li, and S. Li, "An enhanced honey badger algorithm based on Lévy flight and refraction opposition-based learning for engineering design problems," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 43, no. 4, pp. 4517-4540, 2022.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yönetim Sistemi Standartlarının İşletmelerde Uygulanması: Düzce Sanayi İşletmelerinde Bir Araştırma

 Buşra KESİCİ^{a,*},  Mehmet Selami YILDIZ^b

^a Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İşletme Bölümü, İşletme Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: busrakesici@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1272751

ÖZ

Bu araştırmanın temel amacı, Düzce’de faaliyet gösteren işletmelerin yönetim sistemi standartlarına sahip olma durumlarının ve öneminin ortaya konmasıdır. Nitel araştırma deseninin kullanıldığı çalışmada, veriler doküman inceleme ve görüşme teknikleri ile elde edilmiştir. Düzce’de faaliyet gösteren 57 üretim işletmesinden toplanan veriler meslek gruplarına göre kategorilere ayrılmıştır. Üretim tesislerinin içinde buldukları sektörlerle özgü gerekliliklere göre edindikleri standartlar, ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, IATF 16949, ISO 27001, ISO 50001, ISO 10002, ISO 13485 ve ISO 22000 olarak tanımlanmıştır. Söz konusu standartların uygulanma durumu, koşulları ve sektördeki önemli özelliklerine ait çıkarımlar yapılarak sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yönetim Sistemi, Standart, Düzce Sanayii, ISO

Application of Management System Standards In Businesses: A Research In Duzce Industrial Companies

ABSTRACT

The main purpose of this research is to reveal the status and importance of having management system standards of businesses operating in Düzce. In the study, in which the qualitative research design was used, the data were obtained by document analysis and interview techniques. The data collected from 57 production enterprises operating in Düzce were divided into categories according to occupational groups. By adding the standards specific to the sectors of the production facilities, they have been defined as ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, IATF 16949, ISO 27001, ISO 50001, ISO 10002, ISO 13485 and ISO 22000. The results were shared by making inferences about the amount of use of these standards and their important features in the sector.

Keywords: Management System, Standard, Düzce

I. GİRİŞ

İşletmelerin kendi çalıştıkları sektörlerdeki rekabetçilik koşulları, dünya çapında giderek daha fazla artmaktadır. Başarılı kalite uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi için başarılı bir yönetim sistemi felsefesine odaklanması gerekmektedir. Yönetim sistemleri kavramı, işletmelerin tedarik zincirindeki tüm aşamalarda sürekli iyileştirme sağlaması anlamına gelmektedir. Yönetim sistemlerinin temel amacı; müşteri memnuniyeti, verimlilik, iş tatmininin arttırmak ve maliyetleri düşürmektir.

Günümüzün küresel dünya koşullarında, ülkeler arasındaki ekonomik, siyasi ve sosyal ilişkiler ile herhangi bir bölgede üretilen ürün/hizmetin başka bir bölgeye pazarlanabilir hale gelmesi rekabeti arttırmaktadır [1]. Bu sebeple işletmelerden paydaşların değişen koşullara ve gelecekte yaşanacak değişikliklere uyum sağlayabilmek için yeni esnek, rekabetçi stratejiler geliştirmeleri beklenmektedir. Bu yeni rekabet stratejisi kapsamında iyileştirmelerin sistematik olarak izlenmesi, elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve yeni pazarlama stratejileri geliştirilmesi sağlanmalıdır. Yönetim sistemi standartları tüm süreçler için stratejik bir araç olarak kabul edilmiştir [2]. Büyük çoğunluğu Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) liderliğinde yayınlanmaktadır. ISO, 1947 yılında kurulmuştur ve merkezi Cenevre, İsviçre'dedir. ISO standartlarından bazıları (ISO 22000, ISO 13485, IATF 16949) çeşitli sektörler için geliştirilmiş olmakla birlikte, tüm sektörlerde geçerli olan ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 standartları da yayınlanmıştır.

Yönetim sistemi standartlarının giderek artan yaygınlığına rağmen, firmaların bu standartları nasıl uyguladığına ilişkin araştırmalar nispeten az kalmaktadır [3], [4], [5], bu da firmaların standartların gerekliliklerini tam olarak yerine getirip getirmediği konusunda bir bilgi boşluğu oluşturmaktadır. Ek olarak, mevcut literatür, çoğunlukla standartların uygulamasını neyin yönlendirdiğine odaklandığından etkili bir şekilde uygulanmasının önemini analiz etmemektedir [6]. Yönetim sistemi standartlarının uygulama sürecinin kalitesi, günlük operasyonlarda ilgili uygulamaları tutarlı bir şekilde kullanarak bu uygulamaların gerekliliklerine tamamen bağlı işletmelerden, standart gerekliliklerine uymayan işletmelere göre değişebilir.

Bu çalışmada Düzce ilindeki işletmelerin kalite yönetim sistemi açısından değerlendirilmesi ele alınmaktadır. Üretim tesislerinin yönetim sistemi standartlarına sahip olma durumlarının ortaya konması ve bu standartlara bakış açısının mevcut durum, fırsat ve tehditler yönünden irdelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde giriş, ikinci bölümde en yaygın kullanılan yönetim sistemi standartları, üçüncü bölümünde, Düzce bölgesindeki üretim tesisleri ile yapılan araştırma detaylarına, dördüncü bölümde bulgulara ve beşinci bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

II. YÖNETİM SİSTEMLERİ

Küresel rekabetin giderek artmasıyla işletmeler varlıklarını devam ettirebilmek için rekabet edebilirliklerini arttırmak zorunda kalmıştır [2]. İşletmeler müşteri özel isteklerini sağlayarak rekabet yarışında önde olabilmek için ISO tarafından oluşturulan yönetim standartlarını daha çok uygulamaktadır [7]. Yönetim sisteminin başarılı olabilmesi, etkin bir süreç kontrolü ve iyileştirmesine bağlıdır [8]. ISO tabanlı bir yönetim sisteminin doğru şekilde uygulanmasının faydaları şöyledir [9]:

- Maliyet tasarrufu: Kuruluşun operasyonlarını optimize etmeye yardımcı olması,
- Gelişmiş müşteri memnuniyeti: Kaliteyi, müşteri memnuniyetini ve satışları arttırmaya yardımcı olması,
- Yeni pazarlara erişim: Ticaret engellerinin aşılmasına ve küresel pazarlara açılmasına yardımcı olması,
- Artan pazar payı: Üretkenliği ve rekabet avantajını arttırması,
- Çevresel faydalar: Çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasına yardımcı olmasıdır.

İşletmeler tarafından yaygın kullanılan yönetim sistemi standartları şunlardır: ISO 9001: 2015 Kalite Yönetim Sistemi, ISO 14001: 2015 Çevre Yönetim Sistemi, ISO 45001: 2018 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi, ISO 27001: 2017 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi, ISO 50001: 2018 Enerji Yönetim Sistemi, ISO 22000: 2018 Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi, IATF 16949: 2016 Otomotiv Kalite Yönetim Sistemi, ISO 31000: 2018 Risk Yönetimi, ISO 13485: 2016 Tıbbi Cihazlar Yönetim Sistemi ve ISO 19011: 2018 Yönetim Sistemleri Denetim Standardıdır. Bu standartların bazıları (ISO 9001, 14001, 45001, 27001, 50001, 22000, ISO 13485 vb.) yıllık yapılan denetlemeler ile belgelendirme sürecine sahip iken bazıları ise (19011, 31000 vb.) belgelendirilmeden uygulanan standartlardır. Başlıca Yönetim standartları genel hatları ile aşağıda açıklanmıştır.

A. ISO 9001: 2015 KALİTE YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi; mal ve hizmet kalitesinin aksine yönetimin performansı ile ilgilenmektedir. ISO tarafından oluşturulan ve dünyada en çok kullanılan ISO 9001 KYS standardı işletmelerin kendilerini başka firmalar ile kıyaslamasını sağlamaktadır. Bazı işletmeler ise kalite ve performans konuları ile ilgili yatırım yaptıklarını göstermek için sertifika edinmektedir [10]. ISO 9001 KYS standardının amacı, işletmenin mal ve hizmet sunma sürecindeki faaliyetler ile ilgili kalite gerekliliklerini sağlayacak bir kalite yönetim sisteminin oluşturularak belgelendirilmesini sağlamaktır [11].

Kalite yönetim sisteminin uygulanması için uluslararası bir model olarak kabul edilen ISO 9001, her tür işletmeye uyarlanabilen bir standarttır. Bir şirkette KYS olgunluk düzeyi analizinde dikkate alınması gereken hususlardan biri de ISO 9001 sertifikasının olup olmadığıdır. Bu anlamda, ISO 9001'i uygulayan bir şirketin KYS'si, bu sertifikaya sahip olmayan bir şirkete göre daha olgun sayılabilir [12]. ISO 9001'in benimsenmesinin, tüm sektörleri, iş türlerini ve şirket boyutlarını kapsayan, pazarda kalıcı ve büyüyen bir olgu olduğu görülmüştür [13]. ISO 9001 gibi bir KYS standardının ortak bir özelliği, bağımsız bir dış kuruluşun (belgelendirme kuruluşu), uygulanabilir gerekliliklere uyup uymadığını ve amaçlanan sonuçlara ulaşıp ulaşılmadığını değerlendirmek için bir kuruluşta KYS'nin uygulanmasını denetleyebilmesidir [14]. Sertifikasyon, kuruluşun kaliteye yönelik tutumunu gösterir ve tüm paydaşlarının, yani tüketicilerin ve iş gücünün olumlu tutumlarını etkileyerek marka imajını geliştirebilir [15].

B. ISO 14001: 2015 ÇEVRE YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi; işletmelerin çevrelerinde yaşadıkları olumsuz durumlar karşısındaki problemleri çözmeyi sağlar. Genel olarak çevre yönetim sistemi için gerekli şartları ve önemli çevre ölçütlerini kapsar [16]. Bazı ülkeler tarafından çevre koruma konusundaki acil ihtiyaçla birlikte, kirliliğin düzenlenmesi için emisyon performans standartları ve azaltma teknolojisi talimatları gibi birçok komut ve kontrol politikası oluşturulmuştur. Bu standart, çevre faktörlerini koruyarak yaşanan iklimsel değişikliklere cevap vermek amacıyla işletmeler tarafından kullanılmaktadır. İşletmelerin çevresel performansını iyileştirmek için gereklilikler ile firma içinde uyulması gereken operasyonel sistemleri tanımlayan kuralları içermektedir [17]. Farklı türdeki kirleticilerin emisyonlarını en aza indirmek için geliştirilen modeller, yöntemler ve araçlardan biri de ISO 14001'e dayalı Çevre Yönetim Sistemi standardıdır. Bu uluslararası standart verimli bir çevre yönetimi sistemi aracılığıyla ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlanmıştır [18]. ISO 14001'in benimsenmesi, farklı endüstriler arasında farklı etkiler gösterebilir ve toplu net etki, örneklenen firmaların endüstri dağılımına bağlı olabilir [19].

C. ISO 45001: 2018 İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ YÖNETİM SİSTEMİ

İş güvenliği politikası; kuruluşun üst yönetimi tarafından belirlenerek birbirini tamamlayan ve sürekli iyileşen aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır [20];

- a) Kuruluş risklerine ve bu risklerin niteliğine uygun olmalıdır,
- b) İş güvenliği yönetimi, yaralanmaları ve kazaları önlemek için sürekli iyileştirmeyi içeren bir taahhüt içermelidir,
- c) Asgari şartlarda yasal çerçeve hükümlerine uygun olmalıdır,
- d) Strateji ve hedefleri gözden geçirmek için bir plan hazırlanmalıdır,
- e) Kuruluş tarafından tüm çalışanların sorumluluklarının bilincinde olması için duyuru yapılmalıdır,
- f) Herkes tarafından erişilebilir olmalı, sürekli gözden geçirilmeli ve sonuçlara göre tedbir alınmalıdır.

İş sağlığı ve güvenliğini kurum kültürü olarak benimseyen ve bu doğrultuda çalışarak bu süreci iyi yöneten kuruluşlar, rekabet koşullarında avantaj sağlayarak iş kazaları ve meslek hastalıkları sebebiyle oluşabilecek maliyetlerini minimize edip karlılıklarını artırmaktadır [21].

Başarılı bir iş güvenliği yönetim sistemi, çalışanların verimliliğini, iş memnuniyetini, moral ve motivasyonu yükselterek kanunlara uyumu kolaylaştırmaktadır. İşgücü devrini ve kayıp iş gününün azalmasını sağlayarak ürün kalitesinin artmasına neden olmakta, hatalı ürün üretimini azaltmaya ve kazalara bağlı olarak çevreye verilen zararı en düşük düzeye indirmeye destek olmaktadır [22].

D. IATF 16949: 2016 OTOMOTİV KALİTE YÖNETİM SİSTEMİ

IATF 16949 Otomotiv Sektörü Kalite Yönetim Sistemi; otomotiv sanayisine yönelik düzenlenerek hataları önleme, maliyeti azaltma gibi durumlarda faydalıdır [23]. Otomotiv sektörünün gereklilikleri tanımlandığında ISO 9001: 2015'den farklılaşmaktadır. Otomotiv sektörüne özel gereklilikler ile kalite yönetim sistemi oluşturmak isteyen otomobil endüstrisindeki işletmeler için referans niteliğindedir [24]. Sektörün özel ihtiyaçlarını karşılamak için başlıca otomotiv üreticileri, ticaret birlikleri ve Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) dahil olmak üzere çeşitli paydaşlar tarafından desteklenmiştir [25].

IATF 16949 sertifikası, otomotiv sektöründe kalite standardının uygulanması üretimde oldukça faydalıdır [26]. Hazırlanan bu tür standartlar, sektöre özgü gerekliliklerin varoluşuna ışık tutmaktadır [27]. Üretimdeki bu fayda, otomotiv firmalarının sertifikaya alabilmeleri için benimsedikleri organizasyonla ilgilidir. Bu organizasyon, gerekli eylemlerin belirlenmesini, bu eylemlerin yürütülmesi için kaynakların tahsis edilmesini ve uygulanan eylemlerin iyileştirilmesi için yeniden denetimin yapılmasını içerir [28]. IATF 16949'un otomotiv iyileştirmelerini teşvik etmedeki başarısı, kalite gereksinimlerini karşılayan üretim süreçleri ve hizmetleri belirleme yeteneği ile ilgilidir. Bunun olabilmesi için ürün ve hizmetlere ilişkin müşteri verilerinin elde edilmesi, periyodik olarak iç denetimlerin yapılması ve elde edilen tüm bilgilerin dikkatle analiz edilerek kalite iyileştirme yatırımının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir [29]. Zaletova vd. IATF 16949'un daha fazla kontrol sağladığını ve üretim süreci üzerinde teknolojik değişiklikleri teşvik ettiğini ve bunun da şirkette iyileştirmelere yol açtığını gözlemlemiştir [30].

E. ISO 27001: 2017 BİLGİ GÜVENLİĞİ YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi (BGYS); ticari sürekliliğin sağlanmasında ve ticari fırsatların değerlendirilmesinde ortaya çıkabilecek tehditlere karşı işletme bilgilerinin korunmasının sağlar [31]. Bu standart, günümüzde en yaygın olarak kabul gören bilgi güvenliği standartlarından biridir ve bu nedenle sanallaştırılmış sistemlerin farklı bilgi güvenlik önlemlerinin uygulanması ve değerlendirilmesi için bir kılavuz olarak hizmet etmektedir [32]. BGYS; bilgi varlıklarının gizlilik, bütünlük ve erişilebilirlik gerekliliklerini gerçekleştirmek üzere sistemli, kurallı, planlı, yönetilebilir, sürdürülebilir, dokümente edilerek yönetim tarafından desteklenen uluslararası güvenlik standartlarının dikkate alındığı faaliyetler bütünüdür [33].

BGYS için politikaların oluşturulması, bir risk yönetimi yaklaşımına dayanmaktadır. Politikaların tanımı, meydana gelebilecek bilgi güvenliği risklerini belirlemek için iş ortamının anlaşılması, kaynakların ve süreçlerin değerlendirilmesi ile başlar. Riskleri belirledikten sonra firma, risklerin her birini değerlendirir ve potansiyel etkiyi belirleyerek risklerin yönetilmesinde stratejiler geliştirir. Yukarıdaki adımlar, yönetimin yanı sıra operasyonları yürüten çalışanların kapsamlı katılımını gerektirir. Çevre ve iş süreçleri organizasyondan organizasyona farklılık gösterdiğinden, belirlenen risk ve geliştirilen strateji de farklılık gösterecektir. Yani, ISO 27001 standardı, bir BGYS uygulamasına ilişkin gereksinimleri ve spesifikasyonu sağlar, ancak BGYS, her ISO 27001'i benimseyen işletme için özel olarak tasarlanmıştır. Genel olarak, mevcut ISO 27001 çalışmalarının çoğu, uygulama sırasında karar verme, uygulamanın amacı ve hedefi ve BGYS uygulamasının etkinliğinin değerlendirilmesi dahil olmak üzere uygulama sürecine odaklanır. Benimseme sonrası finansal performansı inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır [34].

F. ISO 50001: 2018 ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 50001 Enerji Yönetim Sistemi; ürünün kalitesi ve verimliliğinin yanında enerjinin daha verimli kullanılması amacıyla oluşturulmuş bir sistemdir. ISO 50001 standardı esas olarak, yasal koşullar ve şirketin karşılaması gereken diğer gereksinimleri dikkate alarak, şirketin enerji verimliliğini sürekli iyileştirmek için sistematik olarak çaba göstermesini sağlayacak bir enerji yönetim sistemi gereksinimlerinin belirlenmesine odaklanmaktadır [35]. Enerji yönetim sistemi, özellikle enerji yoğun endüstride veya sera gazı emisyonlarına ilişkin gereklilikleri ve düzenlemeleri karşılamanın gerekli olduğu durumlarda önemlidir. Dolayısıyla işletmelerin ve tedarik zincirlerinin yönetiminde sürdürülebilir kalkınma kavramının önemini artırdığı günümüzde, ISO 50001 standardı gerekliliklerinin uygulanması sistematik olarak artacak gibi görünmektedir [36].

ISO 50001 standardının gerekliliklerinin nispeten az sayıda uygulanması, bir işletmenin gerekliliklerini uygulamaya karar vererek elde edebileceği faydaları göz önünde bulundurarak merak uyandırabilmektedir. Konuyla ilgili literatürde yazarlar, ISO 50001 standardının enerji tüketiminin azaltılması, şirketin işletme maliyetlerinin azaltılması, kuruluşun doğal çevre üzerindeki olumsuz etkisinin yanı sıra pazarlama ve imajın iyileştirilmesi gibi özelliklerinin olumlu yönde etkilediğini belirtmektedir [37], [38], [39]. Ayrıca, Zsebik ve Novák, ISO 50001 temel çizgisine uygun olarak enerji yönetimine sistematik yaklaşımın, bir şirketin işini sürekli iyileştirme ile verimli çalışmayı hedefleyecek şekilde yürütmesi için bir fırsat sağladığını belirtmektedir [35]. Bu durum daha iyi sürdürülebilir iş geliştirme performansına yol açmaktadır. Kanneganti vd., enerji yönetiminin üretim maliyetini düşürmeye ve karbon ayak izini azaltmaya yönelik yapılandırılmış bir yaklaşım olarak sanayi sektörü için çok önemli hale geldiğini iddia etmektedir [40]. Kullanılmayan enerjinin, enerji verimliliğini artırmak için olumsuz çevresel etkileri olmayan en temiz yöntem ve aynı zamanda enerji maliyetlerini düşürmenin en uygun maliyetli yolu olduğunu belirtmekte fayda vardır [41], [42]. Enerji tüketiminin rasyonelizasyonunu etkileyen yatırımlar, hem bireysel organizasyon düzeyinde maliyetlerin

düşürülmesini garanti ederek hem de şirketin imajını iyileştirmeyi hedefleyerek olumlu etkilere neden olmaktadır [43].

G. ISO 22000: 2018 GIDA GÜVENLİĞİ YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 22000 Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi; bu sistem gerekli gıda yönetim sistemlerinin güvenli şekilde sağlanması açısından önemlidir. Amacı, ürünlerin oluşumunda meydana gelebilecek tehlikelere karşı önlem almak ve sıfır hatalı ürünler ortaya koymaktır [44].

ISO 22000 standardı bir gıda güvenliği yönetim sistemi için temel gereksinimleri belirterek gıda süreçlerini analiz etmek, olası tehlikeleri belirlemek, kritik kontrol noktalarını ve riskleri tanımlamak için sistematik bir metodoloji sağlamaktadır [45], [46]. Bu yaklaşım, gıda zehirlenmesi riskini en aza indirmeye ve gıdaları tüketim için güvenli tutmaya yardımcı olur. Uygun kontrol önlemleri ile iyi tasarlanmış bir gıda güvenliği yönetim sistemi, gıda şirketlerinin hükümet düzenlemelerine uymasına ve satışa hazırlanan gıdaların hijyenik ve tüketiciler için güvenli olmasına yardımcı olmaktadır. ISO 22000'e uygun bir gıda güvenliği yönetim sistemi, şirketin belgelenmiş bir sisteme sahip olduğu anlamına gelerek aşağıdakileri uygulamaktadır [47]:

- Temiz bir sıhhi ortam sağlamak için yürürlükte olan etkili programları, kontaminasyonun ortaya çıkma olasılığını kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır [48]. Örneğin; binanın inşaatı ve yerleşimi, çalışma alanlarının yerleşimi, kamu hizmetleri - hava, su, enerji, atık bertarafı, ekipman uygunluğu, temizlik ve bakım, satın alınan malzemenin yönetimi, çapraz kontaminasyonun önlenmesi için yapılması gerekenler, temizlik, haşere kontrolü, personel hijyeni ve çalışan tesisleri, yeniden işleme, ürün geri çağırma prosedürleri ve depolamadır.
- Gıda güvenliği tehlikelerini belirlemek, önlemek ve ortadan kaldırmak için geliştirilmiş bir Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Planı (HACCP) sağlamaktır. Buna biyolojik, kimyasal veya fiziksel tehlikelerin dahil edilmesi de dahildir.
- Kuruluş genelinde gıda güvenliğini yönetmek için belgelenmiş gıda güvenliği yönetim sistemi süreçleri oluşturulmasıdır.

ISO 22000 sertifikası almak, bir şirketin müşterilerine, tüketim için güvenli gıdayı garanti eden etkin bir gıda güvenliği yönetim sistemine sahip olduğunu [49] göstermesine olanak tanımaktadır. Müşterilerin güvenli gıda talep etmesi ve gıda işleyicilerinin tedarikçilerinden elde edilen malzemelerin güvenli olmasını talep etmesi nedeniyle bu durum giderek daha önemli hale gelmektedir [50].

H. ISO 31000: 2018 RİSK YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 31000: 2018 Risk Yönetimi, işletmenin tüm süreçlerinde risklerin tanımlanması ve takip edilmesini içerir. İşletmeler, riskleri belirlemek için kaynaklarını, etki alanlarını, olayları ve nedenleri ve muhtemel sonuçlarını belirlemektedir [51]. Belirlenen risklerin analizi sürecinde işletme ilgili risklerle başa çıkmak için en doğru uygun yöntemleri tanımlamaktadır [9]. Risk yönetimi, Risk yönetimi organizasyonun konsept ve planlama faaliyetlerinin bir parçası haline getirmektedir. Risk yönetimi planlama aşamasında daha rahat kontrol edilip yönlendirilebilmektedir. Risk yönetimini en erken zamanda planlamanın parçası haline getirmek, karar verici merciye risk yönetim prensiplerini uygulamak için doğru şartları sağlar [52].

ISO 31000, kapsamı ne olursa olsun risk yönetimi için genel ilkeleri belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu nedenle niteliği ve sonucu fark etmeksizin, her türlü risk için geçerlidir. Standart, bir risk yönetimi sözlüğü, bir dizi performans kriteri, risk tanımlama, analiz, değerlendirme ve iyileştirme için kapsamlı bir süreç ve risk yönetimi sürecinin bir kuruluşa nasıl entegre edilmesi gerektiğine dair rehberlik sağlar [53]. Risk değerlendirmesi, önceden tanımlanmış mevcut riskleri belirleme, tanımlanan riskleri tipik olarak ciddiyetine göre analiz etme ve iyileştirmek için analiz yapılarak tanımlanan risklerin karşılaştırıldığı değerlendirme alt sürecidir. Paydaşlar, risk değerlendirmesinde, risk değerlendirme çıktısını kullanarak, tanımlanan riskleri azaltan bir dizi

kontrolden oluşan bir risk işleme planı tanımlar. Bahsedilen faaliyetler boyunca, doğru tanımlamalar ve tahminler sağlamak için tüm ilgili paydaşlara danışılması ve bilgilendirilmesi esastır. Ayrıca, her bir faaliyette tanımlanan risk bilgilerinin güncellenmesi için sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir [54].

I. ISO 13485: 2016 TIBBİ CİHAZLAR YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 13485: 2016 Tıbbi Cihazlar Yönetim Sistemi, ISO 9001'den daha kapsamlıdır ve tıbbi cihazlara ve sistemlere özel kalite sistem şartlarını kapsar. Temel olarak ISO 9001 standardıyla benzer olmakla birlikte, medikal ürünlere özgü ve diğer bazı dokümanların ve kayıtların hazırlanmasını ve tutulmasına özgü gereklilikleri tanımlamaktadır. ISO 13485 standardının rolü, bir kuruluş tarafından tıbbi cihazların tasarımı, geliştirilmesi, üretimi, kurulumu ve bakımı ile tasarım için kullanılabilir bir KYS için genel gereksinimleri belirlemektir [55].

Her ISO belgelendirmesinde olduğu gibi, ISO 13485 belgesi almak isteyen kuruluşların önce bu standardın gereklilikleri konusunda kendilerini eğitmeleri ve ardından bu gereklilikler doğrultusunda özelleştirilmiş bir yönetim sistemi uygulaması gerekmektedir. Bu yönetim sistemi için referans doküman, kuruluşun bu standardın gerekliliklerine uygun olarak tasarım ve üretim süreci ile ilgili hedeflerini, süreçlerini, prosedürlerini ve formlarını belirttiği Kalite El Kitabı olmalıdır. Bu, kuruluşun ekibi tarafından dahili olarak veya ISO 13485'te uzmanlığa sahip işe alınan bir danışman aracılığıyla geliştirilebilir. Tüm süreçler ve prosedürler oluşturulup kalite el kitabında referans verildikten sonra, gereksinimlerin uygulanması karşılanmışsa, kuruluş dış denetim ve fiili sertifikasyon için bir sertifikasyon kuruluşu arayabilir [56].

J. ISO 19011: 2016 YÖNETİM SİSTEMLERİ DENETİMİ

Her kuruluş, süreçlerinde ortaya çıkabilecek olası sorunları ve riskleri belirlemek ve böylece kuruluşun olumlu sonuçlar almasına katkıda bulunmak için denetim süreçlerini değerlendirmektedir. Son yıllarda, kuruluşun iş prosedürlerini ve ihtiyaçlarını iyileştirmesine, varlıkları koruma altına almasına ve korumasına, operasyonlarda verimliliği, üretkenliği ve gözetimi doğrulamasına olanak tanıyan kontrollerin uygulanması artırılmıştır. Denetim süreçlerini yürütmek için, bir kuruluş içinde denetimlerin hazırlanmasında ve yürütülmesinde destek görevi gören değerlendirilen ve doğrulanan farklı standartlar bulunmaktadır [57].

ISO 19011 Yönetim Sistemleri Denetim Standardı, hem iç hem de dış denetimlere adanmıştır. Her boyutta ve türde endüstri için rehberlik sağlayarak, ISO 9001 dahil olmak üzere herhangi bir yönetim sistemini denetlemek için kullanılabilir. ISO 19011, profesyonel denetçiler için resmi bir model sağlayarak denetim programının yönetimi gibi süreçlere odaklanmaktadır [58]. Bir iç denetçi için gerekli yetkinlikleri tanımlayarak farklı yönetim sistemleri, disiplinler, kişisel bilgi ve beceriler için gerekli bilgi ve genel yetenekleri listelemektedir [59]. ISO 19011, işletmenin kalite politikasının etkin bir şekilde uygulanmasını izlemek ve doğrulamak için bir yönetim aracı olarak denetlemesinin önemini vurgulamaktadır. İç denetim, sade ve basit bir şey değildir. Yüksek standartları olan, hızla değişen bir meslektir. İç denetim, gerçekleştirildiği kuruma ve kültüre özgüdür ve o kurumun kültürünün, politikalarının ve prosedürlerinin derinlemesine anlaşılması açısından önemlidir [60]. ISO 19011: 2018 standardı diğer standartlar gibi belgelendirilmemektedir. İşletmeler sadece bu standartta tanımlı gerekliliklere göre denetimleri ve denetçi koşullarını belirlemektedir. Çalışma kapsamında belgelendirilmeyen standartlar ile ilgili veri toplama ve değerlendirme süreci yapılmamıştır.

K. ISO 10002: 2018 MÜŞTERİ MEMNUNİYETİ YÖNETİM SİSTEMİ

ISO 10002 Müşteri Memnuniyeti Yönetim Sistemi Standardı, müşterilerin geribildirimini ile memnuniyetsizliğe neden olan sorunların belirlenmesini amaçlayan bir standarttır. İşletmelerden kaynaklanan hatalar tamamen ortadan kaldırılamadığı için müşteri memnuniyetsizliği de tamamen ortadan kaldırılamaz. Ancak şikayetlerin alınması bir organizasyonda müşterinin güvenini geri kazanması ve örgütsel iyileştirmelere yardımcı olması için önemli bir avantaj oluşturur. Bu standart ile

işletmelerde müşteri şikayet yönetim sisteminin kurulması ile memnuniyetin sağlanması amaçlanmaktadır [61]. Ayrıca bu standart bütün sektörlerle, yaptıkları işlere, büyüklüklerine, mal ve hizmetlerine bakılmaksızın uygulanabilir. Özellikle şikayetlerin kuruluşlar tarafından ele alınma yönlerini açıklayan bir yaklaşımdır [62].

Standart, kuruluşun müşteri memnuniyeti ve şikayetlerle ilgili süreçler için politika, sorumluluklar ve yetki oluşturmasına yardımcı olan dokuz yol gösterici ilkeye göre yapılandırılmıştır. Ayrıca, müşterilerin şikayetleri olduğunda kuruluşla iletişime geçebilmeleri için organizasyonun mekanizmaları yapılandırmasına yardımcı olmaktadır. Sistemin nasıl planlanacağı ve tasarlanacağı, çalışanların şikayetleri nasıl etkili bir şekilde ele alabilecekleri hakkında bilgi sağlar. Şikayet geri bildirim sistemini analiz ederek müşteri memnuniyet düzeylerini belirlemek, denetlemek, bir yönetim incelemesi gerçekleştirilerek iyileştirmeyi hedeflemektedir [61], [63].

Açıklanan yönetim sistemi standartları ile ilgili literatürde yapılan önemli çalışmalar aşağıdaki Tablo. 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürdeki Çalışmalar

Yazarlar	Yönetim Sistemi	Bulgular
[2]	ISO 9001	Dünyadaki en popüler ve etkili kalite yönetim sistemi ISO 9001'in uygulama sürecini literatür taraması ile gözden geçirerek stratejik gereklilikler belirlenmiştir.
[9]	ISO 9001	Vaka analizi yapılarak ISO 9001'i temel alan bir toplam kalite yönetimi modeli oluşturulmuştur.
[10]	ISO 9001	Yapılan nicel analiz sonucuna göre ISO 9001 sertifikasyonun ticareti teşvik ettiği tespit edilmiştir. Ek olarak gelişmekte olan ülkelerdeki akreditasyon kurumlarının desteklenmesinin önemi vurgulanmıştır.
[12]	ISO 9001	ISO 9001 uygulaması ile kurumsal performansın operasyonel ve pazar performansları boyutunda pozitif ilişkisi bulunduğu literatür taraması yapılarak tespit edilmiştir.
[69]	ISO 9001	Çeşitli sektör, ülke ve büyüklüklerdeki kuruluşlar için revize edilmiş kalite yönetim sistemleri ISO 9001:2015 standardının geçişinde/sertifikasyonunda engelleri, faydaları, önde gelen uygulamaları ve öğrenilen dersleri nicel analiz ile belirlenmiştir.
[70]	ISO 14001	Çevre Yönetim Standartlarının kullanımı ile Sürdürülebilirlik yaklaşımını, uygulayan ve belgelendiren kuruluşların elde ettiği sonuçları ve ISO 14001:2015 revizyonunun mevcut sürecine literatür taraması yaparak odaklanmıştır.
[71]	ISO 14001	Standartın uygulanmasındaki "yararlılığı" ve "zorlukları" temsil eden unsurları derinleştirmek için katlanılan maliyetler, çevresel ekonomik faydalar ve bunları başarmak için gereken süre nicel analiz ile değerlendirilmiştir.
[72]	ISO 45001	Aksiyomatik Tasarım ilkelerine göre yeni bir iş güvenliği yönetim sistemi tasarlanmıştır.
[20]	ISO 45001	Yönetim kavramı, iş güvenliği, iş sağlığı ve iş güvenliği yönetim sistemi hakkında literatür taranmıştır.
[73]	IATF 16949	Dünyada IATF 16949 belgelendirmesine yardımcı olan faktörlere ilişkin yeni kavramlar, yönergeler ve uygulamalar önerisiyle akademi ve endüstri için çeşitli çıkarımlar nicel analiz yöntemiyle yapılmıştır.
[74]	IATF 16949	Yeni revizyon olan IATF 16949: 2016 gerekliliklerinin mevcut uygulamalarla arasındaki ilişki, iç kalite denetim puanı yoluyla boşluk analizi yapılarak vaka analizi ile ölçülmüştür.
[27]	IATF 16949	Vaka analizi ile otomotiv yan sanayi işletmesinde Kalite Yönetim Sistemi standardının ISO/TS 16949: 2009'dan IATF 16949: 2016'a geçiş sırasında eklenen gereklilikler, işletmedeki uygulamaları ve işletmenin performansına etkisi incelenmiştir.
[34]	ISO 27001	Yapılan nicel analiz ile ISO 27001 belgelendirmesinin belgelendirilen firmaya varlık getirisi ve borsa performansı açısından fayda sağlamadığı görülmüştür. Bunun nedeni ise ISO 27001'in iyi bir bilgi güvenliği yönetiminin rekabet avantajından ziyade zorunluluk olarak görülmesine bağlanmıştır.

Tablo 1 (devamı). Literatürdeki Çalışmalar

[33]	ISO 27001	Kamu kurumlarında uygulanan ISO 27001'in etkinlik seviyeleri, sahiplenilmesi ve teknik yeterlilikleri nicel analiz yöntemi ile incelenmiştir.
[35]	ISO 50001	Vaka analizi yöntemiyle enerji tüketimine, üretim planlarına ve izlenen sistemlerin değerlendirilmesine dayalı olarak kısa ve uzun vadeli enerji planlamasına yönelik araçları ve örnekleri tanıtmaktadır. Aynı zamanda incelenen endüstriyel tesislerde uygulama sonuçlarını ve mali faydalarını da göstermektedir.
[36]	ISO 50001	İşletmelerin pratik olarak sürdürülebilir bir enerji yönetim sistemi tasarlamak için atması gereken temel adımlar vaka analizi ile incelenmiştir.
[38]	ISO 50001	Yapılan nicel analiz ile Avrupa'nın en fazla ISO 50001 sertifikasına sahip olduğu, Asya'nın ise en hızlı büyüyen bölge olduğu görülmüştür. En fazla yayıldığı ülkeler arasında Almanya, İngiltere ve Çin yer almaktadır.
[40]	ISO 50001	ISO 50001'in ihtiyaçlarına göre uyarlanmış bir enerji değerlendirme metodolojisi ve raporlama formatı yapılan vaka analizi ile geliştirilmiştir.
[47]	ISO 22000	Nicel analiz ISO 22000 sertifikasyonunun üç önemli faydasını ortaya koymaktadır: gıda güvenliğinin iyileştirilmesi ve daha güvenli ürünlerin sağlanması, hastalıkların ve gıdadan kaynaklanan diğer risklerin azaltılması ve tüketicilerin güveninin artması.
[48]	ISO 22000	Bir üretim tesisinde yapılan vaka çalışmasında tehlike analizlerine ISO 22000'nin dahil edilmesi, sistemi basit, daha yönetilebilir ve etkili hale getirmiştir.
[54]	ISO 31000	ISO 31000'i temel alan risk yönetimi süreci için bir olgunluk modeli vaka analizi ile sunulmuştur. Bu modelin amacı, kuruluşların mevcut risk yönetimi olgunluk seviyesine ulaşabilmeleri için kullanabilecekleri bir değerlendirme aracı sağlamaktır.
[55]	ISO 13485	Güney Kore'deki tıbbi cihazla ilgili işletmelerin ISO 13485 sertifikasını almaya yönelik iç ve dış motivasyonlar, sertifikasyon sınavına karşı önlemler, sertifikanın aktif alım/yürütme seviyesi ve operasyonel ve finansal performansı arasındaki ilişkiyi nicel analiz yöntemi ile araştırmıştır.
[56]	ISO 13485	Tıbbi cihaz geliştirme alanında start-up'lar için bir kalite yönetim sistemi oluşturmak amacıyla vaka analizi ile genel bir bakış açısı sunulmuştur.
[57]	ISO 19011	Bir işletmenin kalite yönetim sistemini iyileştirmek için ISO 19011 standardı gerekliliklerine göre denetim vaka analizi ile yapılmıştır.
[59]	ISO 19011	ISO 19011 standardının yeni versiyonunda en önemli değişiklik olan iç denetimde gizlilik ilkesinin uygulanması, iç denetçilerin bağımsızlığı ve Denetim faaliyeti ile karşılaştırıldığında risk kavramı literatür taraması ile incelenmiştir.
[61]	ISO 10002	Müşteri memnuniyeti şikayet sistemi ve ISO 9001 kalite yönetim sistemi standartları bağlamında analizi, şikayetleri ele alma içeriği ve standardın kamu elektrik hizmetlerinde uygulanabilirliği vaka analizi ile incelenmiştir.
[75]	ISO 10002	ISO 10002 Müşteri Memnuniyeti Kalite Yönetimi Standardı kuramsal olarak ele alınmış ve müşteriler açısından önemine nicel analiz ile vurgu yapılmıştır.

Tablo 1'de tanımlanan çalışmalar, son yıllarda bu standartlarla ilgili önemli uygulamalardır. Hızla değişen dünya koşullarında söz konusu standartların da değişimi ve gelişimi devam etmektedir. İşletmelerin performanslarının iyileşmesi için yaptıkları çalışmaların standartlar ile ilişkisi daha popüler olmaya başlamıştır. ISO 9001 gibi dünyada en yaygın kullanılan standartlar hakkında yapılan çalışmalar daha yoğunken ISO 10002 gibi son yıllarda daha popüler olan standartlar ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar daha azdır.

III. ARAŞTIRMANIN METODOLOJİSİ

Araştırmada nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Derinlemesine veri elde edilebilmesi ve sektöre özgü gerekliliklerin daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla nitel veri analizi kullanılması tercih edilmiştir.

Veriler görüşme ve doküman inceleme yöntemleri ile toplanmıştır. Doküman inceleme “araştırmacının müdahalesi olmadan kaydedilen metin (kelimeler) ve görüntülerden oluşur” [64].

Araştırma verileri, ilgili firmaların fabrika müdürü seviyesindeki yetkililerinden temin edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar, araştırma kapsamında tanımlanan gerekliliklerin açıklanması amacıyla incelenmiştir. Araştırmacının, teorik bilgi düzeyini zenginleştirerek gerek gördüğünde konunun uzmanları ile görüşüp onların deneyimlerinden yararlanması amacıyla [65] görüşme yönetimi de çalışmaya dahil edilmiştir. Görüşme yöntemlerinden olan yarı yapılandırılmış görüşme tekniği daha esnek yapısı ve diyaloglara imkan vermesi sebebiyle kullanılmıştır. Yöneticilerle yapılan görüşmelere ilişkin bilgiler Tablo 2’ye kaydedilmiştir. Bu çalışma sırasında Düzce ilinde Ticaret ve Sanayi Odasına kayıtlı kapasite raporu hazırlayan üretim tesislerinin yönetim sistemi standartlarına bakış açısının araştırılması amaçlanmıştır. Yöneticilerden sadece ilgili standartların firmalarda kullanılıp kullanılmadığına dair bilgi alınmıştır. Kapasite raporu hazırlayan firmalardan sadece üçüncü taraf kuruluşlar tarafından belgelendirilebilen yönetim sistemi standartlarının hangilerine sahip olduklarına dair bilgiler Tablo 3’e tanımlanmıştır. Bu kapsamda sektörel olarak üretim tesislerinin mevcut belgelendirme durumları hakkında veriler teyit edilmiş ve toplanmıştır. Araştırma Etik Kurul İzni gerektiren çalışma grubunda yer almamaktadır.

Tablo 2. Yöneticilerle Yapılan Görüşme Bilgileri

	Katılımcı	Çalışma Alanı	Görüşme Süresi	Tarih
1.				

Tablo 3. Kapasite Raporu Hazırlayan Firmalardan Toplanan Veriler

Sıra	Meslek Grubu	Firma	Çalışan Sayısı	9001	14001	45001	16949	27001	50001	10002	13485	22000	Hiçbiri
1.													

Araştırma evrenini, Düzce ilinde bulunan, kapasite raporu hazırlayan aktif durumdaki ve çalışan sayısı 100 ve üzeri olan üretim işletmeleri oluşturmaktadır. Veriler Mayıs 2022 ve Temmuz 2022 ayları arasında ilgili işletmelerin internet sitelerinden alınmıştır. İnternet sitelerinde verisi bulunmayan işletmeler için Düzce Sanayi ve Ticaret Odası aracılığı ile mail yoluyla talep edilmiştir. Veriler, talep edilen bilgilere dönüş yapan işletmelerden toplanmıştır.

IV. BULGULAR

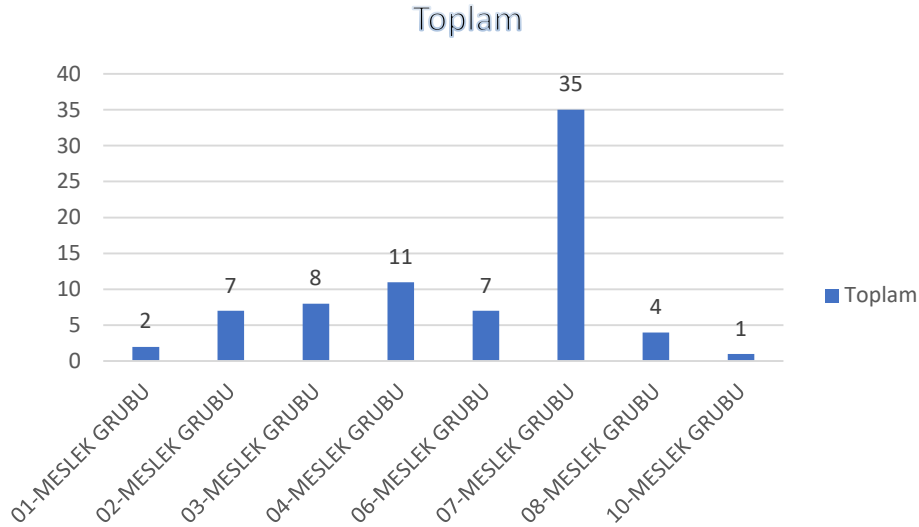
Çalışma kapsamında çalışan sayısı 100 ve üzeri olan 75 işletme bulunmaktadır. Bu işletmelerin 57 tanesinden yönetim sistemi standartlarına sahip olup olmadıklarına dair bilgiler toplanmıştır. Hedeflenen işletmelerin %76’sına erişim sağlanmıştır. Ulaşılamayan işletmelere mail gönderilerek veya telefon ile randevu talep edilerek veri toplanması hedeflenmiştir. Ancak geri dönüş sağlanamamıştır. Bu sebeple verilerin toplanabildiği işletmeler, Düzce Ticaret ve Sanayi Odası tarafından resmi internet sitesinden yayınlanarak kategorize edilen 11 meslek grubuna bölünmüştür. Meslek grupları ve açıklamaları aşağıdaki Tablo 4’de yer almaktadır.

Tablo 4. Düzce İli İşletmelerinin Meslek Grupları

MESLEK GRUBU	AÇIKLAMA
01-Meslek Grubu	Gazete, Basın-Yayın, Sağlık, Eğitim, Güvenlik
02-Meslek Grubu	İnşaat, Savunma Sanayi
03-Meslek Grubu	Mobilya
04-Meslek Grubu	Gıda Dışı İmalat Sanayi, Makine, Metal, Kauçuk
05-Meslek Grubu	Gıda Dışı Perakende, Toptan Satışlar, Kuyumcular, Fotoğrafçılar
06-Meslek Grubu	Oto Yedek Parça İmalat, Satış, Bakım, Akaryakıt
07-Meslek Grubu	Tekstil
08-Meslek Grubu	Gıda İmalatı
09-Meslek Grubu	Bankalar, Sigorta Acenteleri, Döviz Büroları, Esnaf Kefalet Kooperatifleri
10-Meslek Grubu	Otel, Restoran, Kafe, Yemek Siteleri
11-Meslek Grubu	Yük, Yolcu Taşımacılığı ve Lojistik

Kaynak: Düzce Ticaret ve Sanayi Odası Resmi İnternet Sayfası: <https://www.duzcetso.org.tr/meslek-komiteleri>

75 işletmenin meslek gruplarına göre dağılımı Şekil 1’de gösterilmiştir. Buna göre en çok işletme 07. Meslek Grubu olan tekstil sektöründedir. En az olan da 10. Meslek Grubundaki ‘Otel, Restoran, Kafe ve Yemek Siteleri sektörüdür. Üretim sektöründe yer almadıkları için çalışma kapsamına dahil olmayan 05, 09 ve 11 nolu meslek gruplarına ilişkin bilgiler ilgili şekilde bulunmamaktadır.

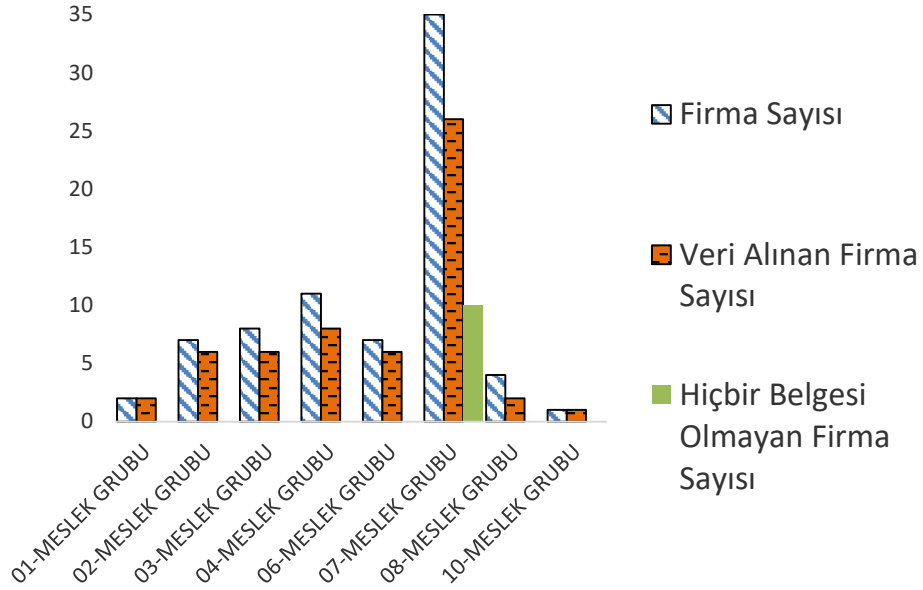


Şekil 1. Meslek Gruplarına Göre İşletmelerin Dağılımı

Meslek gruplarına göre ayrılan şekiller her bir standart için ayrı ayrı değerlendirilerek oluşturulmuştur. Şekil 2’de ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi standardına sahip işletmeler sınıflandırılmıştır. Diğer standartlara göre en yaygın sahip olunan standart dünya ortalamalarında olduğu gibi ISO 9001’dir. 01 ve 10. Meslek gruplarındaki firmaların hepsinden veriler alınmış ve ISO 9001: 2015’e sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, 02 nolu meslek grubundaki 7 işletmenin altısından veriler toplanmış ve tamamında

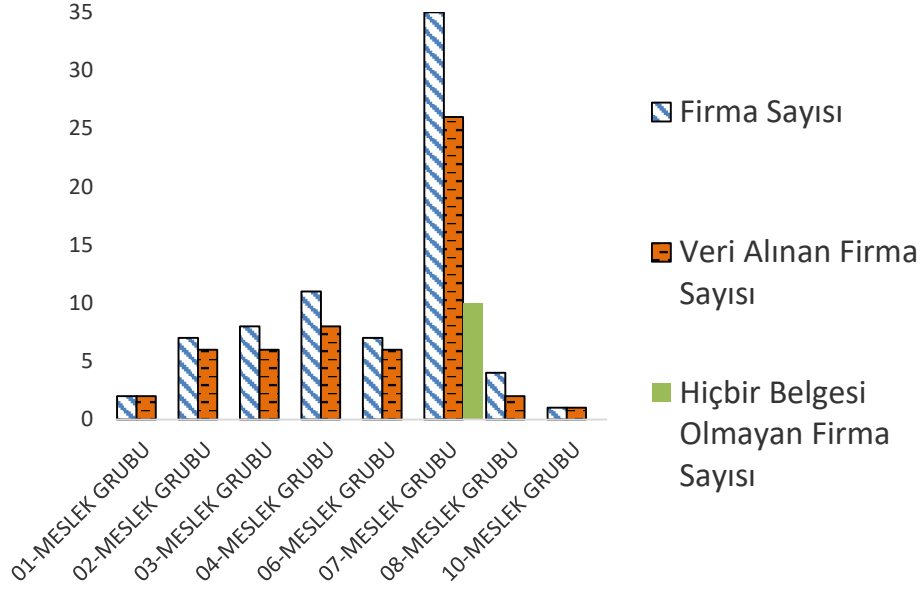
bu belgenin bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde veri toplanan 03, 04 ve 08 nolu meslek gruplarında da ISO 9001: 2015 belgesi bulunmaktadır. Toplamda veri toplanan 57 işletmenin 43 tanesi ISO 9001: 2015'e sahiptir.

Meslek gruplarına göre ayrılan şekiller her bir standart için ayrı ayrı değerlendirilerek oluşturulmuştur. Şekil 2'de ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi standardına sahip işletmeler sınıflandırılmıştır. Diğer standartlara göre en yaygın sahip olunan standart dünya ortalamalarında olduğu gibi ISO 9001'dir. 01 ve 10. Meslek gruplarındaki firmaların tamamından veriler alınmış ve ISO 9001: 2015'e sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, 02 nolu meslek grubundaki 7 işletmenin altısından veriler toplanmış ve tamamında bu belgenin bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde veri toplanan 03, 04 ve 08 nolu meslek gruplarında da ISO 9001: 2015 belgesi bulunmaktadır. Toplamda veri toplanan 57 işletmenin 43 tanesi ISO 9001: 2015'e sahiptir.



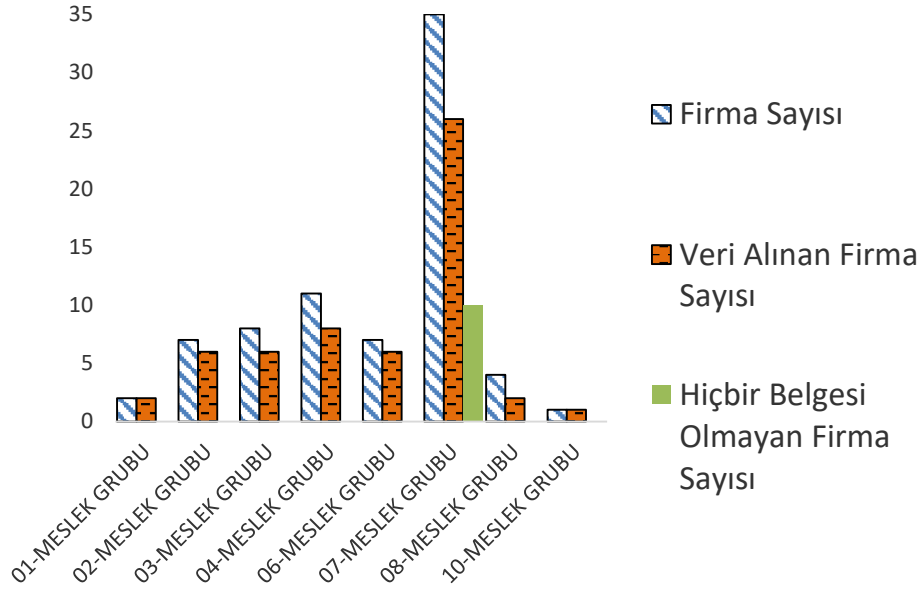
Şekil 2. ISO 9001 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

ISO 9001: 2015 Kalite Yönetim Sistemi standardından sonra en yaygın kullanılan ISO 14001: 2015 Çevre Yönetim Sistemi standardıdır. Veri toplanan 57 üretim tesisinin 33 tanesi bu belgeye sahiptir. 07 nolu meslek grubundaki 35 firmadan 26 tanesinden veri toplanmış ve bunların 11 tanesinin ISO 14001: 2015'e sahip olduğu görülmüştür. 01 ve 03 nolu gruplardaki 2 firmada bu belge bulunurken 08 ve 10 nolu gruplardaki birer firmada 14001 belgesi yer almaktadır. 02 ve 06. Grupların 5 tanesinde çevre belgesinin gereklilikleri yerine getirilmektedir. ISO 14001: 2015 Çevre Yönetim Sistemi standardına ait tüm bilgiler Şekil 3'de yer almaktadır.



Şekil 3. ISO 14001 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

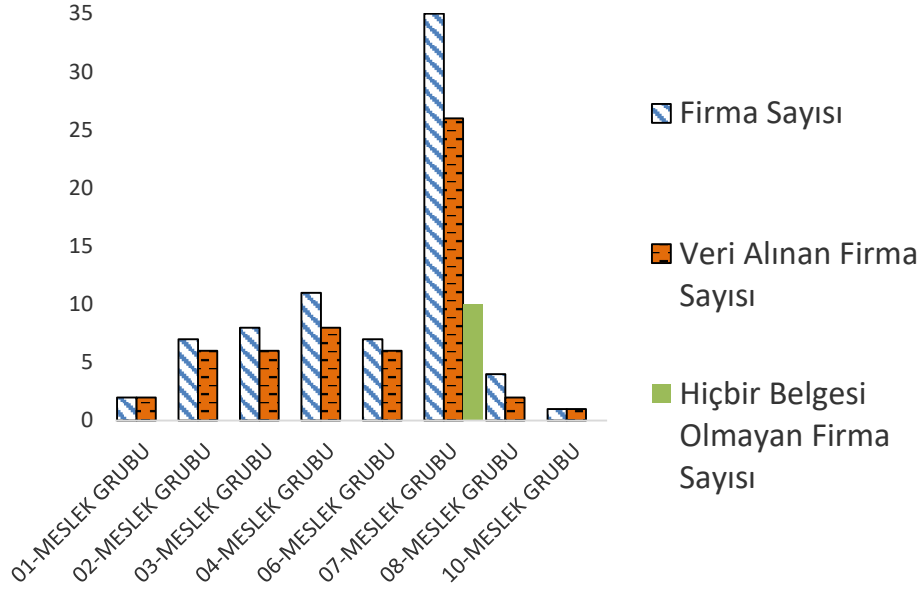
Üçüncü en yaygın standart ISO 45001: 2018 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi standardıdır. Çalışma kapsamında değerlendirilen 57 işletmenin 28 tanesi ISO 45001: 2018'in gerekliliklerini yerine getirerek belgelendirilmiştir. Şekil 4'deki gibi tekstil sektörü olan 07. Meslek Grubunda 9 işletme, Gıda Dışı İmalat Sanayi, Makine, Metal, Kauçuk sektörünün yer aldığı 04. Meslek Grubundaki 5 işletme belgenin en yaygın kullanıldığı sektörlerdir.



Şekil 4. ISO 45001 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

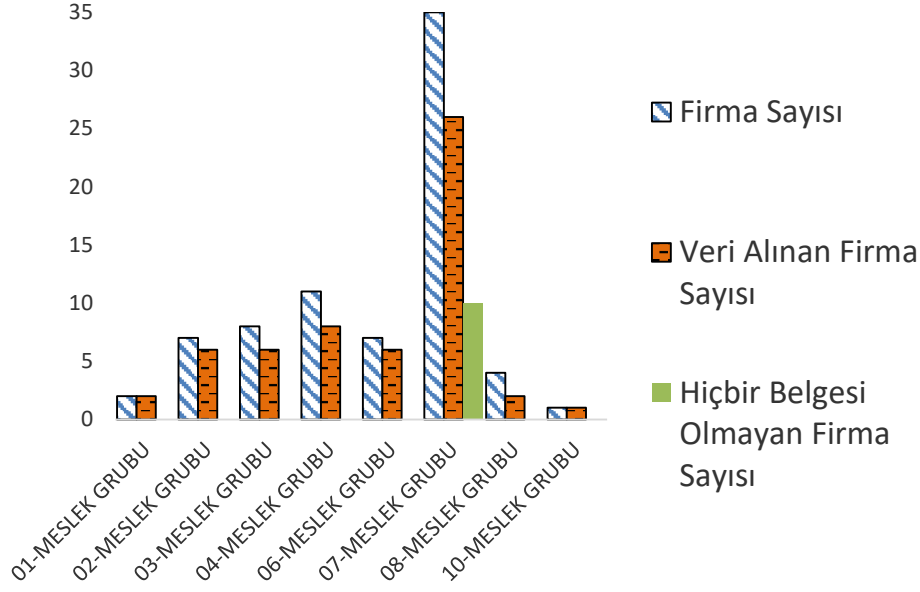
ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi standardının tüm sektörlerde uygulanabilir esnek kurallarının olması, sektörel gereklilikleri tanımlayan standartlar oluşturulmasına zemin hazırlamıştır. IATF 16949 Kalite Yönetim Sistemi standardı da otomotiv sektörüne has gereklilikler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Günümüzde dünyada otomotiv parçası tedarikçileri tarafından yaygın kullanılan bu standart Düzce'deki

57 işletmeden 8 tanesi tarafından kullanılmaktadır. Standart gerekliliklerinin uygulandığı bu işletmeler Şekil 5’de gösterildiği gibi 02, 04, 06 ve 07. Meslek grubunda yer almaktadır.



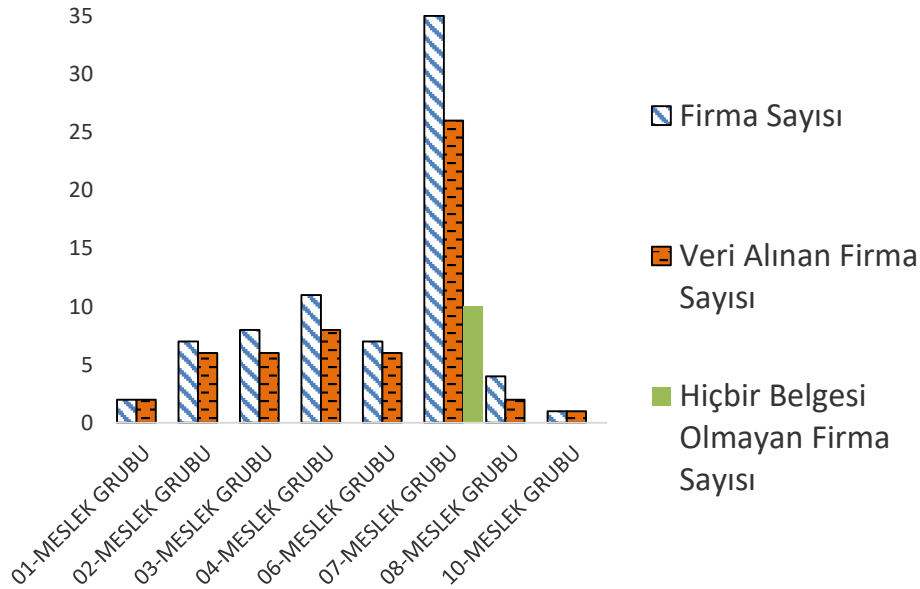
Şekil 5. IATF 16949 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, bilgi güvenliği konusunun tüm iş kollarındaki önemini arttırmaktadır. ISO 27001: 2017 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi standardı, işletmelerde sağlam bir bilgi güvenliği oluşturulmasına rehberlik sağlar. Bilgi güvenliği ihlallerinin önüne geçebilmek amacıyla, ISO 27001 standardına uygunluğun belgelendirilmesi, yöneticinin proaktif tutumuna ilişkin değerlendirmesini yansıtan bir bakış açısı gerekmektedir. Ayrıca, bir kuruluşun bilgi işleminin uluslararası bir standarda uygun olduğunu ve dolayısıyla daha güvenilir olabileceğine işaret etmektedir. Bu kapsamda Şekil 6’da belirtildiği üzere çalışma sırasında Düzce’deki 57 işletmeden 9 tanesinde ISO 27001 belgesi bulunduğu tespit edilmiştir. ISO 27001 standardına sahip işletmeler, ihracatları sırasında sınır kapılarında beklemeden yerinde gümrükleme yapılabilmektedir. Bu durum da ISO 27001 standardına olan ilginin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 6. ISO 27001 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

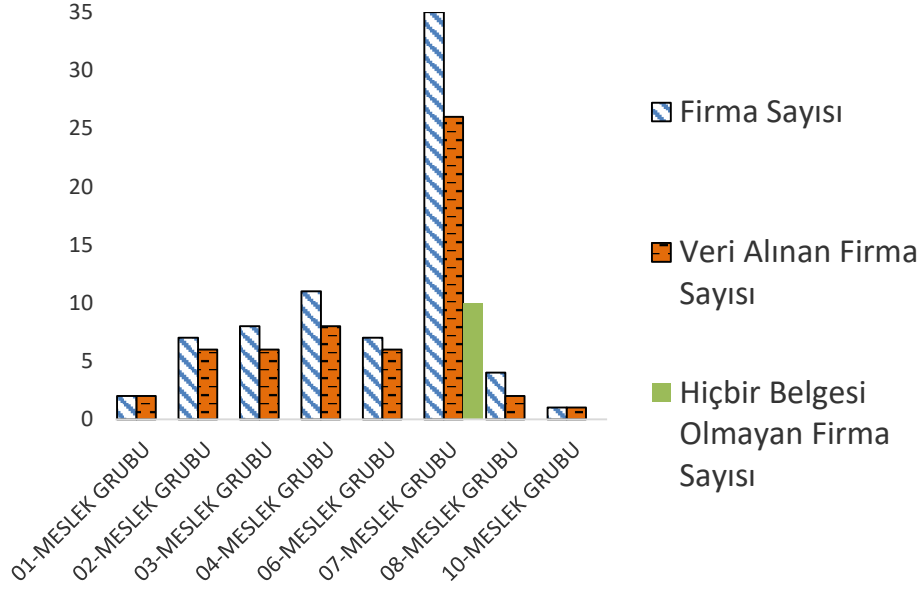
ISO 14001, tüm çevresel etkilerin belirlenmesine yardımcı olurken, ISO 50001 enerji performansının, verimliliğin ve tüketimin sürekli iyileştirilmesine odaklanmaktadır. ISO, işletmelerin enerjiyi verimli kullanarak paradan tasarruf etmelerini desteklemek ve aynı zamanda kaynakları korumaya ve iklim değişikliği ile mücadele etmeye yardımcı olmak için ISO 50001 standardını oluşturmuştur [66]. ISO 50001 kapsamı sadece endüstriyel tesisler için değil, ticari ve devlet kurumları için de kullanılabilir bir çerçeve sunmaktadır. Şekil 7’de görüleceği üzere Düzce bölgesinde çalışan sayısı 100 ve üzerinde olan üretim tesislerinin 7 tanesi ISO 50001: 2018 Enerji Yönetim Sistemi standardı gerekliliklerini uygulamaktadır.



Şekil 7. ISO 50001 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

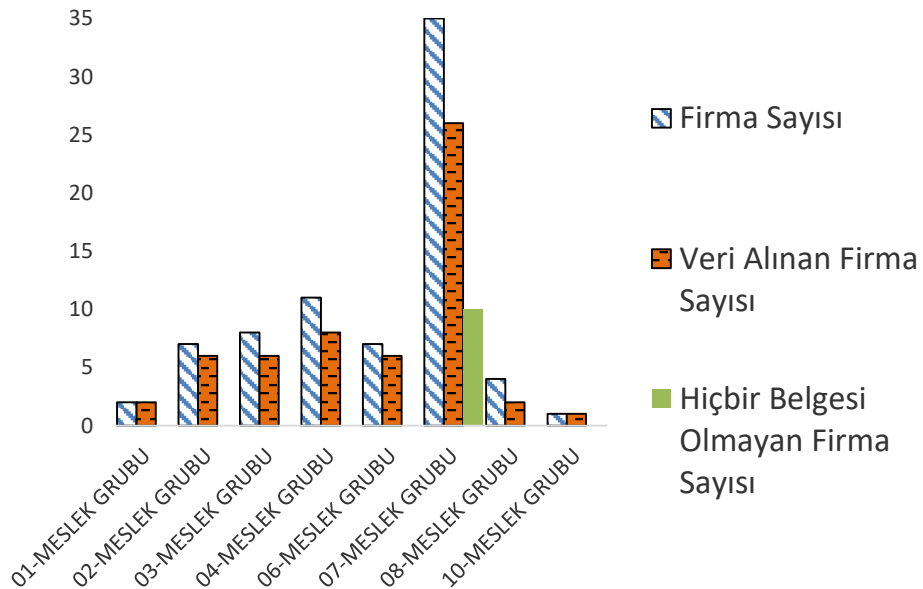
ISO 10002: 2018 Müşteri Memnuniyeti standardı, tüm sektörlerdeki işletmelerin ürün ve hizmetleri ile ilgili şikayetlerinin ele alınması sürecini tanımlamaktadır. Ürün ve hizmetler, işletmenin müşteriye

yönelik veya müşteri tarafından talep edilen çıktılarını ifade etmektedir. ISO 10002: 2018 standardı, işletmelerin müşterileri ile ilişkilerini düzenleyerek şikayet süreçlerini yönetmek ve müşteri memnuniyetini arttırmayı hedeflemektedir. Şekil 8’de ifade edildiği gibi sadece 03 ve 07. Meslek gruplarında bulunan 8 işletme 10002 standardına sahiptir.



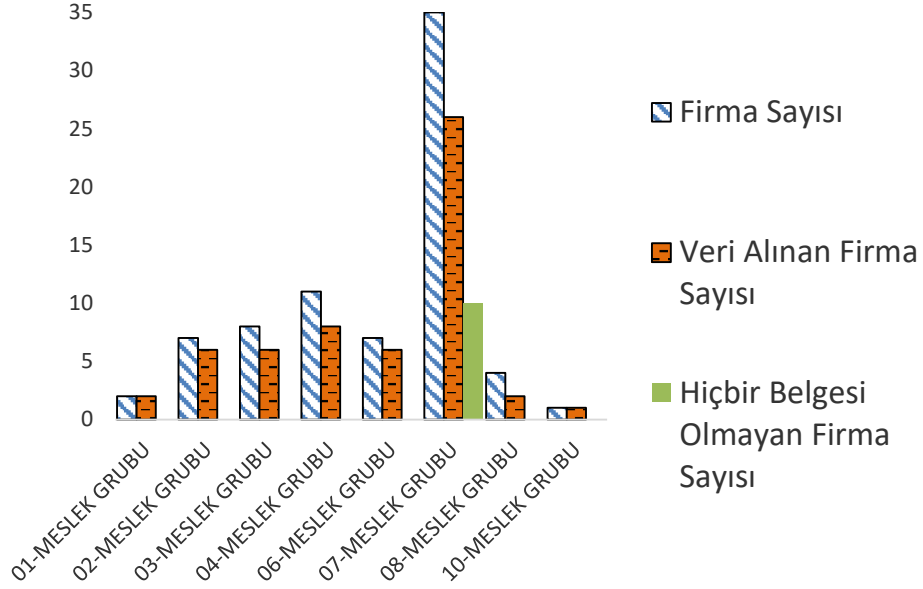
Şekil 8. ISO 10002 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

Sektöre özel gerekliliklerin tanımlandığı bir diğer standart, ISO 13485: 2016 Tıbbi Cihazlar Yönetim Sistemi standardıdır. Tıbbi cihaz üretimi, genel amaçları ile ISO 9001’e dayandırılmaktadır. Ek olarak, tıbbi cihazların geliştirilmesi için tanımlanan gereklilikleri içermektedir. 07. Meslek grubunda veri toplanan 26 işletmenin üç tanesinde bu standarda ait gereklilikler Şekil 9’da tanımlanmıştır.



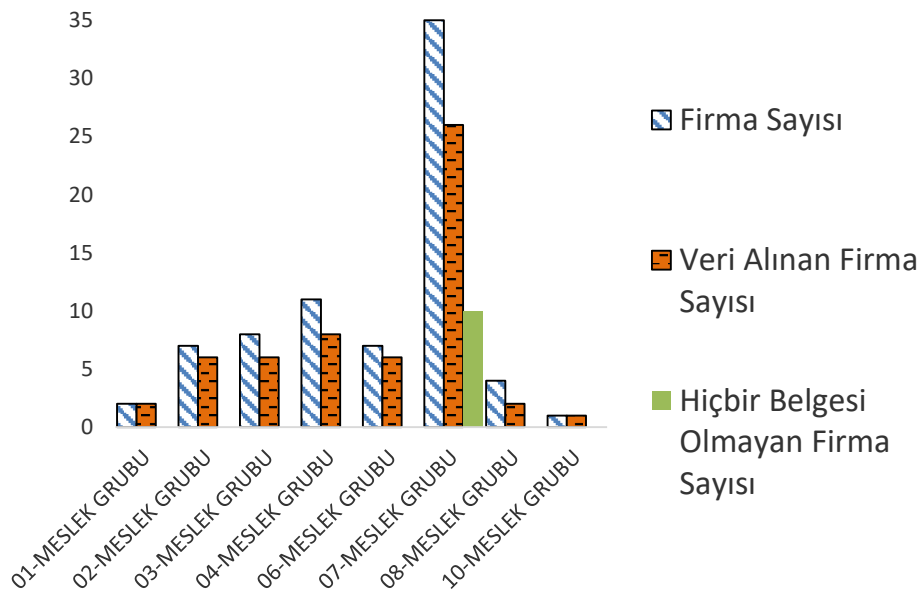
Şekil 9. ISO 13485 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

ISO 22000: 2018 Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi standardı gıda sektöründeki işletmeler açısından oldukça önemli olan bir başka sektörel standarttır. Bir Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi (FSMS), herhangi bir modern gıda işinin hayati bir parçasıdır. Gıda zincirindeki kuruluşların, gıdanın insan tüketimi sırasında güvenli olmasını sağlamak için gıda güvenliği tehlikelerini kontrol etme yeteneklerini göstermeleri gerekmektedir. İyi kurulmuş bir FSMS, gıda güvenliğine yönelik risklerin belirlenmesine ve bunların kuruluşta nasıl izlenip kontrol edildiğinin detaylandırılmasına imkan tanır [67], [68]. Şekil 10'da gösterildiği gibi gıda güvenliği standardına sahip olan 08 ve 10. Meslek gruplarında 3 işletme bulunmaktadır.



Şekil 10. ISO 22000 Belgesine Sahip İşletmelerin Meslek Gruplarına Göre Dağılımı

Analizin son kısmında, veri talep edilen 07. Meslek grubundaki 10 işletmenin hiçbir belgeye sahip olmadığı Şekil 11'de tanımlanmıştır.



Şekil 11. Hiçbir Belgesi Olmayan Firmaların Dağılımı

V. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yönetim sistemi standartları, değişen küresel dünya düzeninde gün geçtikçe üzerinde farklı çalışmalar yapılan dinamik bir konudur. Bu çalışma kapsamında Düzce’de bulunan, kapasite planı hazırlayan ve çalışan sayısı 100 ve üzerinde olan üretim tesislerinin yönetim sistemi standartlarına bakış açısının incelenmesi hedeflenmiştir. Sektörlere özgü kullanılan standartlar da olmak üzere en yaygınları ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, IATF 16949, ISO 27001, ISO 50001, ISO 10002, ISO 13485 ve ISO 22000 olarak tanımlanmıştır. Veriler, toplam 75 işletmeden 57 tanesinden toplanmıştır. İşletmeler, Düzce Ticaret ve Sanayi Odası tarafından kullanılan 11 meslek grubuna bölünerek sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar özet olarak şöyledir:

- ISO 9001: 2015 Kalite Yönetim Sistemi Standardı: Birden çok sektöre uygulanabilirliği sebebiyle dünyada en yaygın kullanılan yönetim sistemi standardıdır. Dünya genelindeki firmalar ile aynı paralellikte çalışma sırasında veri toplanan 57 işletmenin 43 tanesi ISO 9001 belgesine sahiptir. Bu oran ortalama %75 olarak gerçekleşmiştir.
- ISO 14001: 2015 Çevre Yönetim Sistemi Standardı: Dünya genelinde yaygın kullanılan ve işletmelerin çevre gerekliliklerinin tanımlandığı standarttır. Aynı zamanda ISO 9001 ve ISO 450001 ile ortak entegre edilerek işletmeler tarafından kullanılabilir. 57 işletmenin 33 tanesinde ISO 14001 standardı uygulanmaktadır. Ortalama gerçekleşme %58’dir.
- ISO 45001: 2018 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı: İşletmelerin iş ve işçi güvenliği ile ilgili gerekliliklerinin tanımlı olduğu standart 9001 ve 14001 ile entegre edilerek yaygın kullanılan standartlardan bir diğeridir. 57 işletmenin 28 tanesinde uygulanan bu standardın gerçekleşmesi %49 seviyesindedir.
- IATF 16949: 2016 Otomotiv Kalite Yönetim Sistemi Standardı: ISO 9001’in tüm sektörlerde uygulanması, sektöre özgü gerekliliklerin tanımlanarak standartların özelleştirilmesi açısından bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu kapsamda otomotiv sektörüne özgü geliştirilen bu standart, sıkı gereklilikleri ile işletmelerin üretim kalitesinin yükseltilmesini hedeflemektedir. Otomotiv sektörü parçaları ile ilişkilendirilen 02, 04, 06 ve 07. Meslek gruplarında yer alan ve veri toplanan işletmelerin sayısı 46’dır. IATF 16949 belgesine sahip firma sayısı ise 8’dir. Bu oran %17’dir. BMW, Mercedes, Ford, Fiat, Renault vb. ana otomotiv sektörü üreticileri, tedarikçileri ile çalışmak için bu belgeye sahip olunmasını zorunlu tutmaktadır. Dolayısıyla sıkı kuralları olmasına rağmen doğrudan ana üreticiler ile çalışan işletmeler bu belgenin gerekliliklerini sağlamak durumundadır.
- ISO 27001: 2017 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı: Değişen teknolojik gelişmeler ile bilgi güvenliğine verilen önemin artması bu standarda ilginin de artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda ISO 9001 ve ISO 27001 belgesine sahip işletmelerin yetkilendirilmiş statüsü alarak üretim tesisinde gümrükleme yaparak sınır kapılarından direk geçiş hakkı kazanması bu belgenin önemini arttırmaktadır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre 57 işletmeden 9 tanesi ISO 27001 standardına sahiptir. Gümrükleme işlemlerinde sağladığı avantaj göz önüne alınarak %16’lık oranın artırılması son derece faydalı olacaktır.
- ISO 50001: 2018 Enerji Yönetim Sistemi Standardı: Enerji yönetim sistemi standardı Düzce’deki çalışan sayısı 100 ve üzerinde olan üretim tesislerinin 7 tanesinde bulunmaktadır. Gerçekleşme oranı %12 seviyesindedir.
- ISO 10002: 2018 Müşteri Memnuniyeti Yönetim Sistemi Standardı: Müşteri gerekliliklerinin ve geri bildirimlerinin iyileştirilmesinin hedeflendiği bu standardı kullanan 8 işletme bulunmaktadır. Bu standarda ait gerçekleşme %14’dür.
- ISO 13485: 2016 Tıbbi Cihazlar Yönetim Sistemi Standardı: Sektöre özgü kullanılan bir başka standart olan ISO 13485’in gerekliliklerini sağlayan 3 işletme bulunmaktadır. Sadece 07. Meslek grubuna ait olan bu standart için veri toplanan 26 işletme bulunmaktadır. Gerçekleşme %12 seviyesinde kalmıştır.
- ISO 22000: 2018 Gıda Güvenliği Yönetim Sistemi Standardı: Gıda sektörüne özel olarak kullanılarak 08 ve 10. Meslek gruplarını içermektedir. Bu meslek gruplarında veri toplanan 3 firmanın tamamı bu standarta sahiptir. Gerçekleşme %100 seviyesindedir. İşletmelerin bu standart ile ilgili farkındalığının tüm standartlar için uygulanabilir olması oldukça önemlidir.

Çalışmanın son bölümünde 07. Meslek grubunda veri toplanan 26 işletmenin 10 tanesinde hiçbir kalite belgesi bulunmadığı tespit edilmiştir. Özellikle bu işletmelerdeki farkındalığı arttırarak yönetim sistemi standartlarının verimlilik, karlılık gibi göstergelerindeki iyileşmeler ve müşteri memnuniyetindeki artış sağlanmalıdır.

İşletmeler, yönetim sistemi standartlarına sahip olmanın, hurda miktarında azalma, karlılıkta artış, yapılan işlerin sistematik hale gelmesi gibi faydaları olduğunu bilerek belge sahibi olmalıdır. Yönetim sistemi standartlarının sağladığı faydalar genel itibariyle; sistematik düzeydeki hataların iyileştirilmesi, süreçlerin katma değerli hale getirilmesi, karlılığın artması, müşteri memnuniyetinin ve ürün kalitesinin yükselmesi şeklindedir. Bu faydalara ulaşmak için standartların işletmelere doğru şekilde entegre edilmesi ve tanımlı gerekliliklerin yerine getirilmesi sağlanmalıdır.

Yönetim sistemi standartlarının işletmelere önemli faydaları olmak ile birlikte belgeleme maliyetleri, bu konu ile ilgili çalışmaları yürütecek işletme çalışanlarının istihdamı ve iyileştirmeler için gerekli yatırımların planlanması gibi konular hakkında çalışma yapılması sonrasında belgelendirme sürecinin başlatılması önerilmektedir. Yönetim sistemi standartlarının diğer disiplinler ile ilişkisi, işletmelere yüklediği maliyet göz önünde bulundurularak verimlilik ve karlılık artışı gibi konuların çalışılması da önerilmektedir. İnsan kaynakları, satış, satın alma, bakım, bilgi teknolojileri gibi üretim süreçlerine destek veren tüm süreçlerde yapılabilecek iyileştirmelerin yönetim sistemleri kapsamında değerlendirilmesi ve işletmelere katkı sağlaması konuları da yeni çalışmalarda incelenebilir. Üretim tesislerine ait vizyon, misyon ve stratejik hedeflerin yönetim sistemi standartları ile ilişkilendirilerek farklı bir bakış açısı kazandırılması da yeni çalışmalar için önerilmektedir. Özellikle sektöre özgü yönetim sistemi standartlarının belgelendirme süreçleri ve karşılaştıkları uygulamalar yeni çalışmalarda değerlendirilebilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] O. Rodriguez-Arnaldo, and A. R. Martinez-Lorente, “What determinants influence the diffusion of ISO 9001 by countries?” *The TQM Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 223-246, 2020.
- [2] J. Priede, “Implementation of quality management system ISO 9001 in the world and its strategic necessity,” *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, vol. 58, no. 12, pp. 1466–1475, 2012.
- [3] D. Aravind, and P. Christmann, “Decoupling of standard implementation from certification: Does quality of ISO 14001 implementation affect facilities’ Environmental performance?” *Business Ethics Quarterly*, vol. 21, no. 1, pp. 73–102, 2011.
- [4] M. Gondo and J. Amis, “Variations in practice adoption: the roles of conscious reflection and discourse,” *Academic Management Review*, vol. 38, no. 2, pp. 229–247, 2012.
- [5] K. Iatridis, A. Kuznetsov, and P.B. Whyman, “SMEs and certified management standards: the effect of motives and timing on implementation and commitment,” *Business Ethics Quarterly*, vol. 26, no. 1, pp. 67–94, 2016.
- [6] I. Heras-Saizarbitoria and O. Boiral, “ISO 9001 and ISO 14001: towards a research agenda on management system standards,” *International Journal Management Review*, vol. 15 no. 1, pp. 47–65, 2013.
- [7] H. C. Su, S. Dhanorkar, and K. Linderman, “A Competitive Advantage from the Implementation Timing of ISO Management Standards.” *Journal of Operations Management*, vol. 37, pp. 31-44,

2015.

- [8] E. L. Psomas, C.V. Fotopoulos, and D. P. Kafetzopoulos, "Core Process Management Practices, Quality Tools and Quality Improvement in ISO 9001 Certified Manufacturing Companies." *Business Process Management Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 437-460, 2011.
- [9] C. K. Chen, K. Anchecta, Y. D. Lee, and J. J. Dahlgaard, "A stepwise ISO-based TQM implementation approach using ISO 9001: 2015." *Management and Production Engineering Review*, vol. 7, pp. 65–75, 2016.
- [10] K. Blind, A. Mangelsdorf, and J. Pohlisch, "The Effects of Cooperation in Accreditation on International Trade: Empirical Evidence on ISO 9000 Certifications," *International Journal of Production Economics*, vol. 198, pp. 50- 59, 2018.
- [11] D. I. Prajogo, "The Roles of Firms' Motives in Affecting the Outcomes of ISO 9000 Adoption," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 31, no. 1, pp. 78–100, 2011.
- [12] L. S. Sfreddo, G. B. B. Vieira, G. Vidor, and C. H. S. S. Santos, "ISO 9001 based quality management systems and organisational performance: a systematic literature review" *Total Quality Management & Business Excellence*, pp. 389-409, 2018.
- [13] E. Psomas and D. Kafetzopoulos, "Performance measures of ISO 9001 certified and noncertified manufacturing companies," *Benchmarking: An International Journal*, vol. 21 no. 5, pp. 756–774, 2014.
- [14] L. M. Fonseca, J. P. Domingues, P. B. Machado, and M. Calderon, "Management system certification benefits: where do We stand?" *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 10, no. 3, pp. 476-494, 2017.
- [15] S. Wu and J. Jang, "The impact of ISO certification on consumers' purchase intention", *Total Quality Management and Business Excellence*, vol. 25, no. 3/4, pp. 412-426, 2014.
- [16] S. Yörük, "Kalite Yönetim Sistemlerinin Kurulumu ve Nakliye Firmasında Uygulama Deneyimi," Yüksek Lisans Tezi, Uluslararası Ticaret ve Lojistik Yönetimi Bölümü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [17] A. A. King, and M. J. Lenox, "Does it really pay to be green? An empirical study of firm environmental and financial performance," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 5, no. 1, pp. 105–116, 2001.
- [18] A. Gomez and M. A. Rodriguez, "The effect ISO 14001 certification on toxic emissions: an analyses of industrial facilities in the north of Spain," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 1-2, pp. 1091-1095, 2011.
- [19] K. Elsayed and D. Paton, "The impact of environmental performance on firm performance: Static and dynamic panel data evidence," *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 16, pp. 395–412, 2005.
- [20] G. Serin ve M. T. Çuhadar, "İş Güvenliği ve Sağlığı Yönetim Sistemi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, c. 5, s.2, ss. 44-59, 2015.
- [21] V. Peker, "Lojistik Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları ve Risk Analizleri," Yüksek

Lisans Tezi, İşletme Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2009.

- [22] J. Palassis, P. A. Schulte, and Geraci, C. L. “A New American Management Systems Standard in Occupational Safety and Health – ANSI Z10,” *Journal of Chemical Health & Safety*, vol. 13, no. 1, pp. 20-23, 2006.
- [23] C. Batmaz, “ISO / TS 16949 Otomotivde Kalite Yönetim Sisteminin Toplam Kalite Yönetimi Açısından İrdelenmesi ve Talaşlı İmalat Sanayisinde Bir Araştırma,” Yüksek Lisans Tezi, Uluslararası Kalite Yönetimi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [24] I. Ahidar, D. Sarsri, and N. Sefiani, “Approach to integrating management systems,” *The TQM Journal*, vol. 31, no. 2, pp. 183-204, 2019.
- [25] N. Singh, “Automotive industry response to its global QMS standard ISO/TS-16949,” in *Globalization and standards*, Singapore: New Delhi: Springer, 2014, pp. 121–142.
- [26] D. I. Panyukov, and V. N. Kozlovskiy, “Highlights of Russian experience in implementing ISO/TS 16949,” *Life Science Journal*, vol. 11, no. 8, pp. 439–444, 2014.
- [27] B. Kesici ve M. S. Yıldız, “Bir Otomotiv Yan Sanayisinde IATF 16949: 2016 Kalite Yönetim Sistemi Standardının Balanced Scorecard Modeli İle Performans Değerlendirmesi,” *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 36, no. 2, pp. 203-214, 2022.
- [28] P. A. C. Miguel, A. F. Leal, and I. B. Silva, “Results From a Case Study of ISO TS 16949 Implementation,” presented at 16th Int. Conf. on Industrial Engineering and Operations Management, Brazilya, 2010.
- [29] F. Y. Pai and T. M. Yeh, “Effective implementation for introducing ISO/TS 16949 in semiconductor manufacturing industries,” *Total Quality Management and Business Excellence*, vol. 24, no. 3-4, pp. 462–478, 2012.
- [30] E. D. Zaletova, E. B. Yakovleva, V. V. Yashin, and D. V. Ektov, “Improving the annealing of cold-rolled 65Г steel to comply with the ISO/TU 16949: 2002 standard,” *Steel in Translation*, vol. 39, no. 10, pp. 942–944, 2009.
- [31] N. Güney, “Bilgi Yönetiminde Kalite Yönetim Sistemlerinin Rolü,” Yüksek Lisans Tezi, İşletme, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [32] S. H. Li, C. D. Yen, S. C. Chen, P.S. Chen, W. H. Lu, and C. C. Cho, “Effects Of Virtualization On Information Security,” *Computer Standards and Interfaces*, vol. 42, pp. 1-8, 2015.
- [33] H. Çakır ve M. Tuygun, “ISO 27001 Bilgi Güvenliği Yönetim Sistemi Standardının Kamu Kurumlarına Uygulanabilirliğinin Araştırılması: Ankara İli Örneği,” *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 59-78, 2019.
- [34] C. Hsu, T. W. Wang and A. Lu, A. “The impact of ISO 27001 Certification on Firm Performance,” *Proceedings Of The 49th Annual Hawaii International Conference On System Sciences*, 2016, pp. 4842-4848.
- [35] Zsebik, A. and Novák, D. (2018). ISO 50001—Energy Planning and Monitoring Tools and Examples. *Energy Engineering*, 115(6), pp. 46-61, 2018.

- [36] C. Paunescu and L. Blid, "Effective energy planning for improving the enterprise's energy performance," *Management & Marketing*, vol. 11, no. 3, pp. 512-531, 2016.
- [37] V. A. Silva Gonçalves and F. J. M. H. dos Santos, "Energy management system ISO 50001: 2011 and energy management for sustainable development," *Energy Policy*, vol. 133, pp. 1-9, 2019.
- [38] J. M. S. Lira, E. G. Salgado and L. A. Beijo, "Which factors does the diffusion of ISO 50001 in different regions of the world is influenced?" *Journal of cleaner production*, vol. 226, pp. 759-767, 2019.
- [39] T. Y. Chiu and S. L. Lo, "Establishing an integration-energy-practice model to improve energy efficiency in ISO 50001 energy management systems: A case study for a networking products company," *Journal of Quality*, vol. 22 no. 1, pp. 15-28, 2015.
- [40] H. Kanneganti, B. Gopalakrishnan, E. Crowe, O. Al-Shebeeb, T. Yelamanchi, A. Nimbarte, and A. Abolhassani, "Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001 energy management standard," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 23, pp. 121-135, 2017.
- [41] A. Tallini and L. Cedola, "Evaluation methodology for energy efficiency measures in industry and service sector," *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 542-549, 2016.
- [42] I. Dzene, I. Polikarpova, L. Zogla, and M. Rosa, "Application of ISO 50001 for implementation of sustainable energy action plans" *Energy Procedia*, vol. 72 no. 2, pp. 111-118, 2015.
- [43] S. Chrysikopoulos and P. Chountalas, "Integrating energy and environmental management systems to enable facilities to qualify for carbon funds," *Energy & Environment*, vol. 29, no. 6, pp. 938-956, 2018.
- [44] E. Sertkaya, "Kalite Yönetim Sistemleri Çerçevesinde Çalışan Gıda Mühendislerinin İş Tatmini," Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [45] I. Sheps, "ISO 22000: The new international standard on food safety - A comparison to HACCP (Danish Standard DS 3027,2. edition)," *Journal of Environmental Protection and Ecology*, vol. 8, no. 4, pp. 940-949, 2007.
- [46] I. S. Arvanitoyannis, *HACCP and ISO 22000: Application to foods of animal origin*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 2009.
- [47] C. Paunescu, R. Argatu, and M. Lungu, "Implementation of ISO 22000 in Romanian Companies: Motivations, difficulties and Key Benefits," *Amfiteatru Economic*, vol. 20, no. 47, pp. 30-45, 2017.
- [48] E. O. Afoakwa, H. Mensah-Brown, G. K. Crentsil, K. Frimpong, and F. Asante, "Application of ISO 22000 in comparison with HACCP on industrial processing of milk chocolate," *International Food Research Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 1771-1781, 2013.
- [49] A. A. Zorpas and N. Tzia, "The implementation of a new ISO 22000 in the Cyprus olive oil industry," *Risk Analysis*, pp. 261-274, 2008.

- [50] C. Paunescu, "The importance of certification of organizations' management systems to ISO standards" *Quality - Access to Success*, vol. 17, no. 153, pp. 108-110, 2017.
- [51] M. A. Samani, N. Ismail, Z. Leman, and N. Zulkifli, "Development of a conceptual model for risk-based quality management system" *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 30, no. 5-6, pp. 1-16, 2017.
- [52] A. Emhan, "Risk Yönetim Süreci ve Risk Yönetmekte Kullanılan Teknikler," *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 23, no. 3, pp. 209- 220, 2009.
- [53] G. Purdy, "ISO 31000: 2009—Setting a New Standard for Risk Management," *Risk Analysis*, vol. 30, no. 6, pp. 881-886, 2010.
- [54] D. Proença, J. Estevens, R. Vieira and J. Borbinha, "Risk Management A Maturity Model based on ISO 31000," *IEEE 19th Conference on Business Informatics*, 2017, pp. 99-108.
- [55] C. Y. Kim, S. S. Ko, and Y. H. Han "The impact of ISO 13485 on the performance of Korean medical device manufacturers," *Journal of Social Korea Industrial Systems Engineering*, vol. 41, no. 1, pp. 11-23, 2018.
- [56] O. Kheir, S. Smedts, A. Jacoby, and S. Verwulgen, "Efficient Quality Management in MedTech Start-Ups (Based on ISO 13485)," *Medical Devices-Evidence and Research*, vol. 14, pp. 313-319, 2021.
- [57] S. T. Cruz, A. F. Gomez, A. L. Sevillano, and C. L. Garzon, "Audit to the Data Quality Management Process in a Small Organization Based on NTC-ISO 19011," *4th International Congress of Innovation and Trends in Engineering (CONITI)*, 2018.
- [58] H. Hernandez, "Quality audit as a driver for compliance to ISO 9001: 2008 standards," *The TQM Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 454-466, 2010.
- [59] L. Voinescu, "The Internal Audit of the Management Systems according to the New Edition of ISO 19011: 2011" *Quality – Access to Success*, vol. 13, no. 130, pp. 91-93, 2012.
- [60] A. Sukoco, S. Marzuki, and A. Cucus, A. "Concept of Quality Measurement System Software Based on Standard ISO 9126 and ISO 19011," *2nd International Conference On Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE)*, 2012, pp. 105-108.
- [61] S. Hughes, and S. Karapetrović, "ISO 10002 Complaints Handling System: a Study," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 23, no. 9, pp. 1158-1175, 2006.
- [62] H. Şahin, *Sürdürülebilir Müşteri Memnuniyeti ve Şikayet Yönetimi (TS ISO 10002)*, vol. 155, Ankara, Türkiye: Kitabe Yayınları, 2014.
- [63] P. Nowicki, A. Simon, P. Kafel, and M. Casadesus, M. "Recognition of customer satisfaction standards of ISO 10000 family by spa enterprises – a case study analysis". *Revista TMQ, Techniques, Methodologies and Quality*, 2014.
- [64] G. A. Bowen, "Document analysis as a qualitative research method," *Qualitative Research*

Method, vol. 9, no. 2, pp. 27–40, 2009.

- [65] A. H. İslamoğlu ve Ü. Alınışık, *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri*, 6. Baskı, İstanbul, Türkiye: Beta Yayın Dağıtım, 2019.
- [66] C. H. Eccleston, F. March, and T. Cohen (2011) *Inside energy: developing and managing an ISO 50001 standard*. CRC Press LLC, NY.
- [67] D. Smith, T. Jackson-Smith, and R. Politowski, *ISO 22000 Food safety: guidance and workbook for the manufacturing industry*, London, UK: BSI, 2007.
- [68] N. F. Soares, A. A. Vicente and C. M. A. Martins, *Food safety in the seafood industry: A practical guide for ISO 22000 and FSSC 22000 Implementation*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016.
- [69] L. M. C. M. D. Fonseca, J. P. Domingues, P. Baylina, and D. Harder, D, “ISO 9001: 2015 adoption: A multi-country empirical research,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 12, no. 1, pp. 27–50, 2019.
- [70] L. Fonseca, C. Martins, and Da Fonseca, “ISO 14001:2015: An Improved Tool for Sustainability,” *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 8, 2015.
- [71] A. E. Di Noia and M. Nicoletti, “ISO 14001 certification: Benefits, costs and expectations for organization,” *Studia Oeconomica Posnaniensia*, vol. 4, no. 10, pp. 94–109, 2016.
- [72] K. C. Mızrak, “Agile Occupational Safety Management System Model And Evaluation Of The Proposed Model In An Automotive Company,” *International Journal of Management and Administration*, vol. 4, no. 8, pp. 228-244, 2020.
- [73] F. O. Neves, E. G. Salgado, L. A. Beijo, J. M. S. Lira, and L. H. M. S. Ribeiro, “Analysis of the quality management system for automotive industry- ISO/TS 16949 in the World,” *Total Quality Management & Business Excellence*, pp. 1-24, 2018.
- [74] T. Ruswanto and D. Saroso, “Gap Analysis Study on the Compliance of Automotive Standard IATF 16949 based on Internal Quality Audit Score in Automotive Industry,” *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 271-285, 2018.
- [75] H. B. Akın ve T. K. Günay, “TGS yer hizmetleri A.Ş.'de ISO 10002 müşteri memnuniyeti kalite yönetimi sisteminin uygulanması ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi,” *Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi*, vol. 37, pp. 33-48, 2015.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Comparative Performance Analysis of Time-Frequency Domain Images and Raw Signal Data for Classification of ECG Signals

 Turgut ÖZSEVEN^{a,*}

^a Department of Computer Engineering, Tokat Gaziosmanpaşa University, Tokat, 60100 Turkey

* Corresponding author e-mail: turgut.ozseven@gop.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1236072

ABSTRACT

ECG signals are one of the most common tools used to diagnose cardiovascular diseases. ECG signals are obtained by measuring electrical changes on the skin surface. Arrhythmias occurring in the heart are diagnosed because the expert evaluates ECG signals. This diagnosis depends on the experience of the specialist and is a subjective evaluation. With the widespread use of computer-aided diagnostic systems, evaluations dependent on the expert's experience are objectified, and support is provided to the physician for diagnosis. For computer-aided ECG classification, beats are detected from ECG signals, and arrhythmias are detected by analyzing the structure of these beats. In recent years, deep learning models have been successful in classifying ECG signals. The data to be used in the classification process is realized with the help of morphological features or images of the signal. The main objective of this study is to compare the classification performance of digital and visual heartbeat data for ECG signal classification. For this purpose, 1D-CNN and 2D-CNN architectures are used for the type of ECG signals. As inputs of the 1D-CNN model, numerical values of the heartbeat signal and hand-crafted features obtained from these numerical values were used. The inputs of the 2D-CNN model are the raw signal image, spectrogram, scalogram, Mel-spectrogram, GFCC, and CQT images, which are visual representations of the heartbeat signal. The results show that the numerical model of the ECG signal fails for classification, while the hand-crafted features provide 85.2% accuracy. The results obtained with the visual representation of the signal provided over 99% classification accuracy for all images. The highest success rate was 99.9% with the visualization of the raw signal. In line with these findings, the 2D-CNN architecture and the visual representation of the heartbeat signal were found to be the most suitable method for classifying ECG signals.

Keywords: ECG, Deep learning, Heartbeat, Classification

EKG Sinyallerinin Sınıflandırılmasında Zaman-Frekans Domenindeki Görüntülerin ve Ham Sinyal Verilerinin Karşılaştırmalı Performans Analizi

ÖZ

EKG sinyalleri kardiyovasküler hastalıkların klinik tanısı için kullanılan en yaygın araçlardan birisidir. Cilt yüzeyindeki elektriksel değişimlerin ölçülmesi ile EKG sinyalleri elde edilmektedir. EKG sinyallerinin uzmanın değerlendirmesi sonucu kalpte oluşan aritmiler teşhis edilmektedir. Bu teşhis uzmanın deneyimine bağlı olup subjektif bir değerlendirme değildir. Bilgisayar destekli tanı sistemlerinin yaygınlaşması ile uzmanın deneyimine bağımlı değerlendirmeler objektifleşmekte ve hekime tanı için destek sağlanmaktadır. Bilgisayar destekli EKG sınıflandırma için EKG sinyallerinden atımlardan tespit edilmekte ve bu atımların yapısı incelenerek aritmiler tespit edilmektedir. Son yıllarda derin öğrenme modellerindeki yüksek başarı EKG sinyallerinin de

sınıflandırılması için kullanılmaya başlanmıştır. Sınıflandırma sürecinde kullanılacak veri sinyalin morfolojik özellikleri veya görüntüsü yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, EKG sinyallerinin sınıflandırılması için sayısal ve görsel kalp ritmi verilerinin sınıflandırma performanslarının karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla, EKG sinyallerinin sınıflandırılması için 1D-CNN ve 2D-CNN mimarileri kullanılmıştır. 1D-CNN modelinin girdileri olarak kalp ritmi sinyalinin sayısal değerleri ve bu sayısal değerlerden elde edilen öznitelikler kullanılmıştır. 2D-CNN modelinin girdisi kalp ritmi sinyalinin görsel olarak temsilini içeren ham sinyal görüntüsü, spektrogram, skalogram, mel-spektrogram, GFCC ve CQT görüntüleridir. Elde edilen sonuçlar, EKG sinyallerinin sayısal temsilinin sınıflandırma için başarısız olduğunu, hand-crafted özniteliklerin %85.2 doğruluk sağladığını göstermiştir. Sinyalin görsel temsili ile elde edilen sonuçlar tüm görüntüler için %99 üzerinde sınıflandırma doğruluğu sağlamıştır. Bunlar içerisindeki en yüksek başarı ise sinyalin ham halinin görselleştirilmesi ile %99.9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu bulgular doğrultusunda, EKG sinyallerinin sınıflandırılması için en uygun yöntemin 2D-CNN mimarisi ve kalp ritmi sinyalinin görsel temsili olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: EKG, derin öğrenme, kalp ritmi, sınıflandırma

I. INTRODUCTION

Disorders of the heart and blood vessels are referred to as cardiovascular diseases (CVD). World Health Organization (WHO) reports and American Heart Association statistics show that CVD accounts for the majority of non-disease deaths [1]. It claims an estimated 17.9 million lives yearly, accounting for 44% of all non-communicable disease deaths worldwide [2]. Deaths from CVD are projected to reach 23.6 million in 2030 [3]. CVDs cause clotting and vascular occlusion, leading to cerebral or cardiac ischemic necrosis. As a result, the heart pumps blood poorly, and organs can be damaged [4]. As a result, early detection of cardiac arrhythmias is vital. Different ECG waveforms represent arrhythmias and contain information about heart function and condition. The Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI) has categorized arrhythmias into five main classes (N, S, V, F, Q) [5].

An electrocardiogram (ECG) is one of the most widely used methods for diagnosing CVD. Electrical activity in the heart causes electrical changes on the skin's surface. ECG provides visual monitoring of this change with the help of 12 electrodes attached to the patient's body. This facilitates diagnoses such as heart disease, high blood pressure, and heart failure using arrhythmias in the heartbeat. Furthermore, ECG is crucial in predicting short- and long-term outcomes [4]. Figure 1 shows the peaks of an ECG signal.

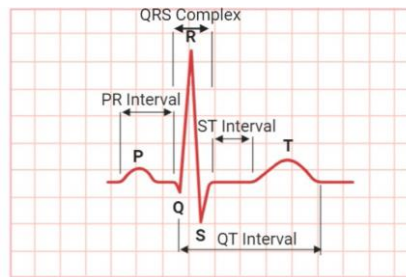


Figure 1. The ECG constitution of a single heartbeat [4].

Five peaks can characterize the heartbeat for the ECG waveform, as shown in Figure 1. The five points' values, distances, and various morphological characteristics are used for this purpose. P wave indicates atrial depolarization, the QRS complex wave indicates ventral depolarization, and the T wave indicates repolarization [5]. The Q, R, and S waves together indicate a single event. The length of the two intervals (PR and QT interval) means the time required for the respective electrical change to complete.

One of the main problems with ECG signal identification is that the signal varies according to the person and the disease. Another problem is that similar signals may be encountered for different diseases. Furthermore, the ECG signal has high noise and complexity characteristics, making it difficult to identify specific diseases [6]. Since the experience of the experts is an important factor in interpreting ECG signals, the result will be subjective. Therefore, computer-aided diagnosis (CAD) will provide objective evaluation for ECG, just as other medical fields do.

CAD systems have been under investigation in many medical fields for many years. For ECG, this process dates back to the 1960s [7]. Traditional CAD methods include the basic steps of pre-processing, feature extraction, and classification. The pre-processing step includes the removal of noise from the signal, framing, and windowing. Researchers have mostly used normalization and noise removal in the preprocessing step. These include z-score normalization, band pass, high pass filter, low pass filter, down-sampling, and DWT denoising [8]–[13]. The features are extracted from the time or frequency domain or the arrhythmia signal. Researchers using traditional methods have used raw data, RR intervals, discrete wavelet transforms, Fourier transforms, and morphological features [10], [11], [14]–[22]. Finally, classification is performed using the features obtained. Past studies have mainly used artificial neural networks, support vector machines (SVM), k-nearest neighbor (k-NN), and random forest (RF) classifiers [12], [21], [23]–[30]. In recent years, the high achievements obtained with deep learning models have started to be used for ECG interpretation. When deep learning studies are analyzed, studies using 1D-CNN, 2D-CNN, and transfer learning come to the forefront. 2D-CNN is generally used in image data, and the kernel is moved in 2 dimensions on the image. In 1D-CNN models, the kernel is moved in only one dimension and used in time series data. On the other hand, transfer learning involves applying CNN models available in the literature to the ECG signal. In studies using 1D-CNN, the raw data of the ECG signal and RR interval values are used [11], [15], [20], [31]–[33]. Spectrogram, log-scale spectrogram, Mel-spectrogram, bi-spectrum, ECG signal, and CQT images were used in studies using 2D-CNN and transfer learning [9], [10], [16], [18], [34]–[37]. Another deep learning model used in ECG classification studies is Long Short-Term Memory (LSTM). In studies using LSTM, raw data and RR interval values were used as input to the model [19], [21], [22], [32], [33], [38], [39].

If the studies involving the classification of ECG signals are evaluated in terms of success, the deep learning classification success is higher than the other methods, with success between 93%–99.7%. If the methods used in these studies are evaluated within themselves, the mel-spectrogram provides higher success than CQT [37]. 2D-CNN model provides higher success than 1D-CNN [31]. CNN models perform better than LSTM [33], [38]. Although recent studies have focused on deep learning models, the study using traditional classifiers (SVM and MLP) achieved 99.8% success using auto-regressive coefficients and discrete wavelet transform [12].

A general review of the research on ECG classification shows that most of the studies used CNN architectures, SVM, and k-NN classifiers proposed by the researchers. Raw data and RR intervals were mostly used as input for these methods. After the literature review, it was observed that the number of spectral image-based studies is limited, the current versions of traditional methods are not used, and there is no comparison between feature sets.

In this study, the performance of waveform, spectrogram (SPEC), Gammatone Frequency Cepstral Coefficients (GFCC), Mel-spectrogram (MEL), Constant Q-transform (CQT), and scalogram (SCL) images were compared for ECG signal classification. For this purpose, the MIT-BIH [40] dataset was used. CNN models were created for feature extraction and classification. Furthermore, the time series values of the ECG signal are used for classification using 1D-CNN, and the results are compared with 2D-CNN. Therefore, the contributions of this research paper are: 1) The classification performance of time-frequency image types of ECG signals is analyzed. 2) The classification performance of the 1D-CNN model with raw signal data and hand-crafted features is compared. 3) Guidance on using visual features is provided to researchers working in ECG classification. The architecture of this study is given in Figure 2.

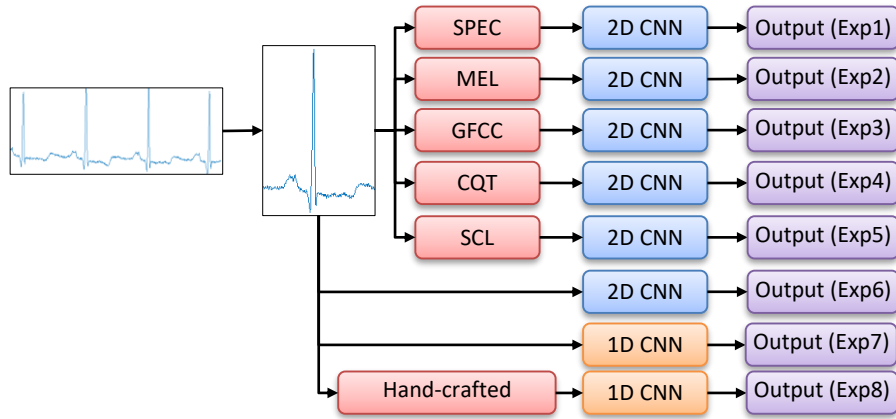


Figure 2. Flow diagram we used for ECG classification.

In this study, eight different experiments were conducted to classify ECG signals. The first six experiments involve the classification of time-frequency dome images with 2D-CNN. The last two experiments involve the time series of the ECG signal and the classification of the features obtained from this series with 1D-CNN. The rest of this paper is organized as follows: Section 2 presents the materials and methods used in the study. Section 3 presents the experimental results. Section 4 contains conclusions and discussion.

II. MATERIALS AND METHODS

A. DATA DESCRIPTIONS

This study used the MIT-BIH [40] database, widely used in the literature. The database contains heartbeat recordings collected by the Massachusetts Institute of Technology and Boston Hospital from 47 participants. The recordings are 30 minutes long and 360 Hz and contain 48 ECG recordings. Each signal was filtered with a 0.1-100 Hz band-pass filter. The database contains arrhythmic signals labeled by two or more cardiologists. Each ECG recording includes two channels (MLII and V1-V5). The QRS is usually more prominent in signals from the MLII lead. Therefore, data from the MLII channel were used in our study. The MIT-BIH database is unbalanced due to the unequal number of ECG beats for each arrhythmia [10]. MIT-BIH includes the classes N (normal), S (supraventricular ectopic), V (ventricular ectopic), F (Normal and V), and Q (undefined) [41]. Heartbeat types according to AAMI standards and tags in the MIT-BIH database are given in Table 1.

Table 1. Heartbeat types according to AAMI and tags in the MIT-BIH.

AAMI	MIT-BIH class¹	Beat Count
N	N, L, R, e, j	90083
S	A, a, J, x	2972
V	V, !, E	7480
F	F	802
Q	Q	15

By AAMI recommendations, four records in this database (102, 104, 107, and 217) were not used in the study [14]. The heartbeat types and the selected recordings to be used in this study are given in Table 2. In the selection of the recordings, those commonly used in the literature were preferred.

Table 2. Types and numbers of heartbeats used.

Beat Types	Beat Count	Record Numbers
N	4868	103, 122, 220
LBBB	3856	109, 111, 214
RBBB	3613	118, 212, 231
PVC	2278	116, 119, 208, 213, 215, 221

The number of classes in the MIT-BIH database equals the number of tags. However, the database has an unbalanced distribution when tag-based beats are analyzed. Since data augmentation will not be used, the classes to be used were determined according to the balanced distribution. When selecting records, we tried to include records with a single beat type in the same class. In cases where this was not possible, other records were included. In this context, classification was made over four beat types.

B. DATA PRE-PROCESSING

Pre-processing includes normalization, filtering, and beat detection of the ECG signal before feature extraction and classification. Amplitude variations of ECG signals negatively affect the features. This variation creates significant variation in different patients for the same type of heartbeat [42]. With the normalization process, the amplitudes of the ECG signals are fixed to 1mV from peak to peak, and the offset of the signal is eliminated. Thus, the dependency of the features extracted from the ECG signal on demographic characteristics will be eliminated. The ECG signal will contain noise due to incorrect electrodes, patient movement, respiration, and various noises. Therefore, the DWT denoising method is used to remove the noise. Figure 3 shows the original, normalized, and denoised images of a sample ECG signal from the database.

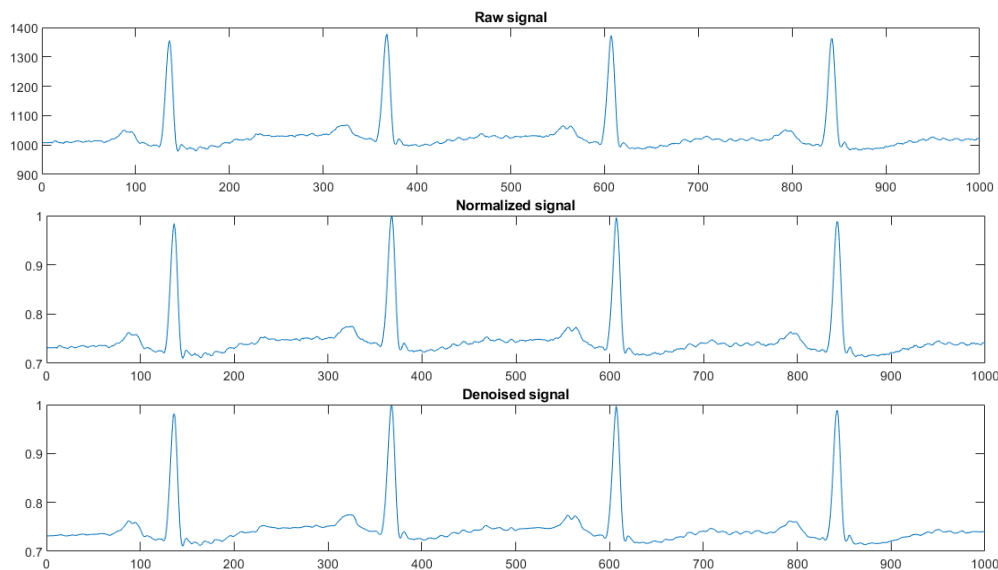


Figure 3. Original, normalized, and noise-removed images, for example, ECG signal from the MIT-BIH database.

The last stage of the preprocessing step is extracting heartbeat regions from the ECG signals. The R and RR interval values in the ECG signal are used for this process. Figure 4 shows an image of the extraction of heartbeat regions.

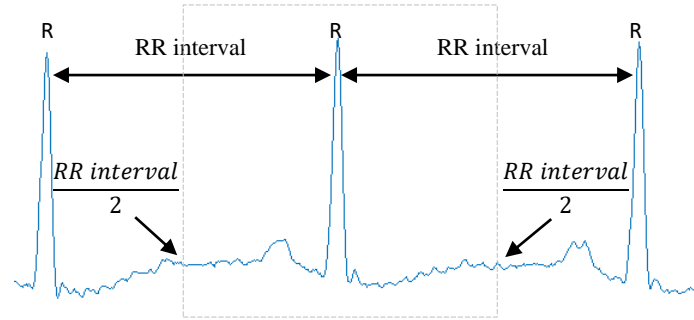


Figure 4. Identification of heartbeat regions.

RR intervals were calculated using the previous R-value and the next R-values for the heartbeat region to be determined. Then, the start and end points for the heartbeat to be received were determined by assessing the midpoint of these values.

C. VISUALIZATION OF HEARTBEATS

The main objective of this study is to classify ECG signals over images and to compare the performance of the methods used. For this purpose, SPEC, MEL, GFCC, CQT, and SCL images were obtained for each heartbeat obtained after the preprocessing step.

SPEC allows a time-varying signal to be moved into the frequency domain by applying a Fourier transform. Thus, the signal is transferred to the frequency domain, and the signal's energy is represented by colors in the spectrogram. To obtain MEL images, the frequencies in the SPEC are converted to the mel scale. If gamma tone filters are used instead of the mel scale, GFCC images are obtained. When the wavelet transform is used instead of the Fourier transform in the transition from the time domain to the frequency domain, the images to be obtained are also expressed as SCL. CQT transforms by creating a logarithmic gap between STFT and frequency transitions [43], [44] —sample images to be obtained after these transformations are given in Figure 5.

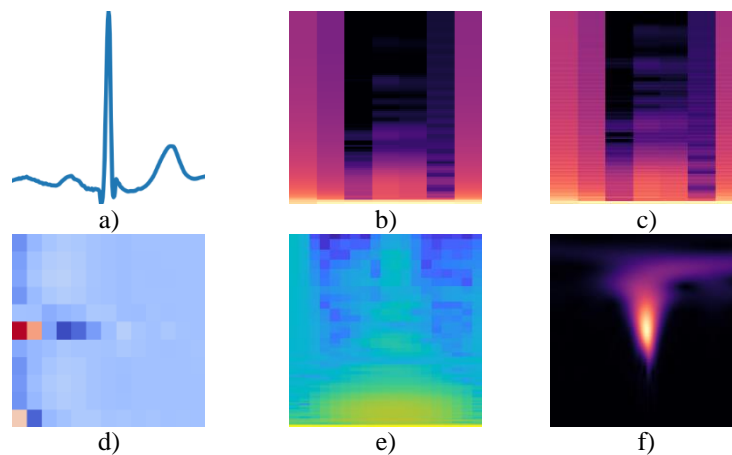


Figure 5. Visualization for an example heartbeat from the MIT-BIH database; *a)* Raw signal, *b)* SPEC, *c)* MEL, *d)* GFCC, *e)* CQT and *f)* SCL

D. HAND-CRAFTED FEATURES

Another experiment performed within the scope of the study is the hand-crafted features of the heartbeat signal. The features, linear spectrum, mel-spectrum, bark spectrum, MFCC, GTCC, spectral centroid, spectral entropy, pitch, and ZCR features were obtained from each heartbeat. These features were used as the input of the 1D-CNN model. In addition, the numerical values of the heartbeat signal were also used as input to the 1D-CNN model.

E. CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK (CNN)

Deep learning is an approach to machine learning in which the feature extraction process is performed in a network. The attributes to be used are realized in the network's learning process. Therefore, it provides higher success compared to classical methods [45]. Despite this high performance, deep learning models require more hardware and data. Thus, hardware with high processing power, such as GPUs, is needed.

CNN (Convolutional Neural Networks), often used in deep learning architecture, is a multilayer perceptron type. While CNN obtains more general features, such as edge information in the first layers, it obtains features representing the image in the advanced layers. CNN algorithms are used in many fields, such as image and audio processing, natural language processing, and biomedicine. The basic building blocks of any CNN consist of 4 main layers: convolution operator, ReLU, subsampling, and fully connected layer. These layers can be used more than once when building a CNN model. CNN models are modeled in 1D, 2D, and 3D. 1D-CNN is used for time series. 2D-CNN architecture is used in models using images as input. 3D-CNN, on the other hand, creates CNN models using 3D data as input.

In this study, a 1D-CNN model was created for the numerical values of the heart-beat signal and the hand-crafted features. The model is given in Figure 6.

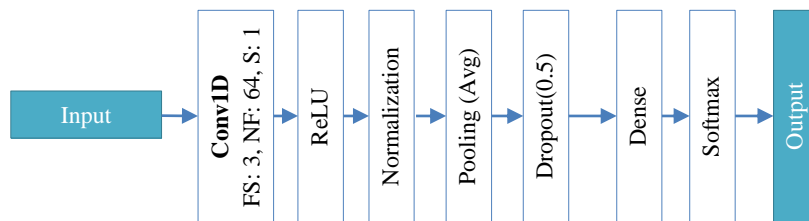


Figure 6. Structure of the 1D-CNN model (FS: FilterSize, NF: NumFilters, S:Stride)

For Exp7, the input to the model is the numerical data of the signal. For Exp8, the input is the hand-crafted features extracted from each signal.

A 2D-CNN model was created for the image of the heartbeat signal, and the SPEC, MEL, GFCC, CQT, and SCL images were obtained from this signal. The model is given in Figure 7.

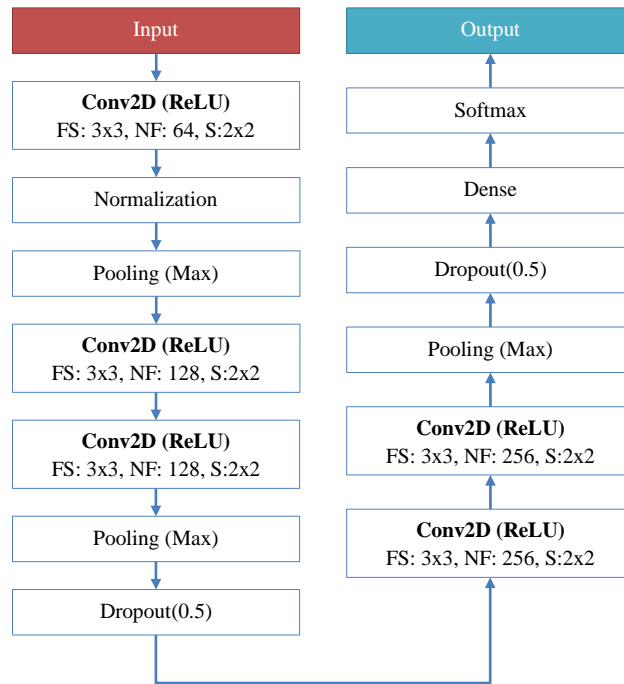


Figure 7. Structure of the 2D-CNN model (FS: FilterSize, NF: NumFilters, S:Stride)

The convolutional layer forms the basis of the CNN architecture and extracts features from the input. Since this process is performed by applying a filter to the data, the filter size, number, and stride value must be determined. Stride determines how many steps it takes to shift the filter on the input. The output of the convolutional layer is linear. However, the model also needs to learn non-linear problems. Therefore, activation functions are used, including various nonlinear activation functions such as sigmoid, tahn, and ReLU. However, ReLU is widely used because it gives faster results. Normalization is the normalization process between the layers of the CNN model and accelerates the training process. The pooling layer is used to reduce the number of features and computations. The dropout layer prevents overlearning by removing some neurons from the model during training. The dense layer is classified according to the information from convolution layers. The parameters used in the training phase of the CNN models are given in Table 3.

Table 3. Parameters used for CNN models.

Data selection for Training, Validation, and Testing	Random permutation
The portion of the data allocated for training	70%
The portion of the data allocated for validation	15%
The portion of the data allocated for the test	15%
Optimizer	Adam
Learning Rate	0.001
Epochs	30
Mini Batch Size	512

F. PERFORMANCE EVALUATION

There are various methods used to evaluate the success of classification problems. The confusion matrix gives the correctly and incorrectly classified examples for each class. With the help of the confusion matrix, measures such as precision, recall, f-score, and accuracy are used for performance evaluation. The recall is the ratio of the number of correctly classified positive samples to the sum of the number of correctly classified positive samples and the number of misclassified negative samples. Precision is the ratio of the number of correctly classified positive samples to the total number of positive samples. The F-score is the harmonic mean of the sensitivity and precision values. Accuracy is the ratio of the number of correctly classified samples to the total number of samples [46].

In the experiments, accuracy and loss graphs were obtained for training and validation during the training process of the models and given in the results section. A testing process was created and evaluated the success of the models with accuracy, precision, recall, and f-score criteria to evaluate the success of the models. For this purpose, 30% of the data was used for training, 15% for validation, and 15% for testing. The equations for the performance metrics used are given in Equations 1, 2, 3 and 4 [47].

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$f - score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (3)$$

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

II. EXPERIMENTAL RESULTS

In this study, six different images were obtained from heartbeat sound signals to classify ECG signals. ECG classification was performed with 2D-CNN using these six different images. In addition, to compare the performance of image and audio signal data, classification was made with 1D-CNN using the numerical values of the signal and the features obtained by signal processing (hand-crafted). Thus, eight experiments were conducted to classify ECG signals, and the results were compared. The test data classification metrics of the models trained with 1D-CNN and 2D-CNN are given in Table 4.

Table 4. Performance values obtained with the test dataset.

Exp	Model	Input	Precision	Recall	Accuracy	F-score
Exp1	2D-CNN	SPEC	0.9969	0.9971	0.9975	0.9970
Exp2	2D-CNN	MEL	0.9975	0.9970	0.9977	0.9972
Exp3	2D-CNN	GFCC	0.9935	0.9933	0.9934	0.9934
Exp4	2D-CNN	CQT	0.9946	0.9962	0.9963	0.9954
Exp5	2D-CNN	SCL	0.9958	0.9958	0.9963	0.9958
Exp6	2D-CNN	Raw Signal	0.9992	0.9985	0.9991	0.9989
Exp7	1D-CNN	Raw Signal	0.3461	0.4598	0.4753	0.3830
Exp8	1D-CNN	Hand-crafted features	0.8754	0.8330	0.8524	0.8377

When the test results in Table 4 are examined, the numerical signal data for ECG classification shows very low success. In addition, although the classification accuracy obtained with 1D-CNN in Exp8 is 85.24%, the accuracy rates obtained with 2D-CNN models are higher. ECG classification successes with the 2D-CNN model are higher than the results of the studies in the literature. If the results obtained with the image datasets are examined, a success of over 99% has been achieved in all datasets. Among these, the highest success was achieved with the visualization of the ECG sound signal, as 99.91%. Details of each experiment are given below as sub-items. All experiments were performed on MacBook Pro (i7 processor, 16GB RAM, and 512SSD).

A. CLASSIFICATION RESULTS WITH TIME-FREQUENCY DOMAIN IMAGES

In this section, the results obtained in Exp1 (SPEC), Exp2 (MEL), Exp3 (GFCC), Exp4 (CQT), Exp5 (SCL), and Exp6 are presented. The training, validation, and test data used in all six experiments were chosen to be the same for a more objective evaluation of the comparison results. The training and validation results obtained in the six experiments are given in Figure 8.

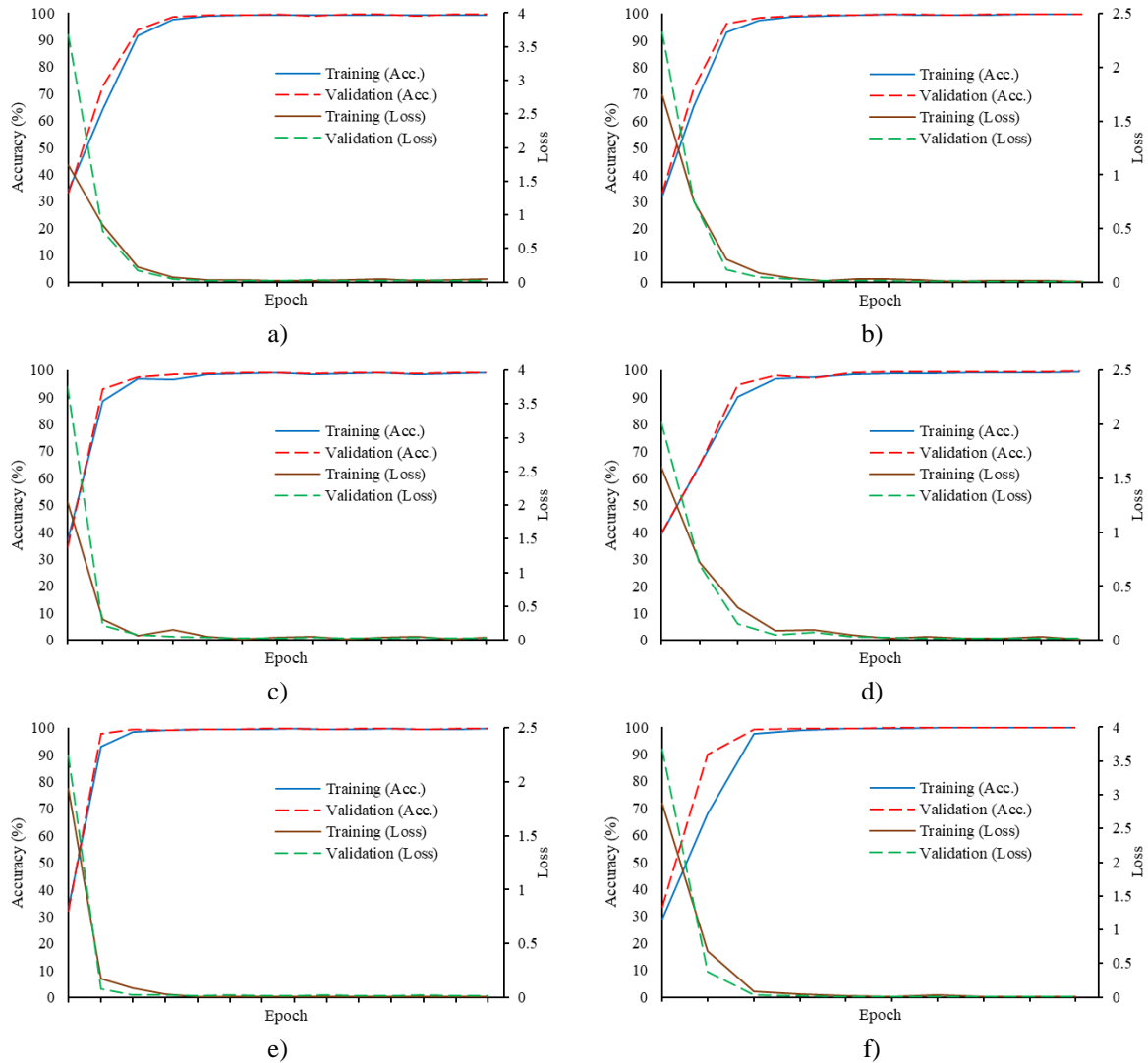


Figure 8. Training and validation results for 2D-CNN model *a) Exp1, b) Exp2, c) Exp3, d) Exp4, e) Exp5, f) Exp6*

As can be seen in the accuracy and loss graphs obtained on the 2D-CNN model and image datasets, the accuracy value is high, and the training value is low in all image datasets. Also, when the training and validation curves are analyzed, it is seen that there is no overfitting problem. The class-based classification achievements were examined using the test data (15% of the entire data set) for these six training experiments. The results obtained are given in Table 5.

Table 5. Class-based classification achievements were obtained with the test dataset for the first six experiments.

Experiments	Accuracy (%)				
	LBBB	RBBB	Normal	PVC	Overall
Exp1 (SPEC)	99.74	99.82	99.93	99.27	99.75
Exp2 (MEL)	99.66	100.00	99.79	99.56	99.77
Exp3 (GFCC)	99.48	99.54	99.10	99.27	99.34
Exp4 (CQT)	99.83	100.00	99.93	98.10	99.63
Exp5 (SCL)	99.22	99.91	100.00	99.19	99.63
Exp6 (Raw Signal)	99.74	100.00	99.93	100.0	99.91

The class-based accuracy rates in Table 5 are obtained from the confusion matrix obtained by classifying the test dataset. In the six experiments, the class-based success rates are evenly distributed. Another finding from the confusion matrix is that the LBBB and PVC classes are similar in 2D-CNN experiments. As in the training process, the highest success rate was obtained with the raw signal image (Exp6) in the testing process. These findings show that all six image types can be used successfully in heartbeat classification.

B. CLASSIFICATION RESULTS WITH 1D-CNN

The 1D-CNN model was used to classify the signal with raw digital data (Exp7) and hand-crafted features (Exp8). The training and validation graphs of the 1D-CNN model for Exp7 and Exp8 are given in Figure 9.

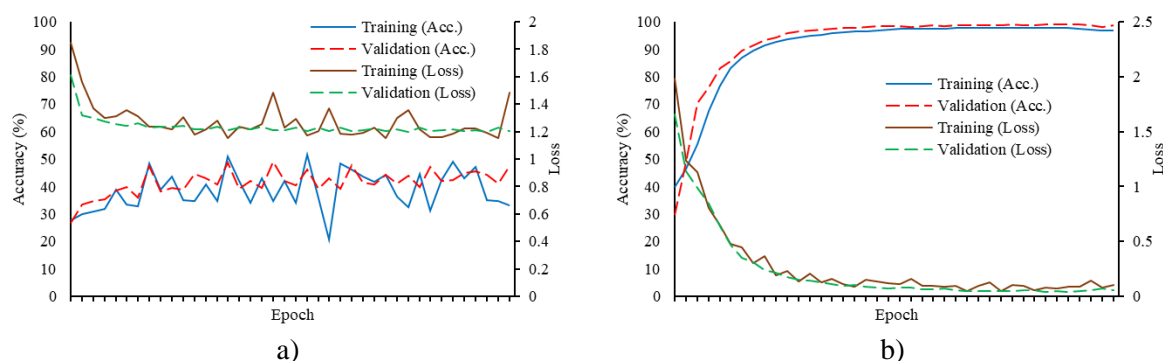


Figure 9. Training and validation results for 1D-CNN a) Exp7, b) Exp8

The training and validation results of the experiment (Exp7) using the 1D-CNN model and the raw numerical data of the signal show that this dataset is unsuitable for heartbeat classification. Because both the loss value is high, and the training value is low. Therefore, the model fails. This situation is also seen more clearly in the class-based achievements obtained because of the classification of the test dataset for Exp7. Accuracy was 0% for LBBB, 25.46% for RBBB, 92.51% for Normal, and 65.95% for PVC. This model can be used for normal-abnormal heartbeat classification and is unsuitable for multi-class problems.

Exp8 used the 1D-CNN model and hand-crafted features extracted from the heartbeat signal. This experiment's accuracy and loss curves show that the model can be used successfully in heartbeat classification. After a particular iteration, the accuracy value increased and went horizontal, while the loss value decreased and went horizontal. When the model is tested using the dataset allocated for testing, it cannot be said that the class-based accuracy rates are fully balanced. Accuracy was 94.83% for LBBB, 96.19% for RBBB, 82.31% for Normal, and 59.87% for PVC. The overall accuracy of the model is 85.24%. The unbalanced class-based accuracy rates are due to the PVC class, which has a lower accuracy rate than the other classes. Also, the PVC class is most like the LBBB class.

IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study uses raw signal data and time-frequency domain images for ECG signal classification. With these data, 1D-CNN and 2D-CNN models were created, and a comparative performance analysis was performed. For this purpose, ECG recordings from the MIT-BIH database were widely used in the literature. First, these recordings detected heartbeat regions, and digital and image datasets were created for these regions. The digital dataset contains raw digital signal data and hand-crafted features extracted from the signal. The heartbeat image, spectrogram, scalogram, CQT, GFCC, and mel-spectrogram images of the signal were used for the image dataset. In this context, eight experiments were performed, and each experiment's training, validation, testing, and loss results were analyzed.

The first six experiments with the image dataset achieved a classification accuracy of over 99%. Among these, the heartbeat signal's highest success rate was 99.91%. The class-based accuracy rates were evenly distributed in these six experiments, and no overfitting problem occurred. The other two experiments use the numerical values of the heartbeat signal. In the seventh experiment, numerical values for the heartbeat obtained from the MIT-BIH database were used, and classification was performed with 1D-CNN. The results obtained are unsuccessful according to the accuracy and loss values of the model. In addition, the class-based accuracy is high, especially for the normal class, but low for the other classes because of the classification performed on the test data. Especially in the LBBB class, the success rate is 0%. In the last experiment, feature extraction was performed on the numerical values obtained for a heartbeat, and training was performed with 1D-CNN. As a result of the training, both accuracy and loss curves show that the model can be used for the heartbeat. However, when the class-based accuracies are analyzed, the accuracy rate for the PVC class is low. The overall success of the model is 85.24%.

When the results of the experiments performed within the scope of the study are compared with the studies in the literature, the success rates of the experiments using 2D-CNN and images are higher than in the literature. The comparison of our results with the recent studies using the MIT-BIH database is given in Table 6.

Table 6. Comparison of the results obtained with the literature.

Method/Feature	Model/Classifier	Accuracy (%)
Our Exp. (Exp6-ECG signal)	2D-CNN	99.9
Our Exp. (Exp1-SPEC)	2D-CNN	99.8
Our Exp. (Exp2-MEL)	2D-CNN	99.8
TERMA and FrFT	SVM	99.8 [12]
Grayscale ECG Signal	2D-CNN	99.7 [10]
Our Exp. (Exp4-CQT)	2D-CNN	99.6
Our Exp. (Exp5-SCL)	2D-CNN	99.6
ECG Signal	CNN and GRU	99.6 [11]
ECG Signal, R-peaks, RR interval	CNN	99.6 [16]
SWT feature and RR interval	1D-CNN	99.4 [15]
ECG Signal	CNN	99.4 [35]
Our Exp. (Exp3-GFCC)	2D-CNN	99.3
ECG Signal	CNN+ELM	98.8 [13]
ECG Signal	2D-CNN	98.7 [48]
ECG Signal	1D-CNN	98.5 [20]
RR-intervals, higher-order-statistic features, DWT	Random Forest	95.7 [14]
Third Order Cumulant	SqueezeNet	94.6 [49]
Spectrogram	ResNet-18	91.0 [18]
Our Exp. (Exp8-handcrafted feat.)	1D-CNN	85.2
Our Exp. (Exp7-raw signal)	1D-CNN	47.5

When the results given in Table 6 are examined, the accuracy rate obtained with the image of the ECG signal is higher than the studies in the literature. The accuracy rate obtained with spectrogram and mel-

spectrogram is the highest accuracy in the literature. The accuracy rates obtained with CQT, scalogram, and GFCC are between 0.2%-0.5% lower than the highest accuracy rates in the literature. Two experiments with 1D-CNN achieved lower accuracy than the studies in the literature.

The results of this study, which examined various inputs for deep learning, which has been widely used in the classification of ECG signals in recent years, showed that the numerical values of the signal for the heartbeat and the features to be obtained from these values showed low classification accuracy and could not entirely separate the similarity between the classes. The raw signal data and the 1D-CNN model showed low success for ECG classification. When 2D-CNN and six different image datasets were used for ECG classification, all images were highly successful for ECG classification. Among these, the highest success was achieved with the image of the heartbeat signal. An important issue encountered in the experiments is the high similarity rate in the classification of PVC and LBBB classes in image datasets compared to other classes.

The strengths of this study are the comparison of the 1D-CNN model with the 2D-CNN model and the performance analysis of ECG classification with different input data. In future studies, the imbalance in the datasets can be eliminated with data augmentation, and performance comparisons can be made. In addition, the success of texture analysis methods during the conversion of heartbeat signals into images can be examined.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

V. REFERENCES

- [1] O. M. A. Ali, S. W. Kareem, and A. S. Mohammed, "Evaluation of Electrocardiogram Signals Classification Using CNN, SVM, and LSTM Algorithm: A review," presented at 8th International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development (IEC), pp. 185–191, 2022.
- [2] "World health statistics 2018: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals - RELAC SIS | OPS/OMS," *Pan American Health Organization / World Health Organization*, 2018. <https://www3.paho.org/relacsis/index.php/es/noticias-relacsis/906-report-world-health-statistics-2018-monitoring-health-for-the-sdgs-sustainable-development-goals> (accessed Jan. 12, 2023).
- [3] E. J. Benjamin *et al.*, "Heart disease and stroke statistics—2019 update: a report from the American Heart Association," *Circulation*, vol. 139, no. 10, pp. e56–e528, 2019.
- [4] X. Liu, H. Wang, Z. Li, and L. Qin, "Deep learning in ECG diagnosis: A review," *Knowledge-Based Systems*, vol. 227, p. 107187, 2021.
- [5] U. R. Acharya, S. L. Oh, Y. Hagiwara, J. H. Tan, M. Adam, A. Gertych, and R. San Tan, "A deep convolutional neural network model to classify heartbeats," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 89, pp. 389–396, 2017.
- [6] G. De Lannoy, D. François, J. Delbeke, and M. Verleysen, "Weighted conditional random fields for supervised interpatient heartbeat classification," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 241–247, 2011.

- [7] H. V. Pipberger, R. J. Arms, and F. W. Stallmann, "Automatic screening of normal and abnormal electrocardiograms by means of a digital electronic computer," *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, vol. 106, no. 1, pp. 130–132, 1961.
- [8] H. Malik, U. Bashir, and A. Ahmad, "Multi-classification neural network model for detection of abnormal heartbeat audio signals," *Biomedical Engineering Advances*, vol. 4, p. 100048, 2022.
- [9] M. Cao, T. Zhao, Y. Li, W. Zhang, P. Benharash, and R. Ramezani, "ECG heartbeat classification using deep transfer learning with convolutional neural network and STFT technique," *arXiv preprint arXiv:2206.14200*, 2022.
- [10] M. Degirmenci, M. A. Ozdemir, E. Izci, and A. Akan, "Arrhythmic heartbeat classification using 2d convolutional neural networks," *Irbm*, vol. 43, no. 5, pp. 422–433, 2022.
- [11] G. Yao, X. Mao, N. Li, H. Xu, X. Xu, Y. Jiao, and J. Ni, "Interpretation of electrocardiogram heartbeat by CNN and GRU," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2021, 2021.
- [12] S. Aziz, S. Ahmed, and M.-S. Alouini, "ECG-based machine-learning algorithms for heartbeat classification," *Scientific reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [13] S. Zhou, and B. Tan, "Electrocardiogram soft computing using hybrid deep learning CNN-ELM," *Applied soft computing*, vol. 86, p. 105778, 2020.
- [14] T. Wang, C. Lu, W. Ju, and C. Liu, "Imbalanced heartbeat classification using EasyEnsemble technique and global heartbeat information," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 71, p. 103105, 2022.
- [15] D. Zhang, H. Zhou, F. Li, L. Zhang, and J. Wang, "A reparameterization multifeature fusion CNN for arrhythmia heartbeats classification," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2022, 2022.
- [16] A. Tyagi and R. Mehra, "Intellectual heartbeats classification model for diagnosis of heart disease from ECG signal using hybrid convolutional neural network with GOA," *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 1–14, 2021.
- [17] Y. Xu, S. Zhang, Z. Cao, Q. Chen, and W. Xiao, "Extreme learning machine for heartbeat classification with hybrid time-domain and wavelet time-frequency features," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2021, 2021.
- [18] E. Jing, H. Zhang, Z. Li, Y. Liu, Z. Ji, and I. Ganchev, "ECG heartbeat classification based on an improved ResNet-18 model," *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, vol. 2021, 2021.

- [19] E. Essa and X. Xie, "An ensemble of deep learning-based multi-model for ECG heartbeats arrhythmia classification," *IEEE access*, vol. 9, pp. 103452–103464, 2021.
- [20] E. Maghawry, T. F. Gharib, R. Ismail, and M. J. Zaki, "An efficient heartbeats classifier based on optimizing convolutional neural network model," *IEEE access*, vol. 9, pp. 153266–153275, 2021.
- [21] S. K. Pandey, R. R. Janghel, and V. Vani, "Patient specific machine learning models for ECG signal classification," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 2181–2190, 2020.
- [22] S. L. Oh, E. Y. Ng, R. San Tan, and U. R. Acharya, "Automated diagnosis of arrhythmia using combination of CNN and LSTM techniques with variable length heart beats," *Computers in biology and medicine*, vol. 102, pp. 278–287, 2018.
- [23] R. J. Martis, U. R. Acharya, and L. C. Min, "ECG beat classification using PCA, LDA, ICA and discrete wavelet transform," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, no. 5, pp. 437–448, 2013.
- [24] Y. H. Hu, W. J. Tompkins, J. L. Urrusti, and V. X. Afonso, "Applications of artificial neural networks for ECG signal detection and classification," *Journal of electrocardiology*, vol. 26, pp. 66–73, 1993.
- [25] N. Izeboudjen and A. Farah, "A new neural network system for arrhythmia's classification," *NC*, vol. 98, pp. 23–25, 1998.
- [26] J.-S. Wang, W.-C. Chiang, Y.-L. Hsu, and Y.-T. C. Yang, "ECG arrhythmia classification using a probabilistic neural network with a feature reduction method," *Neurocomputing*, vol. 116, pp. 38–45, 2013.
- [27] C. V. Banupriya and S. Karpagavalli, "Electrocardiogram beat classification using probabilistic neural network," *Int. J. Comput. Appl.(IJCA)*, vol. 1, no. 7, pp. 31–37, 2014.
- [28] N. Acir, "Classification of ECG beats by using a fast least square support vector machines with a dynamic programming feature selection algorithm," *Neural computing & applications*, vol. 14, no. 4, pp. 299–309, 2005.
- [29] M. Moavenian and H. Khorrami, "A qualitative comparison of artificial neural networks and support vector machines in ECG arrhythmias classification," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 3088–3093, 2010.
- [30] M. H. Song, J. Lee, S. P. Cho, K. J. Lee, and S. K. Yoo, "Support vector machine based arrhythmia classification using reduced features," *Artificial Intelligence in Medicine*, vol.44, no:1, pp. 51-64, 2005.

- [31] A. B. A. Qayyum, T. Islam, and M. A. Haque, "ECG heartbeat classification: A comparative performance analysis between one and two dimensional convolutional neural network," in *2019 IEEE International Conference on Biomedical Engineering, Computer and Information Technology for Health (BECITHCON)*, 2019, pp. 93–96.
- [32] C. Chen, Z. Hua, R. Zhang, G. Liu, and W. Wen, "Automated arrhythmia classification based on a combination network of CNN and LSTM," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 57, p. 101819, 2020.
- [33] H. Shi, C. Qin, D. Xiao, L. Zhao, and C. Liu, "Automated heartbeat classification based on deep neural network with multiple input layers," *Knowledge-Based Systems*, vol. 188, p. 105036, 2020.
- [34] Q. Xie, S. Tu, G. Wang, Y. Lian, and L. Xu, "Feature enrichment based convolutional neural network for heartbeat classification from electrocardiogram," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 153751–153760, 2019.
- [35] X. Xu, and H. Liu, "ECG heartbeat classification using convolutional neural networks", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8614–8619, 2020.
- [36] T. F. Romdhane, H. Alhichri, R. Ouni, and M. Atri, "Electrocardiogram heartbeat classification based on a deep convolutional neural network and focal loss," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 123, p. 103866, 2020.
- [37] K. Yadav, S. Tiwari, A. Jain, and A. K. Y. Dafhalla, "Deep learning based cardiovascular disease diagnosis system from heartbeat sound," *International Journal of Speech Technology*, pp. 1-12, 2021.
- [38] W. Ullah, I. Siddique, R. M. Zulqarnain, M. M. Alam, I. Ahmad, and U. A. Raza, "Classification of arrhythmia in heartbeat detection using deep learning," *Computational Intelligence and Neuroscience*, pp. 1–13, 2021.
- [39] Y. Liang, S. Yin, Q. Tang, Z. Zheng, M. Elgendi, and Z. Chen, "Deep learning algorithm classifies heartbeat events based on electrocardiogram signals," *Frontiers in Physiology*, vol. 11, 2020.
- [40] G. B. Moody, and R. G. Mark, "The impact of the MIT-BIH arrhythmia database," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 45–50, 2001.
- [41] Ö. Yakut, S. Solak, and E. Bolat, "IIR based digital filter design for denoising the ECG signal," *Journal Of Polytechnic*, vol. 21, no. 1, 2018.
- [42] Z. Dokur, "Yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar kullanılarak EKG vurularının sınıflandırılması," Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2023.

- [43] J. K. Das, A. Ghosh, A. K. Pal, S. Dutta, and A. Chakrabarty, "Urban sound classification using convolutional neural network and long short term memory based on multiple features," in *2020 Fourth International Conference On Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS)*, 2020.
- [44] Z. Huang, C. Liu, H. Fei, W. Li, J. Yu, and Y. Cao, "Urban sound classification based on 2-order dense convolutional network using dual features," *Applied Acoustics*, vol. 164, p. 107243, 2020.
- [45] M. A. Kızrak ve B. Bolat, "Derin öğrenme ile kalabalık analizi üzerine detaylı bir araştırma," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp. 263–286, 2018.
- [46] A.-M. Šimundić, "Measures of Diagnostic Accuracy: Basic Definitions," *EJIFCC*, vol. 19, no. 4, pp. 203–211, 2009.
- [47] P. Eusebi, "Diagnostic Accuracy Measures," *Cerebrovascular Diseases*, vol. 36, no. 4, pp. 267–272, 2013.
- [48] H. Xie, H. Liu, S. Zhou, T. Gao, and M. Shu, "A lightweight 2-D CNN model with dual attention mechanism for heartbeat classification," *Applied Intelligence*, 2022.
- [49] A. M. Alqudah, S. Qazan, L. Al-Ebbini, H. Alquran, and I. A. Qasmieh, "ECG heartbeat arrhythmias classification: a comparison study between different types of spectrum representation and convolutional neural networks architectures," *J Ambient Intell Human Comput*, vol. 13, no. 10, pp. 4877–4907, 2022.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

İnsansız Hava Araçları ile Orman Yangınlarının Tespitinde Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Tabanlı Otomatik Bir Model

 Mustafa Alptekin ENGİN^a,  Serhan KÖKHAN^{b,*}

^a Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, TÜRKİYE

^b Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: serhankokhan@bayburt.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1103375

ÖZ

Nefes almak için gereksinim duyduğumuz oksijenin büyük bir kısmı, hayatta kalabilmemiz için hayati öneme sahip olan ormanlar tarafından üretilir. Bu yüzden ormanları korumak, içinde yaşadığımız yüzyılın en önemli konu başlıklarından bir tanesidir. Dünyanın farklı coğrafyalarında (ABD, Avustralya vb.) her yıl meydana gelen orman yangınları ciddi ekonomik kayba neden olmakta ve ekosistemi olumsuz olarak etkilemektedir. Ateşin çeşitli renk, şekil ve doku özelliklerine sahip olması orman yangınlarının uzaktan algılanmasını zorlaştırmaktadır. Yapılan bu çalışmada orman yangınlarının tespitinde insansız hava araçları vasıtasıyla tamamen otomatik bir sistem önerilmiştir. Ormanlık arazinin tespitinde uydu görüntüleri üzerine görüntü bölütleme yöntemi kullanılmış, insansız hava aracının tespit edilen bölgeyi en kısa zamanda ve en az görüntü ile kontrol edebilmesi için de küme kaplama yöntemi kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen imgeler üretilen yapay zekâyâ dayalı ateş algılama modeline göre değerlendirilip başlangıç ve ileri aşamadaki yangınlar tespit edilmiş ve konumları elde edilmiştir. Sonuç olarak, yapılan çalışmada yaklaşık %97,51 değerinde doğrulukla yangın tespit eden bir erken uyarı modeli önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yangın Algılama, Görüntü İşleme, Küme Kaplama, Yapay Zekâ

An Automatic Model Based on Image Processing and Artificial Intelligence via Unmanned Aerial Vehicles in Detection of Forest Fires

ABSTRACT

Most of the oxygen we need to breathe is produced by forests, which are vital to our survival. Therefore, protecting forests is one of the most critical issues of the century. Forest fires that occur every year in different geographies of the World (USA, Australia etc.) cause severe economic loss and negatively affect the ecosystem. The fact that fire has various colors, shapes, and textures makes it challenging to detect forest fires from a distance. In this study, a fully automatic system is proposed by means of unmanned aerial vehicles in the detection of forest fires. The image segmentation method on satellite images was used in the detection of the forested land, and the cluster overlay method was used in order for the unmanned aerial vehicle to control the detected area in the shortest time and with the least amount of images. Then, the images obtained were evaluated according to the fire detection model based on artificial intelligence, and the initial and advanced stage fires were determined, and their locations were obtained. As a result, an early warning model that detects fire with an accuracy of approximately 97.51% is proposed in the study.

Keywords: Fire Detection, Image Processing, Set Covering, Artificial Intelligence

I. GİRİŞ

Orman yangınları, çoğunlukla doğal alanlarda meydana gelen, rüzgâr, hava ve bitki örtüsü gibi faktöre bağlı olarak etki alanını arttırabilen, tarım arazilerini, yerleşim alanlarını ve dolayısıyla insanları etkileyen, kontrol edilmesi oldukça zor bir yangın türüdür [1]. Diğer doğal afetlerden farklı olarak, orman yangınlarının farklı sebepleri bulunmaktadır. Bunlar; yıldırım, yuvarlanan kayalardan çıkan kıvılcıklar, volkanik faaliyetler gibi doğal kaynaklı sebepler ile kamp ateşi, anız yakma, sönmemiş sigara izmariti, elektrik kontağı gibi ateş kaynağının yanıcı madde ile temas etmesinden kaynaklanan insan kaynaklı sebeplerdir [2, 3].

Orman yangınlarının kısa ve uzun dönemli birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Örneğin orman yangınları ulaşımı, iletişimi, elektrik ve doğalgaz hizmetlerini ve su tedarikini sekteye uğratabilmektedir. Ayrıca hava kalitesinin bozulmasına [4] ve mülk, mahsul, kaynak, hayvan ve insan kaybına yol açabilmektedir [5]. Orman yangınları aynı zamanda atmosfere büyük miktarlarda karbondioksit, karbon monoksit ve ince partikül madde salarak havayı ve iklimi de etkilemesi gibi sebeplerden dolayı oluşan hava kirliliği, solunum ve kardiyovasküler problemler de dâhil olmak üzere bir dizi beden sağlık ve ruh sağlığı sorununa neden olabilmektedir [6].

Günümüzde bölgesel ve küresel iklim değişiklikleri nedeniyle orman yangınlarının sıklığı ve büyüklüğü gün geçtikçe artmaktadır [7]. Artan sıcaklık ortalamaları ile birlikte uzun dönem yağışsız geçen günler ve beraberinde gerçekleşen düşük yanıcı madde nemi değerleri, yangınların başlangıcını ve yayılmasını kolaylaştırıcı bir etkiyi ortaya koymaktadır. Orman yangınlarının bu vb. olumsuz sonuçları dikkate alındığında, bu süreçte etkin önleme ve erken uyarı mekanizmalarının oluşturulmasının önemi artmaktadır. Teknolojik gelişmeler yangınların önceden tahmin edilebilmesine imkân veren sistemlerin oluşturulmasında yeni fırsatlar sunmaktadır [8]. Fakat bazı durumlarda tahmin sistemlerinin kullanılmasına rağmen yine de olası yangınların tespiti ve önlenme sürecinde aksaklıklar yaşanabilmektedir. Bu durumlarda bir sonraki aşama olan başlangıç seviyesinde olan yangınların tespiti öne çıkmaktadır. Orman yangınlarının olası kısa vadeli zararlarının yanında uzun yıllar sürebilen olumsuz etkilerinin olabilmesi, çok daha etkin bir kontrol stratejisinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [9]. Orman yangınlarının çıkışı ve gelişmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar iki ana kategoride sunulmuştur. Bunlar; yangın yönü ile yangın gelişimi ve yayılımına yönelik tahmin modelleme yaklaşımlarıdır [10,11]. Yangın tahmin modelleme yaklaşımları da olası yangınların tespiti ve başlangıç aşamasında olan yangınların tespiti olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır.

Olası yangınların tespiti yaklaşımlarında; 2021 yılında yapılan bir çalışmada Nijer geçiş ormanı içindeki orman yangınlarının seviyeleri ve risk bölgeleri belirlenmiş ve modellenmiştir [3]. Yine benzer şekilde Sivrikaya ve Küçük, bir orman yangını risk haritası oluşturmaya yönelik entegre bir yaklaşım önermişler, analitik hiyerarşi süreci (AHP) ve bir istatistiksel indeks (SI) ile coğrafi bilgi sistemi tabanlı çok kriterli karar analizini (GIS-MCDA) kullanmışlardır [4]. Model önerisinde bulunan Francos ve Übeda da yangının toprak, su ve bitki örtüsü üzerindeki etkilerine ilişkin çalışmaları incelemişler ve bir yangın yönetimi için etkin bir model önermiş ve bu parametrelerin geçerliliğini araştırmışlardır [12]. Yapılan bu çalışmaları kategorik olarak değerlendiren Naderpour vd. orman yangını duyarlılığı, tehlikesi ve risk değerlendirmesi için kullanılan yöntemlerin sistematik bir literatür incelemesini yapmış ve temelde dört genel kategoriye ayırmışlardır. Bunlar istatistiksel ve veriye dayalı modeller, makine öğrenimi modeller, çok kriterli karar verme modelleri, topluluk modelleridir [5].

Başlangıç aşamasında olan yangınların ve konumlarının hızlı bir şekilde saptanarak ilgili yetkililere anlık bilgilerin ulaştırılması önem arz etmektedir [16]. Geç kalınmış tespitler genellikle yangın olaylarının şiddetinin artmasına ve müdahale etkinliğinin düşmesine sebebiyet vermektedir [13,14,15]. Bu nedenle, doğru ve etkin erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesi önemlidir [16, 17, 18]. Özellikle son dönemde gelişen teknolojilerin etkisiyle bu alanda birçok yeni araştırma alanı da ortaya çıkmıştır. Bunlar yangın tespiti konusunda yapılan mevcut çalışmalar; kablosuz teknolojiler ve nesnelerin interneti (IoT) aracılığı ile kurulan sistemleri, insansız hava araçlarını (İHA), uydu teknolojilerini ve görüntü

işleme tekniklerini kullanan sistemleri konu başlıklarında incelenmiştir. Bu çalışmalar; 2016 yılında yapılan bir çalışmada, Spatio Wildfire Tahmin ve İzleme Sistemindeki (SWPMS) olası yanlış alarmların ortadan kaldırılması üzerine IoT tabanlı bir sistem önerilmiştir [19]. Diğer bir çalışmada ise tarımsal faaliyetlerde aktif yangın erlerinin tespiti, yayılması ve izlenmesi için bir IoT modülü, IoT sensör tabanlı detektörlerden oluşan derin öğrenme tabanlı bir model önerilmiştir [20]. 2021 tarihli bir çalışmada ise IOT tabanlı kablosuz haberleşme destekli geliştirme kartı (ESP32) üzerinde, yağmur sensörleri, ses sensörü, sıcaklık ve nem sensörü, pasif kızılötesi sensörü kullanarak geliştirilen cihaz ile yangınların tespiti üzerine bir model önerilmiştir [21]. AL-Dhief vd. yaptıkları çalışmada, reaktif Konum Destekli Yönlendirme (KDY), proaktif Optimize Edilmiş Bağlantı Durumu Yönlendirme ve KDY Tabanlı Güvenilir Yönlendirme Protokolü gibi Mobil Geçici Ağ yönlendirme protokollerine dayalı olarak orman yangını tespitinde kullanılan modern teknikler kapsamlı bir incelenmiştir [22]. Martinez vd., görsel ve kızılötesi mikro kamera ve yangın sensörü barındıran 3 İHA kullanarak, Çoklu Heterojen İnsansız Hava Araçlarının Gerçek Zamanlı Koordinasyonu ve Kontrolü projesi dâhilinde, sisteminin yetenekleri ve performansı, otomatik yangın algılama, doğrulama, lokalizasyon ve izleme üzerine çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır [23]. Dios vd. çalışmalarında, kızılötesi ve görsel kameralarla donanımlandırılmış İHA'ların yangın tespitinde kullanımları incelemiştir [24]. Martins vd. FALCOS İHA'ya yerleştirilen düşük maliyetli dijital kameralar ve yakın kızılötesi sensörler ile yangın algılama sistemleri üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır [25]. Özkan çalışmasında, literatürde orman yangınlarını tespit etmeyi amaçlayan İHA sistemleri için bir matematiksel model geliştirmiştir. Modelde meteorolojik veriler ile oluşturulan günlük yangın risk haritaları dikkate alınarak uygun rotalarla yangın tespiti amaçlanmıştır [26]. Sudhakar vd. çalışmalarında, orman yangınlarının tespitinden İHA'lar için geçerli olan güvenilir ve kesin bir tanıma algoritması önermişlerdir [27]. Mohajane vd. Fas'ın kuzey bölgesindeki orman yangını duyarlılığını haritalamak için Frekans Oranı-Çok Katmanlı Algılayıcı (FR-MLP), Frekans Oranı-Lojistik Regresyon (FRLR), Frekans Oranı-Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (FR-CART), Frekans Oranı- Destek Vektör Makineleri (FR-SVM) ve Frekans Oranı-Rastgele Ormanlar (FR-RF) olmak üzere beş yeni hibrit makine öğrenme algoritması geliştirmişlerdir [28]. Singh vd. orman yangını tahmin güvenilirliğine yönelik bir paralel Destek Vektör Makinesi (SVM) uygulaması geliştirilmiştir [29]. Filizzola vd. çalışmalarında, birçok zamanlı değişiklik algılama tekniği olan, yangın algılama ve izleme için kullanılan RST-FIRES ve bunun görünür/kızılötesi görüntüleyici verileriyle MSG-SEVIRI entegrasyonuna yönelik bir uygulama yapmışlardır [30]. Bernabeu ve ark. (2004) pasif kızılötesi sensörler aracılığıyla otomatik orman yangını gözetimi için bir tahmin/tespit şeması önermişlerdir [31]. Sousa vd. tarafından önerilen yaklaşımda, orman yangını algılama uygulamalarındaki derin öğrenme yaklaşımlarının, çapraz doğrulama ile birlikte veri büyütme için önerilen çerçeveler çizilmiştir [32]. Yang vd. çalışmalarında denetim bilgilerinin etkileşimli dışbükey gövdeler tarafından sunulduğu piksel düzeyinde orman yangını görüntüleri için normal dikdörtgen düzenli şekilli bölgeler yerine, çokgen (düzensiz) yangın ve yangın olmayan bölgelerin görsel olarak seçilmesi için bir dışbükey gövde algoritması önermişlerdir [33]. Sharma vd. çalışmalarında yangın algılama sistemi için kablosuz sensör teknolojileri, İHA'lar ve bulut bilişimin birleşiminden oluşan entegre bir sistem önermişlerdir. Önerilen sistem sensör verilerine dayalı olarak gönderilen İHA'nın gerçek zamanlı görüntüleri elde etmesiyle farklı görüntü işleme tekniklerinin uygulanmasına dayanmaktadır. Bu çalışmada başarımlar, yangının tespit doğruluğu oranı açısından %98 olarak verilmektedir [34].Liu vd. tarafından yapılan çalışmada, iki seviyeli bir sınıflandırıcıya dayalı bir orman yangını görüntü tanıma algoritması önerilmiştir [35]. Hu vd. orman yangını dumanı hedef tespitinin doğruluğunu ve etkinliğini geliştirmek için orman yangını dumanı tespiti için bir yöntem önermişlerdir [36]. Wang vd., Güney Georgia'da orman yangınlarını tespit etmeyi amaçlayan ve seçilen uydudan türetilen indekslerin “normalleştirilmiş çok bantlı kuraklık indeksi (NMDI), normalleştirilmiş fark su indeksi (NDWI) ve normalleştirilmiş yanma oranlarının (NBR)” tespitine yönelik bir model sunmuşlardır [37]. Orman yangınlarının erken tespiti üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise görüntü işleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak %96 değerinde doğruluk değerine ulaşılmıştır [38].

Bu çalışmada, başlangıç aşamasındaki orman yangınlarının erken tespitinin yapılabilmesi için İHA vasıtası ile tamamen otomatik olarak çalışan ve başarımları yüksek bir uyarı mekanizması önerilmiştir. Çalışma için uygulama alanı olarak Bayburt ilinde bulunan Aslandağı Vilayet Ormanı seçilmiştir. İlgili bölgeye ait uydu görüntüleri kullanılarak temel görüntü işleme ve optimizasyon yöntemleri aracılığı ile orman arazisini en az sayıda imge kullanarak inceleyebilmek için koordinatlar tespit edilmiştir. Elde

edilen fotoğraflarda yangın olup olmadığına ise yine görüntü işleme ve derin öğrenmeye dayalı teknikler kullanılarak karar verilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

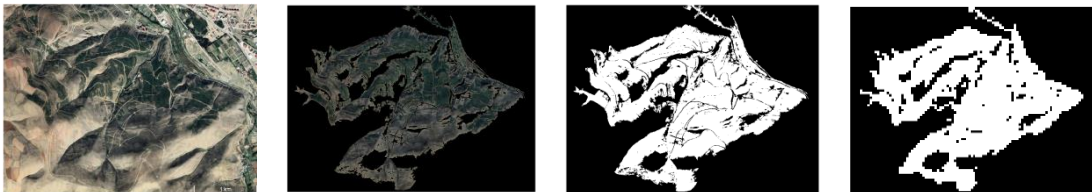
Yapılan çalışmanın akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Yapılan çalışmada öncelikle Bayburt Aslındağı Vilayet Ormanı'na ait Landsat uydu programından alınan uydu görüntülerine (Kasım, 2021), görüntü bölütleme (image segmentation) yöntemi uygulanmıştır. Bayburt Valiliği'nce 1995 yılında projelendirilerek uygulamaya konulan Aslan Dağı Vilayet Ormanı'na bugüne kadar toplam 624.438 adet sarı çam, akasya, alyantus, S. söğüt, N. söğüt, Süs ağacı, Akçağaç ve Y. akasya türlerinden ağaçlar dikilmiştir. Bu yöntemde ormanlık arazi dışındaki tüm yapılar maskeleyme ile inceleme alanının dışında tutulmuştur. Daha sonra elde edilen siyah beyaz görüntüde çözünürlük düşürülerek beyaz ile gösterilen orman arazisinin daha az piksel ile temsili sağlanmıştır. Yeniden boyutlandırılmış bu imgedeki orman arazisine ait piksel bilgileri kullanılarak küme kaplama yöntemi ile ormanlık arazinin en düşük adette fotoğraf sayısı ile temsili sağlanmıştır. İHA ile fotoğraf alınmasında en uygun noktalar tespit edildikten sonra görüntü filtreleme ve yapay zekâ teknikleri kullanılarak yangın tespiti üzerine bir model geliştirilmiştir. Fotoğrafların alındığı noktalarda yangın tespit edilmesi durumunda ise ilgili koordinatın elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 1. Sistemin akış şeması

A. ORMANLIK ARAZİNİN TESPİTİ

Yapılan çalışmada, uygulama alanına ait elde edilen uydu görüntüsü kullanılarak Matlab 2021b yazılımındaki imge bölütleme araç çubuğu aracılığı ile ormanlık arazinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama bir görüntüyü eşikleme, kümeleme, grafik tabanlı bölütleme ve bölge büyütme gibi birçok yöntem vasıtası ile bölümlere ayırma işlemini gerçekleştirme kabiliyetine sahiptir. Bazı bölütleme teknikleri belirli imge türlerinde diğerlerinden daha yüksek başarımda sonuç verebilmektedir [39]. Yapılan çalışmada ilgili yazılımın otomatik kümeleme seçeneği kullanılmıştır. Bu yöntem bir görüntüyü ön ve arka plan öğelerine bölmek için kullanılan otomatik bir bölütleme tekniğidir. Görüntünün bölümlere ayrılmasının ardından ikili maskeyi kaydetmek ve yapılan ayarların kodlarını alıp başka imgelere de aynı şekilde tatbik etmek mümkündür. Şekil 2'de uygulama alanına ait uydu görüntüsü, bölütlenmiş ve maskelenmiş imge, Siyah beyaz renk dönüşümü yapılan imge ve çözünürlüğü düşürülmüş imge gösterilmektedir. Yapılan çalışmada imge bölütleme işleminin daha verimli gerçekleştirilebilmesi için yüksek çözünürlükteki (1024 x 768) uydu görüntüsü kullanılmıştır. Bölütlenmiş imgeyi daha sonra siyah beyaz hale getirmek ve çözünürlüğü düşürmekteki amaç ise küme kaplama yönteminde kullanılacak beyaz noktaları belirlemek ve bu noktaların sayısını azaltmaktır.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 2. (a) Bayburt Aslındağı Vilayet Ormanı uydu görüntüsü, (b) İmge bölütleme ile ormanlık alanların tespiti, (c) Orman arazisini gösteren siyah beyaz imge, (d) Siyah beyaz imgenin yeniden boyutlandırma ile çözünürlüğünün 1/10 oranında düşürülmesi.

B. KÜME KAPSAMA YÖNTEMİ

Küme kapsama yöntemi, tanımlı bir şebeke üzerinde bütün düğümlere daha önceden belirlenmiş bir zaman veya mesafe (r) içerisinde en az bir kez ulaşılabilecek şekilde en az sayıda noktanın tespitine yönelik geliştirilmiş bir çözüm yöntemidir. Başka bir ifadeyle küme kapsama probleminde, her talep düğümünün en az bir tesis tarafından kapsanması için sonlu bir aday tesisler kümesi arasından en düşük maliyetli tesisler kümesinin bulunması amaçlanır [40]. Bu yöntem çoğunlukla ambulans, itfaiye aracı, mobil polis ekibi vb. tesislerin tespiti için yer seçiminde kullanılmaktadır.

Çalışmada ormanlık alanda tarama yapacak İHA'nın tüm alanları kapsayacak şekilde uygun rotalarda uçabilmesi için uygun geçiş koordinatları küme kapsama yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Yöntemde kullanılan matematiksel modelde; amaç fonksiyonu (1) ile en az nokta dolaşımı ile tüm alanların görüntüsünün alınması hedeflenmektedir. 1. kısıt (2) tüm noktaların mutlaka bir kapsama alanı içerisine alınmasını, 2. kısıt (3) y_k değerini (0,1) tamsayısı olmasını sağlamaktadır. Modelde; Z amaç fonksiyonu değerini, y_k her bir koordinat noktasını, a_{ik} iki nokta arasındaki uzaklık değerini ifade etmektedir.

Amaç Fonksiyonu;

$$\text{Min } Z = \sum_{k \in N} y_k \quad (1)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{k \in N} a_{ik} y_k \geq 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in N \quad (3)$$

Karar Değişkenleri;

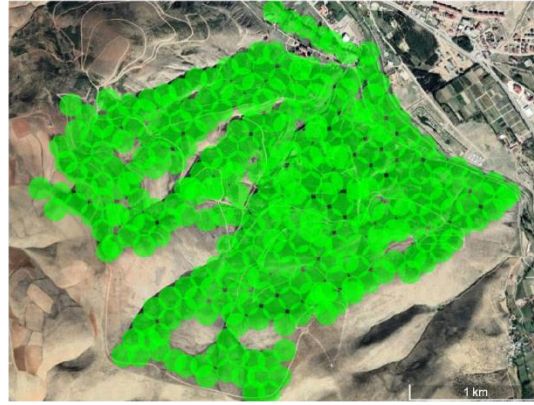
$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ noktası, geçiş koordinatı olursa } \forall k \in N \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (4)$$

$$a_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } k \text{ noktası ile } i \text{ noktası arasındaki mesafe } r' \text{ ye eşit veya az ise } (\forall i, k \in N) \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (5)$$

Halk arasında drone olarak da bilinen İHA'lar, modern çağın en dinamik ve çok boyutlu teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji, koli teslimatı, spor yayını vb. ticari görevlerden araştırma uygulamalarına kadar farklı alanlarda aktif olarak kullanılmaktadır. [41]. Yapılan çalışmada döner kanatlı İHA'nın 100 metre yükseklikten uçtuğu takdirde dikey konumda çekilen bir fotoğraf ile yaklaşık 6 dekar boyutunda arazinin kapsanabileceği (Google Earth uygulaması ile 100 metre yükseklikten alınan resmin dairesel hale getirilmesi ile) hesaplanmıştır. Kullanılan uydu görüntülerindeki çözünürlük bilgisi aracılığı ile görüntüdeki bir pikselin yaklaşık 4 metrelik bir mesafeye tekabül edeceği bulunmuştur. Küme kaplama yönetiminde kullanılması gereken dairesel görüntüler ise Şekil 3'de şekliyle oluşturulmuştur. Görüntü kaybını ortadan kaldıracak şekilde oluşturulan dairesel alanların merkezi gezilecek noktalar olarak belirlenmiştir. Bu noktalar ilgili alanları temsil etmektedir. Bu verilerin kullanılması ile küme kaplama yönteminin uygulanmasından sonra elde edilen en uygun görüntü yakalama noktaları daha sonra çözünürlük geliştirme ile orijinal uydu görüntüsüne uygulanmıştır. Şekil 4'de yapılan çalışmada küme kaplama yöntemi ile elde edilen görüntü yakalama noktaları ve kapsama alanları gösterilmektedir.



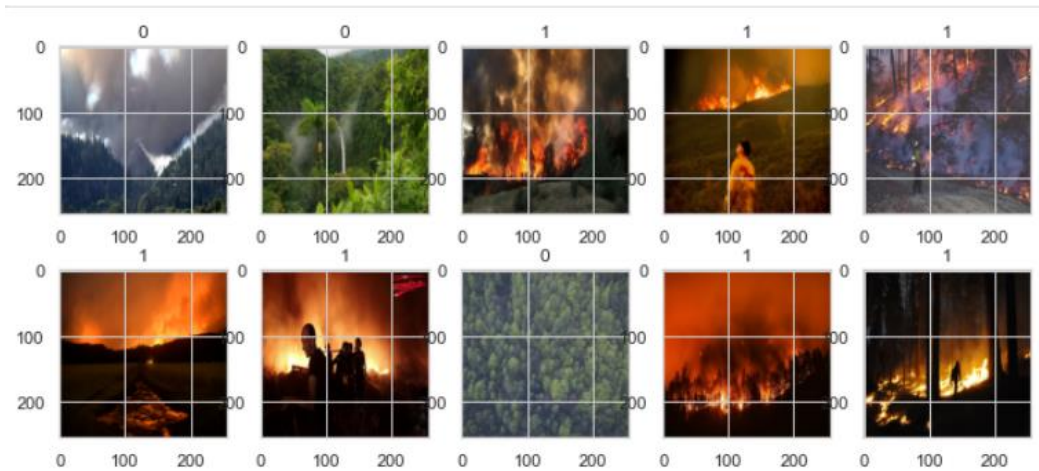
Şekil 3. Küme kaplama yönteminde kullanılacak dairesel alan tespitinde görüntü seçimi



Şekil 4. Küme kaplama ile ormanlık alanda görüntü yakalama aygıtı için en uygun konumlarının tespiti ve kapsama alanı

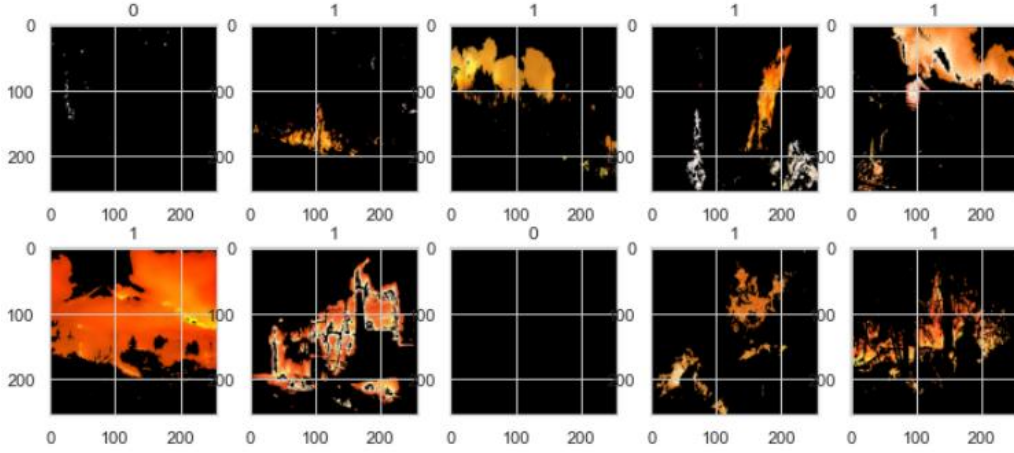
C. YANGIN TESPİTİ

Yapılan çalışmada yangın tespiti üzerine geliştirilen karar verici modelinde python programlama dili ve açık kaynak Kaggle yangın veri tabanı kullanılmıştır [42]. Şekil 5'te örnek imgeler verilen ilgili veri tabanında, 755 adet muhtevasında ateş olan ve 244 adet ateş bulunmayan görüntü mevcuttur.



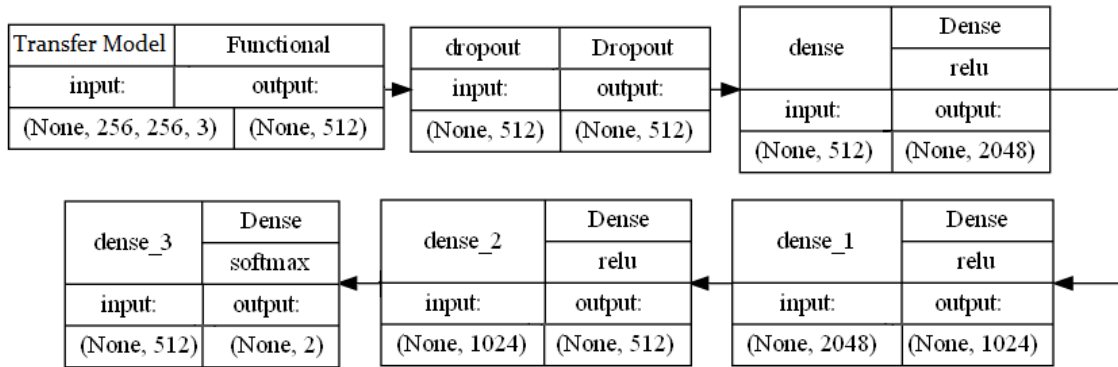
Şekil 5. Veri tabanına ait örnek imgeler (0-yangın yok 1-yangın var)

Kullanılan veri tabanın büyük bir veri tabanı olması dolayısıyla, içeriğinde farklı çözünürlük değerinde ve farklı renk uzayında verilerin bulunma ihtimaline karşılık ilk olarak veri tabanındaki tüm görüntülerin aynı çözünürlük değerinde ve aynı renk uzayında incelenmesi için 256x256 piksel içerecek şekilde yeniden boyutlandırma ve RGB renk uzayına dönüştürme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yangın var (1) ve yangın yok (0) olarak etiketlenen tüm imgelere Şekil 6'da gösterildiği üzere içeriğinde yangına ait renkleri tespit eden ve diğer renklerden ayırt eden bir renk filtresi uygulanmıştır. Kullanılan filtrede, piksel bazında, kırmızı değerlerin yeşil değerlerden büyük olması, yeşil değerlerin mavi değerlerden büyük olması ve kırmızı değerlerin 200 değerinden büyük olması olmak üzere ($R>G$ ve $G>B$ ve $R>200$) üç koşulun aynı anda sağlanması incelenmektedir.



Şekil 6. Veri tabanına renk filtresi uygulanması ile elde edilen örnek imgeler(0- yangın yok 1- yangın var)

Renk filtresi uygulanması işleminden sonra makine öğrenmesine dayalı kör ve adil bir sınıflandırmanın gerçekleştirilebilmesi için, veri setindeki tüm imgeler %80 eğitim, %20 test veri kümesi olarak kullanılacak şekilde rastgele şekilde ayrılmıştır. Daha sonra başarıyı kanıtlanmış, VGG16, AlexNet, InceptionV3 ve Resnet50 mimarileri, aktarım öğrenme (transfer learning) tekniği kullanılarak sınıflandırma modeli eğitilmiştir. VGG16, görsel nesne tanımda büyük bir veri tabanı projesi olan ImageNet için yaygın olarak kullanılan bir Evrimsel Sinir Ağı mimarisidir.



Şekil 7. Derin öğrenmeye dayalı kullanılan modelin ayrıntıları

VGG16, 2014 yılında Oxford Üniversitesi'nden Karen Simonyan ve Andrew Zisserman tarafından geliştirilmiş ve tanıtılmıştır [43]. VGG ifadesi, Oxford Üniversitesi'nde bu mimariyi geliştiren bir grup araştırmacı tarafından oluşan Visual Geometry Group'un kısaltmasıdır. AlexNet, 2012 yılındaki ImageNet yarışmasını büyük bir farkla kazanan derin öğrenme modelidir [44]. InceptionV3 derin öğrenme modeli ise inception ailesinin çeşitli iyileştirmelere sahip olan ferdidir [45]. Resnet50 ise, artık sinir ağları ve artık blokları istifleyerek ağ oluşturan 50 katmanlı bir derin öğrenme modelidir [46]. Yapılan çalışmada kullanılan tüm modellerin epoch sayısı 100 olarak belirlenmiştir. Eğitim sırasında

kayıplar arasındaki fark açılmaya başladığı durumda modelin ezberlemesini engellemek için erken durdurma uygulanmıştır. Modellere ait kullanılan diğer parametreler Şekil 7'deki blok şema üzerinde gösterilmektedir.

Kullanılan veri tabanında yangın olan ve yangın olmayan görüntülerin eşit sayıda bulunmamasından dolayı üretilen modelin sadece doğruluğuna bakarak değerlendirilmesi yanıltıcı olabilmektedir. Bu bakımdan model sonucu elde edilen değerlerin gerçekteki değerler ile karşılaştırıldığı ve birbirleri arasındaki ilişkiyi özetleyen bir tabloya ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmada modelin performans değerlendirmesinde hata matrisi (confusion matrix) ve hata matrisinden elde edilen parametreler kullanılmıştır. Tablo 1'de gerçek ve tahmini değerlerin birbirleri ile ilişkilerinin gösterildiği bir hata matrisi verilmiştir.

Tablo 1. Hata matrisi

Hata Matrisi		Gerçek Sonuçlar	
		Pozitif (1)	Negatif (0)
Tahmin Edilen Sonuçlar	Pozitif (1)	Doğru Pozitif (TP)	Yanlış Pozitif (FP)
	Negatif (0)	Yanlış Negatif (FN)	Doğru Negatif (TN)

Tablo 1'de gösterilen değerler vasıtasıyla Tablo 2. de belirtilen eşitlikler kullanılarak bir sınıflandırma modelinin performansı doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1 skoru gibi farklı parametreler göz önüne alınarak değerlendirilebilmektedir [47].

Tablo 2. Sınıflandırma metriklerinin hesaplanması

Sınıflandırma Metrikleri	Denklem	Numara
Doğruluk (Accuracy)	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	(1)
Duyarlılık (Sensitivity)	$\frac{TP}{TP + FN}$	(2)
Özgüllük (Specificity)	$\frac{TN}{TN + FP}$	(3)
Kesinlik (Precision)	$\frac{TP}{TP + FP}$	(4)
F1 Skoru	$2 \times \frac{Kesinlik \times Duyarlılık}{Kesinlik + Duyarlılık}$	(5)

C. 1. Bulgular

Yapılan çalışmada, kullanılan aktarım öğrenme modellerinin sınıflandırma metriklerine göre performans değerlendirmesi Tablo 3'de, yangın tespitinde karar verici olarak kullanılan yapay zekâ

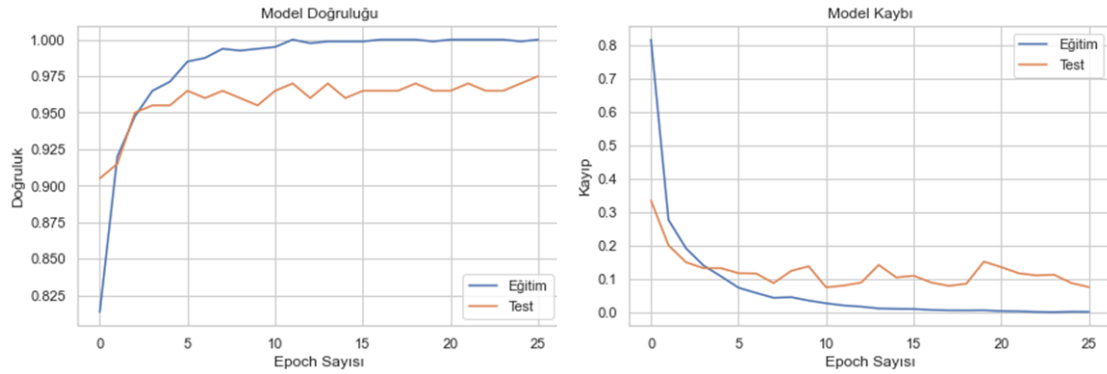
modelleri içerisindeki en başarılı model olan VGG16'ya ait, test veri seti kullanılarak elde edilen hata matrisi Tablo 4'de gösterilmektedir. Ayrıca VGG16 modelinde kullanılan epoch sayısına karşılık eğitim ve test aşamasındaki doğruluk ve kayıp grafikleri ise Şekil 8'de verilmektedir.

Tablo 3. Sınıflandırma modeline ait hata matrisi

Hata Matrisi		Gerçek Sonuçlar	
		Yangın Yok	Yangın Var
Tahmin Edilen Sonuçlar	Yangın Yok	46	3
	Yangın Var	2	150

Tablo 4. Sınıflandırma metriklerine göre modelin performansı

Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1-Skoru
0,9751	0,9804	0,9583	0,9868	0,9836



Şekil 8. Kullanılan modele ait doğruluk ve kayıp grafikleri

IV. SONUÇ

Yapılan çalışmada İHA kullanılarak başlangıç aşamasındaki (özellikle A sınıfında yer alan “1 hektar ve daha küçük alanlar” için) orman yangınlarının tespiti üzerine otomatik bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmanın başındaki uygulama bölgesi olan Bayburt Aslındağı Vilayet Ormanı'na ait uydu görüntüleri alınmış ve ormanlık arazi görüntü bölütleme ile tespit edilmiştir. Daha sonra İHA'nın devriyesi için orman alanının tamamını kapsayacak şekilde fotoğraf alınacak koordinatlar, küme kaplama yöntemi ile tespit edilmiştir. Orta düzeyde döner kanatlı bir İHA'nın 100 metre yükseklikten 45 dakikalık uçuşu süresince elde edilebilecek 302 adet imge ile ilgili bölgenin tamamen temsiline mümkün olduğu hesaplanmıştır. Elde edilen görüntülerde yangın olup olmadığı hususuna ise görüntü filtreleme ve yapay zekâ modeli ile karar verilmiştir. Karar verici olarak kullanılan model sonuçlarının literatürdeki diğer orman yangını tespiti üzerine olan çalışmalar ile karşılaştırılması Tablo 5'de gösterilmektedir.











Tablo 5. Sunulan yöntemin literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırılması

Çalışma	Kullanılan Yöntem	Doğruluk
Sunulan	Görüntü İşleme ve Derin Öğrenme (Yangın Tespiti)	%97,51
[38] Aksoy vd.	Görüntü İşleme ve Derin Öğrenme (Yangın Tespiti)	%96,48
[48] Cui	IoT ve Derin Öğrenme (Yangın Tespiti)	%87,10
[49] Jiao vd.	Derin Öğrenme (Yangın Tespiti)	%91,00

Ayrıca oluşturulan modelin yeni verilere karşı başarımını incelemek için internet kaynaklı web kaynaklı rastgele döner kanatlı İHA ile çekilmiş orman ve orman yangını resimleri bulunmuş, sunulan modelde incelenmiş ve Tablo 6’da sonuçları gösterilmiştir.

Tasarlanan model vasıtası ile İHA ile elde edilen görüntülerde yangın tespit edildiğinde ilgili fotoğrafın çekildiği koordinat bilgisi de elde edilmektedir. Bu sayede çıkması muhtemel bir yangına erken müdahale imkânı sağlanmaktadır. Orman yangınlarının tamamen otomatik tespiti üzerine yapılan bu ön çalışma ile gelecekte tasarımı planlanan İHA’nın temelleri atılmaktadır. İlerleyen çalışmalarda farklı transfer öğrenme tekniklerinin ilgili alanda kullanımı daha büyük veri tabanı ile kıyaslanarak başarımlarının sağlanması planlanmaktadır.

Tablo 6. Sunulan yöntemin yeni verilere karşı başarımı

				
Yangın Var 1,46e-04 Yangın Yok 0,99	Yangın Var 8,51e-06 Yangın Yok 0,99	Yangın Var 2,11e-05 Yangın Yok 0,99	Yangın Var 4,75e-05 Yangın Yok 0,99	Yangın Var 1,46e-04 Yangın Yok 0,99
				
Yangın Var 1,00e+00 Yangın Yok 4,69e-26	Yangın Var 1,00e+00 Yangın Yok 8,25e-23	Yangın Var 1,00e+00 Yangın Yok 1,60e-27	Yangın Var 1,00e+00 Yangın Yok 4,73e-35	Yangın Var 0,99 Yangın Yok 2,83e-04

V. KAYNAKLAR

- [1] A. Dhall, A. Dhasade, A. Nalwade, M. Raj, and V. Kulkarni, "A survey on systematic approaches in managing forest fires," *Appl. Geogr.*, vol. 121, no. 102266, p. 102266, 2020.
- [2] A. Bouguettaya, H. Zarzour, A. M. Taberkit, and A. Kechida, "A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms," *Signal Processing*, vol. 190, no. 108309, p. 108309, 2022.
- [3] M. A. Enoch, U. C. Okeke, and N. Y. Narinua, "Identification and modelling of forest fire severity and risk zones in the Cross – Niger transition forest with remotely sensed satellite data," *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, vol. 24, no. 3, pp. 879–887, 2021.
- [4] F. Sivrikaya and Ö. Küçük, "Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region," *Ecol. Inform.*, vol. 68, no. 101537, p. 101537, 2022.
- [5] M. Naderpour, H. M. Rizeei, N. Khakzad, and B. Pradhan, "Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 191, no. 106558, p. 106558, 2019.
- [6] S. Chaturvedi, P. Khanna, and A. Ojha, "A survey on vision-based outdoor smoke detection techniques for environmental safety," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 185, pp. 158–187, 2022.
- [7] M.D. Flannigan, B.D. Amiro, K.A. Logan, B.J. Stocks and B.M. Wotton, *Forest Fires and Climate Change In The 21st Century, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol.11, pp.847–859, 2005.
- [8] B. Christensen, "Technological advances in rural fire management: use of organizational knowledge and simple economic analysis", Lincoln University, 2014.
- [9] J. San-Miguel-Ayanz, "Forest fires in Europe, middle east and north Africa 2017," 2017.
- [10] M. Mutlu, S. C. Popescu, and K. Zhao, "Sensitivity analysis of fire behavior modeling with LIDAR-derived surface fuel maps," *For. Ecol. Manage.*, vol. 256, no. 3, pp. 289–294, 2008.
- [11] T. J. Duff and K. G. Tolhurst, "Operational wildfire suppression modelling: a review evaluating development, state of the art and future directions," *Int. J. Wildland Fire*, vol. 24, no. 6, p. 735, 2015.
- [12] M. Francos and X. Úbeda, "Prescribed fire management," *Curr. opin. environ. sci. health*, vol. 21, no. 100250, p. 100250, 2021.
- [13] M. Avcı ve M. Korkmaz, "Türkiye’de orman yangını sorunu: Güncel bazı konular üzerine değerlendirmeler", *Turkish Journal of Forestry*, vol. 22, no.3, s. 229-240, 2021.
- [14] E. Bilgili, İ. Baysal, B. Dinç Durmaz, B. Sağlam, Ö. Küçük, "2008 yılında çıkan büyük orman yangınlarının değerlendirilmesi", III. Ulusal Karadeniz Ormancılık Kongresi, 20-22 Mayıs, Artvin, s. 1270-1279, 2010.
- [15] E. Bilgili, B. Dinç Durmaz, İ. Baysal, B. Sağlam, Ö. Küçük, "Doğu Karadeniz ormanlarında orman yangınları" III. Ulusal Karadeniz Ormancılık Kongresi, 20-22 Mayıs, Artvin, s. 1280-1290, 2010.

- [16] E. Bilgili, Ö. Küçük, B. Sağlam and K.A. Coşkuner, “Mega Forest Fires: Causes, Organization And Management”, *Forest Fires*, Ankara, Türkiye Bilimler Akademisi, s. 1-23, 2021.
- [17] E. Bilgili, Ö. Küçük, B. Sağlam, İ. Baysal, B.D. Durmaz ve K.A. Coşkuner, “Türkiye Orman Ekosistemlerinde Yangınların Ekolojik Rolü”, *Ekoloji ve Ekonomi Ekseninde Türkiye’de Orman ve Ormancılık*, Ankara: Sonçağ Akademi, s. 75-115, 2021.
- [18] K.A. Coşkuner ve E. Bilgili, “Orman yangın yönetiminde etkili bir karar destek sisteminin kavramsal çerçevesi”, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, s.6, no.2, s. 288-303, 2020.
- [19] G. Narasimha Rao, P. Jagadeeswara Rao, R. Duvvuru, S. Bendalam, and R. Gemechu, “Fire detection in kambalakonda reserved forest, visakhapatnam, Andhra pradesh, India: An internet of things approach,” *Mater. Today*, vol. 5, no. 1, pp. 1162–1168, 2018.
- [20] A. Sharma et al., “IoT and deep learning-inspired multi-model framework for monitoring Active Fire Locations in Agricultural Activities,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 93, no. 107216, pp. 107216, 2021.
- [21] P. Kanakaraja, P. Syam Sundar, N. Vaishnavi, S. Gopal Krishna Reddy, and G. Sai Manikanta, “IoT enabled advanced forest fire detecting and monitoring on Ubidots platform,” *Mater. Today*, vol. 46, pp. 3907–3914, 2021.
- [22] F. T. AL-Dhief, N. Sabri, S. Fouad, N. M. A. Latiff, and M. A. A. Albader, “A review of forest fire surveillance technologies: Mobile ad-hoc network routing protocols perspective,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 135–146, 2019.
- [23] J. R. Martínez-de Dios, L. Merino, F. Caballero, A. Ollero, and D. X. Viegas, “Experimental results of automatic fire detection and monitoring with UAVs,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 234, p. S232, 2006.
- [24] J. R. M. Dios, L. Merino, and A. Ollero, “Fire detection using autonomous aerial vehicles with infrared and visual cameras,” *IFAC proc.* vol., vol. 38, no. 1, pp. 660–665, 2005.
- [25] A. Martins et al., “Forest fire detection with a small fixed wing autonomous aerial vehicle,” *IFAC proc.* vol., vol. 40, no. 15, pp. 168–173, 2007.
- [26] O. Ozkan, “Optimization of the distance-constrained multi-based multi-UAV routing problem with simulated annealing and local search-based matheuristic to detect forest fires: The case of Turkey,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 113, no. 108015, p. 108015, 2021.
- [27] S. Sudhakar, V. Vijayakumar, C. Sathiya Kumar, V. Priya, L. Ravi, and V. Subramaniaswamy, “Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires,” *Comput. Commun.*, vol. 149, pp. 1–16, 2020.
- [28] M. Mohajane et al., “Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area,” *Ecol. Indic.*, vol. 129, no. 107869, p. 107869, 2021.
- [29] K. R. Singh, K. P. Neethu, K. Madhurekaa, A. Harita, and P. Mohan, “Parallel SVM model for forest fire prediction,” *Soft Computing Letters*, vol. 3, no. 100014, p. 100014, 2021
- [30] C. Filizzola et al., “RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: description, implementation, and field validation in the case of the MSG-SEVIRI sensor,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 186, pp. 196–216, 2016.
- [31] P. Bernabeu, L. Vergara, I. Bosh, and J. Igual, “A prediction/detection scheme for automatic forest fire surveillance,” *Digit. Signal Process.*, vol. 14, no. 5, pp. 481–507, 2004.

- [32] M. J. Sousa, A. Moutinho, and M. Almeida, "Wildfire detection using transfer learning on augmented datasets," *Expert Syst. Appl.*, vol. 142, no. 112975, p. 112975, 2020.
- [33] X. Yang et al., "Pixel-level automatic annotation for forest fire image," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 104, no. 104353, p. 104353, 2021.
- [34] A. Sharma, P. K. Singh, and Y. Kumar, "An integrated fire detection system using IoT and image processing technique for smart cities," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, no. 102332, p. 102332, 2020.
- [35] Z. Liu, K. Zhang, C. Wang, and S. Huang, "Research on the identification method for the forest fire based on deep learning," *Optik (Stuttg.)*, vol. 223, no. 165491, p. 165491, 2020.
- [36] Y. Hu et al., "Fast forest fire smoke detection using MVMNet," *Knowl. Based Syst.*, vol. 241, no. 108219, p. 108219, 2022.
- [37] L. Wang, J. J. Qu, and X. Hao, "Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 148, no. 11, pp. 1767–1776, 2008.
- [38] B. Aksoy, K. Korucu, Ö. Çalışkan, Ş. Osmanbey, and H. D. Halis, "İnsansız Hava Aracı ile Görüntü İşleme ve Yapay Zekâ Teknikleri Kullanılarak Yangın Tespiti: Örnek Bir Uygulama," *Düzce Üniv. bilim ve teknol. derg.*, pp. 112–122, 2021.
- [39] F. Bulut, İ. Kılıç ve İ. F. İnce, "Beyin Tümörü Tespitinde Görüntü Bölütleme Yöntemlerine Ait Başarımların Karşılaştırılması ve Analizi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 20, sayı. 58, s. 173-186, Oca. 2018.
- [40] M. S. Daskin, *Network and discrete location: Models, algorithms, and applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [41] M.A. Khan, W. Ectors, T. Bellemans, D. Janssens, G. Wets, "UAV-Based Traffic Analysis: A Universal Guiding Framework Based on Literature Survey, *Transportation Research Procedia*", vol. 22, pp. 541-550, 2017.
- [42] "Fire Dataset," Kaggle. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/phyllake1337/fire-dataset>. [Accessed: 04-Spring-2022].
- [43] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," *arXiv [cs.CV]*, 2014.
- [44] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks." In *NIPS'2012*, 23, 24, 27, 100, 200, 371, 456, 460, 2012.
- [45] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, "Rethinking the inception architecture for computer vision," in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.
- [46] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," in *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016.
- [47] U. Konur, "Sınıflandırma Başarımını Ölçme ve Seyreklik İşleme Üzerine", *EMO Bilimsel Dergi*, c. 10, sayı. 2, s. 43-56, Ara. 2020.
- [48] F. Cui, "Deployment and integration of smart sensors with IoT devices detecting fire disasters

in huge forest environment,” *Comput. Commun.*, vol. 150, pp. 818–827, 2020.

[49] Z. Jiao et al., “A YOLOv3-based learning strategy for real-time UAV-based forest fire detection,” in 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2020.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Balıkesir İli ve Çevresinin Gutenberg-Richter İlişkisi ve Depremselliğinin Bölgesel Dağılımı

 Nazlı Ceyla ANADOLU KILIÇ^{a,*}

^a Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: nazlianadolu@nevsehir.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1114105

ÖZ

Bu çalışmada Balıkesir İli ve çevresinin (38.50°-40.50°K-26.00°-29.00°D) depremselliği ve depremsellik parametreleri belirlenmiştir. Bu amaçla 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan deprem verileri Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü deprem kataloğundan alınmıştır. Çalışma alanının tamamı için “b”, “ D_c ” ve olası-güvenilir “ M_{mak} ” değeri sırası ile $b=1.17$, $D_c=2.22$ ve $M_{mak}=6.95$ olarak belirlenmiştir. Detaylı depremsellik değerlendirilmesi yapılabilmesi ve depremsellik parametrelerinin uzaysal dağılımlarının haritalanabilmesi için çalışma alanı 0. 5°Kx0. 5°D olacak şekilde alt alanlara ayrılmıştır. “a” değeri $3.63 \leq a \leq 7.49$, “b” değeri ise $0.73 \leq b \leq 1.55$ aralığında hesaplanmıştır. “ M_{mak} ” değerlerinin ise $4.9 \leq M_{mak} \leq 7.6$ aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Depremselliğin oldukça yüksek olduğu çalışma alanı içerisinde depremsellik açısından ön plana çıkan Balıkesir il merkezi ve yakın çevresi için $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ büyüklüğündeki depremlerin olası olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: “b” değeri, “ M_{mak} ” değeri, Depremsellik, Frekans-magnitüd ilişkisi, Balıkesir

The Gutenberg-Richter Relationship and the Regional Distribution of Seismicity of Balıkesir Province and its Vicinity

ABSTRACT

In this study, the seismicity and the seismicity parameters of Balıkesir Province and its vicinity (38.50°-40.50°N-26.00°-29.00°E) were determined. For this purpose, the earthquake of magnitude $M \geq 3.0$ data used, in this analysis were taken from Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute's earthquake catalog, for the time period from 1900 to 2020. For the entire study area, “b”, “ D_c ” and possible-reliable “ M_{max} ” values were determined as $b=1.17$, $D_c=2.22$ and $M_{max}=6.95$ respectively. In order to make a detailed seismicity assessment and map the spatial distributions of the seismicity parameters, the study area was divided into subregions as 0. 5°N x 0. 5°E. The “a” value was calculated in the range of $3.63 \leq a \leq 7.49$ and, the “b” value was calculated in the range of $0.73 \leq b \leq 1.55$. It was observed that the “ M_{max} ” values varied in the range of $4.9 \leq M_{max} \leq 7.6$. It is seen that earthquakes of $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ are possible for Balıkesir province and its vicinity, which are prominent in terms of seismicity in the study area, where seismicity is quite high.

Keywords: “b” value, “ M_{max} ” value, Seismicity, Frequency-magnitude relation, Balıkesir

I. GİRİŞ

Yeryüzündeki büyük depremlerin yaklaşık olarak %20'sinin meydana geldiği Alp-Himalaya Deprem Kuşağı üzerinde yer alan Türkiye'de ortalama olarak beş yılda bir, yıkıcı etkisi olan bir deprem meydana gelmektedir [1]. Depremin yıkıcı etkisine bağlı olarak sosyal, ekonomik ve kültürel kayıplar yaratmasının kökeninde hızlı şehirleşme ve endüstrileşme süreçleri ile ilişkili yerleşime uygun olmayan büyüme, kontrolsüz ve depreme dayanıklı olmayan bina inşaatları yatmaktadır. Oluşumu engellenemeyen depremin yıkıcı etkisini ortadan kaldırmak ve/veya en az seviyeye indirmek dolayısı ile bir doğa olayı olan depremin afete dönüşmesini engellemek mümkün olabilmektedir. Bunun için deprem meydana gelmeden, gelecekte deprem olması muhtemel bölgenin, depremin büyüklüğünün ve depremin o bölgede yaratacağı etkinin mühendislik uygulamaları açısından anlamlı ve istatistiksel açıdan güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi gerekmektedir.

Gelecekte bir bölgede ne kadar büyüklükte bir depremin oluşabileceği deprem tehlike çalışmaları ile belirlenirken, büyüklüğü belirlenen bu depremin o bölgede yaratacağı etki ise deprem risk ve deprem senaryo çalışmaları ile belirlenmektedir. Aslında deprem açısından dirençli bir şehirleşmenin yolu deprem tehlike çalışmalarından elde edilecek güvenilir sonuçlara ve bu sonuçlara göre oluşturulacak deprem master planına dayanmaktadır. Böylelikle deprem kaynaklı oluşması muhtemel sosyo-ekonomik ve sosyo-kültürel kayıpların önüne geçilebildiği gibi deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrasında toplumun ve toplumu oluşturan paydaşların yaşam kalitelerinin kararlılığını sağlamak da mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada hem tarihsel hem de aletsel dönemde önemli deprem hareketliliklerinin yaşandığı ve bu nedenle de gelecekte de yoğun deprem hareketliliklerinin yaşanılmasının kaçınılmaz olacağı düşünülen Balıkesir ili ve çevresi (38.50°-40.50°K - 26.00°-29.00°D) çalışma alanı olarak belirlenmiş ve depremsellik çalışması yapılmıştır. Yapılan depremsellik çalışması kapsamında öncelikle tarihsel ve aletsel dönemde meydana gelen depremlerin dağılımları incelenerek çalışma alanının depremselliğinin sınırları belirlenmiş ve çalışma alanının tamamı için geçerli depremsellik parametreleri hesaplanmıştır. Belirlenen depremselliğin bölgesel değişiminin yakalanabilmesi için ise, oluşturulan alt alanlarda depremsellik parametreleri ayrı ayrı tekrar hesaplanmış ve dağılımları haritalandırılmıştır. Böylelikle nüfus yoğunluğu, sanayi, turizm faaliyetleri ile Türkiye için önemli bir yere sahip olan çalışma alanı için kapsamlı bir çalışma yapılarak deprem potansiyeli ortaya konmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. ÇALIŞMA ALANININ DEPREM GEÇMİŞİ VE DEPREM KATALOĞUNUN OLUŞTURULMASI

Herhangi bir bölgeye ait depremselliğin, depremsellik parametrelerinin dolayısı ile deprem tehlikesi ve riskinin belirlenebilmesi için o bölgede meydana gelen, geçmiş deprem verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Deprem verileri, çeşitli araştırmacılar, ulusal ve uluslararası veri merkezleri tarafından hazırlanan deprem kataloglarından temin edilebilmektedir [2-11]. İnceleme yapılan zaman dilimine bağlı olarak tarihsel ve aletsel dönem deprem katalogları olarak adlandırılan bu deprem kataloglarının duyarlılığı istatistiksel açıdan anlamlı ve güvenilir sonuçlara ulaşılması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle depremsellik çalışmalarında deprem veri seçimi ve/veya deprem kataloğu oluşturmak oldukça önemlidir.

1900'lü yıllardan önce meydana gelen deprem verilerinden oluşan tarihsel dönem deprem katalogları genellikle depremi yaşayan insanların deneyimlerinden/gözlemlerinden oluşan yazılı tarih araştırmalarından ya da arkeosismoloji, paleosismoloji ve arkeojeofizik tabanlı çalışmalardan elde edilen verilerden oluşmaktadır. Herhangi bir sayısal kayıt, ölçüm vb. mühendislik uygulaması olmadan elde edilen bu deprem verilerinin doğal olarak bazı dezavantajlara sahip olabileceği göz ardı

deprem verilerinden oluşmalarına rağmen deprensellik ile ilgili çalışmalarda doğrudan kullanıma uygun olmayabilirler. Öncelikle belirli kriterler göz önüne alınarak seçilmesi gerekli deprem verilerinin yapılacak çalışmaya uygun olarak belirlenecek bir takım dönüşüm işlemlerine tabii tutulmaları gerekmektedir. Bu bağlamda deprem kaydı olmayan yıl sayısının toplam yıl sayısının %25'inden az olmasına özen göstererek mümkün olan en geniş zaman aralığının inceleme dönemi olarak belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle hem çalışma alanının deprenselliği kesintiye uğramadan belirlenebilecek hem de magnitüd hataları kabul edilebilir bir seviyeye indirgenmiş olacaktır [17-22].

Belirtilen bu kriterler doğrultusunda çalışma alanına ait deprenselliğin ve deprensellik parametrelerinin belirlenebilmesi için 1900-2020 yılları arasında meydana gelen $M \geq 3.0$ olan depremlere ait veriler Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü (KRDAE) kataloğundan alınmış ve 121 yıllık sürece ait farklı magnitüd ölçeklerinde (M_b , M_d , M_l , M_s , M_w) kaydedilmiş 9818 adet deprem verisine ulaşılmıştır. Deprem verilerinin birbiri ile kıyaslanabilirliğini sağlamak için tamamı belirlenen bir magnitüd ölçeğine dönüştürülmeli ve nihayetinde de katalog homojen hale getirilmelidir. Deprem verilerinin belirlenen magnitüd ölçeğine dönüştürülmesi yapılan çalışmanın amacına bağlı olarak değişebilmekle birlikte bu çalışmada üst limitte doyuma uğramaması nedeni ile deprem verilerinin moment magnitüd (M_w) ölçeğine dönüştürülmesi tercih edilmiştir. Bu dönüşüm için çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş ve literatürde kabul edilmiş farklı ilişkiler bulunmaktadır [23-25]. Literatürde kabul edilen bağıntıların yerel/bölgesel özellikler taşıma ihtimallerine karşılık yapılan bu çalışmada çalışma alanına ve çalışmada kullanılacak deprem verisine uygun yeni ilişkiler geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Dönüşüm ilişkilerinin geliştirilmesi sırasında ortogonal regresyon yöntemi tercih edilmiştir [26]. Bu kapsamda magnitüd dönüşüm ilişkilerinin ve ilişki katsayılarının belirlenebilmesi için M_w ölçeği bağımlı değişken olarak kabul edilirken diğer magnitüd ölçekleri (M_b , M_s , M_l , M_d) bağımsız değişkenler olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki ve ilişki katsayılarına ait bilgiler ise Tablo 1'de verilmiştir.

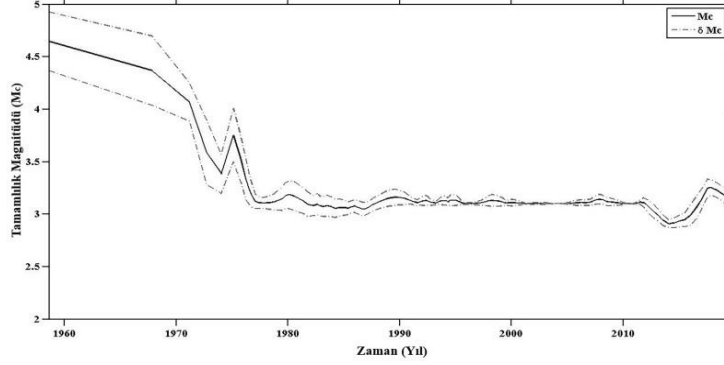
Tablo 1. Magnitüd ölçekleri arasındaki dönüşüm ilişkileri ve ilişki katsayıları

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken	Belirlenen İlişki	İlişki Katsayısı
M_w	M_b	$M_w = -0.369808 + 1.1141 * M_b$	0.98
	M_d	$M_w = -0.0370159 + 1.04799 * M_d$	0.98
	M_l	$M_w = -0.343326 + 1.09302 * M_l$	0.96
	M_s	$M_w = 1.21039 + 0.790061 * M_s$	0.98

Tablo 1'de görülen ilişki katsayıları geliştirilen ilişkilerin deprem istatistiği çalışmalarında kullanılacak yetkinlikte ve güvenilirlikte olduğunu göstermektedir. Böylelikle çalışma alanı için " M_w " ölçeğinde homojen hale getirilmiş bir katalog oluşturulmuştur. Oluşturulan bu homojen katalog içerisindeki deprem verileri içerisinde ana şoklar dışında öncü şok, artçı şok, deprem yığılımları ve deprem çiftleri olarak adlandırılan ana şoka bağlı olarak gelişen olaylar da yer almaktadır. Ana şoka bağlı bu tür olaylar deprem istatistiğinin temelini oluşturan deprem sayısını artırmakta dolayısı ile de güvenilirlik sınırları dışına çıkan deprensellik parametrelerinin elde edilmesine neden olabilmektedirler. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda bu tür olayların homojen deprem kataloğundan uzaklaştırılması gerekmektedir. Literatürde deprem kataloğunda yer alan bağımlı ve bağımsız olayları farklı zaman ve mesafe aralıklarına göre ayırtıran farklı algoritmalar bulunmaktadır [27-30]. [28] tarafından geliştirilen algoritma ise zaman-mesafe seçiminin uygunluğu nedeni ile deprensellik çalışmalarında tercih nedenidir [31-34]. Yapılan çalışmada da MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak Reasenber algoritması [28] esaslarına göre ayırtırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak 1984 deprem verisi katalogdan uzaklaştırılarak 7834 deprem verisine sahip yeni bir katalog elde edilmiştir.

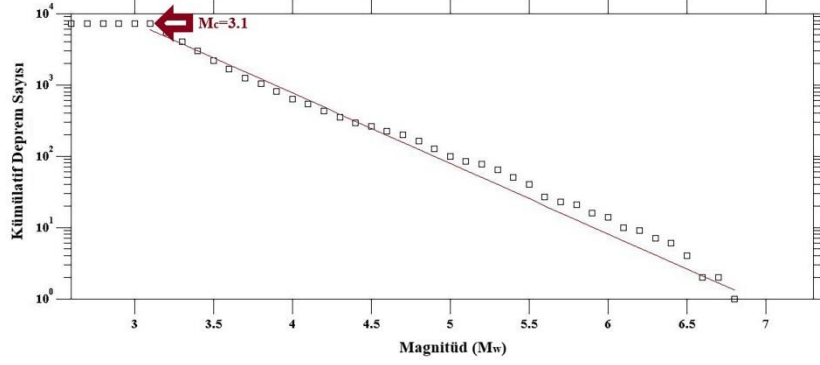
Teoride deprem istatistiği çalışmalarında kullanılacak deprem kataloğunda yer alan deprem verilerinin küçükten büyüğe sıralı ve tam olması arzu edilmekle birlikte bu ideal durum pratikte her daim yakalanamamaktadır. Bu ideali yakalayabilmek ya da mümkün olan en yakın duruma getirebilmek için tamamlılık analizi olarak adlandırılan bir işlem ile deprem kataloğunun belirlenecek bir magnitüd

değerine (M_c) göre tamamlanması gerekmektedir. “ M_c ” değeri, kullanılan katalogdaki en küçük magnitüd değerine eşit olan değer olarak kabul edilebildiği gibi en çok deprem sayısına ait magnitüd değeri olarak da kabul edilebilmekte ya da çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen varsayımlara göre de belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada “ M_c ” değerini belirlemeden önce Maximum Curvature (MAXC) [29] yöntemi esaslarına göre MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak bu değerın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. “ M_c ” değerinin zamana bağlı değişimleri pencere başına en az 20 deprem verisi olmak üzere 200 deprem verisi olacak şekilde hareketli zaman penceresi tekniği kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 2).



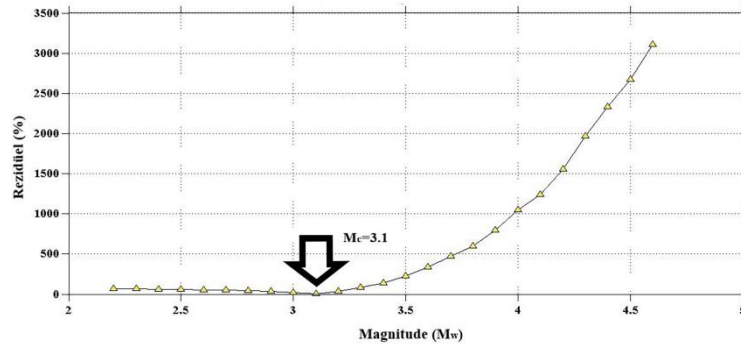
Şekil 2. Tamamlılık magnitüd değerinin (M_c) zamana bağlı değişimi

Şekil 2 incelendiğinde deprem katalogunun ilk yılları için yaklaşık olarak $M_c=4.7$ değeri ile karakterize edilen tamamlılık magnitüd değerinin günümüze yaklaştıkça $M_c=3.0$ seviyesine kadar düştüğü görülmektedir. “ M_c ” değerinin deprem katalogunun ilk yıllarında nispeten büyük magnitüd değerleri ile karakterize olması günümüze yaklaştıkça ise bu değerın görece olarak daha düşük seviyelere inmesi sismolojik açıdan oldukça anlamlı ve olağan bir durumdur. Bu durumu ana hatları ile üç ana zaman dilimi içerisinde açıklamak mümkündür. Aletsel sismolojik verilerin 1900’lü yılların başında elde edilmeye başlaması ve bu dönemde hem deprem kayıt istasyonu sayılarının hem de kayıt yöntemlerinin yetersizliği nedeniyle deprem kataloglarında yer alan deprem verileri genellikle yıkıcı etki yaratan büyük depremlerden oluşmakta dolayısı ile deprensellik çalışmaları için nitelik ve nicelik açısından yetersiz kalmaktadır. 1960’lı yıllara kadar aletsel sismoloji çalışmaları için belirli bir standart oluşturulamamış ve bu durum uzun bir zaman dilimi içerisinde çok sayıda küçük ve orta magnitüd değerine sahip deprem verisinin kayıt altına alınmamasına neden olmuştur. Deprem kaynaklı afetlerin yerbilimsel çalışmaları üzerindeki yarattığı ilerleme ile birlikte özellikle 2000’li yıllardan sonra kayıt istasyon sayılarının artmaya başlaması ve kayıt yöntemlerinin duyarlılığının geliştirilmesi ile birlikte herhangi bir hasar yaratmayan hatta çoğu zaman hissedilmeyen daha küçük magnitüd değerine sahip deprem verilerinin de kataloglarda kayıt altına alınması sağlanmıştır. Böylelikle deprem istatistiği çalışmaları için dezavantaj yaratan veri eksikliğini en az seviyeye indirgeyecek sayıda ve güvenilirlikte deprem verisine ulaşılmaya başlanmıştır. Deprensellik parametreleri üzerinde oldukça etkili olan bu değerın görece olarak küçük magnitüdü bir değer olması buna karşılık deprem katalogunun tamamını kapsayabilecek nitelikte olması gerekmektedir. Oluşturulan homojen katalog incelendiğinde de, deprem magnitüdülerinin $2.7 \leq M_w \leq 6.8$ aralığında değişim gösterdiği görülür. Magnitüdü $2.7 \leq M_w < 3.7$ arasında değişen 6580 deprem, $3.7 \leq M_w < 4.7$ arasında değişen 1054 deprem, $4.7 \leq M_w < 5.7$ arasında değişen 177 deprem, $5.7 \leq M_w < 6.7$ arasında değişen 21 deprem ve $6.7 \leq M_w \leq 7.7$ arasında değişen 2 deprem vardır. Görüldüğü üzere depremlerin magnitüdüleri çoğunlukla $2.7 \leq M_w \leq 3.7$ arasında değişmekte ve bu aralıkta 1775 deprem ile $M_w=3.1$ ilk sırada yer almaktadır. Sonuç olarak yapılan çalışma için tamamlılık magnitüd değeri $M_c=3.1$ olarak kabul edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. ZMAP Programı ile oluşturulan kümülatif deprem sayısı-magnitüd ilişkisi ve “ M_c ” değeri

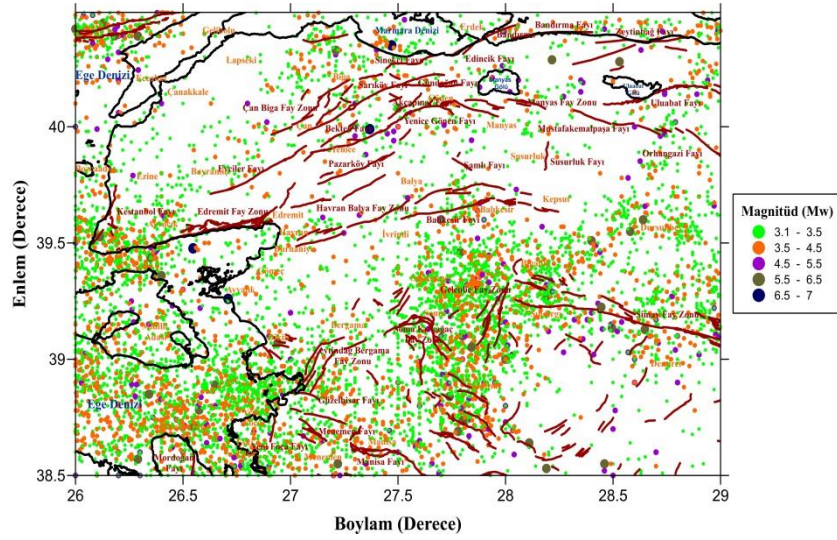
Şekil 3’de çalışma alanı için belirlenen “ M_c ” değeri ($M_c=3.1$) görülmektedir. “ M_c ” değeri hem uzaya hem de zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Belirlenen “ M_c ” değerinden daha küçük magnitüdü depremlerin katalogdan uzaklaştırılması ile yapılan tamamlılık analizi sonucunda olabildiğince az sayıda deprem verisinin katalogdan ayrıştırılması güvenilirliği yüksek istatistiksel sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Belirlenen “ M_c ” değerinin güvenilirliğinin ve oluşturulan yeni katalogun istatistiksel modelinin gözlem setine (frekans-magnitüd dağılımına) uygunluğunun belirlenmesi için MATLAB tabanlı ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak güç yasası uyum iyiliği analizi (Goodness of fit to power law) yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4’de verilmiştir.



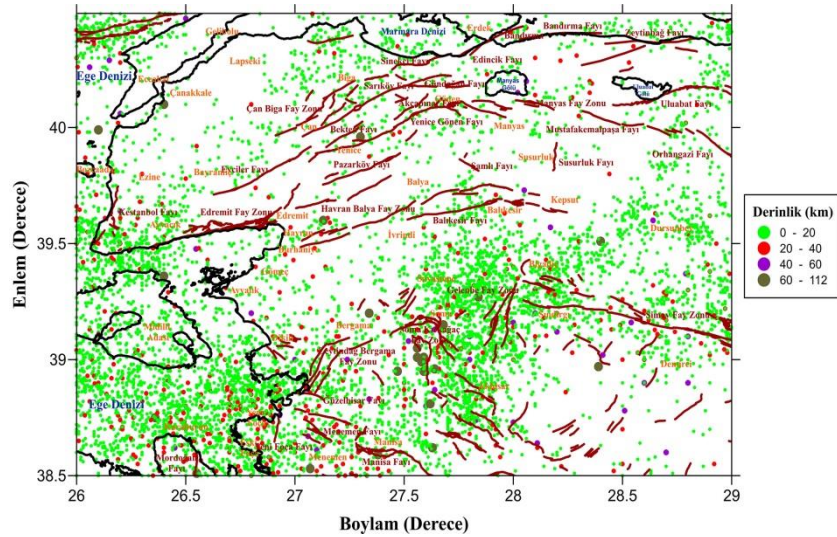
Şekil 4. Tamamlılık analizi yapılan katalogun frekans-magnitüd dağılımının uyum iyiliği analizi sonuçları

Şekil 4 $M_c=3.1$ değeri için %95’lik güvenilirliğin tanımlanamadığını buna karşılık çalışmada kullanılacak katalog için belirlenen “ M_c ” değerinin %90 güvenilirlik verdiğini ifade etmektedir. Böylelikle çalışma alanı için oluşturulan deprem katalogu kullanılarak elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan güvenilir olacağını ifade etmek mümkündür.

$M_c=3.1$ değerinden küçük olan deprem verilerinin katalogdan uzaklaştırılması ile birlikte toplamda 7171 deprem verisinden oluşan homojen, bağımlı olaylardan arındırılmış ve belirli bir magnitüd değerine göre tamamlanmış depremsellik çalışmaları için uygun bir katalog oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katalogta yer alan deprem verilerinin episantr ve derinlik dağılımları sırası ile Şekil 5 ile Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin episantr dağılım haritası



Şekil 6. 1900-2020 yılları arasında meydana gelen depremlerin derinlik dağılım haritası

Şekil 5 ve Şekil 6'da çalışma alanında küçük magnitüdü (3≤M_w≤5.0) ve sığ depremlerin (0≤h≤60) baskın olduğu görülmektedir. Ancak orta büyüklükteki depremler ile orta derin depremlerinin de varlığı göz ardı edilmemelidir. Ege Denizi açıkları, Akhisar Fayı ve çevresi, Gelenbe Fayı ve çevresi, Simav Fay Zonu ve çevresi ile Balıkesir ve ilçelerinde orta büyüklükteki depremlerin varlığı göze çarparken orta derin depremlerinin büyük bir çoğunluğunun ise Soma-Kırkağaç Fay Zonu civarında yoğunlaştığı görülmektedir.

Çalışma alanının aletsel dönem deprem etkinliği incelendiğinde; 1935 Erdek, 1944 Edremit, 1953 Yenice-Gönen, 1964 Manyas, 1969 Gönen, 1971 İvrindi, 2001 Savaştepe ve 2010 Balya Depremlerinin çalışma alanı için önemli yer hareketleri oldukları görülmektedir. Bu depremler arasında ise meydana geldikleri alt alanlar açısından aletsel dönemin etkili ve son depremleri olmaları sebebi ile 1944 Edremit ve 1953 Yenice-Gönen Depremleri ön plana çıkmaktadır.

B. DEPREMSELLİĞİN VE DEPREMSELLİK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Magnitüd-frekans bağıntıları deprem istatistiğinin temelini oluşturmakta ve depremselliğin bir ölçütü olarak kabul edilmektedir. Bu bağıntılar içerisinde literatürde kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan bağıntı ise Gutenberg-Richter (G-R) [36] tarafından geliştirilmiştir. $\log N = a - bM$ olarak tanımlanan bu ilişkide N ; çalışma alanı için inceleme yapılan zaman dilimi içerisinde magnitüdü M 'e eşit ve/veya daha büyük depremlerin sayısını, “a” ve “b” ise regresyon katsayılarını ifade etmektedir. Çalışma alanının büyüklüğüne, inceleme yapılan zaman aralığına ve çalışma alanının deprem etkinlik düzeyine bağlı olarak değişen “a” katsayısı ortalama yıllık sismik aktivite indeksi olarak ifade edilmektedir. Kayaçların deformasyonu dolayısı ile deprem oluşumunun fiziki ile ilişkili olan “b” katsayısı ise deprem istatistiğinde önemli bir yere sahiptir. Kullanılan yöntem ve deprem verilerinin normal ve kümülatif frekanslarına bağlı olarak değişen “b” katsayısı aynı zamanda tektonik özelliklere bağlı olarak da değişim göstermektedir. Bu nedenle de depremselliğin bölgesel dağılımı ve deprem kestirimi çalışmaları için önemli bir sismotektonik parametre olarak kabul edilmektedir. En genel ifade ile hesaplanan “b” değerinin büyüklüğü ile gerilim birikme seviyesi arasında ters bir ilişki olduğu kabul edilmektedir [37-44].

Literatürde $\log N = a - bM$ bağıntısındaki “a” ve “b” katsayılarının belirlenmesi için başta En Küçük Kareler Yöntemi, Ağırlık En Küçük Kareler Yöntemi, En Büyük Olasılık Yöntemi ve Utsu-Page formülleri olmak üzere farklı yöntemler bulunmaktadır. Yapılan çalışmada verdiği güvenilir sonuçlar nedeniyle [45] tarafından geliştirilen En Büyük Olasılık (EBO) Yöntemi tercih edilmiştir. EBO yönteminde rasgele değişken $N_i (i = 1, 2, \dots, n)$ bir Poisson dağılımı gösterir, yani olasılık dağılım fonksiyonu;

$$P(a, b; N_i) = \exp(-\langle N_i \rangle) * \langle N_i \rangle^{N_i} * \langle N_i \rangle^{-1} \quad (1)$$

ile verilir. Burada $\langle N_i \rangle = 10^{a-bM}$ 'dir. Gözlemlerin bağımsız olduğu kabul edilirse;

$$a = \log \sum_{i=1}^n N_i - \log \sum_{i=1}^n 10^{-bM} \quad (2)$$

$$b = \frac{0.4343}{\frac{\sum_{i=1}^n M_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} - M_{\min}} \quad (3)$$

olarak elde edilir.

G-R ilişki grafiğinin elde edilmesinden sonra deprem olayının başta zaman ve mekan olmak üzere çok sayıda belirsizlik ve bilinmezlik içermesi nedeniyle çalışma alanında fraktal geometri esasları kullanılarak fraktal analiz değerlendirilmesi de yapılabilmektedir. Fraktal analiz doğada gerçekleşen olayların karmaşıklık seviyelerini sayısal olarak ifade edebilmeyi mümkün kıldığı için çoğu doğa olayında olduğu gibi depremsellik çalışmalarında da tercih edilmektedir [46-49].

Fraktal analiz, geometrik nesnelerin kendine benzerliğinin belirlenmesinde kuvvetli bir ilişki sunmaktadır. İlişki boyutu “ D_c ” ve ilişki oranı “ $C(r)$ ” arasında var olan ilişki;

$$D_c = \lim_{r \rightarrow 0} [\log C(r) / \log r] \quad (4)$$

$$C(r) = 2N_{R < r} / (N - 1) \quad (5)$$

şeklinde gösterilmektedir.

Burada; “r” iki episantr veya hiposantr arasındaki uzaklığı, “N” birbirinden $R < r$ uzaklıkla ayrılan deprem çiftlerinin sayısını ifade etmektedir [50].

Eğer episantr dağılımı fraktal bir yapıya sahip ise;
 $C(r) \sim r^{-D_c}$ (6)

elde edilir.

İki deprem arasındaki derece cinsinden “r” uzaklığı ise;

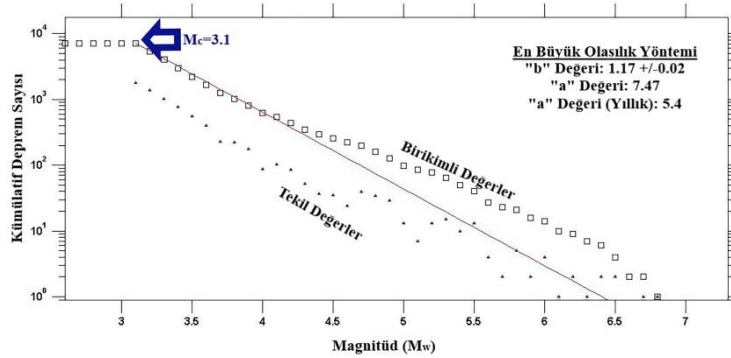
$$r = \cos^{-1}(\cos\theta_i \cos\theta_j + \sin\theta_i \sin\theta_j \cos(\phi_i - \phi_j))$$
 (7)

Burada (θ_i, ϕ_i) ve (θ_j, ϕ_j) sırası ile i. ve j. olayların enlem ve boylamlarına karşılık gelmektedir [51].

G-R ilişkisi ve ilişki integralinin belirlenmesinin ardından “ M_{mak} ” olarak sembolize edilen meydana gelmesi muhtemel en büyük magnitüd değerinin de belirlenmesi ile çalışma alanı için gerekli genel depremsellik parametreleri tamamlanmış olacaktır. Literatürde “ M_{mak} ” değerini belirlemek için kabul edilmiş kesin bir yöntem olmamakla birlikte farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş farklı esas ve kabullere dayalı yöntemlere göre bu değeri belirlemek mümkündür. Yapılan çalışmada ise “ M_{mak} ” değeri belirlenirken parametrik yöntemler arasında yer alan Kijko-Sellevoll (K-S) ve Kijko-Sellevoll-Bayes (K-S-B) teorilerinin Gutenberg-Richter ilişkisine dayanıyor olması tercih nedeni olmuştur. Ayrıca K-S-B teorisinin, K-S teorisi üzerindeki “b” değeri belirsizliğini dikkate alıyor olması da elde edilen sonuçlar aracılığı ile teorilerin kıyaslanabilirliğini sağlamaktadır [52, 53]. Gerekli hesaplamalar [54] tarafından geliştirilen MATLAB tabanlı kodlar kullanılarak yapılmıştır.

III. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Çalışma alanı için deprem kataloğunun hazır hale getirilmesinin ardından çalışma alanının deprem potansiyelini tanımlamak için gerekli olan depremsellik parametreleri ZMAP 6.0 [35] paket programı kullanılarak elde edilmiştir. EBO yöntemi kullanılarak çalışma alanı için hesaplanan “a” ve “b” değerleri ile G-R ilişkisine ait grafik Şekil 7’de verilmiştir.

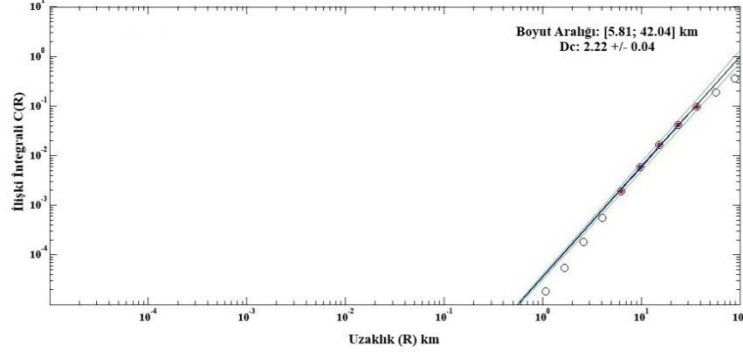


Şekil 7. G-R ilişkisi grafiği ve “a” ve “b” katsayıları

Şekil 7’de $\log N = 7.47 - 1.17M_w$ olarak tanımlanan G-R ilişkisindeki “b” katsayısı aldığı matematiksel değere bağlı olarak çalışma alanının depremselliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. “b” katsayısı dünyanın farklı bölgeleri için farklı değer aralıklarında ($0.3 \leq b \leq 2.6$) temsil edilmektedir. Sismik açıdan aktif coğrafyalarda G-R bağıntısındaki ortalama “b” katsayısının 1.0 ve 1.0’e yakın değerler aldığı kabul edilirken tektonik kökenli depremler için ise bu değer $0.5 \leq b \leq 1.5$ arasında değişim gösterdiği varsayılmaktadır [55]. Şekil 7’de görülen $b=1.17$ değerinin 1’den büyük olması ise çalışma alanının tektonik yapısının aktifliğinin az ya da çok olmasından ziyade çalışma alanında hakim durumda olan küçük magnitüdü depremlerden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak

çalışma alanı için elde edilen “b” değerinin ve dolayısı ile magnitüd-frekans dağılımının bilinen G-R ilişkisi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

G-R grafiğinin oluşturulmasından sonra çalışma alanı için fraktal boyut, “ D_c ” değeri R (km) uzaklığına karşı C(R) ilişki integralinin logaritmik olarak çizilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. İlişki integrali grafiği ile fraktal boyut “ D_c ” değeri ve fraktal boyut aralığı

Şekil 8’de görüldüğü üzere fraktal boyut aralığı [5.81-42.04] km olmak üzere $D_c=2.22 \pm 0.04$ olarak belirlenmiştir. “ D_c ” değerinin belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta sonuç üzerinde doğrudan etkisi olan boyut aralığı seçimidir. Deprem yoğunluğuna uygun olarak belirlenmesi gereken bu değer çalışma alanı için sismolojik anlamı kuvvetli “ D_c ” değerinin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Belirlenecek en küçük boyut aralığının çalışma alanında meydana gelen depremlerin episantr hata büyüklüğü veya episantr büyüklüklerindeki hata ile orantılı olduğu, en büyük boyut aralığının ise çalışma alanının genişliği ile alakalı olduğu kabul edilmektedir [56]. Türkiye’nin farklı bölgelerinde yapılan fraktal analiz çalışmaları incelendiğinde fraktal boyut aralığının 2 km ile 160 km arasında değişim gösterdiği görülmektedir [57]. En büyük boyut aralığının çalışma alanı özelinde değişiklik gösterebileceği göz önüne alındığında çalışma alanı için belirlenen en küçük fraktal boyut aralığının literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Düzenli yapılar ile ilgilenen Öklid geometrisinde boyut kavramı noktanın boyutu 0 (sıfır), doğrunun boyutu 1 (bir), düzlemin boyutu 2 (iki) ve küpün boyutu 3 (üç) olacak şekilde tam sayılarla ifade edilir [58]. Düzensiz yapılar ile ilgilenen Fraktal geometrisinde ise boyut kavramı kesirli sayılarla belirtilmektedir. Yani eğrinin fraktal boyutu 1 ile 2 arasında değişirken düzlem veya küresel yapı arasında bir düzensizliğe sahip yapının fraktal boyutu ise 2 ile 3 arasında değişim göstermektedir. $2 < D_c < 3$ aralığında değişim gösteren görece olarak yüksek “ D_c ” değeri çalışma alanında düzlem veya küresel bir yapı arasında bir düzensizliğe sahip ortamın varlığına işaret etmektedir [59].

Literatürde “ D_c ” değeri ile “b” değeri arasında anlamlı ve güvenilir ampirik bağıntıların varlığı “ D_c ” değerinin sismoloji çalışmaları için önemini ortaya koymaktadır [47, 60-62]. Farklı araştırmacılar tarafından Türkiye’nin tamamı ya da belirli bölgeleri için farklı deprem verileri kullanılarak yapılan fraktal analiz çalışmalarının incelenmesi ile birlikte Türkiye genelinde “ D_c ” değerinin $0.78 \leq D_c \leq 2.57$ aralığında değişim gösterdiği görülmektedir [57, 63]. Bu bağlamda çalışma alanı için elde edilen “ D_c ” değerinin Türkiye için elde edilen “ D_c ” değer aralığı ile uyumlu olduğu görülmektedir.

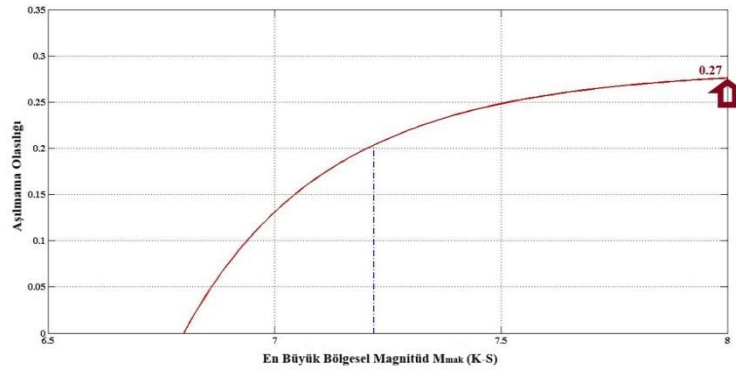
Çalışma alanı için standart sapma değeri oldukça küçük olan “b” ve “ D_c ” değerleri hem literatür ile hem de birbiri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu durum çalışma alanı için kullanılan katalogun ve yöntemin güvenilirliği arttırmakta dolayısı ile de elde edilecek deprensellik parametrelerinin anlamlarını kuvvetlendirmektedir. Sonuç olarak birbiri ile uyumlu “b” ve “ D_c ” değerlerinin sismolojik açıdan anlamlı sonuçlar vermesi çalışma alanı için gerilme değişiminin bir belirtisi olabileceği düşünülmektedir [49].

Çalışma alanının tamamında ileride meydana gelmesi muhtemel “ M_{mak} ” değeri G-R ilişki grafiğinden elde edilen $b=1.17$ değeri kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ise Tablo 2’de verilmiştir.

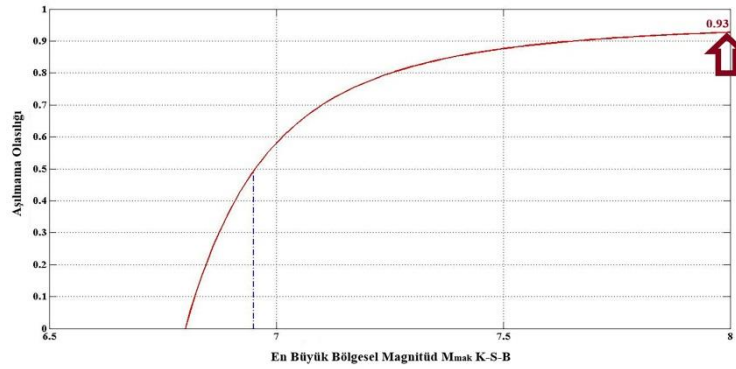
Tablo 2. G-R ilişki grafiğinden hesaplanan “ M_{mak} ” değerleri

“b” değeri	K-S “ M_{mak} ” değeri	K-S-B “ M_{mak} ” değeri
1.17	7.22	6.95

Ancak elde edilen “ M_{mak} ” değerlerinin çalışma alanının tamamı için yapılacak deprem tehlike ve deprem risk çalışmalarında kullanılabilirliklerini sağlamak için olasılık-güvenilirlik sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Psirenko [64], “ M_{mak} ” değerlerinin aşılma olasılıklarının 0.90 ve daha yüksek olması durumunda hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olası-güvenilir olduğunu belirtmiştir. Çalışma alanında kullanılan yöntemlere bağlı olarak elde edilen “ M_{mak} ” değerlerine ait olasılık-güvenilirlik grafikleri sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 9. K-S yöntemi ile hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olasılık-güvenilirlik grafiği

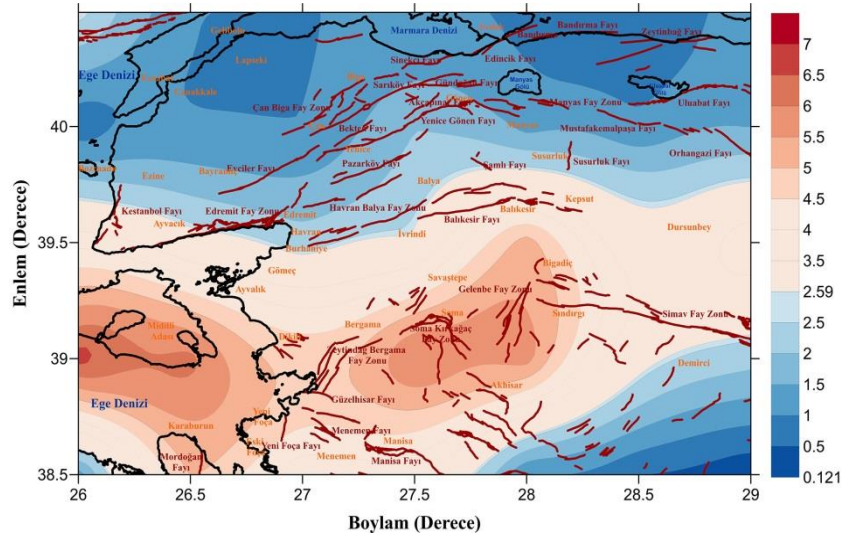


Şekil 10. K-S-B yöntemi ile hesaplanan “ M_{mak} ” değerinin olasılık-güvenilirlik grafiği

Şekil 9’da aşılma olasılığının yaklaşık olarak 0.27 olduğu görülürken Şekil 10’da bu değer yaklaşık olarak 0.93’dir. Bu değerlendirmeye göre çalışma alanı için K-S-B yönteminin daha uygun olduğunu ve aynı şekilde çalışma alanının tamamı için $M_{mak}=6.95$ değerinin olası-güvenilir olduğunu ifade etmek mümkündür.

Yapılan genel depremsellik değerlendirmesinden sonra çalışma alanının deprem potansiyelinin detaylı olarak incelenebilmesi için çalışma alanı $0.5^{\circ}K \times 0.5^{\circ}D$ olacak şekilde alt alanlara ayrılmıştır. Oluşturulan her bir alt alanda meydana gelen depremlerin yığınsal dağılımları dikkate alınarak belirlenmek istenen parametrik değer için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Ancak inceleme yapılan alt alanda yeterli sayıda depremin (10 depremden daha az deprem bulunması durumu) bulunmaması durumunda o alt alan değerlendirmeye alınmamıştır.

Çalışma alanında öncelikle deprensellik çalışmalarında yardımcı parametre olarak kabul edilen ve inceleme yapılabilen her alt alanda deprem sayısı/yıl sayısı ölçütü ile hesaplanan deprem aktivite oranı “ λ ” değeri belirlenmiştir. En küçük, ortalama ve en büyük “ λ ” değeri sırası ile $\lambda_{\min}=0.121$, $\lambda_{\text{ort}}=2.59$ ve $\lambda_{\max}=6.74$ olarak hesaplanmış ve de “ λ ” değeri dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 11).



Şekil 11. Çalışma alanı “ λ ” değeri dağılım haritası

Şekil 11’de dağılımı görülen deprem aktivite oranı “ λ ” değerinin küçük ya da büyük değerde olması çalışma alanının deprem etkinliğinin seyrek ya da yoğun olması ile ilişkilidir. Bu nedenle de “ λ ” değeri dağılım haritalarının episantr dağılım haritaları ile uyum içinde olması beklenir. Bu bağlamda Şekil 5’de verilen çalışma alanı episantr haritası ile oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülen “ λ ” değeri dağılım haritasına göre çalışma alanının merkez noktası olarak tanımlayabileceğimiz Balıkesir il merkezinin güneyinde kalan alt alanların deprem etkinliğinin kuzeyinde kalan alt alanlara göre daha yoğun olduğunu söylemek mümkündür. Detaylı bir ifade ile çalışma alanının deprem etkinliğinin Karaburun ve Midilli Adası açıklarında, Zeytinadağ-Bergama Fay Zonu, Soma-Kırkağaç Fay Zonu ve Gelenbe Fay Zonu civarında oldukça fazla olduğu, bu alt alanları Menemen ve çevresi, Dursunbey ve çevresi, Balıkesir-Ayvalık hattı ile Ayvacık ve çevresinin takip ettiğini söylemek mümkündür.

Ayrıca Şekil 11’de çalışma alanının aktif tektonik birimlerinin yarısının büyük “ λ ” değeri, diğer yarısının ise küçük “ λ ” değeri ile karakterize edilen alt alanlarda kaldığı görülmektedir. Çalışma alanındaki orta büyüklükteki depremlerin de yaklaşık olarak %69’u ortalama “ λ ” değerinden daha büyük değere sahip alanlarda, %31’i ise “ λ ” değerinden daha küçük değere sahip alanlarda meydana geldiği görülmektedir. Büyük depremlerin yaşandığı aktif tektonik birimlerin küçük “ λ ” değeri ile karakterize edilmesi, “ λ ” değerinin belirlenmesinde depremlerin büyüklük değerlerinin değil deprem oluşum sayılarının etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle 1953 Yenice-Gönen, 1964 Manyas ve 1969 Gönen Depremleri başta olmak üzere çalışma alanı için önemli olduğu kabul edilen depremlerin küçük “ λ ” değeri ile karakterize edilen alt alanlarda meydana gelmiş olmaları o alt alanların deprem potansiyellerinin daha detaylı incelenme gerekliliğini de ortaya koymaktadır. Sonuç olarak herhangi bir alanın deprenselliği tanımlanırken “ λ ” değeri ana parametre değil yardımcı parametre olarak değerlendirilmelidir. Yardımcı parametre olarak tanımlanmasının en önemli nedeni ise yapılan çalışmada olduğu gibi en büyük magnitüd değerinin “ M_{\max} ” hesaplamaları için “ λ ” değerine ihtiyaç duyulmasıdır.

“ λ ” değerinin belirlenmesinden sonra bölgenin tektoniğinin ve sismisitesinin tanımlanmasında önemli bir parametre olan “b” değeri EBO yöntemi esaslarına [45] göre belirlenmiş ve “b” değeri dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 12).

ve açıklarının çevresine nazaran sahip olduğu düşük “b” değerini ise ısı akısının düşüşünün yanı sıra küçük ve büyük magnitüdü depremlerin varlığının bir arada görülmesi ile ilişkilendirmek mümkündür. Her ne kadar bu bölgedeki en büyük jeotermal potansiyel Bergama ve çevresi olarak tanımlansa da Foça-Aliğa bölgesi de eğilimin bir uzantısı konumundandır ve yüksek potansiyele sahiptir [75]. Ayrıca Foça ve çevresinin sahip olduğu ve Foça Volkanik Kompleksi olarak adlandırılan jeolojik birim nedeniyle de bu alanın ısı akısının çok düşük olamayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle de Eski Foça ve Yeni Foça'nın küresel ortalama “b” değerine göre yüksek ancak çalışma alanı içinde Soma-Kırkağaç Fay Zonu ve Zeytindağ-Bergama Fay Zonu için elde edilen “b” değerine göre görece olarak düşük olmasını da ısı akısındaki bu az miktardaki değişim ile ilişkilendirmek mümkündür. Sonuç olarak, çalışma alanının güneybatı kısmı için ısı akısı değerleri ile “b” değeri dağılımının hem literatür ile hem de kabul edilen varsayımlar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Jeotermal enerji hammaddeleri bakımından zengin alanlara sahip Balıkesir ve çevresindeki jeotermal alanlar ağırlıklı olarak Gönen, Havran, Balya ve Susurluk ilçelerinde yoğunlaşmaktadır [76]. Hisarlı [77] tarafından yapılan çalışmada Biga Yarımadası ve Kireç (Dursunbey)-Sındırgı civarından elde edilen sığ Curie nokta derinlikleri ile manyetik-gravite anomalileri arasında gözlenen ilişkiden dolayı bu alt alanların yüksek ısı ve ince kabuk yapısına sahip olabileceği belirtilmiştir. Bu durum çalışma alanı içerisindeki Sındırgı ve çevresi ile Ayvacık, Kestanbol, Bayramiç ve çevresindeki yüksek “b” değerini açıklamaktadır. Yapılan çalışmada olduğu gibi Akyol [78] tarafından yapılan çalışmada da Edremit Körfezi çevresinde yüksek “b” değerleri elde edilmiştir. Ve bu durumun bir nedeni olarak da jeolojik açıdan Kestanbol granitleri olarak tanımlanan sağlam litolojik özelliklere sahip jeolojik birimler olabileceği belirtilmiştir. Çalışma alanının kuzeybatı kısmına ait ısı akısı değişimleri ile “b” değeri değişiminin uyumlu bir dağılım verdiğini söylemek mümkündür. Aktif sağ yanal doğrultu atımlı bir fay özelliğinde olan Yenice-Gönen Fayı üzerinde yer alan Gönen jeotermal kaynağına rağmen bu alt alan çalışma alanı içerisinde düşük “b” değeri ile karakterize edilmektedir. Schorlemmer [79] tarafından yapılan çalışmada normal faylanma alanlarında yüksek “b” değeri, ters faylanma alanlarında orta büyüklükte “b” değeri ve son olarak doğrultu atımlı faylanma alanlarında ise düşük “b” değeri beklenmesi gerektiği belirtilmiştir. Geçmişte yıkıcı ve büyük depremlerin yaşandığı Yenice ve Gönen çevresindeki “b” değerindeki bu düşüşü geçmiş deprem hareketliliğinin yanı sıra faylanma karakterindeki değişim ile de ilişkilendirmek mümkün olabilmektedir. Ancak çalışma alanı içerisinde büyük ve yıkıcı etki yaratan depremlerin de bu alt alan ve yakın çevresinde gerçekleştiği ve dolayısı ile “b” değerinin düşük değerler ile karakterize edilmesinde bu durumun etkisinin de göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Ayrıca Gezer ve Bekler [80] tarafından yapılan çalışmada da Yenice-Gönen kırığının ürettiği depremlerin olduğu alanlarda “b” değerinin düşük olduğu belirtilmiştir.

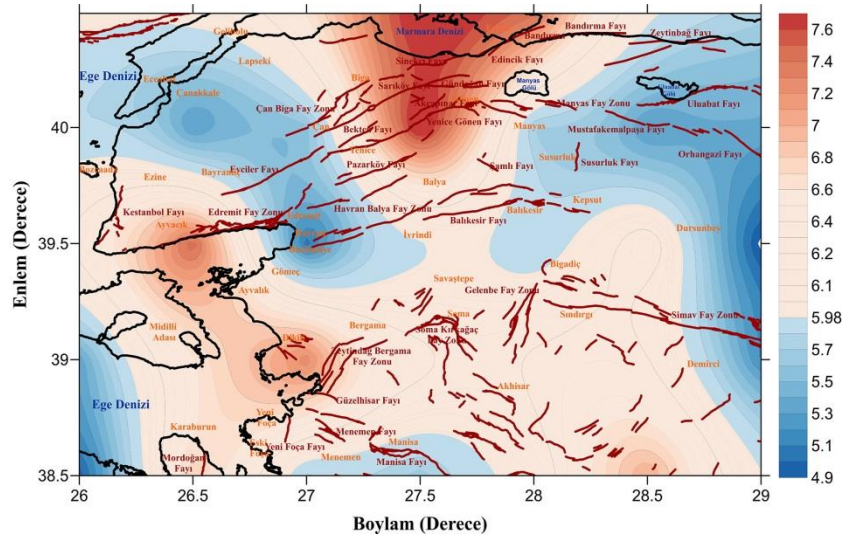
Çalışma alanının bilinen tektonik yapısının sıkışmalı-genişlemeli bir hareketin ürünü olarak doğrultu atımlı faylanmadan normal faylanmaya geçiş olarak tanımlanıyor olması göz önüne alındığında “b” değeri dağılımı ile faylanma karakteri değişiminin önemli bir oranda uyum yakaladığını ifade etmek mümkündür.

Tüm bu değerlendirmelere ilave olarak, Gutenberg ve Richter [81] dünya ölçeğinde istatistiksel sonuçlara dayandırarak sığ depremler için “b” değerinin $b=0.9\pm 0.02$, orta ve derin depremler için ise “b” değerinin $b=1.2\pm 0.2$ olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma alanı derinlik dağılım haritasında (Şekil 6) görüldüğü üzere çalışma alanı içerisinde meydana gelen orta derin depremlerin en yoğun görüldüğü alt alan Soma-Kırkağaç Fay zonu ve çevresidir. Bu alanın yüksek “b” değeri ile karakterize olmasının bir önemli nedeninde bu durum olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Edremit Fay Zonu ve yakın çevresinin Zeytindağ-Bergama Fay Zonu ve çevresi ile Soma-Kırkağaç Fay Zonu'na kıyasla daha küçük ama çalışma alanının tamamı için görece olarak yüksek “b” değerine sahip olduğu görülmektedir. Çalışma alanı episantr dağılım haritası (Şekil 5) incelendiğinde Edremit Fay Zonu ve yakın çevresinin yeterli deprem verisine sahip olmadığı görülmektedir. Yüksek “b” değeri ile karakterize edilen alt alanları deprem sayısı yetersizliği, büyük magnitüdü olayların az olması, küçük magnitüdü depremlerin yakın alt alanlara göre bu alanlarda daha fazla olması ile ilişkilendirmek mümkündür. Edremit Fay Zonu ve çevresinde görülen “b” değeri üzerinde bu durumun etkisi kaçınılmazdır. Çalışma alanı içerisinde düşük “b” değeri ile karakterize edilen alt alanlar incelendiğinde de büyük magnitüdü depremlerin küçük magnitüdü depremleri baskıladığı

görülmektedir. Bu nedenle “b” değeri üzerinde deprem sayısı kadar küçük ve büyük magnitüdü depremlerin yoğunluğunun da önemli değişimler yarattığı görülmektedir.

Sonuç olarak çalışma alanı içerisinde düşük ve yüksek “b” değeri dağılımı veren alt bölgelerin bu bölgelere ait tektonik, jeolojik, hidrokimyasal ve jeokimyasal özellikler ile hem de literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu kapsamda çalışma alanının tamamı için deprenselliğin oldukça yüksek olduğu görülmekle birlikte düşük “b” değeri ile yüksek gerilim arasındaki ilişki göz önüne alındığında çalışma alanının ana noktası olarak kabul edilen Balıkesir il merkezinin kuzey kısımları ve güneydoğu kısımlarının önemli deprensellik alanları olduğunu ifade etmek mümkündür.

İleride meydana gelmesi muhtemel “ M_{\max} ” değerinin belirlenmesiyle birlikte çalışma alanının deprenselliğinin tanımlanması için gerekli deprensellik parametrelerinin tamamı belirlenmiş olacaktır. Çalışmanın bu aşamasında “ M_{\max} ” değerinin belirlenmesi için verdiği güvenilir sonuçlar nedeni ile K-S-B yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda $4.9 \leq M_{\max} \leq 7.6$ aralığında değişim gösteren “ M_{\max} ” değerinin ortalama değeri ise “ $M_{\max\text{kort}}$ ” $M_{\max\text{kort}}=5.98$ olarak belirlenmiş ve “ M_{\max} ” değeri dağılım haritası oluşturulmuştur (Şekil 13).



Şekil 13. Çalışma alanı “ M_{\max} ” değeri dağılım haritası

Şekil 13 incelendiğinde çalışma alanının aktif tektonik birimlerinin önemli bir kısmının ortalama “ M_{\max} ” değerinden daha büyük magnitüd değerleri ile karakterize olan alanlarda yer aldığı görülmektedir. Özellikle “b” değeri dağılım haritasında (Şekil 12) önemli deprensellik alanları olarak tanımlanan alt alanların büyük “ M_{\max} ” değeri ile karakterize olması elde edilen sonuçların birbiri ile uyumunu göstermektedir.

Şekil 13’de “ M_{\max} ” değerinin dağılımı incelendiğinde ise Yenice-Gönen Fayı ile başlayan ve Marmara Denizi’ne doğru genişleme gösteren alt alanların çalışma alanı içerisindeki en büyük “ M_{\max} ” değerleri ($M_{\max} \geq 7.0$) ile karakterize olduğu görülmektedir. Bu durumda 1935 Erdek Depremi ve 1953 Yenice-Gönen Depremi etkilerinin bir arada görülüyor olmasının etkisinin oldukça fazla olmasının yanı sıra daha önce de belirtildiği gibi bu alt alanlarda görece olarak deprem sayısının az olmasının da etkisi büyüktür.

Çalışma alanı için yapılan deprensellik çalışmaları incelendiğinde ise benzer alanları kapsayan çalışmalarda “ M_{\max} ” değerlerinin hesaplandığı ya da çalışma alanında yer alan aktif faylar için olası deprem senaryolarına göre deprem büyüklüklerinin (M_w) belirlendiği görülmüştür. Bu çalışmalarda elde edilen değerler ise $6.0 \leq M \leq 7.55$ aralığında değişim göstermektedir [65, 82-85]. Gözlenen uyumlu

sonuçlara rağmen yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler, deprem veri setleri, yapılan kabuller/varsayımlar ve hata payları/oranları arasında farklılıklar olduğu gerçeği de unutulmamalıdır.

Sonuç olarak çalışma kapsamında elde edilen “ M_{mak} ” değerlerinin çalışma alanının tektonik yapısına uygun değerler vermesi ve dağılım göstermesinin yanında literatür ile de uyumlu sonuçlar vermesi çalışma alanı için elde edilen güncel “ M_{mak} ” değerlerinin güvenilirliğinin göstergesi olması açısından oldukça önemlidir. Bu kapsamda elde edilen ortalama “ M_{mak} ” değerinden ($M_{makort}=5.98$) küçük “ M_{mak} ” değeri ile karakterize olan alt alanlar için $5.5 \leq M_{mak} \leq 5.8$ aralığındaki depremlerin geniş yayılımlar gösterdiği ve dolayısı ile bu alt alanlarda bu aralıkta depremlerin meydana gelme olasılığının oldukça olası olduğu görülmektedir. Ortalama “ M_{mak} ” değerinden ($M_{makort}=5.98$) büyük “ M_{mak} ” değeri ile karakterize olan alt alanlar incelendiğinde ise $6.0 \leq M_{mak} \leq 6.9$ aralığındaki depremlerin $6.9 \leq M_{mak} \leq 7.6$ aralığındaki depremlere oranla daha kapsayıcı dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle çalışma alanının genelinde $6.0 \leq M_{mak} \leq 6.9$ aralığında deprem ve/veya depremler ile karşı karşıya olma olasılığının daha fazla olduğunu ifade etmek mümkündür.

IV. SONUÇ

Tektonik açıdan Kuzey Anadolu Fay Zonu ile Ege Graben Sistemi arasında bir geçiş bölgesinde yer alan Balıkesir MS 117 yılından itibaren yıkıcı etkisi olan depremlere ev sahipliği yapmaktadır. Balıkesir ve çevresinin günümüzde sahip olduğu nüfus yoğunluğu, sanayi alt yapısı, turizm potansiyeli ve kültürel miras noktaları göz önüne alındığında yıkıcı etkisi olan bir depremin yaratacağı kayıpların sadece Balıkesir ili ve çevresini değil aynı zamanda Türkiye'nin tamamını etkileyeceği çok açıktır. Bu nedenle Balıkesir ili ve çevresinin güncel depremselliğinin belirlenebilmesi ve elde edilen sonuçlara göre de aksiyon alınabilmesinin sağlanması hem sosyal hem de ekonomik açıdan hayati önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada Balıkesir ili ve çevresi (38.50° - 40.50° K- 26.00° - 29.00° D) için kapsamlı bir depremsellik çalışması yapılmıştır. Farklı istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı çalışmada belirlenen depremsellik parametreleri aracılığı ile çalışma alanının genel depremselliği ve aynı zamanda deprem potansiyeli açısından ön plana çıkan alt alanlar belirlenmiştir.

Çalışma alanının güncel depremselliğinin belirlenmesi için hem tarihsel hem de aletsel dönem deprem verileri incelenmiştir. Mühendislik yetkinliğinin bulunmaması nedeniyle deprem istatistiği çalışmalarına dahil edilmeyen tarihsel dönem deprem verilerinin Manyas Gölü ve çevresi, Ege Denizi açıkları özellikle de Midilli Adası ve yakın çevresi ile Dikili ve Foça arasında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Tarihsel dönem deprem verilerinin bu alt alanlarda yoğunlaşmasında bu alt alanların deprem hareketliliği dışında arkeolojik açıdan da zengin olması nedeniyle günümüzde bu alt alanlar hakkında çok fazla bilgiye sahip olunmasının etkisi de göz ardı edilmemelidir. Güncel depremselliğin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için KRDAE kataloğundan temin edilen aletsel dönem deprem verilerine uygulanan işlemlerden sonra depremsellik çalışmalarında kullanılabilir homojen, bağımlı olaylardan arındırılmış ve tamamlılık analizi yapılmış bir deprem kataloğu oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kataloğa göre çalışma alanının 1900'lü yılların başından itibaren oldukça fazla deprem hareketliliğine ev sahipliği yaptığı ve bu depremlerin büyük bir çoğunluğunun da küçük magnitudlü ve sığ depremlerden oluştuğu görülmektedir. Dolayısı ile de görece olarak daha az sayıda deprem sayısı ile temsil edilen orta büyüklükte ve orta derinlikteki depremlerin deprem tehlike ve olasılık çalışması sonuçları üzerinde daha az etkiye sahip olacağını ifade etmek mümkündür.

Depremselliğin genel hatları ile ortaya konulabilmesi için G-R ilişki grafiği ve “a” ve “b” katsayıları ile ilişki integrali, fraktal boyut “ D_c ” değeri ve fraktal boyut aralığı belirlenmiştir. “b” değeri $b=1.17$ “ D_c ” değeri ise $D_c=2.22$ olarak bulunmuştur. Çalışma alanının tamamının sahip olduğu görece olarak düşük kabul edebileceğimiz “b” değeri ile görece olarak yüksek “ D_c ” değeri baskın sismolojik yapısal bir özellik olarak ön plana çıkmaktadır. Çalışma alanının tamamını kapsayacak ileride meydana gelmesi muhtemel “ M_{mak} ” değerinin $6.95 \leq M_{mak} \leq 7.22$ aralığında değişim gösterebileceği ancak güvenilir “ M_{mak} ” değerinin K-S-B yönteminden elde edilen $M_{mak}=6.95$ olduğu belirlenmiştir.

Baskın sismolojik özelliklerin daha detaylı incelenebilmesi için $0.5^{\circ}K \times 0.5^{\circ}D$ olacak şekilde alt alanlara ayrılan çalışma alanında her bir alt alan için G-R ilişki grafiği oluşturulmuştur. “a” değeri $3.63 \leq a \leq 7.49$ aralığında değişim gösterirken sahip olduğu fiziksel anlamlar nedeni ile deprem kestirimi çalışmaları için öncü bir parametre olarak kabul edilen “b” değeri ise $0.73 \leq b \leq 1.55$ aralığında değişmektedir. Aktif tektonik yapısının yanı sıra sahip olduğu bölgesel yüksek ısı akısının varlığı ve alt alanların deprem verisi özellikleri çalışma alanı içerisinde düşük ve yüksek “b” değerlerinin bir arada görülmesine neden olmaktadır. Başta Gönen ve çevresi, Uluabat Gölü ve çevresi, Erdek ve çevresi, Ege Denizi ve Midilli-Ayvacık açıkları ile Demirci-Akhisar arası düşük “b” değeri ile karakterize olmakta dolayısı ile deprem potansiyeli açısından ön plana çıkmaktadırlar.

Çalışma alanında meydana gelmesi muhtemel “ M_{mak} ” değerinin ise $4.9 \leq M_{mak} \leq 7.6$ aralığında değişim gösterdiği görülmektedir. “b” değeri ve “ M_{mak} ” değeri dağılım haritalarının birlikte değerlendirilmesi sonucunda Yenice-Gönen Fayı ve çevresi ile başlayan ve Marmara Denizi’ne doğru genişleyen alt alan başta olmak üzere Midilli-Ayvacık açıkları, Demirci-Akhisar arası ve bölgesel değişikliklere rağmen Ege Denizi için deprenselliğin yüksek olduğu görülmektedir. Ege Denizi için $5.9 \leq M_w \leq 6.8$ aralığında deprem büyüklüğünün oldukça olağan olduğunu ayrıca Balıkesir il merkezi ve yakın çevresi için ise $5.9 \leq M_w \leq 7.2$ aralığındaki depremlere hazırlıklı olunması gerektiğini söylemek mümkündür.

Sonuç olarak çalışma alanı için tanımlanan sismolojik özellikler, hesaplanan deprensellik parametreleri ve deprensellik açısından ön plana çıkan alt alanların belirlenmesi ile birlikte gelecekte meydana gelmesi muhtemel deprem ve/veya depremlerin zararlarının azaltılmasına yönelik yapılacak çalışmalarda kullanılabilir önemli olasılıksal değerler hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar; çalışma alanı içerisinde istenilen herhangi alt alanın olası bir depremden ne kadar etkileneyeceğinin belirlenmesi amacı ile yerel tasarım ivme spektrumlarında deprem dağılım ve deprem büyüklüğü aşılma olasılığı çalışmalarında kullanılabilir veri girişini sağlayacak düzeydedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Anonim. (2022, Nisan). *Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri* [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf
- [2] N. Pınar ve E. Lahn, “Türkiye Depremleri İzahlı Kataloğu”, Bayındırlık Bakanlığı, Yapı ve İmar İşleri Reisliği, Türkiye, 6, 1952.
- [3] K. Ergin, U. Güçlü, U. ve Z. Uz, “Türkiye ve Civarının Deprem Kataloğu (M.S. 11-1964)” İstanbul Teknik Üniversitesi, Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları, Türkiye, 1967.
- [4] H. Soysal, S. Sipahioğlu, D. Kolçak, ve Y. Altınok, “Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu, M.Ö.2100-M.S.1900,” TÜBİTAK Temel Bilimler Araştırma Grubu, Türkiye, Rap. 341, 1981.
- [5] N. N. Ambraseys and C. F. Finkel, “Long Term Seismicity of İstanbul and of the Marmara Region”, *Terra Nova*, vol. 3, pp.527-539, 1991.
- [6] N. N. Ambraseys and J. A. Jackson, “Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500”, *Geophysical Journal International*, vol. 141,, T539-834, 2000.
- [7] O. Tan, M. C. Tapırdamaz and A. Yörük, “The Earthquake Catalogues for Turkey”, *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol.17, 405-418, 2008.

- [8] AFAD. *T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://deprem.afad.gov.tr/home-page>
- [9] KRDAE. *Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü* [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>
- [10] ISC. *International Seismological Centre* [Çevrimiçi]. Erişim: <http://www.isc.ac.uk/>
- [11] NEIC. *National Earthquake Information Center* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-information-center-neic>
- [12] W. Salomon-Calvi, “Türkiye’nin Zelzele Haritasına Dair Birkaç Söz”, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) Yayını, Türkiye, Rap. 1257, 1941.
- [13] K. Ergin, U. Güçlü ve Z. Uz, “Türkiye ve Civarının Deprem Katalogu (M.S. 11-1964)”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Arz Fiziği Enstitüsü Yayınları, Türkiye, Rap. 24, 1967.
- [14] N. V. Shebalin, V. Karnik and D. Hadzievski, “Catalogue of Earthquakes, Part 1, 1901-1970”, UDNP-Unesco Survey of the Seismicity of Balkan Region, Skopje, 1974.
- [15] A. Özoğul, “Balıkesir Ovası ve Yakın Çevresinde Meydana Gelen Depremlerin Uygulamalı Jeomorfoloji Bakımından Etkileri”, *Uludağ Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, vol. 11, ss. 43-51, 1987.
- [16] Ö. Emre, S. Özalp, A. Doğan, V. Özaksoy, C. Yıldırım ve F. Göktaş, İzmir Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri. Maden Tetkik Arama, Türkiye, Rap. 10754, 2005.
- [17] B.C. Papazachos, “Dependence of the seismic parameter b on the magnitude range”, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 112, pp. 1059-1065, 1974.
- [18] P.W. Burton, “Seismic risk in Southern Europe through India examined Gumbel’s third distribution of extreme values”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 59, pp. 259-280, 1979.
- [19] A. Kijko and M.A. Sellevoll, “Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part I, utilization of extreme and complete catalogues with different threshold magnitudes”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 79, pp. 645-654, 1989.
- [20] A. Kijko and M.A. Sellevoll, “Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files, part II, incorporation of magnitude heterogeneity”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 82, pp. 120-134, 1992.
- [21] B.C. Papazachos, “An alternative method for a reliable estimation of seismicity with an application in Greece and the Surrounding Area”, *Bulletin of Seismology Society of America* vol. 89, pp. 111-119, 1999.
- [22] M.V. Manakou and T.M. Tsapanos, “Seismicity and seismic hazard parameters evaluation in the Island of Crete and surrounding area inferred from mixed data files”, *Tectonophysics*, vol. 321, pp. 157-178, 2000.
- [23] E.M. Scordilis, “Empirical Global Relations Converting Ms And Mb To Moment Magnitude”, *Journal of Seismology*, vol. 10, pp. 225-236, 2006.
- [24] A. Deniz and M. S. Yüçemen, “Magnitude Conversion Problem for the Turkish Earthquake Data”, *Natural Hazards*, vol. 55, pp. 333-352, 2010.

- [25] F. T. Kadirioglu and R. F. Kartal, "The New Empirical Magnitude Conversion Relations Using and Improved Earthquake Catalogue for Turkey and its near vicinity (1900-2012)", *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol 25, pp. 300-310, 2016.
- [26] M.S. Yucemen, "Olasılıksal sismik tehlike analizi: Genel bakış ve istatistiksel modellemede dikkat edilmesi gerekli hususlar", *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ankara, Türkiye, 2011, ss. 1-20.
- [27] J. K. Gardner and L. Knopoff, "Is the sequence of earthquakes in Southern California, with Aftershocks Removed Poissonian?", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 64, pp. 1363-1367, 1974.
- [28] P.A. Reasenber, "Second-order moment of Central California seismicity 1969-1982", *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, no. B7, pp. 5479-5495, 1985.
- [29] S. Wiemer and M. Wyss, "Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, no. 4, pp. 859-869, 2000.
- [30] I. Zaliapin and Y. Ben-Zion, "Earthquake Clusters in Southern California II: Classification and Relation to Physical Properties of the Crust", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 118, 2865-2877, 2013.
- [31] R. Console, C. Montuori and M. Murru, "Statistical Assessment of Seismicity Patterns in Italy: Are they Precursors of Subsequent Events?" *Journal of Seismology*, vol. 4, pp. 435-449, 2000.
- [32] A. Helmstetter, Y. Y. Kagan and D. D. Jackson, "Comparison of Short-Term and Time-Independent Earthquake Forecast Models for Southern California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 96, 90-106, 2006.
- [33] M. Zare, H. Amini, P. Yazdi, K. Sesetyan, M. B. Demircioglu, D. Kalafat, M. Erdik, D. Giardini, M. A. Khan and N. Tsereteli, "Recent Developments of the Middle East Catalog", *Journal of Seismology*, vol. 18, 749-772, 2014.
- [34] S. Öztürk, "A Study on the Correlations Between Seismotectonic b-value and Dc-value, and Seismic Quiescence Z-value in the Western Anatolian Region of Turkey", *Austrian Journal of Earth Sciences*, vol. 108, pp. 172-184, 2015.
- [35] S.A. Wiemer, "Software package to analyze seismicity: Zmap", *Seismological Research Letters*, vol. 72, no. 2, pp. 374-383, 2001.
- [36] B. Gutenberg and C.F. Richter, "Frequency of earthquakes in California", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 34, pp. 185-188, 1944.
- [37] C.R. Allen, P., Amanp, C.F. Richter and J.M. Nordquist, "Relation between seismicity and geological structure in the S. California region", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 55, pp. 752-797, 1965.
- [38] J. Weeks, D. Lockner, and J. Byerlee, "Change in b-values during movement on cut surfaces in granite", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 68, pp. 333-341, 1978.
- [39] P.M. Hazidimitriou, E.E. Papadimitriou, D.M. Mountrakis and B.C. Papazachos, "The seismic parameter b of the frequency-magnitude relation and its association with the geological zones in the area of Greece", *Tectonophysics*, vol. 120, pp. 141-151, 1985.

- [40] J.H. Wang, “b-values of shallow earthquakes in Taiwan”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 78, pp. 1243-1254, 1988.
- [41] T.M. Tsapanos, D.G. Galanopoulos and P.W. Burton, “Seismicity in the Hellenic Volcanic Arc: Relation between seismic parameters and the geophysics fields in the region”, *Geophysical Journal International*, vol. 117, pp. 1677-1687, 1994.
- [42] J. Mori, and R.E. Abercrombie, “Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, pp. 15081-15090, 1997.
- [43] Olsson, R., An Estimation of Maximum b-Value in the Gutenberg-Richter Relation. *Journal of Geodynamics*, 27, 547-552, 1999.
- [44] S. Wiemer and M. Baer, “Mapping and removing quarry blast events from seismicity catalogs”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 90, pp. 525-530, 2000.
- [45] K. Aki, “Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits”, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, vol. 43, pp. 237-239, 1965.
- [46] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Space-time correlations of seismotectonic parameters and examples from Japan and Turkey preceding the İzmit earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 339-350, 2002.
- [47] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Anomalous seismicity preceding the 1999 İzmit event, NW Turkey”, *Geophysical Journal International*, vol. 169, pp. 259-270, 2007.
- [48] O. Polat, E. Gök and D. Yılmaz, “Earthquake hazard of the Aegean Extension Region (West Turkey)”, *Turkish Journal of Earth Science*, vol. 17, pp. 593-614, 2008.
- [49] S. Öztürk, “Orta Anadolu Bölgesi ve civarındaki depremselliğin bölge-zaman-magnitüd analizleri ve güncel deprem potansiyeli”, *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, c. 1, s. 2, ss. 148-166, 2019.
- [50] P. Grassberger and I. Procaccia, “Measuring the strangeness of Strange attractors”. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 9, no. 1-2, pp. 189-208, 1983.
- [51] T. Hirata, “Correlation between the b-value and the fractal dimension of earthquakes”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, pp. 7507-7514, 1989.
- [52] A. Kijko, “Statistical Estimation of Maximum Regional Earthquake Magnitude m_{max} ”, Workshop: Seismicity Modelling in Seismic Hazard Mapping, Poljce, Slovenia, 2000.
- [53] A. Kijko, “Estimation of the Maximum Earthquake Magnitude, m_{max} ” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 161, pp. 1-27, 2004.
- [54] A. Kijko and M. Singh, “Statistical tools for maximum possible earthquake magnitude estimation”, *Acta Geophysica*, vol. 59, no. 4, pp. 674-700, 2011.
- [55] C. Frohlich and S. Davis, “Teleseismic b-values: or, much about 1.0”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, pp. 631-644, 1993.
- [56] Y.Y. Kagan and L. Knopoff, “Spatial distribution of earthquakes: The two correlation function”, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 62, pp. 303-320, 1980.

- [57] S. Öztürk, “Kuzey Anadolu Fay Zonu ve civarındaki güncel deprem aktivitesinin bölgesel ve zamana bağlı analizleri”, *Yerbilimleri*, c. 38, s. 2, ss. 193-228, 2017.
- [58] D.L. Turcotte, *Fractals and chaos in geology and geophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, New York, 1997.
- [59] E. Aydınadağ, “Kuzey Anadolu ve San Andreas Fay Zonlarında Aktif Fay Verilerinin Fraktal Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [60] A.O. Oncel and T.H. Wilson, “Correlation of seismotectonic variables and GPS strain measurements in Western Turkey”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, no. B11306, pp. 1-13, 2004.
- [61] S. Roy, U. Ghosh, S. Hazra and J.R. Kayal, “Fractal dimension and b-value mapping in the Andaman-Sumatra subduction zone”, *Natural Hazards*, vol. 57, pp. 27–37, 2011.
- [62] S. Öztürk, “Statistical correlation between b-value and fractal dimension regarding Turkish epicentre distribution”, *Earth Sciences Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 103-108, 2012.
- [63] S. Öztürk, “Türkiye’nin Batı Anadolu Bölgesi için deprem istatistiği ve olası güçlü depremlerin orta vadede bölgesel olarak tahmini üzerine bir çalışma”, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 4, s. 1, ss. 75-93, 2014.
- [64] V.F. Pisarenko, “Statistical evaluation of maximum possible magnitude”, *Izvestiya, Earth Physics*, vol. 27, pp. 757-763, 1991.
- [65] E. Bayrak, “Batı Anadolu bölgesinin deprem tehlikesinin farklı yöntemler kullanılarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2012.
- [66] N.M. Warren and G.V. Latham, “An experiment study of thermal induced micro-facturing and its relation to volcanic seismicity”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, pp. 4455-4464, 1970.
- [67] Y. Ogata, M. Imoto and K. Katsura, “3-D spatial variation of b-values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto District, Japan”, *Geophysical Journal International* vol. 104, pp. 135–146, 1991.
- [68] N. Maden and S. Öztürk, “Seismic b-values, bouguer gravity and heat flow data beneath Eastern Anatolia, Turkey: Tectonic implications”, *Surveys in Geophysics*, vol. 36, no. 4, pp. 549-570, 2015.
- [69] U. Akın, E.U. Uluggerli, ve S. Kutlu, “Türkiye jeotermal potansiyelinin ısı akısı hesaplamasıyla değerlendirilmesi”, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, c. 149, ss. 205-214, 2014.
- [70] D. Gürcün ve A. Petek, “Jeotermal Enerji Potansiyelinin Swot Analizi ile Değerlendirilmesi: Aydın İli Örneği”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 14, pp. 349-364, 2021.
- [71] S. Wiemer, S.R. McNutt and M. Wyss, M., “Temporal and three-dimensional spatial analyses of the frequency–magnitude distribution near Long Valley Caldera, California”, *Geophysical Journal International*, vol. 134, no. 2, pp. 409-421, 1998.
- [72] A. Bal, Aydın-İzmir civarının hava manyetik verilerinden ısı akısı değerlerinin belirlenmesi ve ısı akısı dağılımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2004.

- [73] O.M. İlkişik, “Regional heat flow in Western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs”, *Tectonophysics*, vol. 244, pp. 175–184, 1995.
- [74] A. Gurer, Ö.F. Gürer, A. Pinçe and O.M. İlkisik, “Conductivity structure along the Gediz Graben, West Anatolia, Turkey: Tectonic implications”, *International Geology Review*, vol. 43, no. 12, pp. 1129-1144, 2001.
- [75] A. Aydemir, F. Bilim, G. Ciftci and S. Okay, “Modeling of the Foca-Uzunada magnetic anomaly and thermal structure in the gulf of Izmir, Western Turkey”, *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 156, pp. 288-301, 2018.
- [76] Anonim (2022, Nisan). Balıkesir İli Maden ve Enerji Kaynakları [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden_potansiyel_2010/Balikesir_Madenler.pdf
- [77] Z. M. Hisarlı, Batı Anadolu’da Curie noktası derinliklerinin saptanması ve jeotermal alanlarla ilişkisi, Doktora Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1996.
- [78] B. Akyol, Çanakkale ve Çevresinin Deprem Riskinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye, 2009.
- [79] D. Schorlemmer, S. Wiemer, M. Wyss, “Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes,” *Nature*, vol. 437, pp. 539-542, 2005.
- [80] A. Gezer ve T. Bekler, “6 Şubat 2017, $M_w=5.4$ Ayvacık depremi öncesi ve sonrası temel deprem tehlike parametrelerinin analizi”, *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, s. 1, ss. 82-89, 2021.
- [81] B. Gutenberg and C.F. Richter, *Seismicity of the earth and associated phenomena*, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA, 1954.
- [82] Y. Bayrak, S. Öztürk, H. Çınar, D. Kalafat, T. M. Tsapanos, G. Ch. Koravas and G.A. Leventakis, Estimating earthquake hazard parameters from instrumental data for different regions in and around Turkey, *Engineering Geology*, vol. 105, pp. 200-210, 2009.
- [83] H. Yalçın, L. Gülen ve M. Utkucu, Türkiye ve yakın çevresinin aktif fayları veri bankası ve deprem tehlikesinin araştırılması, *Yerbilimleri*, s. 34, ss. 133-160, 2013.
- [84] G. Esin ve Ş. Ceryan, Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, *Yerbilimleri*, s. 36, ss. 81-96, 2015.
- [85] Ş. Ceryan, G. G. Büyükkahraman, S. Berber ve F. Çoban, BAUN Mühendislik Fakültesi binalarının bulunduğu (Çağış, Balıkesir) deprem tehlike analizi, dinamik özellikleri ve standart deprem hareketi spektrumları, *Balıkesir Üniversite Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s. 24, ss.422-435, 2022.



Düzce Üniversitesi Journal of Science & Technology

Review Article

Space Activities and the Simultaneous Development of the Economy in Türkiye

Nedim SÖZBİR ^a, Murat BULUT ^{b,*}, Şenol GÜLGÖNÜL ^c,
 Lokman KUZU ^{d,e}, Osman DUR ^f,

^a Rector, Düzce University, Düzce, TÜRKİYE

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Düzce University, Düzce,, TÜRKİYE

^c Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Ostim Technical University, Ankara,,
TÜRKİYE

^d Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk, TÜRKİYE

^e Turkish Space Agency, Ankara, TÜRKİYE

^f Advanced Technologies, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, Ankara, TÜRKİYE

* Corresponding author e-mail: muratbulut@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1226156

ABSTRACT

As space technologies have become an integral part of our daily lives, they have profoundly influenced the course of human civilization since 1957. These technologies have provided humanity with many remarkable insights. Therefore, they have an important role in modern society. Satellite technology is not only vital for military and defence but also for civil applications such as transportation, communication, disaster management, agriculture planning, land, and urban planning. These applications make the space sector an engine of economic growth having advanced and the state-of-the art technology. Technological advances in space continuously benefit the citizens of developed countries. The space economy is defined as all the actions and resources that produce value and benefit to people through exploration, research, knowledge, management, and utility of space. Through satellite communications, navigation systems, earth observation missions, space science and technology research, employment is created, economic growth is achieved, and many industries become more competitive in worldwide economic market. Spinoff companies are born from space activities. In 1994, the Türkiye had its first communication satellite TURKSAT 1B built by Aerospatiale; thus, Türkiye entered the space field being an operator in its region. After millennium, the Turkish space industry has ramped-up by developing its dedicated communication and observation satellites, and their subsystems and creating a launcher system for microsatellites. Türkiye is now developing space technology more comprehensively. This article describes recent developments of space activities and future work in Türkiye. In the article, the strategies in other countries in space technologies are also discussed and suggestions are made for space technology education, development of space economy and regulation of space activities for Türkiye.

Anahtar Kelimeler: Space technology, space capability, space economy, TÜRKSAT, Türkiye

Türkiye’de Uzay Faaliyetleri ve Ekonominin Eş Zamanlı Gelişimi

Öz

Uzay teknolojileri günlük hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelirken, 1957’den bu yana insan uygarlığının seyrini derinden etkilemiştir. Bu teknolojiler, insanlığa birçok önemli içgörü sağlamıştır. Bu nedenle, modern

toplumda önemli bir role sahiptirler. Uydu teknolojisi sadece askeri ve savunma için değil, aynı zamanda ulaşım, iletişim, afet yönetimi, tarım planlaması, arazi ve şehir planlaması gibi sivil uygulamalar için de hayati öneme sahiptir. Bu uygulamalar, uzay sektörünü geliştirmiş ve ileri teknolojiye sahip ekonomik büyümenin öncüsü haline getirmektedir. Uzaydaki teknolojik gelişmeler sürekli olarak gelişmiş ülke vatandaşlarına fayda sağlamaktadır. Uzay ekonomisi, keşif, araştırma, bilgi, yönetim ve mekan kullanımı yoluyla insanlara fayda sağlayan ve değer üreten tüm eylemler ve kaynaklar olarak tanımlanır. Uydu iletişimi, navigasyon sistemleri, yer gözlem görevleri, uzay bilimi ve teknoloji araştırmaları yoluyla istihdam yaratılır, ekonomik büyüme sağlanır ve birçok endüstri dünya çapındaki ekonomik pazarda daha rekabetçi hale gelir. Yan şirketler uzay faaliyetlerinden doğar. 1994 yılında Türkiye, Aérospatiale tarafından inşa edilen ilk haberleşme uydusu TURKSAT 1B'ye sahip oldu. Böylece Türkiye bölgesinde operatör olarak uzay sahasına girdi. Milenyumdan sonra, Türk uzay endüstrisi, özel iletişim ve gözlem uydularını ve bunların alt sistemlerini geliştirerek ve mikro uydu için bir fırlatma sistemi oluşturarak hız kazandı. Türkiye artık uzay teknolojisini daha kapsamlı bir şekilde geliştiriyor. Bu makale, Türkiye'deki uzay faaliyetleri ve gelecekteki çalışmalarla ilgili son gelişmeleri açıklamaktadır. Makalede, uzay teknolojilerinde diğer ülkelerdeki stratejileri de tartışılarak Türkiye için uzay teknolojileri eğitimi, uzay ekonomisinin gelişimi ve uzay faaliyetlerinin regülasyonu ile ilgili önerilerde bulunmaktadır.

Keywords: Uzay teknolojisi, uzay kabiliyeti, uzay ekonomisi, TÜRKİSAT, Türkiye

I. INTRODUCTION

Thousands of years ago, people were curious about space and began to wonder about its origins. Many philosophers have observed our solar system and helped shape our current perception of the universe since beginning of the life. They made discoveries and established theories, changing our understanding the universe significantly. After thousands of years dedicated to developing an understanding of the solar system and the universe, scientists went beyond the boundaries of earth and explored space via current technology and engineering [1].

The U.S. space exploration projects commenced in 1954 starting with the Orbiter Project put forward by the armed forces. The project planned to send a satellite into space using the ballistic missile called Redstone, used by the US army. It was rejected by the U.S. president, Eisenhower, because using military technology in a scientific project could be misinterpreted. Therefore, it was decided to develop a launch via a civil program. However, in 1957, after the Soviet Union successfully sent the Sputnik-1 and Sputnik-2 satellites into space, the Orbiter Project had to be revived. Not to fall behind in the space race, the USA gave the ballistic missile agency, within the army, the task of updating the Jupiter rocket, which was produced for military purposes, to carry a satellite into space. A large amount of funds was allocated to national space agencies in the U.S. because there was a huge competition between Russia and the U.S., throughout the Cold War. However, in the 1970s, as the Space Race decelerated and the space market decreased, less funds were allocated to NASA. In response, NASA began exploring and later prioritizing support of markets in the private sector, and then collaborating with private firms on space research. The European Space Agency (ESA) also gave research funds to the private sector. At last, the private space sector was given credence, because it had a high probability for producing revenue and the ability to activate other sectors. Entrepreneurs and private investors have increased in the space sector [1]. Many countries have developed space policies and technologies to grow their national economies. They have shared space technologies in other countries and developed space technology and the economy as well [2-18].

Many scientists and researchers have investigated the economic effects of satellite technology and the industry, new opportunities in space, scientific benefits of space economy, space technology development, spinoffs, benefits of space technology, and space market, etc. [19-30]. The global space economy has grown to be a significant size, with many companies and varied products. Furthermore, the global space economy has become one of the most significant contributors to the global economy, reaching 350 billion dollars in 2017, and is expected to reach 1.1 trillion dollars by 2040 [1].

Today, there is a new space race. Hundreds of satellites are launched into Earth's orbit every year for purposes ranging from communications and the internet to environmental monitoring and border security. In total, almost 6,000 satellites are circling Earth and that number is increasing. The Union of Concerned Scientists (UCS) indicated that 2,666 operational satellites were rotating around the Earth in April of 2020. Of these, only 1,327 satellites belong to the United States. China, the US's closest follower, has only 363 satellites. Satellites are an important part of our modern world, allowing GPS use, the internet access, and the Earth studies. In addition, 1,007 satellites are used for communication services, 446 are used for observing the Earth and 97 are used for navigation/GPS purposes. The purpose and number of commercial satellites is shown in Table 1. In the next ten years, Euroconsult (2019) estimated that 990 satellites would be put into orbit annually. From 2009 to 2018, 2,298 satellites were launched while from 2019 to 2028, 9,935 satellites will be launched. As we compare those periods, the number of satellites in space will increase 332%, meaning that by 2028, there could be 15,000 satellites in orbit. As of now, the number of satellites in space has increased 600% since 2012 from 994 to approximately 6,000 [31].

Table 1. Purpose and number of commercial satellites [31].

Commercial Satellites by Purpose	Number of Satellites
Communications	1,007
Earth Observation	446
Navigation / GPS	97
Tech Demonstration & Development	87
Other	9
All Commercial Satellites (including combination)	1,646

The new space race is continuing as SpaceX is planning the Starlink constellation of 12,000 satellites and Amazon also is proposing a constellation. Greater than 50% global operational satellites are put in orbit for commercial use with approximately 61% providing communication for satellite TV and global internet, and 27% providing Earth Observation such as environmental monitoring and border security. Though most commercial satellites are used for communications or Earth Observation purposes, they can also serve multiple purposes. Of all the Earth's operational satellites, government and civil satellites make up 21%, while military satellites make up 13%. SpaceX is used for missions to the International Space Station (ISS) and the biggest operator of commercial satellites. Part of Space X's mission is to increase navigation potential and provide worldwide internet from space using 358 satellites launched since April 2020, 22% of all operationing satellites in the world. From August to September 2020, it further launched an additional 175 satellites. Greater than 50% of all functioning satellites are for commercial purposes. With growing constellations and new market entrants, space operators have set their sights on mass connectivity, analytics, and earth monitoring. The satellite operators and satellite numbers of the company is shown in Table 2. Following several launches conducted in summer, SpaceX had sent off enough satellites to encourage the beta version of Starlink, a satellite-based internet service. The new space race also involves small satellites such as cubesats, microsats, and nanosats. With its flock of small EO satellites, Planet Labs now has more than 150 satellites in operation (however, in April 2020, the number exceeded 250). Amazon is also getting ready for space as demonstrated by the approval to dispatch and manage an internet constellation of 3,236 satellites in July of 2020 by the US Federal Communications Commission (FCC) [31].

Table 2. Satellite operators and satellite number of the company [31].

Satellite Owner/Operator	Number of Satellites	Country of Operator/Owner
SpaceX	358	USA
Planet Labs, Inc.	246	USA
Spire Global Inc.	89	USA
Iridium Communications, Inc.	78	USA

OneWeb Satellites	74	United Kingdom
SES S.A.	51	Luxembourg
Intelsat S.A.	51	USA
ORBCOMM Inc.	35	USA
DoD/US Air Force	33	USA
EUTELSAT Americas	33	Multinational
TÜRKSAT	5	Türkiye

The United States, China, and Russia have the greatest number of operating satellites worldwide. The U.S. and Russia began the space race throughout the 1950s and 1960s. The U.S. manages nearly 1,308 satellites, about 50% of all worldwide satellites, as of April 2020, while China operates approximately 356 satellites. Russia has the third most satellites, 167, while the UK has 138 and Japan has 78 satellites in operation. All others in the world total 627 as of April 2020. Satellites from the US, Russia, China, The UK, and Japan dominate earth's orbit today, collectively, operating approximately 76% of all satellites. International collaboration today allows for ease in launching satellites and space-based science. SpaceX will likely reduce launch costs up to US\$6 million per flight, because of the reusable rockets, and in effect, there will be an increase in satellite production in the near future [31].

The US Commerce Department aides in the success of the U.S. space economy in several ways; it studies economic trends in the commercial space market and encourages commercial financing and insurance for the space sector. In 2020, 352,000 jobs were created or saved as a result of \$21.6 billion in NASA funding. The US Government began seeking the well-being of the public, through investing in practical outcomes via the space programs. Scientific and socio-economic benefits to society continue today through space travel and space exploration. NASA's budget for 2020 was \$22.6 billion, 0.48 % of the \$4.7 trillion the United States planned to spend in 2020. Overall, the U.S. NASA budget has been close to US\$650 billion [32].

In this paper, Turkish space technology, space economy, and economic benefits of Turkish space activities were investigated.

II. SPACE TECHNOLOGIES AND ITS BENEFITS TO THE WORLD

Space systems have seriously affected modern society more than ever. The economic development of space systems is on the rise because they are increasingly important in satellite technology for navigation, communications, meteorology, and Earth observation. These days, space technologies are also a source for economic growth in agriculture planning, disaster management, medicine, land monitoring, transportation, and urban planning [33]. Public and private investors around the globe are also attracted to the space sector because of the potential for innovative sources of economic development.

Space technology has strategic importance in the world. The space industry has grown steadily recently. The global space sector encompasses a state-of-the-art technology niche with a complex composition, employing more than 900,000 people worldwide in 2013, including public administration (space agencies, space departments in civil and defence-related organizations), the space manufacturing industry (building rockets, satellites, ground systems), direct suppliers to the industry (components), and the wider space services sector (mainly commercial satellite telecommunications). However, people employed by universities and research institutions are not accounted for in these numbers, and they make up a large portion of the R&D, because they receive public contracts and initiate much of the space sector's research [33]. Today, the space sector is rapidly developing in the world, employing approximately 1,000,000 people. In Türkiye, approximately 1,000 people are employed in the space sector and it includes public administration, manufacturing, suppliers, and service sectors. Space

technology research activities, its impact on a growing nation and its society requires understanding space capability, activities, and applications.

Because satellite technology is used in navigation, communications, meteorology, and earth observation, space systems are vital for the function of today’s society, their strategic order, and their economic growth. Space technology influences agriculture planning, disaster management, medicine, land monitoring, transportation, and urban planning. Because there is an abundance of applications of space technology, there are many opportunities for economic growth within this sector. Even with the recent economic crisis, there have been ample funds for global space programs compared to other sectors, despite space programs frequently having a stigma of being expensive.

Space activities have an important impact on everyday life and society such as GPS on mobile phones. Other well-known uses of space technology include use in telecommunications and National Security. Space activities have provided societal benefits such as bringing communication and education to inaccessible areas, and information and entertainment to large numbers of people. Economic impacts can be categorized in many forms: cost savings, new products, dynamic savings, new values, lower costs for environmental management, health, social services, outcomes, and national economic growth [33].

Satellite manufacturing, launch services, ground stations, and related equipment make up commercial space infrastructure and related industries. Commercial space products and services include, satellite broadcasting, communication, earth observation, geolocation, and global navigation equipment and services. Global navigation equipment a services is one of the space industry’s fastest- growing sectors. Design, assembly, and integration of spacecraft systems are dispatched to governmental or commercial users and include: telecommunications and earth observation satellites, launchers, and human-rated capsules. There are four groups of people that encompass the space sector. The first group, carries out the design, assembly, integration, and manufacture of major subsystems, such as satellite structures, propulsion subsystem, power subsystem, and payloads. The second group manufacturers equipment that is assembled in major subsystems. The third and fourth groups produce components and subassemblies that, specialize in the production of specific electronic, electrical and electromechanical components, and materials [33].

The space sector has adopted the “upstream” and “downstream”, the same business terms that are used by other industries. Upstream occurs when objects are sent into space and when space is explored. Downstream work occurs when the research and technology gained from upstream is applied to a number of different sectors [34,35]. Fig. 1 shows the space value chain concept [35].

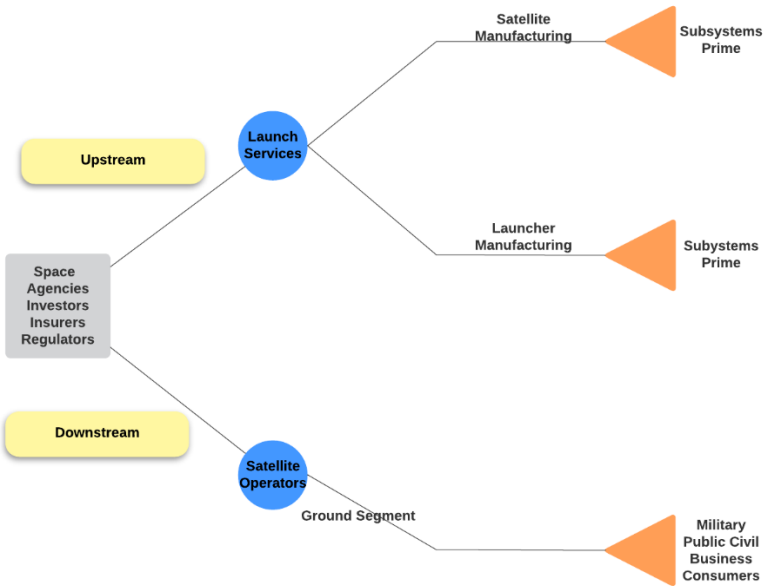


Figure 1. The space value chain concept [35].

Government agencies and commercial firms are supplied infrastructure by the satellite industry, which flows from upstream to downstream to the end-users, along the value chain. Space-based services that rely on satellite technology are delivered along the satellite value chain, and includes diverse stakeholders at five stages of the chain [35]: The first level contains government agencies that provide funding for space technology research and development for their sole use or use in conjunction with partners. Most government-funded R&D projects are rare and are only found in a few countries. The second stage includes the space industry (upstream), or those individuals who design and manufacture space systems and their launch vehicles. The third group is the satellite operators who own the satellite systems and market their capacities to the service providers (downstream). The service providers deliver communications, navigation, and geographic information services to the end-users by incorporating the satellite signal into multiple solutions. The fourth level contains the ground segment and terminal suppliers, who design and deliver a plethora of software and equipment geared toward managing satellite infrastructure and accessing services by the users. Customers also can be found along the value chain. The last group are from governmental (civil/military) or commercial (business or customer) sectors who do not request the satellite technology. Rather, they are interested in solutions geared towards their needs. For example, they might request better communications, navigation, or geographic information services.

Because of scientific and technological innovations, space applications are more accessible and can cultivate social and economic growth especially for developing countries. In fact, there is gradual increase in countries from both the private and public sectors involved in international space activities due to the increased importance of and the various domains affected by space applications in every day life. Finally, the space value chain creates socio-economic impacts from space investments [33].

The organization and scope of work of the space agencies can differ across various countries but a well-coordinated national space activity is important. Governments have direct, concrete, and significant involvement in space activities. On the other hand, the private sector may not be as involved in space activities due to the high costs, the long time to obtain a reasonable return on investment and high risk. Governments may support space activities in many ways including providing funds to finance the research, coordinating researchers and the development of the tasks, implementing policies, creating regulation and laws that allow space development and sustainability, international collaborating, and monitoring of market and development. Only Space agency can build an efficient collaboration. A partnership between industry, government and university is created by establishing the ideal situation that accommodates both space-related industry needs and encourages space-based research. The Space Agency establishes the main goals and specific objectives based on its national program and strategies. The Space Agency priorities focus on national priorities, driving industry growth, creating jobs, developing policies, and laws, international relations, developing national skills and space expertise, following an educational path, and university programs [33].

III. SPACE ECONOMY IN THE WORLD

Space economy is the use of all activities and resources while creating value and benefits for people amid exploration, researching, understanding, management, and use of space. In space manufacturing, satellite operations and other consumer activities have been the central activities of the space industry have been derived from governmental research and development. Space-related outcomes include all public and private factors from the development, provision, and use of scientific information from space-based products, services, and space research. The main parts of the space economy include in manufacturing, services from satellite operator and consumer services. The space manufacturing supply chain includes many different individuals involved in the production of space systems and relies on

institutional civil and military funding. The space economy has become important for high-tech innovation, commercial opportunities, and strategic purposes [33].

Recently, there has been a boom in the space that has been driven by topics related to climate change, security, and telecoms. For example, there is a growing relationship between space and climate change, increased capital formation, mitigating orbital debris, space and security and telecoms a near-term focus [36,37].

Many economists and experts have predicted that the size of the space economy will be approximately \$3 trillion in the next couple of decades which will stimulate economic growth and will be driven by space products and services including: launch vehicles, ground systems, new capabilities, businesses. These also include other products, and services from space technologies and spinoffs from space programs [1].

Fig. 2 shows an overview of the 2016 value chain for a commercial satellite. Fig. 2 includes commercially active companies with greater than or equal to one operating satellite or satellite developed, and are satellites at least 50 kg. There are 30 space industry companies (as integrators) having \$ 4.9 billion economy in total where as 50 satellite operators generate \$14 billion. There are 10 launcher companies with \$2.5 billion market. The remaining 5000 other companies shares \$250 billion of the commercial satellite value chain [35]. The main segments of the space economy are satellite services and ground equipment. The latest research indicates that the U.S. government is the largest worldwide investor in space programs, while China, Russia, France, and Japan follow in descending order. The U.S. spent \$40.9 billion or 58 percent of the world market on space programs in 2018 which was, down from 75 percent of the world market in the early 2000s. China’s \$5.8 billion budget is the second largest in the world, using these funds to commercialize and internationalize its space sector. Russia’s budget has been depleted significantly since 2013, while France has the highest national budget, overtaking Japan with the fourth-largest government - funded program in 2018 [36-39].

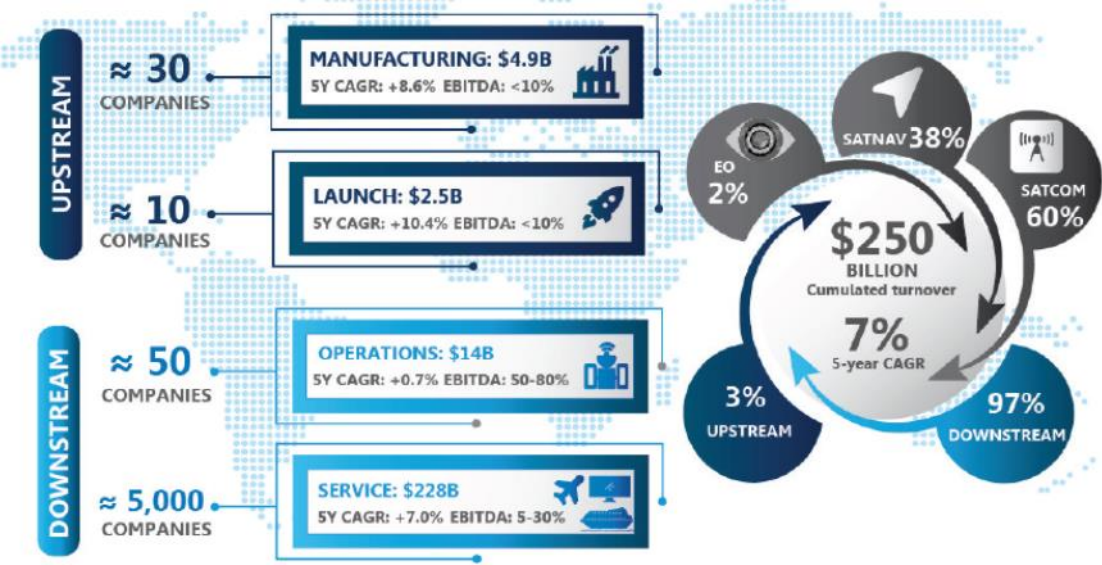


Figure 2. Overview of the commercial satellite value chain in 2016 [35].

Fig. 3 shows the commercial satellite revenues in 2018. The industry company (satellite manufacturing) economies are \$ 4 billion. The satellite operator economies are \$14 billion. The launcher company economies are \$1.4 billion. Ground economies are \$ 3 billion. Services economies are \$276 billion. Upstream is \$8 billion, downstream is \$290 billion and total revenues are 298 billion in 2018 [38].



Figure 3. Commercial Satellite Revenues in 2018 [38].

The space economy was worth \$385 billion in 2020, having total commercial space revenues over \$310 billion [39]. Government spending remains unaffected, despite the Covid-19 global pandemic impacting some parts of the commercial space market. In fact, Euroconsult estimates that the consolidated space economy was a record \$385 billion in 2020; this include both government space and commercial space investments. Compared with 2019's \$319 billion revenues, commercial revenues in 2020 were \$315 billion, a 2% decrease. This decline in revenue was partially a result of the Covid-19 pandemic that affected particular commercial markets, such as satellite communication sub-segments markets with high mobility including aero, maritime, offshore oil and gas. Other factors also contributed to the downward trend in commercial revenue in 2020. For example, video-related revenues continued their pre-pandemic decrease in 2020. Government space budgets also added \$70 billion to these commercial revenues in 2020 (not counting government payments toward commercial services, because they were considered commercial revenues), 10% higher than in 2019. Government space investment were not impacted, because 2020 budgets were established before the pandemic. However, it remains to be seen how these large government space investments post-pandemic will be affected [39]. Fig. 4 shows Space Economy in 2020.

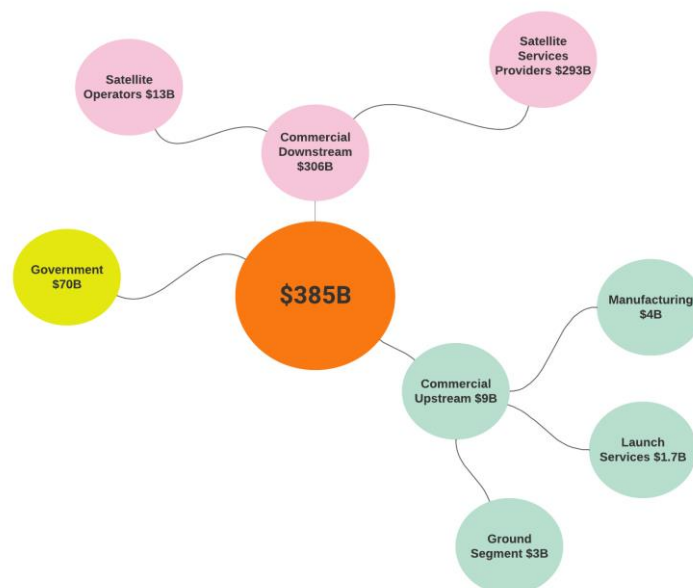


Figure 4. Space economy in 2020 [39].

Fig. 5 shows commercial satellite value chains during 15-year evolution. Over the next decade, the commercial space value chain will see a gradual increase, to \$485 billion by 2028. The upstream segment, encompassing commercial revenues from manufacturing, launch, and ground equipment is predicted to grow to \$11 billion in 2028, from \$8 billion in 2018. This is at a growth rate of 4% per year. The downstream segment, was valued at \$290 billion in 2018 and encompassed commercial operations and satellite services, which included satellite navigation. It is predicted to increase 5% percent per year to reach \$474 billion in 2028 [38].

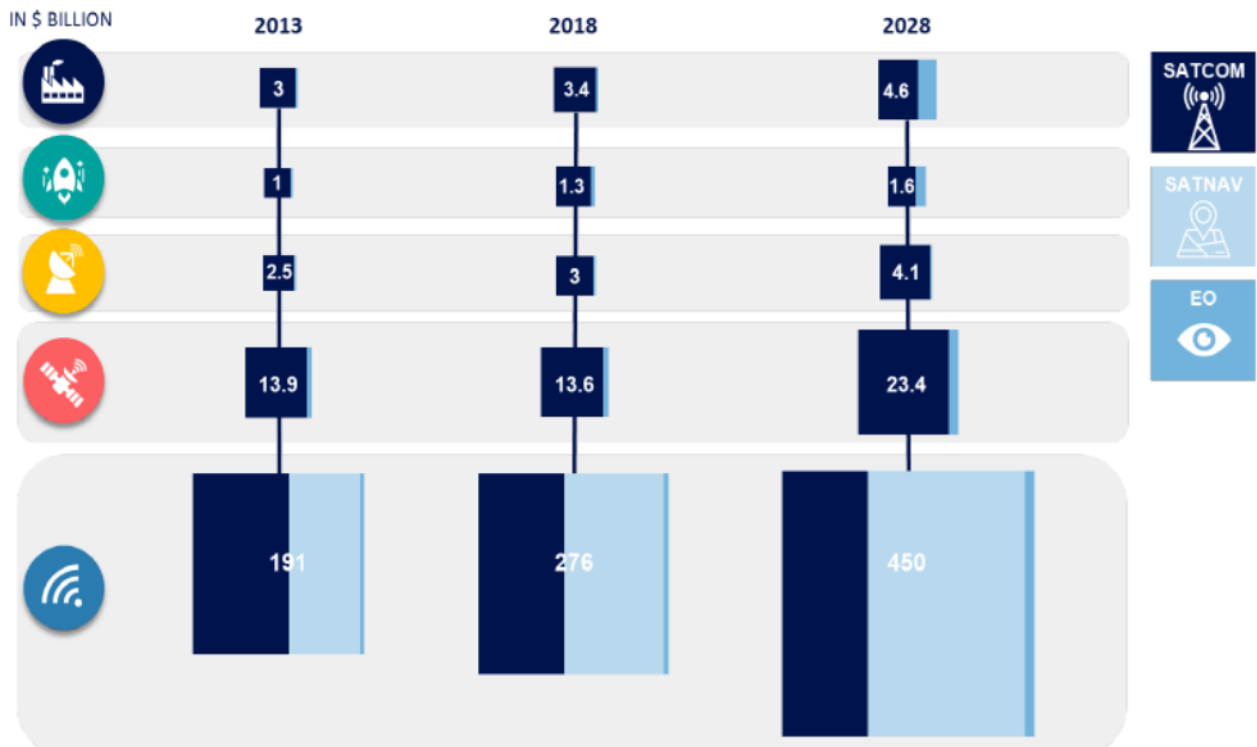


Figure 5. The commercial satellite value chains 15-year evolution [39].

In the beginning of a decade-long growth cycle, total world payments for global government budgets are forecasted to reach \$84.6 billion by 2025 from \$70.9 billion in 2018. The Euroconsult report presents relevant information on investment priorities according to regions, and it emphasizes this information for space programs in 86 countries. Trusted by hundreds of organizations worldwide, it analyses seven topics areas for each country include: Earth observation, satellite navigation, space science and exploration, space security, communications, launch vehicles, and manned spaceflight. Countries with government spending on space programs greater than \$200 Million in 2018 can be seen in Fig. 6 and Table 3 that show the United States allocates the toward its space budget. The latest research indicates the U.S. government is the largest worldwide investor in space programs, while China, Russia, France, and Japan follow in descending order. The U.S. budget spent \$40.9 billion or 58 percent of the world market on space programs in 2018 which was below 75 percent of the global market that was observed in the right after the year 2000. China’s \$5.83 billion budget is the second largest in the world, using these funds to commercialize and internationalize its space program. Russia’s budget has been depleted significantly since 2013, while France has the highest national budget, overtaking Japan with the fourth-largest government-funded program in 2018 [36-39]. In 2018, Russia had a budget of US\$4.2 billion, France had a budget of US\$3.2 billion, Japan had a budget of US\$3.1 billion and Germany had a budget of US\$2.2 billion on space programs. Global government space budgets are currently in the beginning of a decade-long growth cycle with total world spending forecasted to increase \$84.6 billion by 2025

from \$70.9 billion in 2018 [35, 38, 40, 41]. More government satellites were launched and more governments took part in launching in 2018. Two new precedents were set in 2018; more government satellites were launched and more governments took part in launching. The Euroconsult report predicts that an average of 150 government satellites will be put into orbit each year for the next 10 years [41].

Fig. 7 shows the government's annual space program spending from 2003 to 2018, and indicates that the United States allocated the most funds toward their space budget among all countries, while China and Russia allocated the next highest budget to their budgets [41].

According to the Euroconsult report, in 2018, 18 countries spent as much as \$200 million on space-related activities, including those related to satellites to exploration. Although the U.S. continues to spend the most on space activities, other nations are increasing their budgets. For example, the investment firm space Angels noted that China's government spending on space activities has increased 349% over 15 years, with a total of \$22.3 billion being invested in 476 private space companies since 2009 [41].

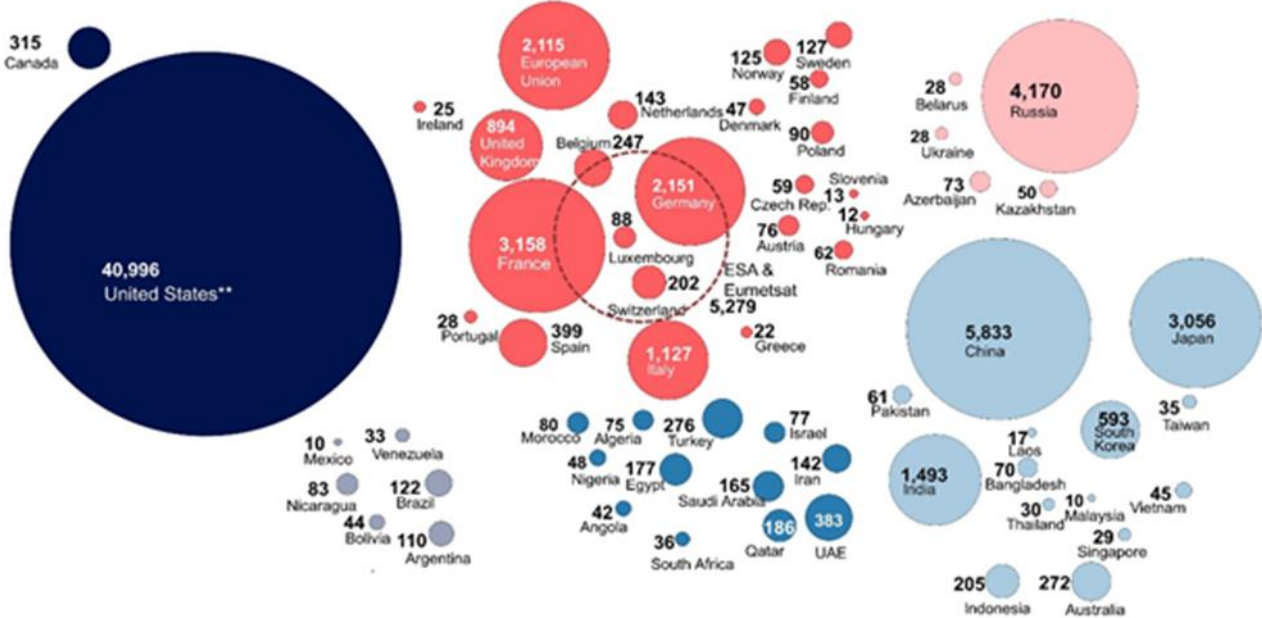


Figure 6. World government expenditures for space programs in 2018 [40].

Table 3. Government spending on space programs in 2018 [41].

	Countries	Budgets (US\$)
1	USA	41.0 billion
2	China	5.8 billion
3	Russian	4.2 billion
4	France	3.2 billion
5	Japan	3.1 billion
6	Germany	2.2 billion
7	European Union	2.1 billion
8	India	1.5 billion
9	Italy	1.1 billion
10	United Kingdom	894 million
11	South Korea	593 million
12	Spain	399 million

13	United Arab Emirates	383 million
14	Canada	315 million
15	Türkiye	276 million
16	Australia	272 million
17	Belgium	247 million
18	Indonesia	205 million
19	Switzerland	202 million



Figure 7. Government annual space program spending (adjusted for inflation) [41].

Ten drivers of the new space ecosystem are satellite launchings, satellite internet, deep space exploration, lunar landing, earth observation, asteroid mining, space debris, space tourism, space research, and manufacturing. The satellite launching industry is one of the largest subsectors and focuses on technology and infrastructure with the hope of sending satellites to near space and low Earth orbit. Satellite Internet firms concentrate on enhanced connectivity using low Earth orbit satellites, wireless broadband, optical communications, and other technologies. Deep space exploration firms establish cutting-edge missions to transport people and supplies to the moon, the surface of Mars, and elsewhere. Lunar landing companies build products and develop infrastructure for missions to Earth’s moon. Earth observation firms develop imaging, tracking, and analytics technology for monitoring the weather, climate, maritime data, GPS technology. Asteroid mining disruptors are improving technologies that extract water, rare minerals, and metals from near-Earth asteroids. Space debris firms track and analyze anthropogenic objects orbiting in the atmosphere; such debris needs to be monitored for fear that it could collide with satellites and spacecraft or land on earth. Space tourism firms are exploring possible space trips for private citizens, space explorers, space adventure programs. Space research groups are dedicated to space and space technology research, exploration, and education. Finally, large manufacturing is a sub-segment of the worldwide space economy that designs and develops spacecraft, hardware, propulsion systems, engines, and other technology [36,37,39].

In 2016, the Ground Equipment economy was \$113b (33.33%), the Consumer TV economy was \$98b (28.91%), the Government economy was \$84b (24.78%) and all other economics were \$44b (12.98%). In 2040, the Consumer Broadband economy was \$95b, (9.02%), the Consumer TV economy was \$117b, (11.11%), the Government economy was \$181b, (17.19%), the Internet economy was \$412b, (39.13%), the Ground Equipment economy was \$196b, (18.61%) and all other economies were \$52b, (4.94%). By 2030, the new space economy will result in many benefits. For instance, there will be more advanced technology, as we live life more sustainably beyond Earth. In another example, we will improve Earth observations that assist in protecting and preserving life on Earth. Finally, there will be new jobs, companies, and opportunities as a result of the new space economy. The global space industry is forecasted to be worth more than \$1 trillion by 2040, which is an increase from about \$350 billion in 2016 [36,37]. The global space economy will triple from US\$329 billion in 2016 to \$1.1 trillion in 2040

[36,37,40]. Today, the global space economy is roughly a \$400B economy, of which about 80% is commercial activity.

IV. SPACE ACTIVITIES IN TÜRKİYE

Türkiye's early consideration of space activities dates back to the 1990s [42]. Türkiye has designed, assembled and tested the capabilities of space products. Türkiye produces and operates communication satellites, earth observation satellites, scientific micro, and nanosatellites. The Turkish space sector is relatively small. Türkiye's top universities, government organizations, and companies are providing support to these projects. TÜRKSAT R&D Department under the Ministry of Transportation and Infrastructure, TÜBİTAK Space Technologies Research Institute (TÜBİTAK SPACE), TÜBİTAK Marmara Research Center (MAM) TÜBİTAK RUTE, and TÜBİTAK UME under the ministry of Science and Technology, and commercial companies such as Turkish Aerospace Industries, Inc. (Turkish Aerospace), ASELSAN, STM, and CTech, have a solid role in the Turkish space sector. The space economy is estimated to be above 270 million USD in Türkiye. Türkiye is in a good position to leverage existing fortes and investments in space-related activities, and therefore, to benefit the national economy while encouraging innovation. Over the past 10 years, Türkiye has increased potential in the space economy as it has developed its necessary assets and technologies and gained knowledge. Türkiye has shown its capability in many space sectors such as observation satellites, communication satellites, services, and products. Moreover, expanding space activities in Türkiye allow for several valuable contributions to daily life and the national economy, which is demonstrated in the following detailed list of benefits that would be gained from a space program: satellite manufacturing (communications, earth observation, micro, and nanosatellites) and satellites replacement (old with new), increased national economic growth, improved safety, and security in Türkiye, significant innovation opportunities, ensure space capabilities in the future, launching of systems for microsatellites, developed ground systems, and refined operation satellites (communication and observation).

TÜBİTAK SPACE plays a critical role in the Turkish Space Industry. TÜBİTAK SPACE is focused on space technologies and leads several R&D projects for satellite design and manufacturing such as BİLSAT, RASAT, GÖKTÜRK-2, İMECE, and TÜRKSAT 6A. TÜBİTAK SPACE has a clean room with class 10,000, an environmental test facility that can be used for vibration, thermal vacuum, and thermal cycle tests, some other laboratories such as reliability and hall effect propulsion laboratory, and a ground station works at VHF-UHF, S and X bands [43].

In 2001, BİLSAT Earth Observation Microsatellite Project started under the framework of an agreement between SSTL (Surrey Satellite Technology Limited, UK) and TÜBİTAK SPACE. The goal of the BİLSAT project was to initiate, develop and support small satellite technologies in Türkiye and this was carried out in cooperation with SSTL. After the infrastructure for the design was established, there was an increase in small satellites production. Then, a ground station was set-up and Türkiye's inaugural remote sensing satellite, called "BİLSAT," was produced and launched. The designing, manufacturing, testing, and launching phases of BİLSAT were conducted in collaboration between Turkish and SSTL engineers. GEZGİN, and ÇOBAN, two payloads of the satellite in Türkiye, were devised and produced by TÜBİTAK SPACE staff and integrated into BİLSAT. It was launched from Russia on September 27th, 2003, and it was Türkiye's inaugural Earth Observation Satellite. Its resolution is 12 m PAN and 26.7 m RGB. Its total mass is 129 kg and had an altitude of 686 km [44].

RASAT is Türkiye's second earth observation satellite, following BİLSAT of TÜBİTAK SPACE which is a high-resolution optical imaging system and has new modules that were developed by Turkish engineers. RASAT is the first Earth-observation satellite conceived of and produced in Türkiye, has a total mass is 94 kg and an altitude of 687 km. Its resolution is 7.5 m PAN and 15 m RGB. Attitude Control is 3-axis stabilized control. Swath Width is 30 km. Mission Duration is 3 years. Payloads are a new generation flight computer (BİLGE) with a X-Band Transmitter Module (TRES) and a real-time image processing module (GEZGİN-2). It was launched on August 17, 2011 [43].

İMECE is an Earth observation satellite designed and developed by TÜBİTAK SPACE. İMECE program consists of two main project which are İMECE satellite subsystems development project and İMECE satellite platform development project. İMECE satellite subsystem development project was started in 2013 with funding from the Presidency of Strategy and Budget in coordination with the Presidency of Defence Industries. İMECE satellite platform development project was started in 2017 with funding under TÜBİTAK 1007 Programme [44]. İMECE has a total mass is 800 kg and an altitude of 680 km. Its resolution is 0.99 m PAN and 3.96 m MSI. It has an image area of 13.9 km × 16.2 km. Mission Duration is 5 years. It was launched on April 15, 2023. İMECE is shown in Fig. 8.

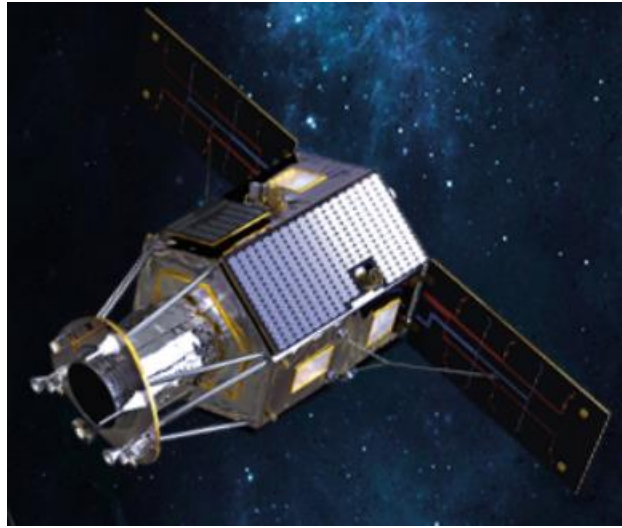


Figure 8. İMECE satellite developed by TÜBİTAK Space [43].

GÖKTÜRK-2 has provided the satellite imaging for the Turkish Armed Forces and other governmental institutions and organizations. Through its development, GÖKTÜRK-2 afforded the opportunity to cultivate human expertise and to develop technology and infrastructure in the field of space. The satellite is 686 km from the ground, is set in the sun-synchronous orbit and can take images from any point in the world. The satellite takes a turn around the earth every 98 minutes and every turn passes once in the North and South polar regions. TÜBİTAK SPACE and Turkish Aerospace Industries Inc. created GÖKTÜRK-2 and it was launched in 2012 from China. Its resolution is 2.5 m PAN and 5 m MSI. Its total mass is 409 kg, and its lifespan is 5 years. The satellite's on-board computer and software were produced by Turkish engineers in Türkiye. TÜBİTAK SPACE and The Turkish Aerospace have gained the capability to design and build Earth Observing Satellites [44]. It was launched on December 18, 2012.

Table 4 shows main actors in main space and satellite projects in Türkiye from 1994-2023. BİLSAT, RASAT, GÖKTÜRK-2, and İMECE observation satellites were developed by TÜBİTAK SPACE. TÜRKSAT 6A is being developed by TÜBİTAK SPACE, Turkish Aerospace, ASELSAN and CTECH. Fig. 9 show satellite and indigenous satellite subsystems developed by TÜBİTAK SPACE. Fig. 10 shows BİLSAT, RASAT, and GÖKTÜRK-2 observation satellites specifications.

The GÖKTÜRK-1 program (satellite and AIT center) was coordinated by the Turkish Under Secretariat for Defence Industries. Telespazio was involved in this program, as the prime contractor who built the satellite. Thales Alenia Space (TAS) and other local industrial partners including Turkish Aerospace, ASELSAN, TÜBİTAK BİLGEM, Roketsan, and TR Technology were also involved. GÖKTÜRK-1 satellite was launched from Kourou, in French Guiana in 2016. The Turkish Aerospace established an AIT Center with the Investment of the Republic of Türkiye Undersecretariat for Defence Industries (SSB) and Ministry of Transport and Infrastructure and TÜRKSAT, and it is operated by Turkish Aerospace. This state-of-the-art AIT center enables assembly, integration, and test activities of more

than one satellite up to 5 tons simultaneously, using a 3.800 m² ISO 8 grade cleanroom and specific ground support equipment [43].

Table 4. Main actors in main space and satellite projects in Türkiye from 1994-2023.

Projects	Type	Dates	Main actors
TÜRKSAT 1A	GEO Communication Satellite	Launch: 24 January 1994	Türksat A.Ş.
TÜRKSAT 1B	GEO Communication Satellite	Launch: 11 August 1994	Türksat A.Ş.
TÜRKSAT 1C	GEO Communication Satellite	Launch: 9 July 1996	Türksat A.Ş.
TÜRKSAT 2A	GEO Communication Satellite	Launch: 10 January 2001	Türksat A.Ş.
BILSAT	Remote Sensing LEO Satellite	Launch: 27 September 2003	TÜBİTAK Space
TÜRKSAT 3A	In orbit GEO Communication Satellite	Launch: 13 June 2008	Türksat A.Ş.
RASAT	Earth Observation LEO Satellite	Launch: 17 August 2011	TÜBİTAK Space
GÖKTÜRK 2	Earth Observation and Reconnaissance LEO Satellite	Launch: 18 December 2012	TÜBİTAK Space, the Ministry of Defence (SSB)
TÜRKSAT 4A	In orbit GEO Communication Satellite	Launch: 15 February 2014	Türksat A.Ş.
TÜRKSAT 4B	In orbit GEO Communication Satellite	Launch: 16 September 2015	Türksat A.Ş.
GÖKTÜRK 1	High Resolution Earth Observation and Reconnaissance LEO Satellite	Launch: 5 December 2016	The Ministry of Defence (SSB)
TÜRKSAT 5A	In orbit GEO Communication Satellite	Launch: 8 January 2021	Türksat A.Ş.
TÜRKSAT 5B	In orbit GEO Communication Satellite	Launch: 19 December 2021	Türksat A.Ş.
AIT Center	Satellite Assembly Integration and Test Center	One part of Göktürk 1 project, opened on May 21, 2015	The Ministry of Defence (SSB), Türksat A.Ş.
Regional Positioning and Timing System Satellites	Navigation Satellites (LE/MEO or GEO)	In feasibility study phase	The Ministry of Defence (SSB)
GÖKTÜRK 3	High Resolution Earth Observation and Reconnaissance LEO Satellite with SAR Payload	Contract Date: 08 May 2013	The Ministry of Defence (SSB)
Space Launch System Project	Space Launch System	Contract Date: 17 July 2013	The Ministry of Defence (SSB)

TÜRKSAT 6A

Planned GEO
Communication
Satellite

Projected Started: 15
December 2014

TÜBİTAK Space,
Türksat A.Ş. Ministry
of Transport and
Infrastructure

İMECE

High-resolution
observation satellite

Launch: 15 April 2023

TÜBİTAK Space, the
Ministry of Defence
(SSB)

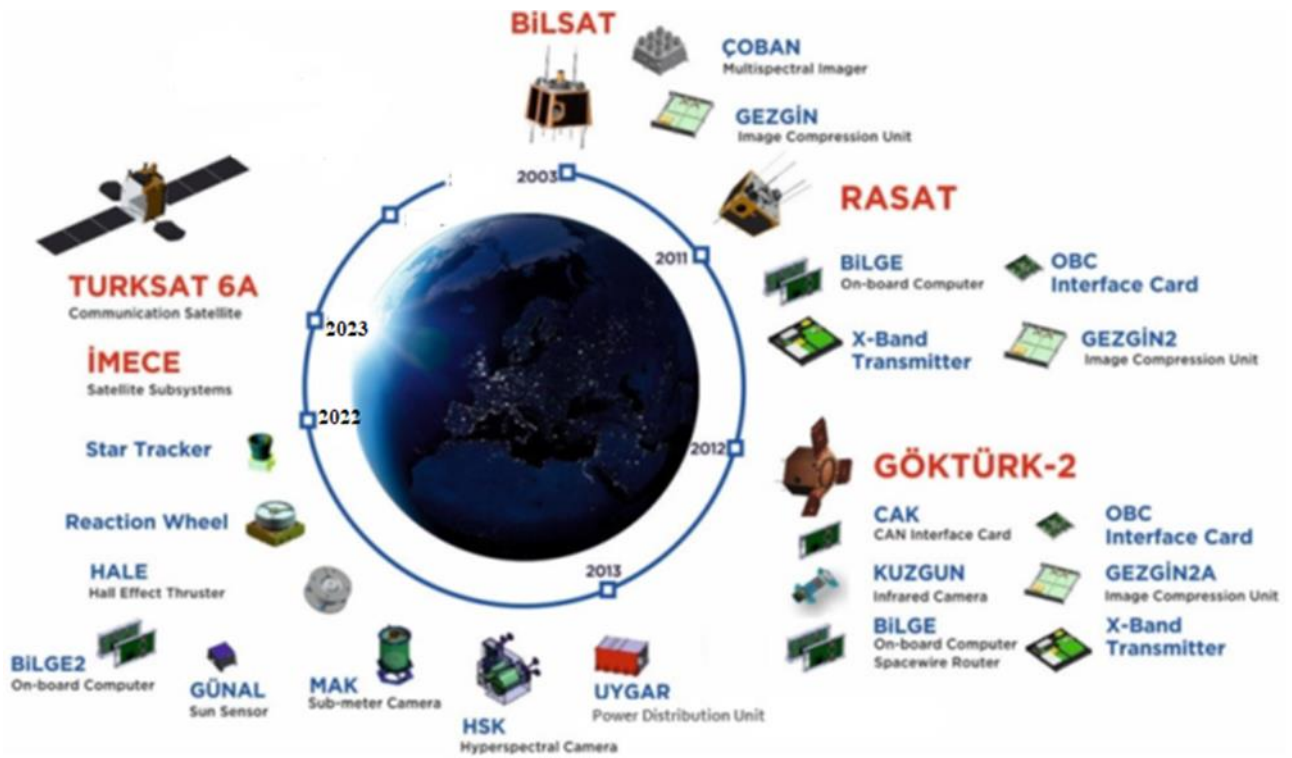


Figure 9. Satellite and indigenous satellite subsystems developed by TÜBİTAK Space between 2003 and 2023 [43].

		
BİLSAT	RASAT	GÖKTÜRK-2
2003	2011	2012
12 m PAN 26,7m RGB	7,5 PAN 15m RGB	2,5 PAN 5 m NIR+RGB
129 kg	94 kg	397 kg
686 km	687 km	686 km
		

Figure 10. BİLSAT, RASAT and GÖKTÜRK-2 observation satellites developed by TÜBİTAK SPACE [43].

Turkish Aerospace Space Systems Assembly, Integration and Test (AIT) Center (Uzay Sistemleri Entegrasyon ve Test Merkezi, USET), started running on May 21, 2015. Turkish Aerospace Industries, Inc. is located in Ankara on a 4 million m² area of land with an industrial facility of over 296,000 m². The AIT center has a vibration test system (VTS), an acoustic test system (ATS), a mass properties measurement system, a compact antenna test range (CATR) test system, an EMI/EMC test system and a Thermal Vacuum Chamber (TVAC) test system. VTS maximum load capacity is 8000 kg and maximum force is 289 kN sine, 266 kN random, and 578 kN shock. The frequency range is from 5 to 2,000 Hz. ATS maximum, the sound pressure level is 156 dB. The frequency range is from 25 to 10,000 Hz. Mass Properties Measurement System range is from 50 to 9000 kg. Mass measurement is up to 5850 kg. Device Under Test (DUT) positioner capacity of CATR is 6000 kg. The frequency range is from 1 GHz to 200 GHz. Electric field attenuation is from 1 to 40 GHz. Measurements capabilities are Co-polar / cross-polar radiation pattern, gain, end to end test. TVAC is Ø6.2 m x L7.0 m (horizontal). The vacuum level is 10⁻⁶ mbar, Shroud temperature is -180 ± 5 °C (via LN₂) [45]. In September 2019, the partly state-owned Turkish Aerospace Industries Inc. (Turkish Aerospace) and Argentine provincial state-owned INVAP officially agreed to co-developed a geostationary satellite [46].

In January 2013 at the meeting of the Defense Industry Executive Committee (SSİK) it was decided to start the procedures for the preliminary plan of Türkiye's first military satellite with RADAR synthetic aperture (SAR) [47]. The partners of the project include the Turkish Aerospace Industries the support of the TÜBİTAK Research Institute of Space Technologies and the private company Aselsan, TÜBİTAK Space's recent innovation include the İMECE Satellite Subsystems Development Project and İMECE Satellite Platform Development Project. İMECE is based on the information and expertise acquired in the BİLSAT, RASAT, and GÖKTÜRK-2 Projects, and is set to satisfy future sub-meter resolution needs of Türkiye as well as to build related infrastructure and capability domestically. İMECE Satellite Subsystems Development Project was started in 2013 with funding from The Ministry of Development in coordination with the Minister of Defence. This project is composed of several sub-systems such as Electro-Optical Satellite Camera, Communication System, Star Tracker, Sun Sensor, Hall Effect Thruster System, Reaction Wheel, Payload Data Storage, Compression and Formatting Unit, and Next Generation On-board Computer. İMECE Satellite Platform Development Project was started in 2017 with funding from TÜBİTAK [43].

For many years, TÜBİTAK SPACE has been contributing to European Commission FP7 projects including the P2-ROTECT (Prediction, Protection & Reduction of Orbital Exposure to Collision Threats), which aims to arm future space missions with ideas on how to limit space debris. TÜBİTAK SPACE also has played role in the project by enhancing mission safety and sustainability by integrating Space Situational Awareness services (like collision avoidance, space weather prediction, etc.) into general spacecraft operations [48-51].

TÜBİTAK Marmara Research Center (MAM) houses the İMECE observation satellite subsystems project, which is developing a space-qualified solar panel. In this project, new generation (perovskite and organic) photovoltaic technologies are being researched and application-specific solar panels are being developed. TÜBİTAK Rail Transport Technologies Institute (RUTE) houses the İMECE observation satellite subsystems project in which a space-qualified lithium-ion battery is being developed. TÜBİTAK National Metrology Institute (UME) contains the İMECE observation satellite subsystems project in which a space-qualified torque rod and magnetometer is being developed.

Türkiye has bought seven communication satellites since 1994 and two communication satellites in production and plan to be launched in 2021. Türkiye launched its first satellite in 1994 (TÜRKSAT 1A and TÜRKSAT 1B) followed by two others in 1996 (TÜRKSAT 1C) and 2001 (TÜRKSAT 2A). TÜRKSAT 3A, 4A, and 4B were launched in 2008, 2014, and 2015, respectively. TÜRKSAT 1A, TÜRKSAT 1B, TÜRKSAT 1C, TÜRKSAT 2A, and TÜRKSAT 3A were manufactured by Thales Alenia Space (formerly Alcatel Alenia Space). TÜRKSAT 1A, TÜRKSAT 1B and TÜRKSAT 1C belongs to the Spacebus 2000 family. TÜRKSAT 1A was lost in 1994 due to launch failure. TÜRKSAT 2A and TÜRKSAT 3A belong to the Spacebus 3000 family. TÜRKSAT 4A and 4B were manufactured by Mitsubishi Electric Corporation (Japan). TÜRKSAT 4A and TÜRKSAT 4B EMC belong to the DS2000 family. Türkiye signed an agreement with Airbus for the production of TÜRKSAT 5A and TÜRKSAT 5B communication satellites in 2017. TÜRKSAT 5A was launched on January 8, 2021, with Falcon 9 in the USA, while TÜRKSAT 5B is prepared to launch in 2021. All communication satellites have been operated by TÜRKSAT, which is a satellite operating company of the Turkish government. TÜRKSAT 6A is Türkiye's inaugural communication satellite project that supports programs that develop technologies and encourage production. The Project has been funded by TÜBİTAK and the Ministry of Transportation, Maritime, and Communication. After in orbit tests, TÜRKSAT will be the end-user and future the owner of the satellite. TÜBİTAK Space, the main contractor of the TÜRKSAT 6A project, partnered with Turkish Aerospace, ASELSAN, and CTECH, to combine their expertise and capability in space technologies accumulated over years, and contribute their expertise learned from the RASAT, GÖKTÜRK-2 and İMECE projects. The TÜRKSAT 6A Project started in December 2014 with on-ground delivery in 60 months. The Republic of Türkiye, Ministry of Transport, and TÜRKSAT and TÜBİTAK contributed to the financial budget for the program. TAI is responsible for satellite structural, thermal control, chemical propulsion subsystems, harness, and mechanical ground support equipment. The assembly, integration, and test (AIT) activities will take place at the Turkish Aerospace's facilities in Ankara. ASELSAN is developing a communication satellite payload and Ctech is developing Telecommand and Telemetry subsystems. Other than the Flight Model, Engineering Model for the ground tests and development will also be produced as part of the project. The satellite with a total mass of more than 4 tonnes, including propellant will be placed into the orbit of 42°E. There are 16 active and 4 redundant Ku-Band transponders which cover Europe, the Northern coast of Africa, the Middle East, India, and Indonesia, in addition to Türkiye. As a result of the project, equipment produced in Türkiye will set a precedent that will constitute a solid baseline for Türkiye's future space projects. The service life is more than 15 years, and dry mass is almost 1700 kg. The total mass is almost 4200 kg, and power generation is almost 8 kW at EOL.

The number of CubeSats launched since ITUpSAT-1 was launched in 2009. Table 5 shows the list of CubeSats by developed and launched by Türkiye.

Table 5. The list of CubeSats by developed and launched by Türkiye [52].

Mission Name	Organisation	Type	Launch date	Mission description
ITUpSAT-1	İTU	1U	23.09.2009	Educational space systems engineering and CMOS camera
TURKSAT-3USAT	İTU	3U	26.04.2013	Main payload in linear transponder operating in VHF/UHF
BeEagleSat (TR01)	İTU HHO GUMUSH SABANCI UN	2U	18.04.2017	Part of QB50 to study lower termosphere
HavelSat (TR02)	İTU HAVELSAN GUMUSH	2U	18.04.2017	Part of QB50 to study lower termosphere
UBAKUSAT	İTU	3U	02.04.2018	Amateur radio communications and telemetry transmission
ASELSAT	İTU ASELSAN	3U	24.01.2021	Earth observation mission with X-band downlink system
Connecta T1.1	Plan-S	3U	25.05.2022	Demo satellites for end-to-end solutions for global IoT services
Connecta T1.2	Plan-S	3U	03.01.2023	Demo satellites for end-to-end solutions for global IoT services
AKUP	TÜBİTAK SPACE	3U	15.04.2023	Educational training and capacity building in space technology development
KILICSAT	ASELSAN GUMUSH	3U	15.04.2023	Demonstrate locally made LNA module in space and AIS transceiver
Connecta T2.1	Plan-S	6U	15.04.2023	Demo satellites for end-to-end solutions for global IoT services
n-ART One	GUMUSH	3U	not launched	Test&Demonstration Satelllite n-ART Bus
PIRI-SAT	ITU	6U	not launched	Modular 6U platform for hosted payloads to provide free platform and launch for payload developers without the burden of finding a satellite/launch. Experimental AIS demonstration.

ITUpSAT-1 is the first pico-satellite that was developed by İstanbul Technical University (İTU) in Türkiye. TÜRKSAT-3USAT was a LEO communication triple unit CubeSat that was built jointly by İTU and TÜRKSAT and launched in 2013. TÜRKSAT-3USAT program advances educational, scientific, and technological interests, and will full support and funds coming from the TÜRKSAT, A.S. Company. İstanbul Technical University's the Space Systems Design and Test Laboratory (SSDTL) (İTU) was used for building and testing the TÜRKSAT-3USAT. TÜRKSAT-3USAT's payload contain an amateur band VHF/UHF transponder (for use in voice communication), and its primary structure uses ISIS 3-Unit CubeSat platform as the generic modular having a total volume of $10 \times 10 \times 34$ cm³. Included in TÜRKSAT-3USAT's subsystems are a thermal control subsystem, a command and data handling subsystem, a mechanical structure, a power subsystem, a payload subsystem, and a communication subsystem. The subsystems and the payloads can be found in its the upper, middle, and lower stacks. TÜRKSAT-3USAT was created with maximum possible redundancy, which means that every subsystem has a backup with complementary design. TÜRKSAT-3USAT has two onboard computers, two transponder modules, two electric power systems, and two beacons and modems, and its entire structure is shown in Fig. 11 [53-59].

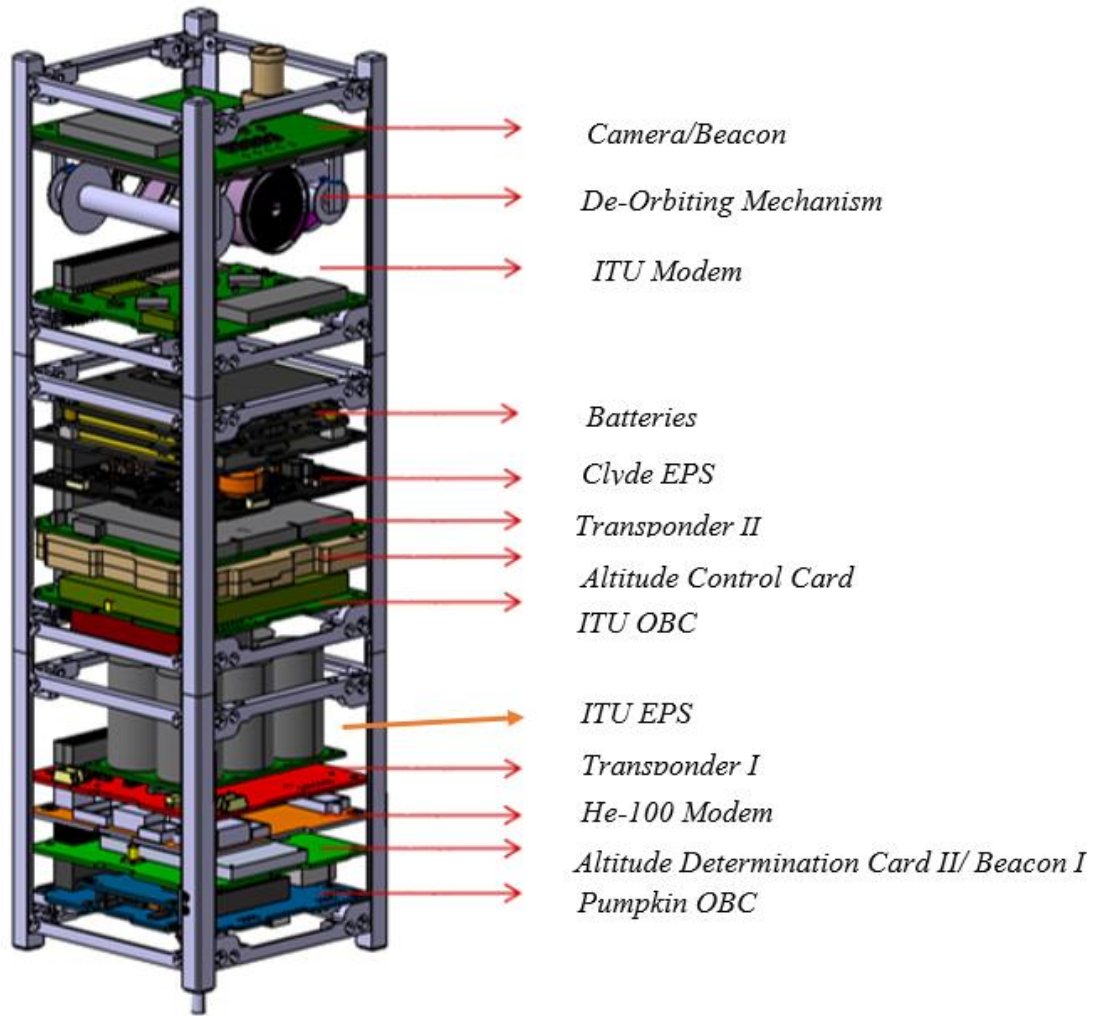


Figure 11. TÜRKSAT-3USAT and its subsystems [55-59].

TÜRKSAT started a model satellite competition in 2016, with 3 teams and 18 people. This competition is open to Turkish and International universities, attracted increasing attention each year. There were approximately 114 applications in 2022. After completing the Qualification Review (QR) phase, in 2023, 15 finalist teams are selected. The model satellites of these teams were launched with rockets designed specifically for the competition. The TÜRKSAT Model Satellite competition statistics from 2016 until 2023 are given in Table 6.

Table 6. TÜRKSAT satellite model competition between 2016 and 2023.

Years	Number of Applications	QR Phase	Number of Flying
2016	8	4	3
2017	25	13	11
2018	34	22	20
2019	95	33	32
2020	149	46	23
2021	109	66	20
2022	111	53	20
2023	114	57	15

There are 18 space engineering departments in Turkish Universities with 606 student's quotas. Fig. 12 shows number of master and PhD thesis in Astronomy and Space Sciences in Türkiye from 2010 to 2022. There is an increasing trend at number of master and PhD thesis in Space Technologies.

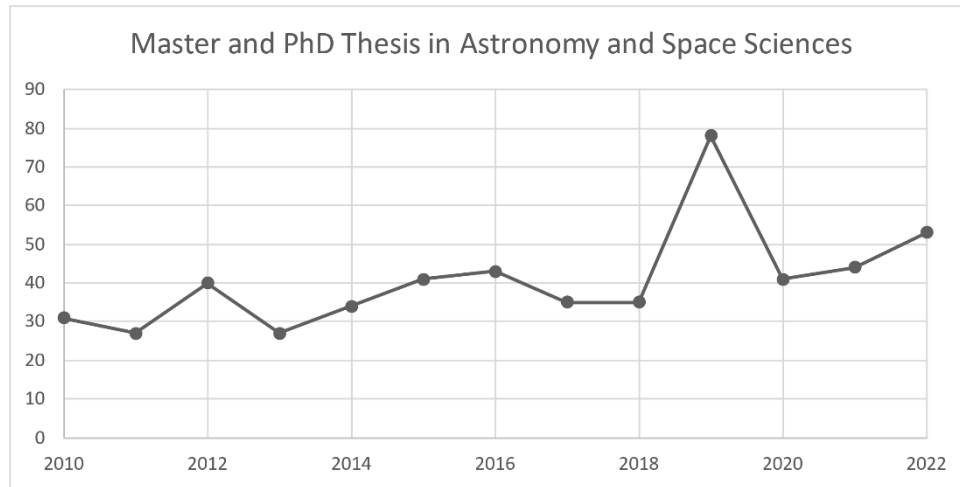


Figure 12. Number of master and PhD thesis in satellite technologies in Türkiye from 2010 to 2022.

LAGARİ, developed by Engineering Technology Consultancy (STM), is a micro-class, high-resolution Earth observation satellite that will be launched in Low Earth Orbit (LEO), and will be the first of its kind in Türkiye. LAGARİ will be the first constellation satellite to deliver imagery for use in general mapping, forestry, agricultural, disaster monitoring, near-real-time tactical field applications. The satellite also will contain the latest electro-optical camera system that has capabilities for PAN and multispectral spot/strip imaging. LAGARİ Main Properties are high - resolution imaging, lightweight and compact satellite structure, high accuracy attitude determination, and positioning, 3-axis attitude control, body-mounted highly efficient solar panels, Lithium-Ferrite (Li-Fe) battery technology, and S-Band and X-Band links for communication with the ground. Its lifetime is 2 years. It has a Sun-synchronous orbit and will be launched at end of 2021. Automatic Identification System Application on Nano-Satellite Platform Project which is a 6U-sized nanosatellite platform PİRİSAT, will be developed by STM and will be the first application of the space-based Automatic Identification System (AIS) in Türkiye. PİRİSAT is the first national satellite of a future constellation that will provide AIS data in Türkiye. In addition to the main AIS mission, the platform will also be used to gain space heritage for various experimental payloads which will be developed by national institutes and companies. PİRİSAT nanosatellite platform to be developed, will be a reliable, time and cost-effective commercial platform that can be used for solidifying sound space-ready qualification of the products that are already developed or under developed in Türkiye. LAGARİ and PİRİSAT satellites are shown in Fig. 13 [60].

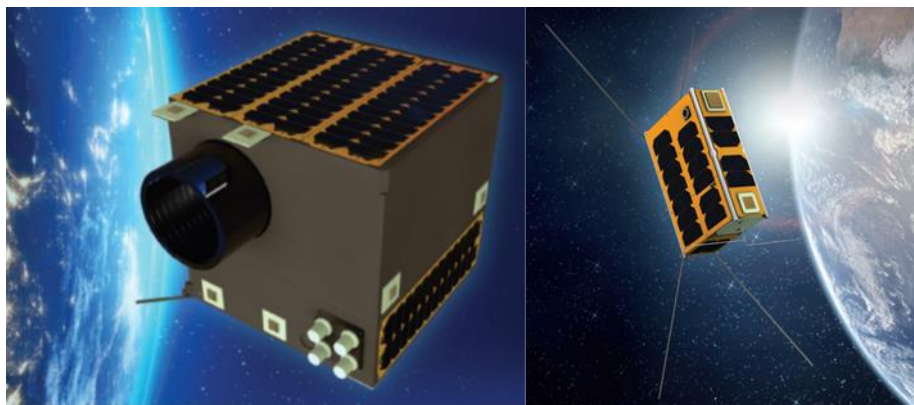


Figure 13. LAGARİ (left) and PİRİSAT (right) satellites [60].

The Eastern Anatolia Observatory (DAG) project has been an important investment in Türkiye. at the project is on Atatürk University Campus in Erzurum city of Türkiye. In the scope of the project, an observatory building with a telescope, dome, buildings, and infrastructure were established in the first phase between 2012-2019. In the second phase, called the ODA project, which occurred between 2016-2019, purchasing, design, construction, and construction of an optical laboratory were completed. In the third phase, named AKS project, which occurred between 2018-2020, space satellite equipment were gathered, including a 4 m telescope with its enclosure, and all infrastructure and civil work and the mirror coating system were put in place on mountain (altitude 3170 m). When the DAG project is completed, it is expected to have a great international impact and the facility will be “the world's third important gateway to space. An observatory with a diameter of 50 cm was established in the Türksat campus to monitor geostationary communication satellites. Using Türksat observatory, Türksat satellites were observed optically for the first time and formed the infrastructure for many scientific studies. [61, 62]

Studies on satellite navigation systems started with distribution of atomic clock through TÜRKSAT satellites. A satellite based GNSS augmentation system developed using Türksat satellites Ku-band frequency. Finally, a regional navigation system using TÜRKSAT satellites has also been developed [63-66].

A model satellite competition has been held every year for university students since 2016 [64]. This competition ensures that university students learn the satellite production phases and increases their interest in satellite technologies.

Türkiye Space Agency (TUA) was established on December 13, 2019, and has been awaited especially by those in the aviation and space industry sector. Established as an institution with administrative and financial autonomy with a special budget by decree, TUA's primary tasks are to prepare and follow-up on the National Space Program, determine medium and long-term strategies in the field of aviation and space, represent and coordinate with international organizations, research on space preparation and support development of (R&D) projects.

Türkiye's National Space Programme was announced on February 9, 2021. This program covers vision, strategies, targets, and projects of Türkiye's national space policy. The space program (Turkish Space Agency, 2021) has a “Moon Mission”, which is sending a Moon rover that was produced using domestic technological capabilities, to the Moon surface, and gaining experience in launching technologies and deep space systems. Significant progress has been made in Türkiye's first Lunar Mission (AYAP-1). An agreement was signed between the Swedish Space Physics Institute (IRF) and TÜBİTAK Space for the Lunar Neutral Telescope (LNT) scientific payload on July 5, 2022 [44]. AYAP-1 will collect data on neutral particles from the Moon's surface. In February 2021, National Space Program was explained and it is said that in 2021, Türkiye is planning heavy landing on the moon with an international cooperation and, in 2028, soft landing on the Moon with national rocket [67]. The national and indigenous hybrid rocket developed by DeltaV a subsidiary of the Presidency of Defence Industries with mission to moon was fired for the first time on 25 June 2021 [68]. Through the second main projects in the program, Türkiye is seeking to establish a regional positioning and timing system, obtain independent positioning and timing skills and increase the positioning and timing precision for our country and all countries in the region. The third project is called “Access to Space and Space Port”, which is developing critical technologies and establishing a launching facility infrastructure. Ankara has tried to push for a domestic launch capability project [46]. Roketsan and the Turkish Presidency of Defense Industries (SSB) agreed in 2008 to develop a Satellite Launch System (MSLS) to LEO that will allow the country to gain independent access to space [69]. Up till now, Türkiye has relied on developed nations including the United States, Russia and members of the European Union, to launch her satellites.

The other projects of the space program are entitled: Turkish Astronaut and Scientific Mission, Space Weather Research, Observation and Tracking of Space Objects from Earth, Forming Space Industry Ecosystem, Increasing Awareness in Space and Developing Human Resources and finally Space

Technology Development Zone. As part of the national space program, Türkiye officially started the process of sending the citizen to the International Space Station. The Turkish astronaut is expected to embark on the journey in 2023.

V. SATELLITE TECHNOLOGY TRANSFER PROGRAMS

In Türkiye, space companies and research agencies more frequently are considering technology transfer opportunities. The noticeable characteristics of technology transfer are, at present, mainly concerned with [70]:

- creating new technology and making it available;
- increasing information about what is available; and
- facilitating transactions between suppliers and potential users.

BILSAT, TÜRKSAT 3A, TÜRKSAT 4A, TÜRKSAT 4B, TÜRKSAT 5A, TÜRKSAT 5B and GÖKTÜRK-1 (with AIT center project) projects contained technology transfer programs within the main procurement contract.

The BILSAT Know-How Transfer and Training (KHTT) team comprises a core group of 8 young engineers with strong backgrounds in mechanical, electrical and electronic engineering. Complementing the activities of this SSTL-based team are 4 MSc students conducting research at the Surrey Space Centre and a number of academic staff and technicians at TÜBİTAK-Bilten in Ankara. The core team engineers, upon completing their academic lecture programme, immediately became involved in the development work on BILSAT [71,72]. The second satellite built by using the technology transferred in the development process of BILSAT is RASAT [73].

During the production of TÜRKSAT 3A, TÜRKSAT started the first satellite technology transfer programs. Sixteen people attended technology transfer programs which were organized in France. Within the TÜRKSAT-3A project, a domestic communication satellite design project, namely TUSAT was started. TUSAT communication satellite design (Preliminary Design Review (PDR level)) was completed 2012. Several outputs such as reports, papers, patents have been completed that highlight the development of communication satellite design, through the work at AIT center. TUSAT preliminary design became a baseline for TÜRKSAT-6A and many engineers of TUSAT project transferred into TÜRKSAT-6A project.

Within the scope of the TÜRKSAT 4A and TÜRKSAT 4B projects, TÜRKSAT carried out the second phase of satellite technology transfer called, “Direct Participation Program”, with 16 engineers attending the program in Japan. For the TÜRKSAT 5A and TÜRKSAT 5B projects, 12 people have been receiving training under the third technology transfer training programs by Airbus and IAS in France since 2018. Three technology transfer programs were promoted by TÜRKSAT and the Presidency of Defence Industries (SSB) to design, assemble and test skills of communication and observation satellites, operation of the AIT center. These programs are determinants of developing spacecraft technology in Türkiye.

GÖKTÜRK-1, with AIT, carried out technology transfer programs. GÖKTÜRK-1 is an Earth Observation Satellite developed by Thales Alenia Space-France with the Direct Participation (DP) of Turkish companies which are Turkish Aerospace and ROKETSAN. DP is a work model where the DP companies participate to all activities in the scope of the work package description while the responsibility of the activities belongs to the Subcontractor [74].

VI. SPACE ECONOMY IN TÜRKİYE

Opportunities in space industries could be summarised as the need for improvement in manufacturing communication and observation satellites through national means and exporting those products and

services developed to other countries while also providing improvements in infrastructure [73]. It could be stated that space exploration would have great impacts on the economy if it is planned in the “right” way, so public agencies would play critical roles within the mission-oriented policies. Dede and Akcay [73] define the strategic management of space technologies as an important phase in the capacity building efforts of the nation. Özalp [42] also underlies that the initial initiatives led by TUBITAK have an understanding of defining science and technology goals that would affect social life. In this regard, strategies and policies to support space science, life science, and earth sciences could be included in mission-oriented policies.

Satellite communication services reached \$135 million yearly revenues in 2018 [75] in Türkiye, excluding TV Platform Services. TV platform services had \$ 51.5 million yearly revenues in Türkiye. We can assume that US\$ 186.5 million for satellite services from direct revenues were created by three TÜRKSAT satellites, TÜRKSAT-3A, TÜRKSAT-4A, and TÜRKSAT-4B. The estimated investment for these three satellites is US\$ 771 million in total. By assuming 15 years of lifetime, US\$ 51.4 million yearly satellite investment created triple revenues of US\$ 186.5 million. This means that every \$ 1 yearly investment in satellite creates \$ 3.6 yearly revenue, which is smaller compared to the UK’s 1 to 6 direct return ratio for space telecommunication investment and NASA’s general 6-9 rate of return ratio.

All of these studies and space projects, described above, play a very important role in accelerating Türkiye’s role in global space programs [76]. Türkiye spent US\$ 276 million on its space programs in 2018. USA, China, Russian, France, Japan, and Germany spent \$41 billion, \$5.8 billion, \$4.2 billion, \$3.2 billion, \$3.1 billion, and \$2.2 billion respectively on space programs. The space program budget of Türkiye was the fifteenth largest in the world, in 2018. Space program budget is increasing every year.

IV. CONCLUSIONS

The Turkish government spent US \$ 276 million on space programs in 2018. The space sector uses state-of-the-art technology and employs approximately 1,000,000 people in the world today. Currently, around 1000 engineers and scientists work in the space sector of Türkiye where the program gives credence not only to designing, analysing, and testing the satellites but also to manufacturing high-value-added equipment in Türkiye. However, the number of people working in space sector should increase and more manufacturing of value-added equipment should be conducted. Commercialization of space technology and research in communication, earth observation, and navigation systems is also important for the sustainability of economic development. TÜRKSAT plays an important role in commercialization of communication satellite technologies. Similarly, Türkiye’s state-owned observation satellites outputs need to be commercialized by TÜRKSAT or other commercial companies. The Turkish space industry is growing steadily. Türkiye is now among fifteen countries in the world which is spending generously on the space program. The global space economy is roughly \$400 billion now and is expected to grow all over the world. The rate of return in space investment is as low as 3.6 in Türkiye compared to values of the UK and the USA. This situation motivates Türkiye to enrich value-added space services such as Earth observation and navigation, in addition to direct services of TV broadcasting and data communication. Satellite TV services through TÜRKSAT satellites are saturated and reached 578 due to influencing growth of internet broadcasting such as Youtube, Netflix, BluTV etc.

Technology transfer has especially benefited from the development of satellite technologies in Türkiye, especially in BILSAT, TÜRKSAT 3A, 4A, 4B, 5A, 5B, GÖKTÜRK-1 projects. This practice of Türkiye can be an example for developing countries.

Supporting spinoff companies in the development of satellite subsystems and equipment, it will support the faster development of space technologies (CTECH example in TÜRKSAT 6A project, Gumush Aerospace Inc. from cubesat projects). Satellite operations and services are very profitable compared to

satellite manufacturing and launching. On the other hand, Satellite manufacturing and launching are strategic need support of government funds.

Türkiye's participation to ESA will catalyse development space technologies. Similarly, participation and collaboration to other space related international organizations will ease the finance of space projects and will provide a job opportunity to Turkish space engineers in addition to limited space sector of Türkiye.

Finally, when compared to international space technology companies (Eutelsat, SES, SpaceX etc), entrance of Türkiye's key space companies (TÜRKSAT and Turkish Aerospace) to the Turkish stock market (BIST) will provide necessary finance for future projects and will strengthen their institutional structures.

This study shows that the rate of return value of investments in the space economy is low compared to other countries and the added value should be increased. In addition to classical TV broadcasting and data communication, observation satellites, positioning systems, "Internet of Things" IOT applications reveal the need to bring into the economy. It is clear that for the development of the space economy, space activities should cease to be limited to the state and become an area in which the private sector plays a role.

VII. REFERENCES

- [1] Turkish Policy Quarterly (TPQ). (2022, October 24). [Online]. Available: <http://turkishpolicy.com/blog/42/the-global-space-economy-a-short-overview-of-the-new-space-race>.
- [2] R. Krawec, "Ukrainian space policy contributing to national economic development," *Space Pol.*, vol. 11, no. 2, pp. 105-114, 1995, doi:10.1016/0265-9646(95)00004-V.
- [3] A. Hansson, "The future of the European space industry," *Space Pol.*, vol. 12, no. 4, pp. 293-294, 1996.
- [4] E. D. Gaggero, "New roles in space for the 21st century: a Uruguayan view," *Space Pol.*, vol. 19, pp. 203-210, 2003, doi:10.1016/S0265-9646(03)00040-7.
- [5] J.M.C. Romero, "Technology, limitations and applications of space technology in developing countries," *Adv. Space Res.*, vol. 34, pp. 2203-2208, 2004, doi: 10.1016/j.asr.2003.11.006.
- [6] H. Jazebizadeh, M. Tabeshian, and M. Taheran Vernoozfaderani, "Applying the system engineering approach to devise a master's degree program in space technology in developing countries," *Acta Astronautica.*, vol. 67, pp. 1323-1332, doi: 10.1016/j.actaastro.2010.06.026.
- [7] D. Wood, and A. Weigel, "Charting the evolution of satellite programs in developing countries-The Space Technology," *Space Pol.*, vol. 28, no. 1, pp. 15-24, 2012, doi:10.1016/j.spacepol.2011.11.001.
- [8] K. Venturini, C. Verbano, and M. Matsumoto, "Space technology transfer: Spin-off cases from Japan," *Space Pol.*, vol. 29, pp. 49-57, 2012, doi: 10.1016/j.spacepol.2012.11.010.
- [9] P. Manikowski, "Developments in space activities in Poland," *Space Pol.*, vol. 29, pp. 35-39, 2013, doi:10.1016/j.spacepol.2012.11.002.
- [10] Y. Chen, "China's space policy-a historical review," *Space Pol.*, vol. 37, pp. 171-178, 2016,

doi:10.1016/0265-9646(91)90022-A.

- [11] S. Yilmaz, "Space and Turkey," *Open Journal of Political Science*, vol. 6, pp. 323-337, 2016.
- [12] A.S. Soofi, "A comparative study of Chinese and Iranian Science&Technology, and techno-industrial development policies," *Technol. Forecast. Soc. Change.*, vol. 122, pp. 107-118, 2017, doi:10.1016/j.techfore.2016.06.017.
- [13] A. Lopez, P. Pascuini, and A. Ramos, "Climbing the space technology ladder in the south: The case of Argentina," *Space Pol.*, vol. 469, pp. 53-63, 2018, doi: 10.1016/j.spacepol.2018.06.001.
- [14] T. S. Cottom, "An examination of Vietnam and space," *Space Pol.*, vol. 47, pp. 78-84, 2019, doi: 10.1016/j.spacepol.2018.07.002.
- [15] M. Z. Hussain, and R. Q. Ahmed, "Space programs of India and Pakistan: Military and strategic installations in outer space and precarious regional strategic stability," *Space Pol.*, vol. 47, pp. 63-75, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.06.003>.
- [16] Z. Zhang, and B. Seely, "A historical review of China-U.S. Cooperation in space. Launching commercial satellites a technology transfer, 1978-2000," *Space Pol.*, vol. 50, pp. 101333, 2019, doi: 10.1016/j.spacepol.2019.08.003.
- [17] Y. A. Adde, "Socioeconomic Benefits of Space Technology," *IEEE-SEM*, vol.10, no.6, pp. 258-262, 2019.
- [18] H. J. Haubold, A. M. Mathai, and L. Pyenson, "Space science and technology education, teaching, research," *Space Pol.*, vol. 53, pp. 101384, 2020, doi: 10.1016/j.spacepol.2020.101384.
- [19] M. Jussawalla, "The economic implications of satellite technology and the industrialization of space," *Telecommunications Policy*, vol. 8, no. 3, pp. 237-248, 1984, doi: 10.1016/0308-5961(84)90008-9.
- [20] A. Ocampo, L. Friedman, and J. Logsdon, "Why space science and exploration benefit everyone," *Space Pol.*, vol. 14, no. 3, pp. 137-143, 1998, doi:10.1016/S0265-9646(98)00012-5.
- [21] K. Karnik, "Societal benefits of space technology," *Acta Astronautica*, vol. 19, no. 9, pp. 771-777, 1999, doi:10.1016/0094-5765(89)90150-1.
- [22] O. Gurtuna, "Emerging space markets: engines of growth for future space activities," presented at Int. Conf. on Recent Advances in Space Technology (RAST) IEEE, pp. 506-541, 2003. doi: 10.1109/RAST.2003.1303973
- [23] N. Komerath, J. Nally, E. Z. Tang, "Policy model for space economy infrastructure," *Acta Astronautica*, vol. 61, no. 11-12, pp. 1066-1075, 2007, doi: 10.1016/j.actaastro.2006.12.033.
- [24] D. Comstock. (2022, November 19). "The socio-economic benefits of space technology applications and spinoffs," United Nations/Turkey/European Space Agency Workshop on Space Technology Applications for Socio-Economic Benefits, Istanbul, Turkey, September 14, 2010. https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/spaceworkshop/presentations/Comstock.Doug.pdf
- [25] G. Petroni, C. Verbano, B. Bigliardi, and F. Galati, "Strategies and determinants for successful space technology transfer," *Space Pol.*, vol. 29, no. 4, pp. 251-257, 2013.
- [26] P. Jiyoun, "Space Technology Development: Effects on National Security and International Stability," Science and Technology, Center for Science and Technology Policy, Korea, 2014.

- [27] I. A. Crawford, "The long-term scientific benefits of a space economy," *Space Pol.*, vol. 37, no.2, pp. 58-61, 2016, doi:10.1016/j.spacepol.2016.07.003.
- [28] P. T. Metzger, "Space development and space science together, a historic opportunity," *Space Pol.*, 37 (2), 77-91, 2016, doi:10.1016/j.spacepol.2016.08.004.
- [29] A.M. Yazıcı, and S. Darıcı, "The new opportunities in space economy," *Journal of the Human and Social Sciences Researches*, vol. 8, no. 4, 3252-3271, 2019, <http://www.itobiad.com/tr/issue/49747/615134>.
- [30] A. Orlova, R. Nogueira, and P. Chimenti, "The present, and future of the space sector. A business ecosystem approach," *Space Pol.*, vol. 52, 101374, 2020, doi: 10.1016/j.spacepol.2020.101374.
- [31] T. Wood. (2022, October 10). [Online]. Available: <https://www.visualcapitalist.com/visualizing-all-of-earths-satellites/>
- [32] Office of Space Commerce. (2022, October 15). [Online]. Available: <https://www.space.commerce.gov/category/space-economy/>
- [33] A. Piva, and N. Sasanelli, N. "Societal and economic benefits of a dedicated national space agency for Australia," Defense SA, 2017.
- [34] Space Safety Magazine. (2022, November 16). [Online]. Available: <http://www.spacesafetymagazine.com/space-on-earth/space-economy/>
- [35] "Satellite value chain: snapshot 2017." A Euroconsult Executive Report, 2017.
- [36] Morgan Stanley. (2022, November 15). [Online]. Available: <https://www.morganstanley.com/ideas/space-economy-themes-2021/>
- [37] Morgan Stanley. (2022, November 15). [Online]. Available: <https://www.morganstanley.com/Themes/global-space-economy#>
- [38] The Space Economy Report, Euroconsult, 2019.
- [39] Euroconsult. (2022, November 16). [Online]. Available: <https://www.euroconsult-ec.com/node/625>
- [40] Government Space Programs: Benchmarks, Profiles & Forecasts to 2028, Euroconsult, July 2019. (2022, November 23). [Online]. Available: https://www.euroconsult-ec.com/25_July_2019
- [41] N. Rapp, and N. O'Keefe. (2022, October 4). [Online]. "50 years after moon landing, money races into space," *Fortune*. Available: <https://www.euroconsult-ec.com/node/534>.
- [42] T. Özalp, "Space as a strategic vision for Turkey and its people," *Space Policy*, vol.25, no. 4, pp.224-235, 2009. doi:10.1016/j.spacepol.2009.09.005.
- [43] TÜBİTAK UZAY Space Technologies Research Institute. (2022, November 16). [Online]. Available: <https://uzay.tubitak.gov.tr/en/uydu-uzay/satellite-projects>
- [44] TÜBİTAK UZAY Space Technologies Research Institute. (2022, November 16). [Online]. Available: <https://uzay.tubitak.gov.tr/en/haber/scientific-cooperation-agreement-signed-between-tubitak-uzay-and-swedish-space-physics>
- [45] TURKISH AEROSPACE. (2022, November 25). [Online]. Available:

<https://www.tusas.com/en/products/space>

[46] A. G. Levaggi, D. Blinder, “High in the sky: Turkish-Argentine South-South space cooperation,” *Third World Quarterly*, vol. 43, no. 1, pp. 94-113, 2022, doi: 10.1080/01436597.2021.1993811.

[47] S. G. Mantarlis, “Turkish space technology,” M.S. thesis, National and Kapodistrian University of Athens, Greece, 2021.

[48] B. Yaglioglu, O. Yilmaz, A. Utku, and B. G. Ozdemir, “Surveillance of space: An overview and a vision for Turkey’s roadmap,” presented at 6th Int. Conf. on Recent Advances in Space Technology (RAST), Istanbul, Turkey, pp. 1041-1046, 2013.

[49] B. Yaglioglu, E. Imre, V. Tesmer, and M. Scheper, “Mission operations to improve space mission protection,” AIAA Spaceops Conference 2012, Stockholm, Sweden, June 2012.

[50] B. Yaglioglu, “Effective and sustainable outreach of space science and technology: the middle east and central America cases,” presented at 66th International Astronautical Congress (IAC’15), IAC-15-E1.6.8, Jerusalem, Israel, October 2015.

[51] B. Yaglioglu, M. Khesroh, N. Senturk, B. Meskoob, M. Tasdemir, R. Abramovich, and T. C. Atasever, “Spacefaring future of the middle east: the role of moon missions,” presented at 71st International Astronautical Congress (IAC). Dubai, United Arab Emirates, October 12-16, 2020.

[52] Nanosats. (2022, November 3). [Online]. Available: <https://www.nanosats.eu/database>

[53] M. Bulut, A. Kahriman, N. Sozbir, “Design and analysis for thermal control system of nanosatellite,” presented at ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2010), Vancouver, British Columbia, Canada, 12-18 November. Proc. ASME. 44472; Volume 10: Micro and Nano Systems:863-866. January 01, 2010, IMECE2010-39716, doi: 10.1115/IMECE2010-39716.

[54] A. R. Aslan, A. Sofyalı, E. Umit, C. Tola, I. Oz, S. Gulgonul, “TURKSAT-3USAT: A 3U communication cubesat with passive magnetic stabilization,” presented 5th Int. Conf. on Recent Advances in Space Technology (RAST), Istanbul, Turkey, pp. 783-788, 2011.

[55] M. Bulut, N. Sozbir, and S. Gulgonul, “Thermal control system of cube satellite,” presented at 6. Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, AIAC-2011-050, September 14-16, 2011.

[56] M. Bulut, Ö. R. Sözbir, and N. Sözbir, “Thermal control of Turksat 3U nanosatellite,” presented at 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2017), Baku, Azerbaijan, pp. 26-32, September 29-30, 2017.

[57] B. Yaglioglu, S. Kose, O. Atas, O. Tekinalp, D. Kahraman, M. Suer, “A multi-national multi-institutional education framework: APSCO SSS-2B Cubesat project,” presented at 9th Int. Conf. on Recent Advances in Space Technology (RAST), IEEE, June 12 June, Istanbul. 553-557, 2019.

[58] M. Bulut, and N. Sozbir, “Thermal design, analysis and test validation for TURKSAT-3USAT satellite,” *J. Therm. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 468-482, 2021.

[59] M. Bulut, “Thermal design, analysis, and testing of the first Turkish 3U communication CubeSat in low earth orbit,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 143, pp. 4341-4353, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10566-z>.

[60] STM. (2022, November 20). [Online]. Available: <https://www.stm.com.tr/en/our->

- [61] A.N. Nurbaki, B. Yıldız, D. Baş, H. H. Ertok, Ş. Gülgönül, ve M. Helvacı. "Optik gözlemlerle Türksat uydularının yörüngelerinin belirlenmesi," VI. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı UHUK-2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 28-30 Eylül 2016.
- [62] B. Gürol, Ş. Gülgönül, G. Gökay, A. Okan and I. Öz, "Optical monitoring of inter satellite distance between Türksat-2A And Türksat-3A," Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011, pp. 337-340, 2011. doi: 10.1109/RAST.2011.5966851.
- [63] S. Gulgonul, M. Gokten, T. Meinerz, E. Demircioglu, and N. Sozbir, "IRIG-B time Signal distribution over geostationary satellites," presented at 44. Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, USA, November 26-29, 2012.
- [64] N. Sözbir, M. Bulut, Ş. Gülgönül, "Turkish space technology and economy," 10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems Industry 4.0/5.0: Future Minds and Future Society, Sakarya University, Sakarya, Turkey, September 9-11, 2019.
- [65] S. Gulgonul, "Gnss augmentation through ku-band communication satellites with rtk realization," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 26, no. 1, pp. 58-65, 2018. doi:10.3906/elk-1508-83.
- [66] A. Yagli, E. Demircioglu, S. Gulgonul, H.H. Ertok, J. Winkel, and E. Goehler, "Regional positioning system development over Türksat geostationary telecommunication satellites," *Navigation*, vol. 63, no. 3, pp. 359-369, 2016, <https://doi.org/10.1002/navi.143>.
- [67] E. Kalelioğlu. (2022, November 21). [Online]. Available: <https://www.webtekno.com/mustafavarank-uzaya-ilk-turk-kadin-olabilir-h106142.html>
- [68] MSI. (2022, November 21). [Online]. Available: <https://www.savunmahaber.com/en/ministry-of-industry-and-technology-delta-v-moo-rocket-first-firing/>
- [69] Roketsan. (2022, November 22). Space Projects [Online]. Available: <https://www.roketsan.com.tr/en/product/micro-satellite-launching-system/>
- [70] G. Petroni, C. Verbano, "The development of a technology transfer strategy in the aerospace industry: the case of the Italian Space Agency," *Technovation*, vol. 20, pp. 345-351, 2000.
- [71] S. Jason, A. Curiel da Silva Curiel, D. Liddle, F. Chizea, U. M. Leloglu, M. Helvacı, M. Bekhti, D. Benachir, L. Boland, L. Gomes, M. Sweeting, "Capacity building in emerging space nations: experiences, challenges and benefits," *Adv.Space Res.*, vol. 46, no. 5, pp. 571-581, 2010, doi: 10.1016/j.asr.2010.03.003.
- [72] N. Ghafoor, M. Leloglu, and M. Sweeting, "Turkey BILSAT-1: A case study for the surrey know-how transfer and training program," presented at 34th COSPAR scientific assembly, the second world space congress, Houston, TX, USA, 10-19 October 2002.
- [73] G. Dede, and M. Akçay, "Technology foresight in practice: A proposal for Turkish space vision," *Space policy*, vol. 30, pp. 226-230, 2014, doi:10.1016/j.spacepol.2014.07.002.
- [74] A. Çilli Tarçın, Ü. Poyraz, M. Bayramoğlu, D. Özatürk Şahin, E. Yalçınkaya, O. Çelebioğlu, "GOKTURK-1 satellite propulsion subsystem design, integration, test and launch campaign activities," presented at 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, 11-14 June 2019.

[75] Türkiye Elektronik Haberleşme Sektörü. (2022, November 18). Üç Aylık Pazar Verileri Raporu [Online]. Available: <https://www.btk.gov.tr/uploads/pages/pazar-verileri/2018-2ceyrekraporu.pdf>

[76] T. Emen, “Government intervention in the space sector: policy recommendations in Turkey,” *Marmara University Journal of Economic & Administrative Sciences*, vol. 42, no. 2, pp. 265-282, 2021, <https://oi.org/10.14780/muiibd.854382>.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Sürdürülebilirlik Kavramı Anlayışında Tuğla Endüstrisinin İncelenmesi

 Can DEMİREL^{a,*},  Osman ŞİMŞEK^b

^a İnşaat Bölümü, Pınarhisar Meslek Yüksekokulu, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: candemirel@klu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1261218

ÖZ

Sürdürülebilirlik kavramı için önemli problem doğal kaynakların ve çevrenin tahrip edilmesidir. Tuğlalar inşaat sektöründe kullanılan en yaygın duvar malzemesi olduğundan kil tuğlalarının üretiminde kullanılan doğal kilin kaynaklarında azalma meydana gelmektedir. Bunun yanında tuğla üretim süreci büyük miktarda enerji tüketmekte ve hava kirliliği oluşturmaktadır. Bu çalışmada sürdürülebilirliğin tanımı, önemi ve tuğla endüstrisi açısından sürdürülebilirlik kavramı araştırılmıştır. Tuğla üretiminde sürdürülebilirlik açısından çözüm yolları ve üretimde kullanılan atık malzeme üzerine akademik çalışmalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, Tuğla, Atık malzeme

Examining the Brick Industry in Understanding the Concept of Sustainability

ABSTRACT

The important problem for the concept of sustainability is the destruction of natural resources and the environment. Since bricks are the most common wall material used in the construction industry, there is a decrease in the resources of natural clay used in the production of clay bricks. In addition, the brick production process consumes a large amount of energy and creates air pollution. In this study, the definition and importance of sustainability and the concept of sustainability in terms of the brick industry were investigated. In terms of sustainability in brick production, academic studies on solutions and waste materials used in production were examined.

Keywords: Sustainability, Brick, Waste material

I. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ve teknolojinin gelişmesi ile aynı hammaddenin farklı alanlarda kullanılması kaynakların hızlıca tüketilmesine yol açmaktadır. Böylece hammadde kullanımı atık malzemelerin oluşmasına neden olmaktadır. Meydana gelen atık malzemeler insan sağlığına zarar vermekte ve bunun yanında çevre kirliliğine ve finansal olarak da negatif yönde etki etmektedir. Negatif yönde olan bu etkilerin takip edilmesi ve önlemler alarak bu etkileri en zara indirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu çalışma yöntemlerinden bazıları atıkları toplamak, geri kazanmak ve depolamaktır [1].

Üretim yöntemlerinin yanında sürdürülebilirlik kavramı ile birlikte araştırmacılar ucuz ve hafif yapı malzemeleri üretmek için araştırmalar yapmaya yönelmiştir. Araştırmacılar ortaya çıkan atık malzemeleri sürdürülebilir malzeme üretmek amacıyla tuğla üretimine dahil ederek araştırmalar yapmıştır. Bilim adamları uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanını birçok araştırmada kullanmışlardır. Tuğla üretiminde kullanılan atıkların basınç dayanımı bakımından olumsuz etki yaptığı görülmüştür [2].

Çalışmada sürdürülebilirlik kavramının tanımı yapılarak, tuğla üretim sürecinde sürdürülebilirlik kavramı üzerinde durulmuştur. Tuğla üretim sürecinde hammadde miktarının azaltılarak doğal kaynakları korumak üzerine yapılan güncel çalışmalar incelenmiştir.

II. SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Sürdürülebilirlik, bir olayın, olgunun devamlılığını sağlamak, sürdürmek anlamına gelen Latince 'sustinere' kelime kökünden gelmektedir. Sürdürülebilirlik asıl kaynağı bitirmeden, kontrollü bir şekilde tüketilmesi ile birlikte sonsuza kadar var olması sağlanarak kullanılmasıdır [3].

1987 yılının öncesinde enerji kaynakları ve hammaddeler kontrolsüz bir şekilde tüketilmekle birlikte çevre faktörü önemsenmeden sadece ekonomik boyut üzerinde durulmaktaydı. 1987 yılından itibaren ekonomik boyutların düşünülmesinin ortaya çıkardığı sorunlardan dolayı sürdürülebilir kalkınma ortaya çıkarak benimsenmiştir. Sürdürülebilir kalkınmanın benimsenmesiyle çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlar hep birlikte ele alınmıştır [4].

Yapı malzemelerinin süreci hammaddenin çıkarılması, fabrikaya ulaştırılması ve işlenmesi, kullanılacağı yapının şantiyesine taşınması, şantiyede kullanılması, onarılması ve ömrü bittiğinde yıkılması ve geri dönüştürülmesi evrelerini kapsamaktadır. Malzemenin sürdürülebilirliğini belirleyen özellikler enerji, elde edildiği hammadde, performans, maliyet ve estetikdir. Yapılarda sürdürülebilir malzemeler yenilenemez enerji kaynağına duyarlı, doğaya zarar veren kimyasal içermeyip, canlıların yaşamsal döngülerine zarar vermeyip, hammaddesinin kullanılabilir hale getirilmesinde, işlenmesinde minimum düzeyde su ve enerji kullanılan, geri dönüşebilir ve tekrar kullanılabilen, doğaya ve çevreye zarar vermeyen malzemelerdir [5].

Sürdürülebilir yapıların süreci projelerin çiziminden itibaren, yapının inşası, kullanılması ve onarılması, ömrünü tamamladıktan sonra yıkılarak geri dönüşüm ile tekrar kullanılarak ortadan kalkması döngülerinden oluşmaktadır [6].

III. TUĞLA ENDÜSTRİSİ AÇISINDAN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

A. TUĞLA ÜRETİMİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN TAŞIDIĞI TEMEL ÖZELLİKLER

Tuğlalar en fazla kullanılan yığma birimlerdir. Üretim aşamasında fazla enerji tüketilen ve hava kirliliğine sebep olan bir süreci kapsamaktadır. Milattan önce kullanılan geleneksel yapı malzemesi olan tuğlalar, inşaat sektöründe en çok kullanılan duvar malzemesidir. Kil tuğlalarının üretimi 800°C ile 1400°C sıcaklıklarda pişirilmesiyle oluşmaktadır. Fırınlarda kullanılan kömüründe etkisiyle atmosferi kirleterek hava kirliliği oluşturmakta ve ciddi sağlık problemleri oluşturmaktadır. Sürdürülebilir bir üretim olması için enerjinin daha verimli yollarla yapılması gerekmektedir [7].

Tuğla üretimi ülkemizde hammaddesinin fazla ve elde edilmesinin kolay olduğu yerleşimlere yoğunlaşmış inşaat sektörüne hizmet eden 520 fabrika bulunmaktadır. Tuğla fabrikalarının sayılarına bakıldığında yıllık hammadde kullanımının 30 milyon ton civarında olduğu tahmin edilebilir. Türkiye’ de üretimi basit, maliyet olarak düşük ve yaygın tüketilen yapı malzemesidir [8].

Tuğla üretiminde pişirme safhasındaki fırın çeşitlerine bakıldığında; Türkiye’ de en fazla kullanılan fırın Hoffman fırınlarıdır. Hoffman fırınları, kesit olarak dairesel tonoz şeklindedir. Tuğlalar sabit fakat ateş hareketlidir. Bu fırın tipleri ısıyı verimli kullanır ve kapasiteleri yüksektir. Hoffman fırınlarında genellikle katı yakıt olarak kömür kullanılır. Çok az da olsa sıvı yakıt da kullanılır. Enerji bakımından diğer fırınlara göre yüksek tüketim ve maliyet olarak da yüksek maliyetlidir [9].

Tuğla üretimi sırasında kullanılan hammadde miktarını azaltmak ve bunun için kile atık malzemeler ikame etmek, pişirme işlemindeki enerjiyi düşürmek için fırın sistemlerinde ve yakıt kullanımında değişikliklere gitmek tuğla endüstrisinde sürdürülebilirlik kavramını canlandırmaktadır. Ayrıca üretilen tuğlaların kırık durumda olanları tuğla tozu haline getirilerek kilin plastikliğini dengelemek amacıyla hammadde içerisine karıştırılmaktadır. Beton sektöründe tuğla kırıkları ve tozları agrega ve çimentoya ikame olarak kullanılmaktadır.

B. TUĞLA ENDÜSTRİSİNDE TARİHSEL DEĞİŞİME KISA BAKIŞ

Geçmişte üretilen ilk yapı malzemesi tuğla olup; kilin suyla karışıp pişirilmesiyle doğmuştur. Geçmiş çağlarda barınma ihtiyacı için yapılmış yapılar, önce tuğla üretim yeri olmuş ve sonra üretilen tuğlalarla inşa edilmişti. Bu bilgiye göre tuğlalardan yapılan ilk ev; tuğlanın ilk üretim yeri olmuştur. Eski çağlarda kurulan yerleşim yerleri seçilirken tuğla üretiminde kullanılan toprağın fazla olduğu bölgelerin dikkate alındığı bilinmektedir. Tuğla sanatının ilk başlangıcı bu dönemlerin olduğu kabul edilmektedir. Mezopotamya toprakları içerisinde yer alan Nil ve Tigris nehirlerinin aşağı kısımları ilk başlangıç bölgeleridir. Bu bölgelerde yapılan kazı çalışmalarından elde edilen kalıntılardan zamanın gösterişli yapılarının tuğlalardan imal edildiği bilgisine ulaşılmıştır [9].

Anadolu’da kiremit ve tuğlaya ilk standart Osmanlılar döneminde getirilmiştir. Fatih Sultan Mehmet devrinde tuğlalar 4.5x28x28 cm boyutlarında üretilmiş, taban tuğlaları da 25x25 cm ebatlarında kare veya çapları 30 cm ile 60 cm arasında değişen altıgen şeklinde üretilmiştir. Anadolu’da kullanılan tuğlalar bu standartlar dışında üretiliyse inşaatlarda kullanılmasına ve tuğlaların satışına da izin verilmemiştir. 18. yüzyıla kadar tuğla sektöründe kayda değer gelişmeler görülmemiştir. Bu durgunluk sanayi devrimi ile sona ermiştir. Tuğla ve kiremit endüstrisinde üretimde standartlaşma ve iş gücünün azalması yönünde çalışmalara öncelik verilmiştir. Tuğla ve kiremit 21. yüzyılın vazgeçilmez malzemeleri arasındadır [9], [10], [11].

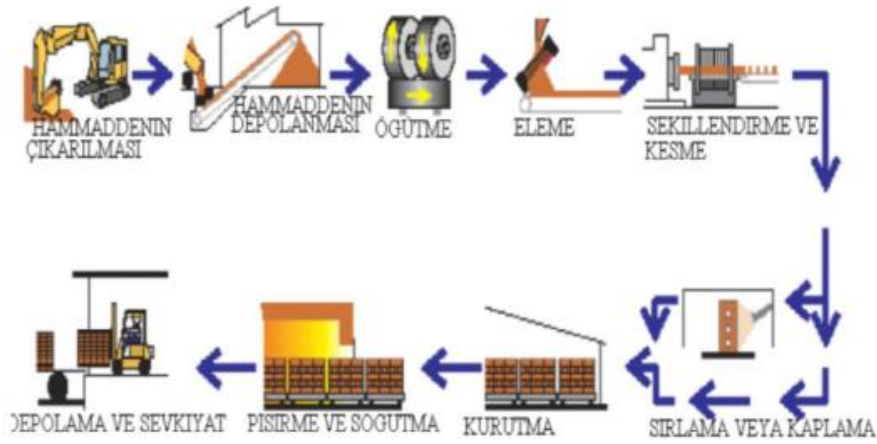
C. TUĞLALARIN YAŞAM DÖNGÜSÜNÜN DEĞERLENDİRMESİ

Yapı malzemeleri üretimi dünyada gıda sektöründen sonra hammadde tüketen sektördür [12]. Dünyada her yıl yapı malzemeleri üretimi için en az üç milyon ton hammadde kullanılmaktadır. Tüketilen hammadde küresel ekonominin neredeyse %40 -50' sidir [13].

Tuğlaların yaşam döngüsünün değerlendirilmesi, tuğla üretiminin başından sonuna kadar, yani tuğla hammaddesi olan kilin çıkarımından, tuğla üretimine, kullanımına, tuğlanın ömrünü tüketmesine, geri dönüşümüne kadar, yaşam döngüsünde olası çevresel etkilerini kapsar.

Tuğla üretiminde kullanılan hammadde kil'dir. Kil, feldispat, kalsit, dolomit ve kuvars en bilinen tortul kayalarda bulunan en yaygın minerallerdir. Tortul kayalardan granit gibi magmatik ana kayacın parçalanması ve kimyasal bozuşma kil minerallerini oluşturur. Feldispat mineralince zengin olan volkanik kayaların suların etkisiyle aşınarak taşınması ve havzalarda birikmesi ile kil yatakları oluşmaktadır [14].

Tuğla üretim aşamaları ilk olarak hammaddenin çıkarılarak depolanmasıyla başlar. Hammaddenin hazırlanması, hammaddenin şekillendirilmesi, şekil verilen tuğlaların kurutulması, pişirilmesi ve pişirilen tuğlaların soğutulduktan sonra paletlere dizilerek depolanmasıyla üretim aşamaları son bulur.



Şekil 1. Üretim süreçleri [18].

Tuğla üretimi hammaddenin hazırlanması, şekillendirilmesi, kurutulması ve pişirilmesi aşamalarından meydana gelmektedir. İlk aşama olan hammaddenin hazırlanması, üretimde kullanılacak killerin boyut ve bileşim açısından uygun hale gelmesi için gerekli hazırlıkları içeren aşamadır. Hammaddeden iri taşların ve çöplerin ayıklanmasından sonra istenilen inceliğe kadar öğütülmesi, işlenebilirlik özelliğinin artması, malzemenin homojen olması, kohezyon ve plastiklik özellikleri için önemlidir. Öğütme işleminin tamamlanmasının ardından harmanlama (kireç tebeşir, kum, gibi) ve su eklenerek istenilen kıvam elde edilinceye kadar yoğurma işlemi yapılır. Daha sonra hammadde dinlendirilerek, çamurun direnç kazanması sağlanmış olur. Hammaddenin hazırlanması aşamalarından en önemli aşama kalitesini etkilediğinden dinlendirme aşamasıdır [15].

Şekillendirilmiş tuğlalar pişirilmeden önce pişirme esnasındaki çatlamayı engellemek ve bir miktar mukavemet kazanması için kurutulması gerekmektedir. Tuğlaların kurutulması doğal olarak atmosferik şartlarda olabileceği gibi, nemin kontrol altında tutulduğu özel tasarlanmış kurutma odalarında da yapılabilir [16].

Kurutma işleminin ardından pişirme işlemi fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Pişirme sırasında kilin kimyasal değişimleri tuğlaların sağlamlığını ve mekanik özelliklerini artırmaktadır.

Tuğla üretiminin son aşaması pişirme işlemidir. Killer pişirme sırasında kimyasal reaksiyonlara maruz kalır. 300°C’ de organik maddeler yanar, molekül suyu 550°C’ de bileşimden ayrılır. 550-900°C arasında silis ve alümin tekrar birleşerek metakaolin oluşur. Bu oluşan malzeme sert, şeklini koruyan, mukavemet kazanan ve rengini almış olan tuğladır. Pişirme sıcaklığı arttıkça su emme azalmakta ve birim ağırlığı artmaktadır. Ancak çok fazla yüksek sıcaklıkta pişirme tuğlaların camlaşmasına ve uygulama sırasında harca yapışmasının azalmasına sebep olur. Genellikle pişirme sıcaklığı 900-980°C arasında olmalıdır [17].

Etki değerlendirme aşamasına gelindiğinde, hammaddelerin çıkarılması, elenmesi, taşınması, işlenmesi çok fazla enerji gerektiren aşamalardır ve elektrik enerjisi tüketimi olur. Enerji tüketiminin en yoğun olduğu aşama fırın yani tuğlayı pişirme aşamasıdır. Bununla birlikte fabrikalarda çoğunlukla kömür ve son teknoloji fabrikalarda doğalgaz kullanılan enerji kaynaklarıdır. Tuğla üretiminde tuğla pişirmek için kullanılan yakıtların etkisiyle CO₂ oluşmakta ve bu durum küresel ısınmaya neden olmaktadır.

Tuğla üretiminde ortaya çıkan diğer tehlike ise tozdur. Tuğla fabrikasında çalışan işçilerde tozdan dolayı göz tahrişi ve akciğer hasarları gibi sağlık sorunları meydana gelebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Pişirilen tuğlalardan çıkan toz

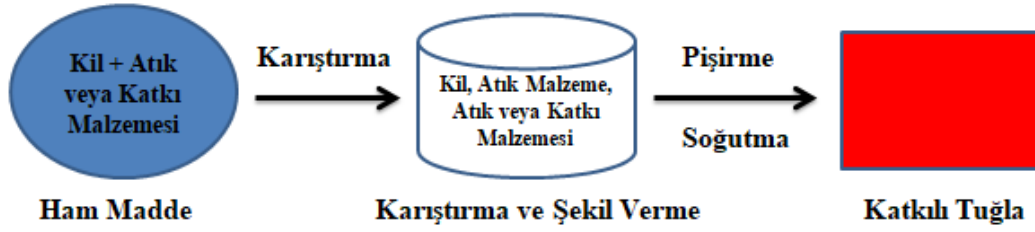
Tuğlaların taşınması sırasında kullanılan araçların yaktığı yakıtlar hammadde taşınmasından üretilmesinde olduğu gibi insan sağlığı ve çevreye etki etmektedir.

D. SÜRDÜRÜLEBİLİR TUĞLA ENDÜSTRİSİNDE ÇÖZÜM YOLLARI

İmalat endüstrisinin endüstriyel ekoloji uygulaması, kendi atık ürünlerini ve kendi üretim yöntemleriyle atıklarını geri dönüştüremeyen başka endüstrilerin atık ürünlerini kullanılabilir hale getirmek ve yeniden kullanmaktır. Depolanan endüstriyel atık ürünler geri dönüşümlü malzeme olarak kullanıldığında, tuğlanın daha ekonomik üretilmesi olanağı da sağlanabilmektedir.

D. 1. Kullanılan Kil Miktarının Azaltılması

Kil tuğlaları üretmek için gerekli hammaddelerin (doğal kil, kum, silt, vb.) kaynakları doğada azalmaktadır. Doğal kaynakların tüketilmesini azaltmak için çevre dostu alternatif bulmak dünya genelinde bir ihtiyaçtır. Atık maddelerin yapı malzemelerinde üretime dahil edilerek hammadde kullanılmasını azaltması bu soruna çözüm olarak sunulmaktadır. İşlenmiş atık çay, kauçuk, polistiren, uçucu kül, talaş, kireçtaşı tozu ve çamur gibi atıkları kil miktarını azaltarak tuğla üretim sürecine dahil etmek için birçok çalışma yapılmıştır [19].



Şekil 3. Katkılı tuğla örneklerinin üretim şeması.

Geleneksel tuğla üretim sürecinde kilin üretime hazırlanması için enerji harcanmaktadır. Hammaddenin çıkarılması araziye yani çevreyi olumsuz etkilemektedir. Üretilen tuğlaların fırınlama işlemleri sırasında tüketilen enerjinin yanında çok fazla sera gazı salınımı olmaktadır. Kil tuğlalarının sahip olduğu enerji yaklaşık 2.0 kWh ve bir tuğla yaklaşık olarak 0.41 kg CO₂ salmaktadır. Dünyada killerin doğal kaynaklarının kontrolsüz kullanımı kil kıtlığına sebep olmuştur. Bazı ülkeler örneğin Çin kil tuğlalarının kullanımına sınırlama getirmiştir [20].



Şekil 4. Üretimde kullanılan kil

Yapılan araştırmalarda tuğla üretiminde kullanılan kilin miktarı azaltılarak termik santral atığı olan uçucu kül, atık çamur, çay atıkları, çeltik kavuzu, cam kırıkları gibi malzemeler kullanılmıştır. Hammadde miktarını azaltmış, atık malzemeleri değerlendirmiş ve aynı zamanda tuğlaların fiziksel ve mekanik özelliklerinde bazı iyileştirmeler görülmüştür.

D. 2. Plastiklik Suyu Olarak Yağmur Suyu Kullanılması

Plastiklik suyu olarak içilebilir nitelikte su kullanılmaktadır. Atık sular ve içilemeyen sular genellikle yapılan analizlerde zararlı oldukları sonucu çıkmadığı sürece şebeke suyu yerine kullanılmışlardır. Tuğla fabrikalarında şebeke suyu kullanımını azaltmak amacıyla çatı oluklarını çatı seviyesine yakın yerleştirilmiş su depolarına bağlayarak suyun birikmesi sağlanabilir.

Klasik yağmur suyu toplama sisteminde; toplama yüzeyi, nakil sistemi, depolama sistemi ve dağıtım sistemleri olarak 4 aşama bulunmaktadır. Yağmur suyu, toplama yüzeylerinden toplanarak bir dizi oluk sistemi aracılığıyla depolara iletilmekte ve depolardan çeşitli alanlarda kullanmak için yeniden dağıtılmaktadır [21].

D. 3. Atık Tuğlaların Geri Dönüşüm Olarak Kullanımı

Atık tuğla yığınları genellikle tuğla fabrikalarında pişirildikten sonra şekil bozukluğu oluşan ve taşıma sırasında kırılmalar meydana gelen tuğlalardan oluşur. Bunların bir kısmı toz haline getirilerek

hammaddeye karıştırılır. Araştırmacılar atık tuğlaları genellikle beton agregası ve çimentoya ikame olarak kullanmışlardır.

Kentsel dönüşümün hızlanması ile ömrünü dolduran binaların yıkımından fazla miktarda kil tuğlası atığı ortaya çıkmaktadır. Yapılan istatistiklere göre kentsel dönüşümlerde inşaat atıklarının %50-70'ini ve inşaat işlerinin de %30-50'sini kil tuğlaları oluşturmaktadır. Fabrikalarda tuğla üretim sürecinde standarda uymayan çok sayıda tuğla üretilmektedir. Özellikle son yıllarda tuğlaların geri dönüştürülmesi çok fazla ilgi görmektedir. Tuğlaların geri dönüştürülmesinin ve kullanımının geliştirilmesi gerekmektedir [22].

Kentleşmenin hızlanması çok büyük miktarda yıkılan yapıların atıklarını ortaya çıkarmaktadır. ABD ve Avrupa Birliği her yıl sırayla 700 milyon ve 800 milyon kentsel dönüşümlerde inşaat atığı üretmektedir. Çin dünyanın gelişmekte olan en büyük ülkesi olarak her yıl 1.8 milyar ton inşaat atığı üretiyor ve kentleşme hız kazandıkça üretmeye artarak devam edecektir. İnşaat yıkım atıkları birikerek arazileri doldurmakta ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle inşaat yıkım atıklarının geri dönüştürülerek azaltılması ve çevreye olan etkisinin çözülmesi dünyayı ilgilendiren bir sorundur [23].

D. TUĞLA ÜRETİMİNDE ATIK VE KATKI KULLANIMI ÜZERİNE YAPILAN AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Esmeray ve Atış yaptıkları çalışmada, tuğla üretiminde kanalizasyon çamurunun kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kanalizasyon çamuru %5, %10, %15 oranlarında tuğla kiline eklenmiş 900°C ve 1050°C de pişirilmiştir. Kanalizasyon çamurunun üretilen tuğlaların dayanım değerleri üzerinde olumsuz bir etki yaptığı ancak sıcaklık artışının dayanımı olumlu etkilediği görülmüştür [24].

Levent tarafından yapılan çalışmada kırmızı çamurun katkı olarak tuğla kiline ilave edilerek tuğla özelliklerine etkisi incelenmiştir. Tuğla kiline ağırlıkça %0 (kontrol serisi), %5 ve %10 oranında kırmızı çamur ilave edilerek numuneler üretilmiştir. Tuğla numuneleri pişirilirken 3 farklı sıcaklık (800°C, 900°C, 1000°C) kullanılmıştır. Pişirilmiş numuneler üzerinde uygulanan mekanik ve fiziksel deneylerin sonucu olarak % 10 katkılı ve 1000°C' de pişirilmiş numunelerin basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür. Pişirilmiş kırmızı çamur katkılı tuğla numunelerinin renklerine bakıldığında referans numunelere göre daha kırmızı olduğu görülmüştür[25].

Emrulloğlu ve Emrulloğlu yaptıkları çalışmada tuğla üretiminde Kırka boraks atığı ile Afyon Reis mermer atığının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmalarında farklı karışımlar hazırlamışlar ve farklı sıcaklıklarda sinterlemişlerdir. Boraks atıklarının bağlayıcı özellikleri, sıvı faz oluşturmaları ve soğuyunca katılaşmaları sebebiyle 600-700°C'lerde sıvı fazın sinterleşmeyi sağladığını saptamışlardır. Karışımlarda mermer atığı oranı arttıkça; pişme küçülmesi, gözenek miktarı, kızdırma kaybı, basma dayanımı, su emme ve yoğunluk değerlerinin de arttığı görülmüştür [26].

Ulusoy, tarafından yapılan çalışmada, tuğla hammaddesine %5, 10 ve 20 oranlarında atık uçucu tekstil külü ve bazaltikpomza ikame edilerek, 700, 900, 1050 °C sıcaklıklarda pişirilmiştir. Katkılı tuğlaların mekanik özelliklerinin, katkısız tuğla örneklerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [27].

Yüksek ve Kaya (2017) çalışmalarında, hafif yapı tuğlası üretiminde Kangal Termik santrali atığı uçucu kül ile alçı ve kirecin farklı oranlarda karışımlarını araştırılmışlardır. %70 alçı, %10 uçucu kül ve %20 oranında kullanılan karışımın diğer oranlardaki karışımlara göre daha optimal değerlere sahip olduğu görülmüştür. Kızılgut ve arkadaşları (2001) çalışmalarında, Çatalağzı termik santralinin atığı uçucu külün tuğla üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmaya göre %30-40 oranında tuğla kili ve uçucu kül karışımı kullanımıyla uygun özellikte tuğla üretilebileceği ve tuğla üretiminde meydana gelen ve kireç kusmasından meydana gelen beyazlaşmanın ortadan kalktığı belirlenmiştir [28,29].

Kumarasamy ve arkadaşları, araştırmalarında, tuğla üretiminde uçucu külün optimum kullanım oranının tespitini amaçlamışlardır. Araştırma sonucunda uçucu kül kullanımının tuğla özelliklerine olumlu etkisinin görüldüğünü ve optimum kullanım oranının %20 olduğu sonucuna varmışlardır [30].

Abbas Al Amara, yapmış olduğu tez çalışmasında, bor atığı ve uçucu kül kullanarak geopolimer tuğla üretmiştir. Çalışmada da dayanımlı ve yalıtım özelliği yüksek geopolimer tuğla üretmeyi amaçlamıştır. Bor atığı oranları (%10, %20, %30, %40, %50 ve %60) değiştirilerek kullanılmış ve %10 oranında uçucu kül sabit tutularak üretim yapılmıştır. Üretilen geopolimer tuğla örnekleri üzerinde birim hacim ağırlık, porozite, su emme, ısı iletkenlik katsayısı deneyi, eğilme de çekme ve basınç deneyleri uygulanmıştır. Üretilen tuğla örneklerine yapılan deneylere göre su emme, birim hacim ağırlık, porozite ve ısı iletkenlik katsayısında azalma meydana gelmiştir. Bor atığı katkısı %50 oranına kadar kullanıldığında basınç dayanımında artma, daha fazla oranda kullanımında basınç dayanımında azalma meydana getirmiştir. Eğilmede çekme deneyinde ise tam tersi olarak bor atığı katkısı %50 oranına kadar kullanıldığında azalma, %60 oranda kullanımında azalma meydana getirmiştir. Uçucu kül ve bor atığının kullanımının tuğla üretiminde olumlu sonuçlar verdiği ve çevre sağlığı bakımından da olumlu olacağı tespit edilmiştir [31].

İnceyol, çalışmasında, atık kil içeren topraklar ile atık cam parçalarını farklı oranlarda ve farklı sıcaklıklarda pişirerek fiziksel özellikleri iyi olan tuğla üretmeyi hedeflemiştir. Pişirme sıcaklığının artırılmasıyla kızdırma kaybı, su emme ve dayanım gibi özelliklerinde arttığı görülmüştür. Üretilen katkılı tuğlalardan pişirme sıcaklıkları 900 °C ve üzerinde pişirilenler referans tuğlaya yakın değerler vermiştir. Cam atığı katkısının üretilen tuğla örneklerinin fiziksel özelliklerine olumlu yönde etki ettiği görülmüştür [32].

Bergil tez çalışmasında, kırılmış cam elyaf ile polipropilen lif kullanılarak ağırlıkça % 0 (katkısız), % 0,5 , % 1 ve % 1,5 oranlarında killi toprağa ikame edilerek tuğla üretimi gerçekleştirmiştir. Üretilen katkılı tuğla örneklerine kızdırma kaybı, birim hacim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımları testleri yapılmıştır. Katkı oranının artmasıyla pişirilmiş örneklerde basınç ve eğilme dayanımları artmış, pişirilmemiş örneklerde ise basınç ve eğilme dayanımları azalmıştır. Pişirilmemiş numunelerde katkı oranının artmasıyla hacim ve birim hacim ağırlığının azaldığı görülmüştür [33].

Aykut, tez çalışmasında, tuğla üretiminde traverten ve Bayburt taşı atıkları ile sodyum hidroksiti geopolimerizasyon yöntemiyle kullanmış ve yüksek dayanımlı tuğla üretimini amaçlamıştır. Hamur haline getirilen numuneler küre bırakılarak sonrasında 20, 40, 80 °C sıcaklıklarda pişirilerek sertleştirilmiştir. Sertleşen örnekler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, priz başlama ve bitişi, birim hacim ağırlık, aşınma dayanımı, su emme gibi deneyler yapılmıştır. Alınan değerler referans ile karşılaştırıldığında daha ekonomik, yüksek dayanımlı, çevre dostu malzeme olduğu sonucuna varılmıştır [34].

Ertaş tez çalışmasında, kil ile bor atığı, atık kül, alünit, kalsine manyeziti farklı oranlarda karıştırarak laboratuvarında presleme yöntemiyle tuğla örnekleri üretmiştir. 6 adımda sıcaklık artırılarak 900 °C' de tuğla örnekleri pişirilmiştir. Üretilen tuğla örneklerine fiziksel ve mekanik testler yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre kızdırma kaybı, porozite, dayanım gibi özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir [35].

Abbas ve arkadaşları, araştırmalarında, termik santrallerden atığı uçucu kül ve kil kullanarak tuğla üretmişlerdir. Tuğla örneklerinde %0-%25 arasında uçucu kül kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda uçucu kül içermeyen tuğla örneklerinin basınç dayanımının uçucu kül içeren örneklerle göre daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. %20 uçucu kül kullanımında Pakistan Yönetmeliklerine göre minimum gerekliliği karşıladığı, tuğla ağırlığında azalma olduğundan dolayı bina ölü yükünün azaldığı ifade edilmiştir. Uçucu kül kullanılan tuğla örneklerinde çiçeklenmenin az gözleendiği sebebiyle ekonomik açıdan daha sürdürülebilir üretime yardımcı olacağı belirtilmiştir [36], [37].

Zawrah ve arkadaşları araştırmalarında, geopolimer tuğla üretimi için yüksek fırın cürufu ve kil kullanarak üretim yapmışlardır. Tuğla üretiminde yüksek fırın cürufu %20, %40, %60 ve %80

oranlarında kullanılmıştır. Geopolimer üretimde kür sürelerinin etkisini de araştırmışlardır. Sonuç olarak üretilen tuğlalarda geri dönüşüm sürecinin başarılı olduğu sonucu kanıtlanmıştır [38].

Amin ve arkadaşları, yapmış oldukları araştırmada, seramik karo malzeme imalatı sürecinde çıkan atık ince toz malzemeyi tuğla üretim sürecinde kullanmışlardır. Çalışmalarında %1 sodyum hidroksit seviyesinde kostik soda ve %6-%10 arasında sönmüş kireç kullanmışlardır. Atık malzemelerin kullanımında ekonomik açıdan önemli bir azalma görülmüştür [37], [39].

IV. SONUC

Çalışmada incelenen araştırmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- ✓ Tuğlaların yaşam döngüsü incelendiğinde çıkan etkiler ülkedeki hammadde rezervlerinin tüketilmesi, fosil yakıtların tüketilmesi ve su kaynaklarının tüketilmesidir.
- ✓ Tuğla üretiminde atık kullanılması doğal kaynakların ve verimli toprakların korunmasını ve tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu etkilemektedir.
- ✓ Yapılan üretimin çevre dostu olması için endüstriyel atıklar hammadde olarak kullanılabilir.
- ✓ Tuğla üretiminde atık kullanılması fiziksel özelliklerinde olumlu etkisinin yanında ekonomik olma durumu da söz konusudur.
- ✓ Geopolimer tuğlalar, mevcut tuğlalara göre hafif, gözenekli ve yüksek dayanımlı olduğu görülmektedir.
- ✓ Tuğla üretiminde atık kullanılması ile genellikle tuğla örneklerinin porozitelerinin arttığından hafif tuğla üretimi yapılmaktadır.
- ✓ Tarım atıkları kullanılan tuğla üretimlerinde tuğla bünyesinde yanan atıklar boşluk oluşturarak ısı yalıtım özelliklerini iyileştirmektedir.

Kolay üretimiyle inşaat sektörünün gözdesi olan tuğlaların üretimi her geçen gün artmaktadır. Diğer yandan da tarımsal arazilerdeki ham maddelerinde azaldığı bilinmektedir. Bunun içindir ki araştırmacılar hammadde miktarını azaltmak ve geleneksel tuğlaya göre özellikleri iyileşmiş tuğla üretmek için araştırmalar yapmaya devam etmektedir.

V. KAYNAKLAR

[1] Turan, E., “Bor atığı kil pestillerinin mühendislik özellikleri ve yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2019.

[2] Iftikhar S, Rashid K, Ul Haq E, Zafar I, Alqahtani F K, Iqbal Khan M., “Synthesis And Characterization of Sustainable Geopolymer Green Clay Bricks An Alternative To Burnt Clay Brick,” *Construction and Building Materials*, 259, 1–10, 2020.

[3] Aydın, B., “Sürdürülebilir Çelik Uygulama Olanakları”, Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2011.

[4] Berber, F., “Ekolojik Malzemenin Tasarımdaki Yeri ve Ekolojik Malzemeyle Mimari Konut Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Haliç Üniversitesi. İstanbul, Türkiye, 2012.

- [5] Sev, A., *Sürdürülebilir Mimarlık*, YEM Yayınevi, 2009.
- [6] Yılmaz, S., “Afet Sonrası Geçici Barınmanın Çevresel Ekonomik ve Sosyal Sürdürülebilirliğinin Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yapı Bilgisi Ana Bilim Dalı, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2021.
- [7] Ganesh C, Muthukannan M, Aakash S, Prasad, Subramanian B., “Energy Efficient Production of Geopolymer Bricks Using Industrial Waste,” IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 872, 1–8, 2020.
- [8] Kırgız, M. S., “Mermer ve Tuğla Endüstrisi Atıklarının Çimento Üretiminde Minerolojik Katkı Olarak Kullanılması”, Doktora Tezi, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [9] Özçay, Ü. “Kiremit Sektöründeki Endüstriyel Atıkların Geri Kazanılması,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [10] Yanık, G., “Turgutlu (Manisa) Neojen Oluşuklarının Tuğla Kiremit Hammaddesi Yönünden Minerolojik Petrografik ve Jeokimyasal incelenmesi”, Doktora tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.
- [11] Bayraktar, O.Y., “Sürdürülebilir Bir Materyal Olarak Tuğla Tozunun Potansiyel Kullanımı,” ISAS-Winter, Samsun, Turkey, 2018.
- [12] Yeang K., *Designing With Nature : The ecological basis for architectural design*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [13] Calkins M., *Materials For Sustainable Sites : a complete guide to the evaluation, selection, and use of sustainable construction*, Wiley, Hoboken, N.J. 2009.
- [14] Arcasoy, A. *Seramik Teknolojisi*. Marmara Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi Yayınları. syf.277 İstanbul, (1983).
- [15] Dönmez, S. *Yapı Bilgisi 3. (Çeviri)*. Yüksek Öğretim Kurulu Yayını, 149-173, Ankara, 1993.
- [16] ÖNEŞ, A. *İnşaat Malzeme Bilgisi*. Ankara Üniv. Ziraat Fakültesi Yayınları:1094, Ders Kitabı:315, s. 67-75, Ankara. 1988.
- [17] EKMEKYAPAR, T. VE ÖRÜNG, I., *İnşaat Malzeme Bilgisi*. Atatürk Üniv. Ziraat Fakültesi Ders Yayınları No: 145, s. 22-36, Erzurum. 1993.
- [18] Şahin, Ş. E. Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, F.B.E., Kütahya, 38. 2008.
- [19] Khater H M., Ezzat M., El Nagar A M., “Engineering of Low Cost Geopolymer Building Bricks Applied For Various Construction Purposes,” *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7, 81–99, 2016.
- [20] Zhang L., “Production of bricks from waste materials” *Construction and Building Materials*, 47, 643–655, 2013.
- [21] Aslan, D., “Binalar aracılığıyla yağmur suyu toplama stratejilerine biyomimetik bir yaklaşım,” Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.

- [22] Cheng H., “Reuse Research Progress on Waste Clay Brick,” *Procedia Environmental Sciences*, 31, 218–226, 2016.
- [23] He Z, Shen A, Wu H, Wang W, Wang L, Yao C, Wu, J, “Research Progress on Recycled Clay Brick Waste As An Alternative To Cement For Sustainable Construction Materials,” *Construction and Building Materials*, 274, 1–13. 2021.
- [24] Esmeray, E., Atıs, M. Utilization of sewage sludge, oven slag and fly ash in clay brick production. *Construction and Building Materials*, 194, 110-121, 2019.
- [25] Levent M. Kırmızı Çamur Katkılı Tuğla Üretiminin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi Afyon Kocatepe Üniversitesi. Afyonkarahisar, 2012.
- [26] Emrulloğlu, Ö. F.; Emrulloğlu, C. B. ve Temel, P., , Etibor Kırka Boraks Atığı İle Afyon Reis Mermer Atığından Beyaz Tuğla Üretiminin Araştırılması, I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, s. 229-234, 2002.
- [27] Ulusoy, A., Uçucu Kül-Tekstil Fabrikası Atık Külü Ve Bazaltik Pomzanın Tuğla Üretiminde Katkı Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş. 2008.
- [28] Yüksek, S., Kaya, S. Kömür Baca Külü, Kireç ve Gips Ürünlerinden Yapı Malzemesi Yapımı. *APJES* vol. 5, pp. 58-70, 2017.
- [29] Kızılgut, S., Çuhadaroğlu D., Çolak, K. Çatalağzı Termik Santral Uçucu Küllerinden Tuğla Üretim Olanaklarının Araştırılması. Türkiye 17. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi-TUMAKS. 2001.
- [30] Kumarasamy, V., Sampath, R., Kandasamy, S., “Experimental Study on Hardened Mechanical and Durability Properties of Industrial Ash Bricks,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-8. 2021.
- [31] Abbas Al Amara, S. N., “Uçucu kül tabanlı geopolimer tuğla üretiminde bor atığı kullanımının etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye, 2022.
- [32] İnceyol, M., “Adıyaman yerleşim alanlarından çıkan killi toprağın soda camı katkısı ile tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye, 2019.
- [33] Berkgil, M., “Kırpılmış cam elyaf ve polipropilen katkıli tuğla üretimi,” Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye, 2019.
- [34] Aykut, C., “Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması,” Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye, 2017.
- [35] Ertaş, Nihal Y., “Bazı atık maddelerin tuğla üretiminde değerlendirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Kimya Ana Bilim Dalı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2017.
- [36] Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S.M.S. ve Munir, M. J., “Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: mechanical and durability properties,” *Journal of Building Engineering*, 14, 7-14, 2017.
- [37] AL AMARA, S. N. A., & ÇAĞLAR, A., “Geopolimer Tuğla Üretiminde Atık Kullanımı

Üzerine Yapılan Akademik Çalışmalar,” *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, c.5, s.2, 171-176, 2022.

[38] Zawrah M F, Gado R A, Feltin N, Ducourtieux S, Devoille L., “Recycling and Utilization Assessment of Waste Firedclay Bricks (Grog) With Granulated Blast-Furnaceslag For Geopolymer Production,” *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237–251, 2016.

[39] Amin, S.K., Sherbiny, AboEl-Magd, S.E.A., Belal, A., Abadir, M.F. “Fabrication of geopolymer bricks using ceramic dust waste,” *Construction and Building Materials*, vol.157, 610-620, 2017.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Geri Dönüşümü Yapılmış Polipropilen ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen Polimer Malzemesinin Izod Darbe ve Isıl Özelliklerinin Belirlenmesi

 Ömer ŞENGÜL^{a,*}

^a Hatice Bayraktar Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: omersengulll@hotmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1268052

ÖZ

Günümüzde, endüstrinin gelişmesiyle birlikte plastik malzemelerden üretilen ürün çeşitliliğinde de artış olmaktadır. Bu durumlarda plastik malzemelere olan ihtiyacın da hızla artmasına neden olmaktadır. Plastik malzemelerinin hammaddesinin sınırlı kaynak ve petrolden üretilmesi geri dönüşüm sisteminin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, birincil geri dönüşüm kullanılarak beş kez geri dönüşümü yapılmış yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polipropilen (PP) üretilen prototip malzemelerin özellik indeksi bazı termal ve mekanik özelliklerin tespiti için; ısıl deformasyon, eriyik akış endeksi, izod darbe, özellikleri incelenmiştir. Izod darbe test sonucuna göre %8,08 azalma meydana geldiği, ısıl deformasyon sonucuna göre de % 31,04 iyileşme meydana geldiği gözlenmiştir. Sonuç olarak geri dönüşümü yapılmış numunelerin termal ve mekanik özelliklerinde önemli farklılıklar meydana geldiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Geri dönüşüm, izod darbe, polipropilen, termal özellikler, yüksek yoğunluklu polietilen

Determination of Izod Impact and Thermal Properties of Recycled Polypropylene and High-Density Polymer Material

ABSTRACT

Nowadays, with the development of the industry, there is also an increase in the variety of products produced from plastic materials. In these cases, it causes a rapid increase in the need for plastic materials. The fact that the raw material of plastic materials is produced from limited resources and petroleum shows that the recycling system is inevitable. In this study, for the determination of some thermal and mechanical properties of prototype materials produced from high density polyethylene (HDPE) and polypropylene (PP), which were recycled five times using primary recycling, heat deformation, melt flow index, Izod impact test, were performed. **It was observed that an 8.08% decrease occurred according to the Izod impact test result, and a 31.04% improvement occurred according to the thermal deformation result.** As a result, it has been observed that there are significant differences in the thermal and mechanical properties of the recycled samples.

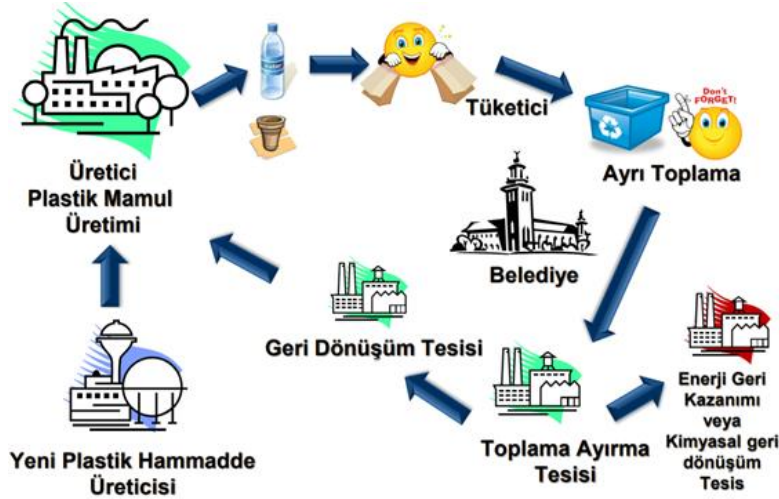
Keywords: high density polyethylene, Izod impact, polypropylene, Recycling, thermal properties

I. GİRİŞ

Endüstrinin gelişmesiyle birlikte plastik malzemelerin kullanımı hayatımıza hızlı bir şekilde girmektedir. Son 50 yıl içerisinde plastik malzemelerle üretilen gereçlerin eskiye oranı yirmi beş kat artmıştır [1]. Mutfak gereçleri, kullan at gereçler, otomotiv ve savunma sanayisinde plastik malzemelerin kullanımı büyük öneme sahiptir. Plastik malzemelerin doğada çok uzun süre yok olmamaları göz önüne alındığında ve plastik hammadde petrolün git gide azalması geri dönüşüm sistemlerinin önemini de ortaya koymaktadır.

Geri dönüşüm, sürdürülebilir üretim için çok önemlidir [2,3]. Geri dönüşüm yöntemlerinden birinci ve ikinci geri dönüşüm sistemleri ülke ekonomileri için çok önemli olmaların yanı sıra, plastik malzemelerin kırılıp tekrar eritilip şekillendirilmesi de mekanik ve termal özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır [4-7].

Plastik malzemelerin kullanılmasında toz, kir, yağ, metal parçacıkları gibi yabancı maddelerden geri dönüşüme gitmeden ayıklanmasındaki zorluklar geri dönüşüm esnasında çok büyük dezavantaja neden olmaktadır [8,9]. Şekil 1'de geri dönüşüm döngüsü gösterilmektedir.



Şekil 1. Geri dönüşüm döngüsü [10].

Güncel literatür çalışmalarına bakıldığında, plastik malzemelere farklı katkı maddeleri katılarak kompozit malzeme üretimi yapıldığı görülmektedir [11]. Farklı partiküller katılarak yapılan kompozit malzemelerin üretiminde maliyetlerin çok arttığı ve homojen karışımların yapılmasının zorlukları gözlenmiştir [11,12].

Poliyeten polimer malzemesi kendi içinde türlere ayrılmaktadır. Bu türleri belirleyen etken molekül ağırlığı ve molekül uzunluğudur [5-11]. Günümüzde bu malzeme; gıda endüstrisinde, kamyon ve silo kaplama, konveyör zincir kızıakları, su takları, kâğıt endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve tekstil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [5,9,12].

Polipropilen sert ve sağlam yapıda bir malzemedir. Özgül ağırlığı düşüktür. Bu malzemenin kristal yapısı alçak yoğunluklu polietilen ile yüksek yoğunluklu polietilen arasındadır. İyi bir yalıtkan özelliindedir. Yüzey pürüzlülük değeri düşük olmasından dolayı sürtünme direnci oldukça düşüktür. Yüksek kimyasal dayanımı, düşük aşınma direnci ve kaynakla birleşme özelliği bu malzemeyi önemli kılmaktadır. Günümüzde; otomotiv endüstrisinde tekstil ve gıda paketlemelerinde, mutfak gereçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada endüstride kullanımı yaygın kullanım alanları olan termoplastiklerden, yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve polipropilen (PP) polimer malzemelerin birincil geri kazanım yöntemi ile beş kez geri dönüşümü yapılmıştır. Enjeksiyon yöntemi ile üretilen prototip ürünlerin bazı mekanik ve termal özelliklerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir.

II. MATERYAL METHOT

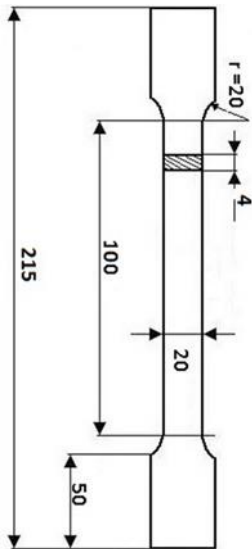
Enjeksiyonla üretim özellikle termoplastik polimer malzemelerle üretimin başında gelmektedir. Bu çalışmada orijinal PP ve YYPE malzemelerin beş kez geri dönüşümü yapılarak, şekil 2’de granür haline malzemeyi getirmek için Shini SG-3060 EH marka kırma makinesi kullanarak geri dönüşümleri yapılmıştır. Kırma işlemi yapılan PP ve YYPE polimer malzemesi 2 saat 40 °C’de kurutma işlemi yapılmıştır. Şekil 3’te enjeksiyon tezgahında 45mm/sn enjeksiyon hızı, 50 bar üretim basıncı ve tek vidalı kovan içerisinde dikdörtgen kesitli standart test çubuğu numunesi üretilmiştir. Şekil 4’te standart test çubuğu numunesi gösterilmiştir. Şekil 5’te geri dönüşümü yapılmış granül haldeki polimer malzeme gösterilmiştir.



Şekil 2. Kırma Makinesi



Şekil 3. Enjeksiyon Makinesi



Şekil 4. Test Çubuğu Numunesi

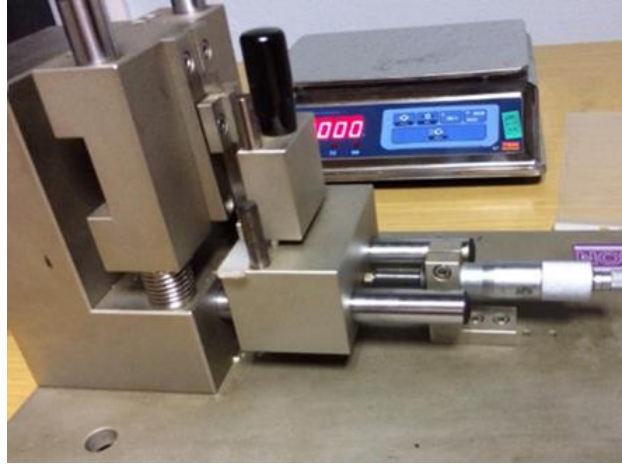


Şekil 5. Granül Malzeme

Izod darbe testi, malzemenin dinamik yükleme vb. şartlarda malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu çalışmada ISO 13802 test standartı ve geri dönüşümü yapılmış numunelerin 100x10x4 mm numuneler, bu numunelere çentik açmak için kullanılan cihaz ve Izod darbe test cihazı şekil 6' da gösterilmiştir.



Şekil 6a. Geri dönüşümü yapılmış ürünler



b. Çentik Atma Cihazı



c) Izod Test Cihazı

Isıl deformasyon testi; polier malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında maksimum sıcaklık değerine kadar sınırın olduğunu belirlemek amacıyla kullanılan termal özellik belirleme testidir. Bu test ISO75 standartta yapılmıştır. Numuneler 100x10x4 mm boyutunda 3 farklı istasyonda yapılmıştır. PP ve YYPE polimer malzemelerin başlama sıcaklıkları da 25 °C [13] olarak belirlenmiştir. Şekil 7'de ısıl deformasyon test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 7. Isıl deformasyon Test Cihazı

Polimer malzemelerde akışkanlık, malzemenin akışkan halinde viskozitesinin belirlenmesi, ürünün işlenmesinde ve kalıplanmasında büyük öneme sahiptir [14-16]. Bu çalışmada eriyik akışkan indeksi ISO1133 standartında yapılmıştır. Sıcaklık 250 °C’de, 5sn ön ısıtma ve 2,75 kg yük uygulanarak yapılmıştır. MFI Test Cihazı şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 8. MFI Test Cihazı

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bir polimer malzemeyi seçip kullanmadan önce o malzemenin mekanik ve termal özelliklerini bilmek ve bunları tespit etmek büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada plastik enjeksiyon makinesinde polimer malzemenin prototipi üretildikten sonra birinci geri dönüşüm işlemi ile kırılarak tekrar bu işlem beş kez yapmıştır. Yapılan işlem sonrasında malzemenin bazı mekanik ve termal özellikleri incelemek için izod darbe testi, eriyik akış indeksi ve ısıl deformasyon testleri yapılmıştır. Katkısız ve geri dönüşümleri yapılmış YYPE ve PP deneysel sonuçları tablo 1 ve tablo 2 de belirtilmiştir.

Tablo 1. *PP malzemesinin bazı mekanik ve termal özelliklerindeki değişim değerleri*

Malzeme	Izod Darbe (Kj/m ²)	Isıl deformasyon (HDT) °C	Eriyik Akış İndeksi (g/10 dak)
Orijinal PP	3,35	33,40	3,13
1.Geri Dönüşüm (PP)	3,12	43,67	3,86
2.Geri Dönüşüm (PP)	3,10	43,72	3,89
3.Geri Dönüşüm (PP)	3,07	43,79	3,91
4.Geri Dönüşüm (PP)	3,04	43,81	3,94
5.Geri Dönüşüm (PP)	3,01	43,85	3,97

Yukarıdaki tablo 1’de PP malzemesinin katkısız ve beş kez geri dönüşümü yapılmış deneysel verileri gösterilmiştir. Her test beş kes yapılmış ve bunların ortalama değerleri referans olarak verilmiştir. Geri dönüşüm miktarı artmasıyla malzemedeki mekanik özelliklerin azaldığı gözlenmiştir. Beş kez geri dönüşümü yapılmış numunelerin ortalama değerleri alındığında malzemenin izod darbe özelliklerinde % 8,35 azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi malzemenin kırılma esnasında çapraz bağların C=C çift bağındaki kırılma ile açıklayabiliriz [14-16]. Yalnız [15] yapılmış çalışmada geri dönüşümü yapılmış PP malzemesinde belli miktar grafit takviyesi yapılarak kompozit malzemedeki mekanik özelliklerinin önemli derecede arttığı gözlenmiştir.

Malzemenin termal özelliklerini belirlemede kullanılan ısıl deformasyon testi incelendiğinde malzemenin geri dönüşüm miktarı ile doğru orantılı arttığı gözlenmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, geri dönüşümü yapılmış numunelerin ortalama değerleri alındığında ısıl deformasyon özelliği % 2,29 arttığı gözlenmiştir. Eriyik akış indeksi sonuçları incelendiğinde malzemenin geri dönüşüm miktarı ile doğru orantılı olarak viskozitesinin arttığı sonucuna varıyoruz. Bu da geri dönüşümü yapılmış PP malzemesinin enjeksiyon yöntemi ile üretilmesinden ziyade ekstrüzyon yöntemi ile ve 3B yazıcılarla üretilmesinin daha uygun olacağını göstermektedir [16].

Tablo 2. *YYPE malzemesinin bazı mekanik ve termal özelliklerindeki değişim değerleri*

Malzeme	Izod Darbe (Kj/m ²)	Isıl deformasyon (HDT) °C	Eriyik Akış İndeksi (g/10 dak)
Orijinal YYPE	6,93	30,95	7,56
1.Geri Dönüşüm (YYPE)	6,46	31,43	13,73
2.Geri Dönüşüm (YYPE)	6,43	31,56	13,77
3.Geri Dönüşüm (YYPE)	6,38	31,70	13,79
4.Geri Dönüşüm (YYPE)	6,32	31,76	13,81

5. Geri Dönüşüm (YYPE)	6,26	31,83	13,85
-------------------------------	------	-------	-------

Tablo 2 incelendiğinde, YYPE polimer malzemesinin beş kez geri dönüşümü yapılmış numunelerin ortalama değerleri alındığında malzemenin ızod darbe özelliklerinde %8,08 azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi malzemenin kırılma esnasında çapraz bağların C=C çift bağındaki kırılma ile açıklayabiliriz [14-16]. Deneysel veriler incelendiğinde, geri dönüşümü yapılmış numunelerin ortalama değerleri alındığında ısıl deformasyon özelliği %31,04 arttığı gözlenmiştir. Eriyik akış indeksi sonuçları incelendiğinde malzemenin geri dönüşüm miktarı ile doğru orantılı olarak viskozitesinin arttığı sonucuna varıyoruz.

Özellikle yüksek dinamik yüklere maruz kalmayan, mekanik özelliklerin çok önem arz edilmediği yerlerde, tekstil sanayisinde iplik vb., çöp kutuları, basit kullan at kap kaşıklarda, çiçek dikmek için kullanılan saksılarda bu geri dönüşümü yapılmış ürünler rahatlıkla kullanılabilir.

IV. SONUC

- PP ve YYPE malzemesinin mekanik özellikleri geri dönüşüm miktarı ile orantılı olarak düşmektedir. Darbe dayanım değer kaybı her iki üründe de %8 den fazladır. Bu da geri dönüşüm miktarı ile malzemenin mekanik özelliklerinde kötüleşmeler olduğunu göstermektedir.
- Mekanik özelliklerindeki değer kayıplarının temel sebebi birinci geri dönüşüm sebebi ile kırma işleminden sonra polimer malzemelerin çapraz bağlarındaki bozulma olduğu söylenebilir.
- Geri dönüşümü yapılmış malzemeleri
- PP ve YYPE malzemesinin Isıl deformasyon özelliği geri dönüşüm miktarı ile orantılı olarak yaklaşık %30 değerinde iyileşmiştir. Bu sonuçlar bize malzemelerin ısıya dayanıklılığının arttığını göstermiştir.
- Hem YYPE hem de PP malzemesinin HDT ve MFI değerleri artmıştır. Bu değerlerin artışı ekstrüder ve 3B yazıcılar için olumlu olduğunu söyleyebiliriz.
- Geri dönüşümü yapılmış ürünlerin mekanik özelliklerini arttırmak için takviye elemanları kullanılabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Akkurt, “Plastik Malzeme Bilgisi Kitabı”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1991.
- [2] M. Öztürk, Plastikler ve Geri Kazanımı Dergisi, 1. Baskı, Y.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Yayınları, 2005.
- [3] M. Türemen, A. Demir, Özdoğan, E., “Tekstil endüstrisi için geri dönüşüm ve önemi”, *Pamukkale Univ. Muh. Bilim Dergisi*, c. 25, s. 6, ss.112-118, 2018.
- [4] E. Aslan, “Enjeksiyonla kalıplamada kalsit katkı polipropilen malzemelerde geri dönüşüm oranının mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Makina Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2013.
- [5] B. Yıldız, “Cam elyaf katkısının geri dönüştürülmüş polyamid 6.6 plastiğinin mekanik özelliklerine etkisinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, 2018.

- [6] M. KOÇ, “Geri dönüşüm polimerlerinin fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi,” M.S. thesis, ERCIYES UNIVERSITY, 2021.
- [7] S. SINKALA, “Designing an automated butt welding machine for welding high-density polyethylene pipes and investigating butt welding parameters,” M.S. thesis, ISTANBUL GEDİK UNIVERSITY, 2022.
- [8] O. MİLİĞ, “PET polietilen tereftalat hidroliz ürünleri kullanılarak indirgenmiş grafen oksit sentezi,” M.S. thesis, EGE UNIVERSITY, 2022.
- [9] T. FIRAT, “Atık polietilen tereftalatın poliöl ve poliüretan üretiminde değerlendirilmesi,” Ph.D. dissertation, FIRAT UNIVERSITY, 2022
- [10] IEEE Websitesi. (2022, 3 Ocak), [Online], Erişim: <https://www.sifiratik.gov.tr/content/files/uploads/9/EK-8.%20Say%C4%B1n.%20Yavuz%20ERO%C4%9ELU,%20PAGEV%20%E2%80%93PAG%C3%87EV%20Ba%C5%9Fkan%C4%B1.pdf>
- [11] S. BULUT, “Genleştirilmiş polipropilen tampon dolgu malzemelerinde yoğunluğun yaya çarpışma performansına etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi,” M.S. thesis, BURSA ULUDAG UNIVERSITY, 2022
- [12] I. Uygur, W.J. Evans, M. Bache ve B. Gulenc, “The fatigue behaviour of SiCp reinforced 2124 Aluminium matrix composites”, *Metallofiz. Nove. Tekhnol.* vol. 26, no.7 pp. 927-939 2004.
- [13] Y. DEMİRHAN, “Farklı dolgu maddelerinin polipropilen esaslı kompozit malzemelerin ısıl bozunma ve yanma davranışlarına etkilerinin incelenmesi,” Ph.D. dissertation, PAMUKKALE UNIVERSITY, 2023.
- [14] M.A. Peydro, D. Juarez, S. Sanchez-Cabellero, R. Pla-Ferrando, “Study of the mechanical properties of recycled abs and recovery through mixing with sebs” *Annals of the Oradea University Fascicle of Management and Technological Engineering* ISSUE 1, <http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/>, pp.83-86, MAY 2014.
- [15] Ö. ŞENGÜL, M. ŞEREMET, and M. KAM, “Sürdürülebilir üretim için grafit takviyeli polipropilen kompozit ürünlerin bazı termal ve mekanik özelliklerinin deneysel analizi,” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 10–20, Jun. 2020.
- [16] N. Saude, K. Kamarudin, M. İbrahim, M.H.I. İbrahim, “Melt Flow Index of Recycle ABS for Fused Deposition Modeling (FDM) Filament”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 773-774, pp. 3-7 2015.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Çoklu Bükme Operasyonlarında Şekillendirme Parametrelerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkisi

 Murat AYDIN^{a,*},  Esra KALENDER^a,  Mertcan YAKAR^a

^a Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: murataydin@karabuk.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1269339

Öz

Metal şekillendirme operasyonlarında karşılaşılan en önemli problemlerden biri geri yaylanmadır. Şekillendirme uygulamalarında malzeme özellikleri, kalınlık, kalıp tasarımı, proses parametreleri gibi birçok faktörün geri yaylanmanın oluşması üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu çalışmada, kapalı kalıp içerisinde çoklu bükme operasyonuna tabi tutulan 1 mm kalınlıktaki DKP sac malzemenin geri yaylanması üzerinde yağlayıcı, bekleme süresi ve şekillendirme basıncının etkisi incelenmiştir. Şekil verilen sac malzeme üzerinden geri yaylanma açıları, kalınlık dağılımı, majör ve minör birim şekil değişimleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, yağlayıcı kullanımının %43-%47 oranında, bekleme süresinin arttırılmasının %30-%40 oranında ve şekillendirme basıncının arttırılmasının %16-%28 oranında geri yaylanma miktarını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, yağlayıcı kullanımı ile sürtünmenin azaltılarak nihai üründe daha düşük incelme elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yağlayıcı, Geri yaylanma, Bükme

Effect of Forming Parameters on Springback in Multi-Bending Operations

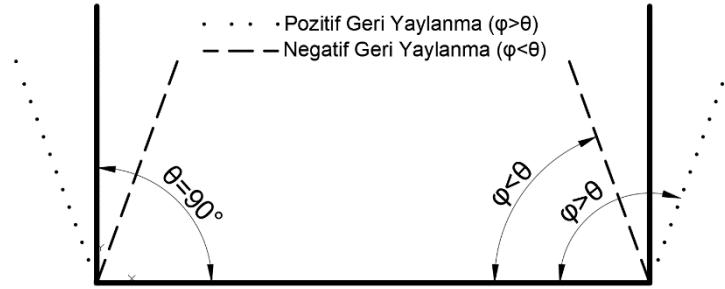
ABSTRACT

Springback is one of the primary phenomena faced in forming metallic sheet materials. Several factors affect the occurrence of springback, such as material properties, thickness, tool design, and process parameters. In this study, the effects of holding time, lubricant, and forming pressure on the springback of DKP sheet material with a 1 mm thickness, which was formed by multi-bending operations in a closed die, were investigated. The springback angles and thickness distributions were measured from the formed parts. In addition, major and minor strains were calculated using grid marking on the surface of sheets. As a result, it was determined that the springback was reduced by about 43%-47% using lubricant, 30%-40% due to an increase in holding time, and 16%-28% thanks to increasing in forming pressure. Besides, less thinning of the final product was achieved by applying lubricant media because of the decrease in friction coefficient.

Keywords: Lubricant, Springback, Bending

I. GİRİŞ

İmalat işlemlerinde, şekillendirme sonrasında nihai geometrinin önceden tahmin edilmesi üretim verimliliği ve maliyet açısından önemlidir. Elastik toparlanmanın meydana getirdiği olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için uygun kalıp ekipmanları tasarımının yapılması gereklidir. Elastik toparlanmanın oluşturduğu olumsuz etki geri yaylanma olarak adlandırılmaktadır [1]. Geri yaylanma imalat endüstrisinde ölçü tamlığını ve üretim verimini doğrudan etkileyen önemli problemlerden biridir. Özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımların kullanıldığı endüstriyel uygulamalarda, otomotiv, havacılık, uçak ve uzay sanayisi endüstrilerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Geri yaylanma deformasyon sonrasında iç gerilmenin homojen olmayan dağılımından ötürü meydana gelmektedir [2]. Deformasyon sonrasında kalıntı gerilmelerdeki değişimin, özellikle artış gösteren artık çekme gerilmesi ve azalış gösteren artık basma gerilmesinin malzeme üzerinde geri yaylanmayı azalttığı görülmektedir [3], [4]. Geri yaylanma, özellikle bükme operasyonlarında karşılaşılmaktadır. Geri yaylanma, deformasyon sonrasında kuvvetin ortadan kalkmasıyla malzemenin bir miktar geri esneyerek arzu edilen geometriden uzaklaşmasıdır. Malzemede meydana gelen geri yaylanma, istenilen ölçülerin değişmesine ve üretim kalitesine olumsuz etki etmektedir [5]. Şekillendirme işlemi sonucunda zımba tarafından uygulanan kuvvetin ortadan kalkması ve sac malzemede oluşan gerilmeler sebebiyle, geri yaylanma pozitif veya negatif olabilmektedir [6]. Şekil 1'de pozitif ve negatif geri yaylanma durumları gösterilmiştir.



Şekil 1. Pozitif ve negatif geri yaylanma durumları [6].

İmalat endüstrisinde geri yaylanmanın engellenmesi veya minimize edilmesi için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri sonlu elemanlar metodu kullanılarak tasarım aşamasında geri yaylanmanın tahmin edilmesi ve bu yönde kalıp tasarımının yapılmasıdır [7]. Diğer yandan, sac malzemenin mekanik özelliklerinin, özellikle elastikiyet modülü ve pekleşmenin geri yaylanma üzerinde etkisi olduğu, kullanılacak olan malzemeye uygun kalıp tasarımının yapılmasının gerektiği bildirilmiştir [8]. Buna ek olarak, geri yaylanmanın telafi için en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi aşırı bükme işlemidir. Geri yaylanma miktarının önceden tahmin edilmesi ve buna göre bükme açısından daha yüksek bükme işlemine tabi tutulması olarak tanımlanmaktadır [9]. Ayrıca manyetik itme kuvvetinin yardımı ile geri yaylanmanın kontrol altında tutulduğu belirtilmektedir. Zımba içerisine uygun yalıtım kullanılarak montaj edilen manyetik sarımlı parça, manyetik itme kuvveti oluşturmakta ve özellikle alüminyum parçaların şekillendirme performansını artırırken, geri yaylanmanın kontrol altında tutulduğu belirtilmektedir. Bu yöntemin, uygulaması zor, kalın parçalar için uygun olmadığı ve maliyeti dezavantajları arasında sayılmaktadır [10]. Ayrıca, şekillendirme sırasında malzeme sıcaklığının artırılmasının, özellikle U ve V bükme kalıplarında, şekillendirme kuvvetinin azalmasında, kalıp içerisinde soğumaya tabi tutularak geri yaylanma miktarının azalmasına olumlu katkı yaptığı görülmektedir [11]. Diğer yandan, şekil verilen malzemenin kalıp içerisinde bekletilmesi (ütüleme süresi) geri yaylanmanın azaltılması için uygulanan yöntemler arasındadır. Bekleme süresinin 10 saniye artmasıyla sac malzemenin türüne bağlı olarak geri yaylanmada ortalama %14,8 ile % 9,7 arasında azalma olduğu belirtilmektedir [12].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, geri yaylanmanın önlenmesi ve minimize edilmesi için V ve U bükme gibi açık kalıp sistemli şekillendirmelerin yapıldığı, çoklu bükme işleminin kapalı

kalıp altında şekillendirmesine yönelik çalışmaların sınırlı sayıda olduğu, şekillendirme esnasında yağlayıcı ve bekleme süresinin kullanıldığı şekillendirme çalışmaları sınırlı sayıda yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, düşük karbonlu sac malzemenin kapalı kalıp altında tek operasyonda çoklu bükme işlemiyle şekillendirilmesinde yağlayıcı ve bekleme süresinin, şekillendirme performansı ve geri yaylanmaya olan etkisi incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

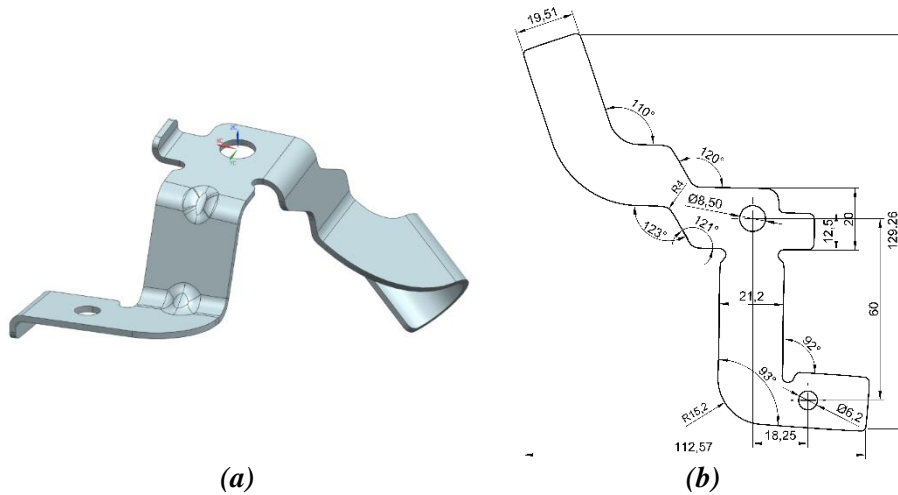
Bu çalışmada, soğuk şekillendirmeye uygun düşük karbonlu 1 mm kalınlıkta DKP sac malzeme kullanılmıştır. DKP saclar, dayanıklı olmaları, yüksek mukavemetleri, kolay şekillenebilmeleri ve derin çekmeye uygun olmaları sebebiyle otomotiv sanayisinde, endüstriyel mutfak ve havalandırma ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Tablo 1’de DKP sac malzemeye ait kimyasal özellikler, Tablo 2’de ise mekanik özellikler verilmiştir [14]. Üretimi yapılacak braket parçasının nihai şekli Şekil 2 (a)’da gösterilmiştir. Braket parçası kapalı kalıp altında birden çok bükme operasyonunun tek seferde gerçekleştirildiği bir endüstriyel parçadır. Şekil 2 (b)’de parçanın üretim öncesi açınım boyu ve ölçüleri verilmiştir. Bükme operasyonları sonucunda meydana gelen geri yaylanmanın önlenmesi ve en aza indirgenmesi için, şekillendirme operasyonlarında yağlayıcı, bekleme süresi ve kalıplama basıncı parametreleri kullanılarak 5 tekrar olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yağlayıcı olarak endüstride yaygın olarak kullanılan yarı katı gres yağı kullanılmıştır.

Tablo 1. DKP sac malzemeye ait kimyasal özellikler [14].

% ağırlık			
C	P	S	Mn
(maks.)	(maks.)	(maks.)	(maks.)
0,12	0,045	0,045	0,60

Tablo 2. DKP sac malzemeye ait mekanik özellikler [14].

Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
280	270-410	28



Şekil 2. (a) Nihai şekil verilmiş parça, (b) açınım boy ve ölçüleri.

Şekillendirilen parçalar üzerinde meydana gelen birim şekil değişimlerinin ölçümü için başlangıç parçaları üzerine lazer ızgaralama yöntemi ile 2x2 mm ebatlarında kare ızgara elemanlar oluşturulmuştur. Lazer ızgaraların şekil değişimi sonrasında alacakları nihai şekilleri ölçülerek, parçaları

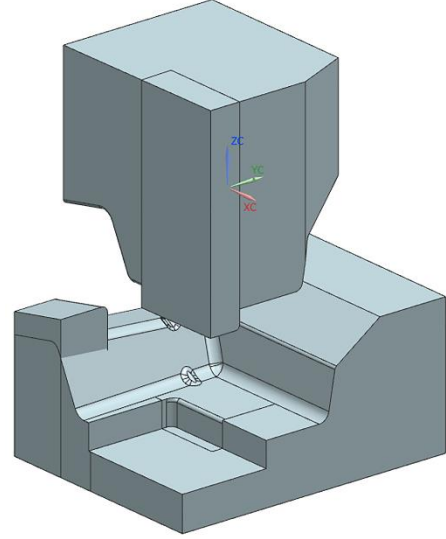
üzerinde meydana gelen birim şekil değişimleri belirlenmektedir. Şekil 3 (a)'da lazer ızgara oluşturulmuş parçalar, Şekil 3 (b)'de şekillendirme için kullanılan kalıbın açık hali verilmiştir. Birim şekil değişimlerinin ölçülmesi için bükme operasyonu Tablo 3'de verilen parametreler kullanılarak 5 tekrar şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Şekillendirme deneylerinde kullanılan parametreler.

Yağlayıcı	Bekleme Süresi (sn)	Şekillendirme Basıncı (bar)
Gresli ve Gressiz	0 ; 10	50 ; 100



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Lazer ızgara bölünmüş numuneler, (b) şekillendirme kalıbı açık hali.

Şekillendirme deneyleri 30 ton hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 50 bar ve 100 bar basınç altında şekillendirme deneyleri yapılmıştır. Kalıp alt plakası pres tablasına pabuçlar yardımıyla bağlanmış ve kalıp üst plakası pres koç başına zımba aparatı ile bağlanmıştır. Hidrolik pres manuel kumandalı olup, şekillendirme basıncına ulaşıldığında deneyler sonlandırılmıştır. Şekil 4 (a)'da kullanılan hidrolik pres, Şekil 4 (b)'de açınım halindeki ızgara çizilmiş sac malzeme, şekillendirme öncesi kalıp üzerine yerleşimi ve kalıbın prese bağlanmış hali gösterilmiştir.



(a)

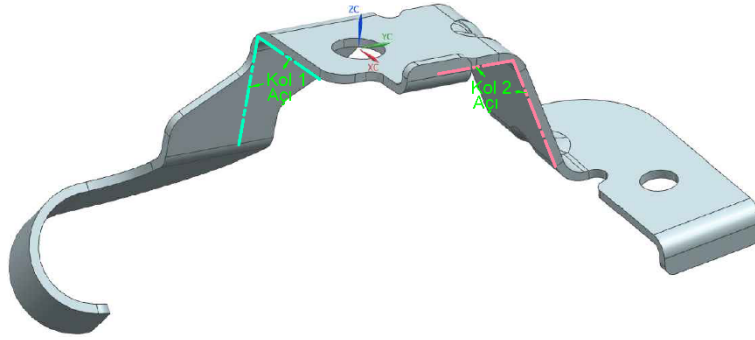


(b)

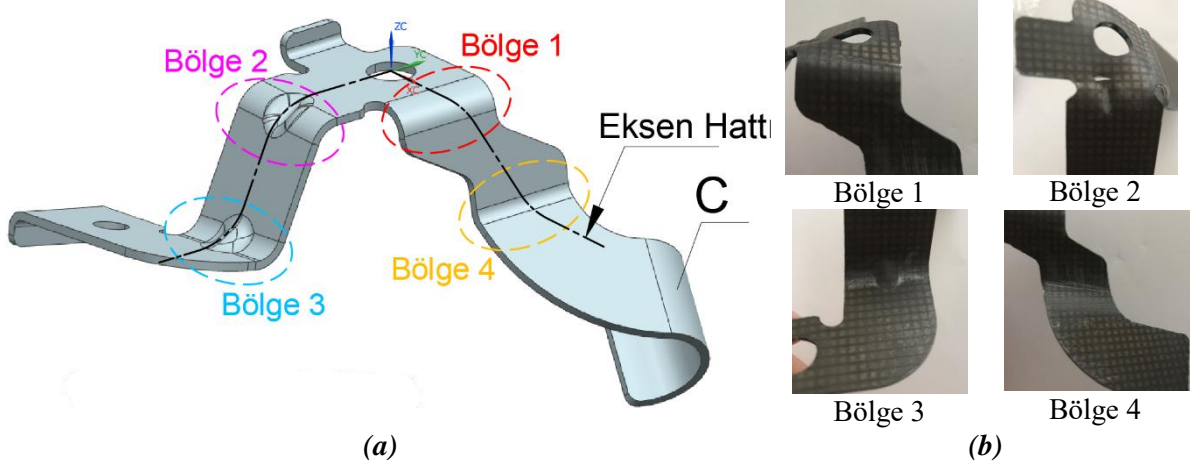
Şekil 4. (a) Hidrolik pres, (b) Bükme kalıbı yerleşimi ve pres bağlantısı.

III. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekillendirme işlemi sonucunda üretimi yapılacak parça üzerinde Kol 1 ve Kol 2 olarak gösterilen bölgeler farklı açı değerlerine sahiptir. Şekil 5’de nihai parça üzerinde kollar gösterilmiştir. Ayrıca birim şekil değişimlerinin ölçülmesi için bükme operasyonları bölgelere ayrılmış olup Şekil 6 (a)’da bu bölgeler ve birim şekil değişimlerinin ölçüldüğü eksen hattı ve Şekil 6 (b)’de örnek parça üzerinde bu bölgeler verilmiştir. C ile gösterilen kenar kıvrırma operasyonu bükme operasyonlarından sonra yapılan bir operasyon olup, çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmamıştır. Nihai parça üzerinde kol açıları hassasiyeti ± 5 dk olan Mitutoyo üniversal açı ölçer ile ölçülmüştür. Üretimi yapılan parça üzerinde anma ölçüsü Kol 1 için 100° ve Kol 2 için 116° olarak tasarlanmıştır. Tablo 4’de deney tekrarlarından açı ölçer ile ölçülen kol açılarının ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 5. Nihai parça üzerinde kol açıları.



Şekil 6. (a) Nihai parça üzerinde bölgeler ve eksen hattı, (b) örnek parça üzerinde bölgeler.

Üretilen nihai parçanın tasarım aşamasında Kol 1 açısının 100° , Kol 2 açısının 116° olması hedeflenmiştir. Tablo 4’de görüldüğü üzere en yüksek geri yaylanma miktarı Kol 1 açısı için $9,43^\circ$, Kol 2 açısı için $7,91^\circ$ olarak elde edilmiştir. Diğer yandan en küçük geri yaylanma miktarı Kol 1 açısı için $2,74^\circ$, Kol 2 açısı için $1,48^\circ$ olarak ölçülmüştür. Kol 1 ve Kol 2 açılarının kendi aralarında karşılaştırılmasında, bütün şekillendirme deneyleri için Kol 1 açısının geri yaylanma miktarı Kol 2 açısından daha fazla olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda, kalıp açısının artmasıyla geri yaylanmanın azaldığı, bükme açısının artmasıyla malzeme yüzeyinde şekil değişimine uğrayan bölge ve uzama miktarının artması sonucunda olduğu bildirilmiştir [15] [5].

Tablo 4. Şekillendirme parametrelerine bağlı olarak ortalama kolların açıları.

Yağlayıcı	Bekleme Süresi (sn)	Basınç (bar)		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Deney Ortalaması (derece)	Geri Yaylanma Miktarı (derece)
Gressiz	0	50	Kol 1	108,64	108,57	109,56	110,73	109,65	109,43	9,43
Gressiz	0	50	Kol 2	124,37	124,21	123,29	124,22	123,46	123,91	7,91
Gressiz	0	100	Kol 1	107,33	106,81	107,88	106,34	107,58	107,19	7,19
Gressiz	0	100	Kol 2	121,70	121,78	121,73	121,78	121,37	121,67	5,67
Gressiz	10	50	Kol 1	106,25	106,08	106,28	106,13	105,48	106,04	6,04
Gressiz	10	50	Kol 2	119,82	120,66	120,11	120,67	120,78	120,41	4,41
Gressiz	10	100	Kol 1	104,33	104,96	104,20	105,44	105,21	104,83	4,83
Gressiz	10	100	Kol 2	118,57	119,41	118,99	119,41	120,24	119,32	3,32
Gresli	0	50	Kol 1	105,54	105,47	105,43	105,60	104,44	105,30	5,30
Gresli	0	50	Kol 2	120,24	119,41	119,82	121,08	120,24	120,16	4,16
Gresli	0	100	Kol 1	104,87	104,65	103,86	104,48	104,33	104,44	4,44
Gresli	0	100	Kol 2	119,41	119,82	118,57	118,99	119,41	119,24	3,24
Gresli	10	50	Kol 1	103,41	104,25	103,55	103,58	104,44	103,85	3,85
Gresli	10	50	Kol 2	119,41	117,74	119,41	117,74	118,57	118,57	2,57
Gresli	10	100	Kol 1	102,16	103,35	102,38	102,47	103,32	102,74	2,74
Gresli	10	100	Kol 2	117,74	116,90	117,74	117,32	117,74	117,48	1,48

Bekleme süresi açısından incelendiğinde, gressiz 0 saniye bekleme süreli 100 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 7,19°, Kol 2 açısı 5,67° olarak ölçülürken, bekleme süresinin 10 saniyeye artırılmasıyla sırasıyla Kol 1 açısı için 4,83°, Kol 2 açısı için 3,32° geri yaylanma miktarı ölçülmüştür. Buradan, bekleme süresinin 10 saniyeye artırılmasıyla geri yaylanma miktarında %30 ile %40 oranında azalma olduğu görülmüştür. Genel olarak, bütün şekillendirme deneylerinde bekleme süresinin artırılmasıyla geri yaylanma miktarında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, bekleme süresinin artırılmasının geri yaylanmayı azaltıcı etkisi olduğu, zımbanın bükülen malzeme üzerinde kaldığı süre boyunca malzeme içerisindeki elastik gerilmelerin azaldığı ve kalıcı gerilmelerin arttığı bildirilmiştir [12].

Şekillendirme basınçları açısından karşılaştırıldığında, gressiz 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 9,43°, Kol 2 açısı için 7,91° olarak ölçülürken, şekillendirme basıncı 100 bara artırıldığında Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 7,19°, Kol 2 açısı için 5,67° olarak belirlenmiştir. Ayrıca, gresli 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 5,30°, Kol 2 açısı için 4,16° olarak ölçülürken, şekillendirme basıncı 100 bara artırıldığında Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 4,44°, Kol 2 açısı için 3,24° olarak tespit edilmiştir. Buradan, şekillendirme basıncının artırılmasıyla geri yaylanma miktarının yaklaşık %16 ile %28 arasında azaldığı görülmüştür. Genel olarak, yapılan deneylerde şekillendirme basıncının artırılmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, metal şekillendirme uygulamalarında şekillendirme kuvveti ve baskı plakası kuvvetinin artmasıyla geri yaylanma miktarının azaldığı bildirilmiştir [16] [17].

Yağlayıcının etkisi kıyaslandığında, gressiz 0 saniye bekleme süreli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için geri yaylanma miktarı 9,43°, Kol 2 açısı için 7,91° olarak ölçülürken, gresin kullanıldığı 0 saniye beklemeli 50 bar basınçlı şekillendirme deneyinde Kol 1 açısı için 5,30°, Kol 2 açısı için 4,16° olarak ölçülmüştür. Buna bağlı olarak, yağlayıcının kullanımı ile geri yaylanma miktarında %43 ile %47 oranında azalma olduğu görülmüştür. Genel olarak, bütün şekillendirme deneylerinde yağlayıcının kullanılmasıyla her iki kol açısında meydana gelen geri yaylanma miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Zimba-sac, sac-kalıp ara yüzeylerinde kullanılan yağlayıcının ve yağlama

teknikinin bükme operasyonları için önemli bir faktör olduğu, gres tipi yağlayıcının iyi yapışma özelliğinden dolayı geri yaylanmayı azalttığı bildirilmiştir [18].



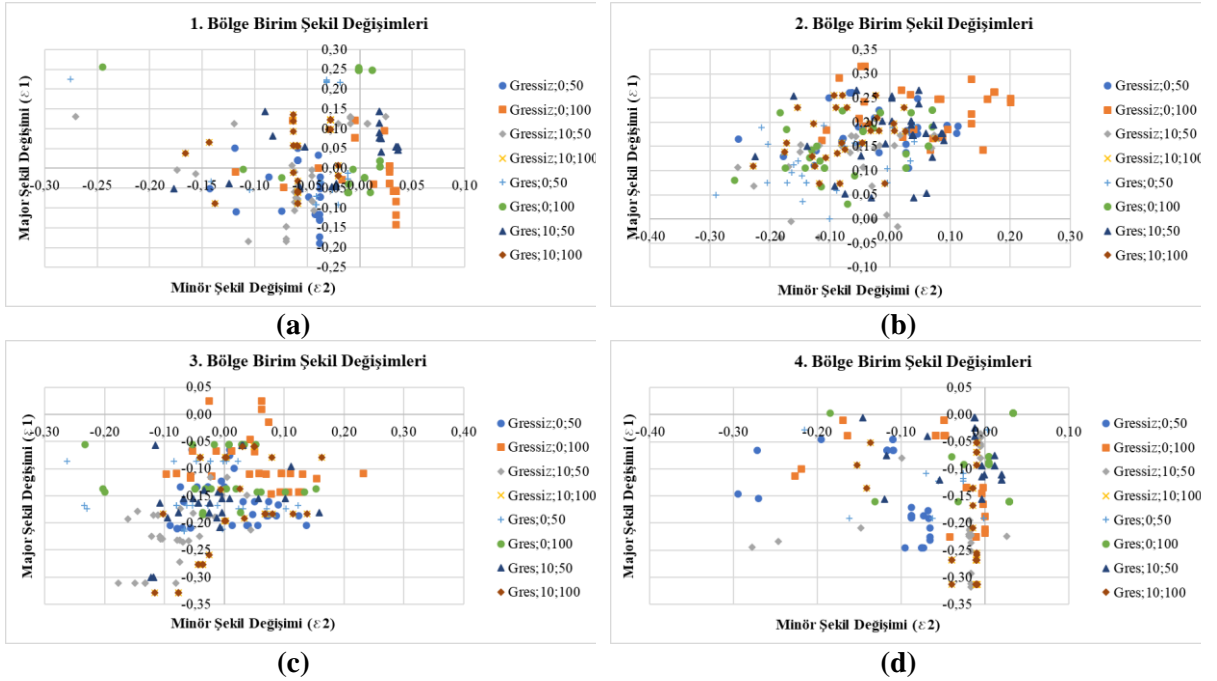
Şekil 7. Deforme olan kare ızgara ölçümü [19].

Nihai şekil verilen parça üzerinden Kol 1 ve Kol 2 üzerinde yer alan Şekil 6'da gösterilen eksen hattı boyunca birim şekil değişimleri ölçülmüştür. Birim şekil değişimleri kalibrasyon ölçeği kullanılarak dijital mikroskop ile bilgisayar üzerinden ölçülmüştür. Şekil 7'de gösterildiği gibi deforme olan kare ızgara eleman üzerinden majör birim şekil değişimi (ε_1) ve minör şekil değişimi (ε_2),

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_1}{d} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{l_2}{d} \quad (2)$$

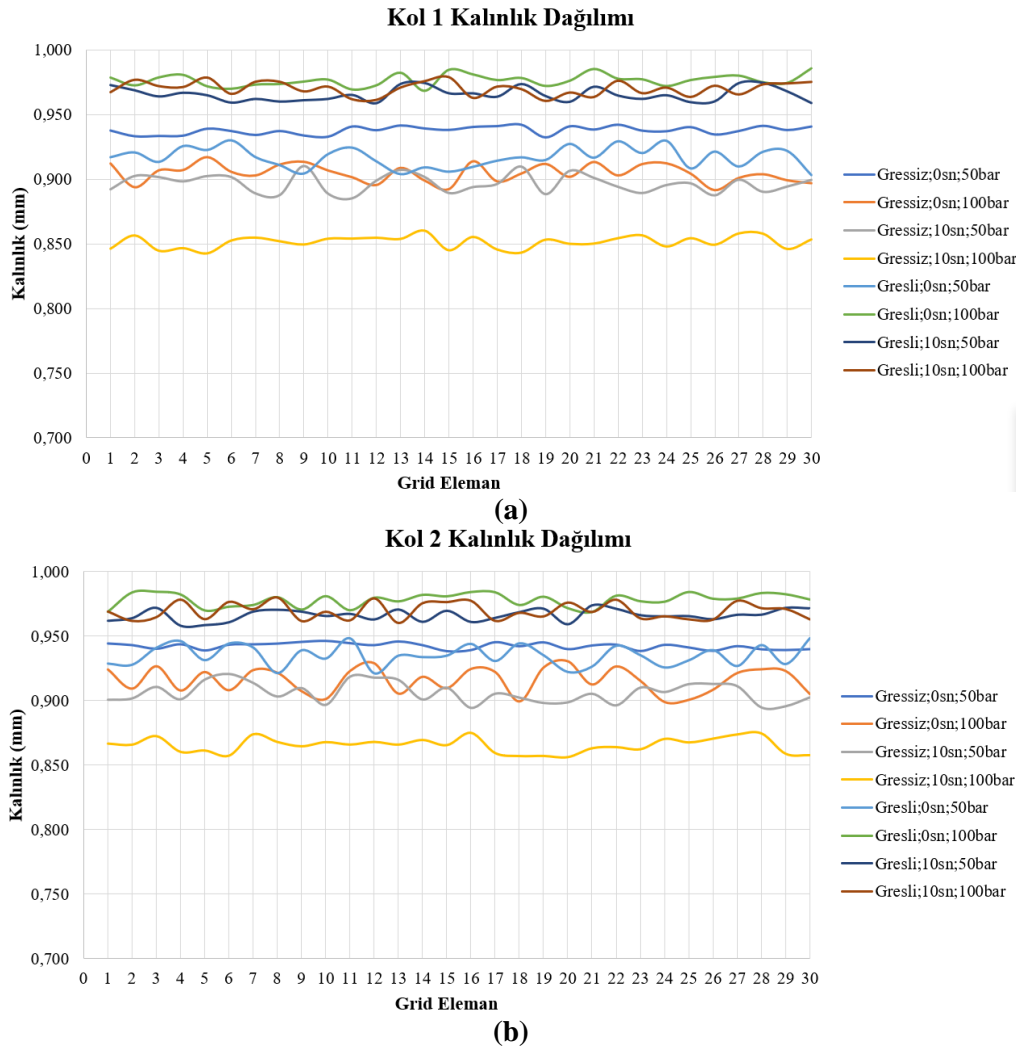
Olarak hesaplanmaktadır. Eş. 1 ve Eş. 2'de l_1 deforme olan kare ızgaranın büyük eksen uzunluğu, l_2 deforme olan kare ızgaranın küçük eksen uzunluğu, d ise kare ızgaranın başlangıçtaki kenar uzunluğunu (2 mm) temsil etmektedir [19]. Şekil 8'de nihai parça üzerinden belirlenen bölgelere ait majör ve minör birim şekil değişimleri grafikleri verilmiştir.



Şekil 8. (a) 1. bölge, (b) 2. bölge, (c) 3. bölge, (d) 4. bölge majör ve minör birim şekil değişim dağılımları.

Nihai parça yüzeyi üzerinde, çoklu bükme operasyonu süresince 1. ve 2. bölgelerin çekmeye, 3. ve 4. bölgelerin basmaya maruz kaldığı görülmektedir. Buna paralel olarak, Şekil 8 (a) ve Şekil 8 (b)'de bölgelerin çekmeye maruz kalmasından dolayı majör birim şekil değişimlerinin 1. bölge ve 2. bölge ağırlıklı olarak pozitif bölgede yüksek olduğu görülmektedir. Majör birim şekil değişiminin 1. bölge için 0,25, 2. bölge için 0,32 değerlerine çıktığı görülmektedir. Diğer yandan, Şekil 8 (c) ve Şekil 8 (d)'de görüldüğü üzere, parça yüzeyinin basmaya maruz kalmasından dolayı majör birim şekil değişiminin negatif değerlere kadar düştüğü belirlenmiştir. Majör birim şekil değişiminin 3. bölge için -0,35, 4. bölge için -0,32 değerlerine kadar azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde yağlayıcı kullanımı ve şekillendirme basıncının artmasıyla çekmeye maruz kalan 1. ve 2. bölgelerde majör birim şekil değişiminin arttığı, basmaya maruz kalan 3. ve 4. bölgelerde majör birim şekil değişiminin azaldığı belirlenmiştir. Bu değişimin, yağlayıcı kullanılmasıyla daha homojen deformasyon elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer yandan, bekleme süresinin majör ve minör birim şekil değişimleri üzerinde etkisinin neredeyse olmadığı görülmüştür. Bu bağlamda, zimba-sac malzeme ve sac malzeme-kalıp ara yüzeylerinde yapılan iyi bir yağlamanın temas basıncının daha iyi olmasına, yüzey kalitesinin arttığına ve daha homojen birim şekil değişiminin elde edilmesine sebep olduğu bildirilmektedir [20].

Nihai parça üzerinden Kol 1 ve Kol 2 üzerinden kare ızgara uygulanmış numunelere hizalı olarak, 30 noktadan kalınlık ölçümü $\pm 0,001$ mm hassasiyetli dijital mikrometre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 (a)'da Kol 1'e ait kalınlık dağılımı, Şekil 9 (b)'de Kol 2'ye ait kalınlık dağılımı grafikleri verilmiştir.



Şekil 9. (a) Nihai parça Kol 1 üzerinden kalınlık dağılımı, (b) Nihai parça Kol 2 üzerinden kalınlık dağılımı.

Şekil 9 (a) ve Şekil 9 (b) incelendiğinde, minimum kalınlık Kol 1 için 0,8428 mm, Kol 2 için 0,8564 mm olarak elde edilmiştir. En düşük kalınlık değerinin gressiz 10 saniye bekleme süreli 100 bar şekillendirme basınçlı deneylerde her iki kol parçası için elde edildiği görülmüştür. Diğer yandan, gressin kullanıldığı şekillendirme deneylerinde başlangıç kalınlığı olan 1 mm kalınlık değerine daha yakın kalınlık değerinin elde edildiği, yağlayıcı kullanımı ile daha homojen kalınlık dağılımının elde edildiği belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, sac şekillendirme işlemlerinde baskı plakası-sac malzeme, sac malzeme-kalıp, zımba-sac malzeme arayüzlerinde yağlayıcı kullanımı ile sürtünme katsayısının azaldığı, buna bağlı olarak sac malzemedeki meydana gelen incelmeye azaldığı bildirilmiştir [21].

IV. SONUC

Bu çalışmada, kapalı kalıp altında çoklu bükme operasyonları ile üretilen braket elemanının geri yaylanma karakteristiği üzerine yağlayıcı ve bekleme süresinin etkisi incelenmiştir. DKP sac malzeme şekillendirme öncesi lazer ile kare ızgara uygulama işlemine tabi tutulmuş, şekillendirme operasyonları sonucunda geri yaylanma açıları, birim şekil değişimleri ve kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- En yüksek geri yaylanma miktarı $9,43^\circ$ ve $7,91^\circ$ olarak gres kullanılmayan 0 saniye bekleme süreli 50 bar şekillendirme basınçlı bükme operasyonlarında elde edilirken, en düşük geri yaylanma miktarı ise $2,74^\circ$ ve $1,48^\circ$ gresli 10 saniye bekleme süreli 100 bar şekillendirme deneylerinden elde edilmiştir.
- Deneylerde kullanılan bekleme süresinin 10 saniyeye arttırılmasıyla, geri yaylanma açılarında %30 ile %40 oranında azalma olduğu görülmüştür.
- Şekillendirme deneylerinde basıncın 50 bardan 100 bara arttırılmasıyla, geri yaylanma miktarında %16 ile %28 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Gres yağlayıcı kullanılan şekillendirme deneylerinin sonucunda, geri yaylanma miktarında %43 ile %47 oranında azalma olduğu belirlenmiştir.
- Majör birim şekil değişimleri açısından karşılaştırma yapıldığında, çekmeye maruz kalan yüzeylerde yağlayıcı kullanımı ve şekillendirme basıncının artışıyla, birim şekil değişimini arttırdığı, basmaya maruz kalan yüzeylerde ise azalttığı görülmüştür. Özellikle yağlayıcı kullanımı ile homojen deformasyon elde edildiği tespit edilmiştir.
- Kalınlık dağılımları açısından yağlayıcı kullanımının, şekillendirme basıncının artışıyla ve bekleme süresinin arttırılmasının daha homojen kalınlık dağılımı elde edilmesini sağladığı ve sac malzeme üzerinde incelmeyi azalttığı gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bükme kalıbının kullanılmasına imkan tanıyan, her türlü katkıları ve desteklerini esirgemeyen Ket İnovasyon Metal İmalat Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi teşekkürlerimizi sunarız.

V. KAYNAKLAR

[1] D-K. Leu, “A simplified approach for distinguishing between spring-back and spring-go in free U-die bending process of SPFC 440 sheets”, *Materials and Design*, vol. 94, pp. 314-321, 2016.

[2] Y. Feng, S. Shi, Z. Wang, and Z. Wang, “Research on mechanism of springback control by viscous medium with different mechanical properties”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 304, pp. 1-16, 2022.

[3] I. Altpeter, M. Kopp, M. Kröning, B.-A. Behrens, M. Milch, and C. Schäffner, “Influences on the part quality in conventional deep drawing processes”, *9th European Conference on Nondestructive Testing*, 2006, pp. 1-8.

- [4] G. Brabie, B. Chirita, N. Nanu, and V. Ciubotariu, "Analysis of the springback and residual stresses generated by cold plastic forming in drawn round parts made from steel sheets", *Metalurgia International*, vol. 14, no. 12, pp. 21-27, 2009.
- [5] A. Işıktaş ve İ. Ay, "Farklı kalınlıklardaki Dkp sacın farklı açılarda yapılan V-bükme işlemindeki geri esnemelerinin incelenmesi", *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 17, s. 1, ss. 59-69, 2015.
- [6] A. Chanda, and D. Bhattacharyya, "A parametric study to minimise spring-back while producing plywood channels", *Journal of Cleaner Production*, vol. 304, pp. 1-11, 2021.
- [7] K. Chung, M.-G. Lee, D. Kim, C. Kim, M. L. Wenner, and F. Barlat, "Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions Part I: theory and formulation", *International Journal of Plasticity*, vol. 21, no. 5, pp. 861-882, 2005.
- [8] S. L. Zang, J. Liang, and C. Guo, "A constitutive model for spring-back prediction in which the change of Young's modulus with plastic deformation is considered", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 11, pp. 1791-1797, 2007.
- [9] J. Wang, S. Verma, R. Alexander, and J.-T. Gau, "Springback control of sheet metal air bending process", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, no. 1, pp. 21-27, 2008.
- [10] X. Cui, Z. Zhang, Z. Du, H. Yu, D. Qiu, Y. Cheng, and X. Xiao, "Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 275, no. 1-13, 2020.
- [11] B. Liu, F. Cao, Y. Zeng, and W. Wu, "Numerical and experimental study on temperature and springback control of U-shape titanium extrusion hot stretch bending", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 5, no. 4, pp. 453-469, 2022.
- [12] K. Aydın ve İ. Karaağaç, "DP600 ve HSLA300 sac malzemelerde geri esneme davranışlarına proses parametrelerinin etkisinin deneysel araştırılması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 3, ss. 1456-1465, 2019.
- [13] ESN Demir Çelik Yapı. (2023). *DKP Sac*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.esnmetal.com/dkp-sac-fiyatlari/>
- [14] ERDEMİR. (2017). *Ürün Kataloğu 2017*. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.erdemir.com.tr/Site/s/1/upload/files/Urun_Katalogu-2017-1269.pdf
- [15] L. Sayın ve G. Basmacı, "Bakır sac levhaların 'V' bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelenmesi", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 11, s. 3, ss. 147-154, 2019.
- [16] E. Esener ve M. Fırat, "Metal şekillendirme prosesi üzerinden geri esneme telafi yöntemlerinin incelenmesi", *16th International Conference on Machine Design and Production*, İzmir, Türkiye, 2014, ss. 1-7.
- [17] R. K. Lal, V. K. Choubey, J. P. Dwivedi, and S. Kumar, "Study of factors affecting springback in sheet metal forming and deep drawing process", *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 4353-4358, 2018.
- [18] R. Narayanasamy and P. Padmanabhan, "Influence of lubrication on springback in air bending process of interstitial free steel sheet", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 19, pp.

246-251, 2010.

[19] P. Wankhede, S. Kodey, S. Kurra, and S. Radhika, "A low cost surface strain measurement system using image processing for sheet metal forming applications", *Measurement*, vol. 187, pp. 1-14, 2022.

[20] L. M. V. Tigrinho, R. A. dos Santos, R. A. C. Filho, and P. V. P. Marcondes, "Experimental investigation on the influence of the lubricant type in the punch stretching of extra deep-drawing steel", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 290-294, 2008.

[21] H. Zein, M. El-Sherbiny, M. Abd-Rabou, and M. El Shazly, "Effect of die design parameters on thinning of sheet metal in the deep drawing process", *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 20-29, 2013.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Synthesis and Characterization of Amido-Thiourea Based *p*-tert-butylcalix[4]arene Compound and Investigation of Transition Metal Complex Properties

 Sevil SÖYLEYİCİ^{a,*}

^a Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: szencir@pau.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1198430

ABSTRACT

In host-guest complexes, the compatibility of the size and shape of the host cavity and the guest molecule is essential in the formation of the host-guest complex. Considered third-generation macrocyclic hosts, calixarenes attract the attention of researchers in supramolecular chemistry as they offer a wide range of applications in fields such as biocatalysis, enzyme analysis, pharmaceuticals, and biosensing. The synthesis of host molecules for anionic and cationic guest compounds has a very important place in coordination chemistry. Calixarenes are known as one of the important types of supramolecular compounds and are an important class of easily synthesized compounds that can act as a suitable receptors for cations, anions, and organic molecules. When calixarene compounds, which have an important place in host-guest chemistry, are derivatized appropriately, the coordination ability of the molecule against metal cations increases. These derivatizations gained importance due to the sensory properties of the molecule, and different studies were started considering that a larger cavity and functional group are required for more guest molecules. In this study, a new ligand of 1,3-disubstituted *p*-tert-butylcalix[4]arene derivative with increased donor atomic number with amide and thiourea groups in its structure was synthesized. Co(II), Ni(II), Cu(II), and Zn(II) complexes were synthesized with the compound and the structures of the compounds were characterized by UV-vis, FT-IR, ¹H-NMR, ¹³C-NMR, and mass spectrometry.

Keywords: *p*-tert-butylcalix[4]arene, Transition Metal Complex, Amide, Thiourea

Amido-Tiyöüre Bazlı *p*-tert-bütikaliks[4]aren Bileşiğinin Sentezi, Karakterizasyonu ve Geçiş Metal Kompleks Özelliklerinin Araştırılması

Öz

Konak-konuk kompleks bileşiklerinde, konakçı boşluğunun ve konuk molekülün boyut ve şeklinin uyumluluğu, konak-konuk kompleksinin oluşumunda esastır. Üçüncü nesil makrosiklik konakçılar olarak kabul edilen kaliksarenler, biyokataliz, enzim analizi, farmasötikler ve biyoalgılama gibi alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaları nedeniyle supramoleküler kimya araştırmacılarının ilgisini çekmektedir. Koordinasyon kimyasında anyonik ve katyonik misafir bileşikler için ev sahibi moleküllerin sentezi oldukça önemli yer tutmaktadır. Kaliksarenler supramoleküler bileşiklerin önemli türlerinden biri olarak bilinmekte ve katyon, anyon ve organik moleküller için uygun bir reseptör olarak görev alabilen ve kolay sentezlenebilen önemli bir bileşik sınıfıdır. Ev sahibi-konuk kimyasında önemli bir yeri olan kaliksaren bileşikleri uygun şekilde türevlendirildiklerinde, molekülün metal katyonlarına karşı koordinasyon yeteneği artmaktadır. Bu türevlendirmeler molekülün sensör özelliği göstermesi ile önem kazanmış ve daha çok misafir molekülü için daha büyük kavite ve fonksiyonel grup gerektiği düşünülerek farklı çalışmalar başlamıştır. Bu çalışmada da katyon seçiciliği artırılmış, yapısında amit grupları taşıyan 1,3-disübstitüe kaliks[4]aren türevi bileşik ve bu bileşiğin Co(II), Ni(II), Cu(II) ve Zn(II)

kompleksleri sentezlenerek bileşiklerin yapıları UV-vis, FT-IR, ¹H-NMR, ¹³C-NMR kütle spektrometresi ile aydınlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *p-tert-butilkaliks[4]aren, Geçiş Metal Kompleksi, Amit, Tiyoure*

I. INTRODUCTION

Calixarenes are defined as third-generation compounds after crown ethers and cyclodextrins, which are referred to as first and second-generation compounds in supramolecular chemistry. They belong to the metacyclophan class of compounds and consist of phenol and methylene units, similar to cyclodextrins which consist of glucose units, and crown ethers which consist of ethylene units. Calixarene compounds are macromolecules with flexible structural properties formed as a result of the reaction between formaldehyde and phenol in a base-catalyzed environment. They contain two regions suitable for derivatization, called the upper (*tert*-butyl bonded region) and lower rim (the region where the -OH group is attached). The contribution of *tert*-butyl groups to the solubility of the compound should not be ignored [1]–[3]. The phenolic oxygen portion functionalized with active groups to bind many different species is used for the purpose [4]–[6]. Many calixarene derivatives are encountered in studies of receptors sensitive to changing their spectroscopic properties, especially with the group it interacts with [7]–[9]. Coordination chemistry is widely used in the synthesis of organic structures containing metal cations, which have many application areas and properties [10]–[17]. In many published studies, the anion and cation selectivity of calixarene derivatives was investigated. Although it is tried to focus on the metal-ligand coordination preferences of the synthesized compounds, this seems to be limited. It is seen that metal coordination ligands with a certain geometry are effective to a certain extent, in which there is a binding based on supramolecular interactions instead of strong coordination bonds. Calixarene-derived ligands offer a wide spectrum for designing reagents with such metal selectivity. In the literature, there are compounds derived from the phenolic hydroxy region to include amide groups, and mostly metal extraction studies have been carried out [7]–[9], [18]–[21]. In this study, a new *p-tert*-butyl calix[4]arene derivative with the added sulfur group was synthesized, in addition to similar structures synthesized in the literature [14]–[15]. Instead of investigating the metal selectivity of this compound, its complexes were synthesized with some 2+ charged transition metal cations and characterized by spectroscopic methods.

II. MATERIALS AND METHODS

A. EXPERIMENTAL

Melting point determinations were made and verified with an Electrothermal IA9100) device. ¹H-NMR spectra were taken with Varian UNITY INOVA 500MHz NMR and TMS was used as standard. Chemical shift values (δ) in the NMR spectrum are expressed in ppm. IR spectra were taken as KBr discs from the FT-IR (Perkin Elmer 60X FT-IR spectrophotometer. UV spectra were taken on a UV-vis Shimadzu UV-1601 UV-visible. Mass spectra were taken (Bruker Microflex LT MALDI-TOF MS Spectrometer) and elemental analysis LECO CHNS 932 analyzer, DTA-TG (Shimadzu DTG-60H), and magnetic susceptibility (Sherwood Scientific). All chemicals were purchased from Merck, Fluka, and Carlo Erba company and were used without further purifications.

A. 1. Synthesis Of Calix[4]arene Derivatives

A.1.1. Synthesis Of Compound (2)

9.8 g (0.023 mol) *p-tert*-butylcalix[4]arene, 3.5 g (0.026 mol) K_2CO_3 , and 300 mL dry acetonitrile were added to a 250 mL two-necked flask. 5.7 mL of ethyl bromoacetate was added to the mixture and it was boiled under reflux for 24 hours. The mixture was evaporated to dryness. The remaining material in the flask was removed by dissolving it with dichloromethane. The dichloromethane phase was washed twice with water and once with brine to be taken into the flask. Anhydrous $MgSO_4$ was added and left to stand for one day. The organic phase was filtered and its solvent was evaporated. Crystallized from chloroform and methanol [24]. Yield: 10,36 g (%78), m.p: 175-177 °C, FT-IR $\nu_{max}(KBr)/cm^{-1}$: 3427 (OH stretching), 1753 (C=O stretching), 1H -NMR δ_H (500 MHz, $CDCl_3$, 298 K): 1.28 (t, 6H, $-CH_3$), (1.37 (s, 18H, $-CH_3$), 1.32 (s, 18H, $-CH_3$), 3.44 (d, $J = 13$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.25 (q, 4H, O- CH_2), 4.35 (d, $J = 13$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.85 (s, 4H, $CH_2-C=O$), 6.65-7.15 (m, 8 H, ArH), 7.69 (s, 2H, ArOH).

A.1.2. Synthesis of Compound (3)

2 g ($3.35 \cdot 10^{-3}$ mol) diester *p-tert*-butylcalix[4]arene, which was placed in a single-necked 100 mL flask, was added and mixed with 50 mL of methanol-toluene (1:1). 5 mL of hydrazine hydrate was added and the reaction mixture was heated in the oil bath at 40 °C. After one hour the white solid was precipitated. The cooled mixture was evaporated without filtration. 25 mL of water and 15 mL of methanol were added to the white solid and the resulting white precipitate was filtered and dried [22]. The product was used with any purification process. Yield: %90, m.p: 263-265°C, FT-IR $\nu_{max}(KBr)/cm^{-1}$: 3313 (OH stretching), 1664 (C=O stretching), 1H -NMR δ_H (500 MHz, $DMSO-d_6$, 298 K): 1.36 (s, 18H, $-CH_3$), 1.32 (s, 18H, $-CH_3$), 3.47 (d, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.21 (d, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.80 (br. 4H, NH_2), 6.58-7.16 (m, 8H, ArH), 8.28 (s, 2H, $NH-NH_2$), 9.51 (s, 2H, ArOH). MALDI-TOF-MS (m/z) = 913 [$M^+ + H^+ + Toluen$]

A.1.3. Synthesis of Compound (4)

Reaction of compound **3** with 4-nitroisothiocyanate under inert atmosphere with dry CH_2Cl_2 at room temperature overnight gave compound **4** as described in the literature [21], [22]. Yield:%52, m.p: 237-239°C, $C_{46}H_{40}N_8O_{10}S_2$, $\nu_{max}(KBr)/cm^{-1}$: 3398 (-OH), 3359 (-NH), 1656 (C=O), 1591 (N-O), 735 (C=S), 1H -NMR δ_H (500 MHz, $DMSO-d_6$, 298 K): 1,36 (s, 18H, $-CH_3$), 1,39 (s, 18H, $-CH_3$), 3.49 (d, $J = 13.4$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.26 (d, $J = 13.4$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$), 4.83 (s, 4H, OCH_2), 7.06-7.12 (m, 8H, ArH), 7.26 (d, $J = 9.2$, 4H, ArH-nitrophenyl), 7.74 (d, $J = 9.2$, 4H, ArH-nitrophenyl), 8.29 (s, 2H, OH), 8.77 (br, 2H, CONH-amide), 9.64 (s, 2H, NH thiourea), 10.12 (s, 2H, NH thiourea) ^{13}C -NMR (100 MHz, $DMSO-d_6$): 155.3, 153.2, 147.5, 140.2, 136.2, 135.5, 129.4, 127.8, 126.3,123.6, 122.1,120.0, 116.7,114.9, 75.3, 33.2, 31.5. MALDI-TOF-MS (m/z) = 1154 [$M^+ + H^+$]

A.1.4. Synthesis of Metal Complexes

Compound **4** (0.57 g, 1.00 mmol) was dissolved in DMF (20 mL) by heating and placed in a reaction flask. To this solution, 1.00 mmol metal salt (metal (II) acetates were used) solution in 15 mL DMF was added dropwise and mixed. The mixture was heated without reflux until precipitation was occurred. The resulting colored product was left to stand at room temperature overnight and filtered. It was washed with water, ethanol and dried.

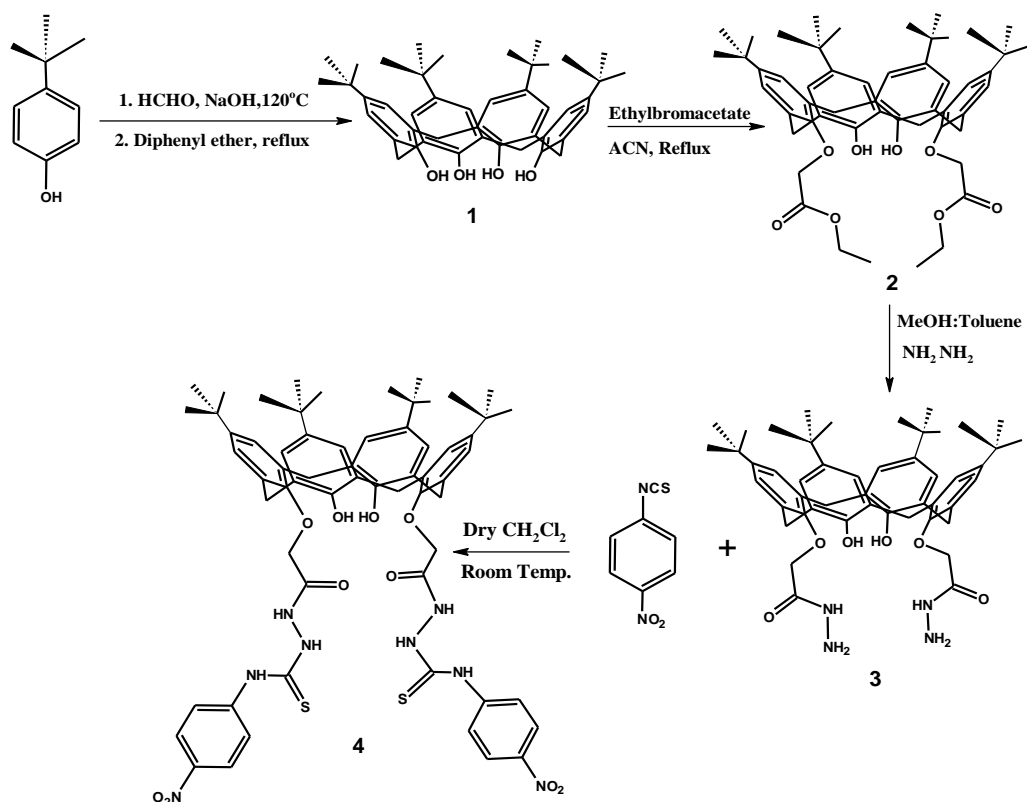


Figure 1. The synthetic procedure of ligand 4

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, 1,3-disubstituted p-tert-butylcalix[4]arene and Co(II), Ni(II), Cu(II), and Zn(II) complexes were synthesized. Similar structures have been synthesized before and extraction studies have been carried out with these compounds. Unlike other derivatives, compound **4** has a sulfur donor group in its structure. The structures of the synthesized compounds were characterized by UV-vis, FT-IR, $^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$, and mass spectrometry, and complex synthesis was performed differently. Since the compound is best dissolved in DMF solvent, studies have been done in this solvent environment. The physical data of compound **4** and complexes are given in Table 1.

Table 1. The physical data of ligands and complexes

Compound	Formula	M.A (g/mol)	Color	μ_{eff} (B.M)	Elemental Analysis, Calculated (Found) %			
					C	H	N	S
4	$\text{C}_{62}\text{H}_{72}\text{N}_8\text{O}_{10}\text{S}_2$	1153.42	Beige	-	64.50 (64.66)	6.24 (6.69)	9.71 (11.51)	5.54 (6.58)
[Co(4)(H ₂ O) ₂]	$\text{CoC}_{62}\text{H}_{74}\text{N}_8\text{O}_{12}\text{S}_2$	1246.36	Dark brown	4,52	59.69 (56.39)	5.94 (6.57)	8.98 (10.53)	5.13 (6.02)
[Ni(4)(H ₂ O) ₂]	$\text{NiC}_{72}\text{H}_{74}\text{N}_8\text{O}_{12}\text{S}_2$	1246.12	Brown	3,20	59.70 (56.40)	5.93 (4.57)	8.98 (10.52)	5.12 (6.01)
[Cu(4)(H ₂ O) ₂]	$\text{CuC}_{72}\text{H}_{74}\text{N}_8\text{O}_{12}\text{S}_2$	1250.98	Dark Green	1,74	59.47 (56.15)	5.91 (4.56)	8.95 (10.48)	6,17 (5,99)
[Zn(4)(H ₂ O) ₂]	$\text{ZnC}_{72}\text{H}_{74}\text{N}_8\text{O}_{12}\text{S}_2$	1252.82	Light Brown	-	59.38 (56.05)	5.90 (4.55)	8.94 (10.46)	5.11 (5.98)

The characteristic IR peaks of **4** in the spectrum are the peaks of NH-C=O, C=S, and O-H stretching vibrations. Other peaks are C=C and C=O stretching vibrations, aliphatic C-H, aromatic C-H and -NO₂ stretching vibrations. In the IR spectrum of the ligand, the stretching vibration of the phenolic -OH group is seen at 3398 cm⁻¹, and the NH-C=O stretching vibration peak of the amide group is seen as a broad peak at 3359 and a sharp peak at 1656 cm⁻¹. The peaks of aromatic and aliphatic C-H stretching vibrations were observed at 3052 cm⁻¹ and 2912 cm⁻¹, respectively. -NO₂ stretching vibration was observed at 1591 cm⁻¹ and C=S stretching vibration was observed at 735 cm⁻¹ (Table 2). These bands support the completion of the ligand formation reaction and the results are in agreement with the values given in the literature [25]. The most significant changes in the IR spectra of the metal complexes were observed in the stretching vibrations of the phenolic -OH of the *p-tert*-butylcalix[4]arene and the NH-C=O of the amide group. During the formation of the metal complex of the ligand, the vibration frequency of the amide group -NH-C=O and the strong band observed at 1254 cm⁻¹, which is characteristic of the phenolic C-O stretching vibration in the ligand are both weakened in complex structures and shifted to the high-frequency region as high as 30-35 cm⁻¹. The absence of a significant change in the C=S frequency value indicates that sulfur was not included as a donor atom in the complex formation. This shift shows that deprotonated phenolic oxygen enters coordination with metal ions during the formation of the complex [26], [27]. FT-IR spectrum of compound **4** and Zn²⁺ complex are given in Figure 2.

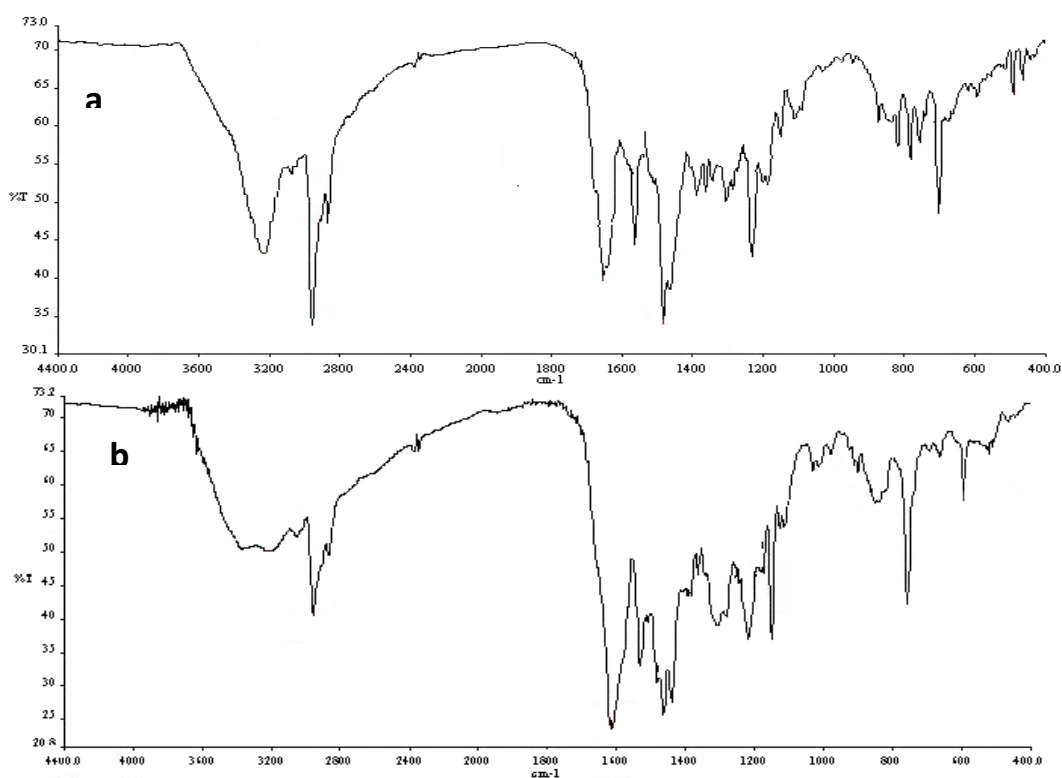


Figure 2. FT-IR spectra of a: compound **4**, b: [Zn(**4**)(H₂O)₂]

Table 2. Characteristic IR spectrum data of ligand and complexes

Compound	$\nu(\text{-OH})$ (cm^{-1})	$\nu(\text{H}_2\text{O})$ (cm^{-1})	$\nu(\text{NH-C=O})$ (cm^{-1})	$\nu(\text{-NO}_2)$ (cm^{-1})	$\nu(\text{C-O})$ (cm^{-1})	$\nu(\text{C=S})$ (cm^{-1})	$\nu(\text{M-O})$ (cm^{-1})
4	3398	-	1656	1591	1254	735	-
[Co(4)(H ₂ O) ₂]	-	3400-3500	1636	1586	1224	736	586
[Ni(4)(H ₂ O) ₂]	-	3400-3500	1639	1590	1221	735	588
[Cu(4)(H ₂ O) ₂]	-	3400-3500	1631	1574	1224	738	584
[Zn(4)(H ₂ O) ₂]	-	3400-3500	1636	1590	1220	736	599

When we indicate the ¹H-NMR spectra of compounds **3**, **4**, and **Zn complex** in the spectrum of compounds **3** and **4**, the peak observed at 8.29 ppm belonging to the hydrazide amine in compound **3** is not seen in compound **4**. This indicates that the ligand is formed. In addition, the other peaks belonging to the **4** are the -NH peaks of the thiourea group in the structure with chemical shift values of 10.12 and 9.64 ppm. Diffuse peaks belonging to -OH and amide -NH proton groups were observed at 8.29 ppm and 8.77 ppm, respectively, and 7.06-7.74 ppm for aromatic protons. The bridge between the aromatic groups in the calixarene compound, which is observed at 4.26 and 3.49 ppm belongs to the Ar-CH₂-Ar and this splitting shows us that the compound **4** conformation is cone [4]. The ¹H-NMR spectrum of the Zn complex shows that the peak in the -OH group has disappeared in the ligand compound. This indicates that in the synthesis of the complex, it is not the thiourea group that is in the possible binding site, but the phenol oxygen of calixarene. Chemical shifts of C=S, C=O, and C-O carbons in the ¹³C-NMR spectrum of the ligand were observed at 155.3, 153.2, and 147.5 ppm, respectively. The resonance observed at 75.3 ppm belongs to the O-CH₂ carbon and peaks of other aromatic ring carbons were observed at 129.4-114.9 ppm [28]–[30].

When the electronic absorption spectrum of the ligand taken in DMF solution was examined, bands in the range of 300-400 nm were observed to belong $\pi \rightarrow \pi^*$ and $n \rightarrow \pi^*$. These bands are transitions originating from aromatic rings and unpaired electrons. When the electronic absorption spectra of the Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, and Zn²⁺ complexes of the ligand were taken in DMF solution compared with the spectrum of the ligand, some differences were observed. Three transitions were observed at 347, and 443 nm in the Co²⁺ (d⁷) complex. The absorption peak was at 275, and 395 nm, and the shoulder was observed at 455 nm in the Ni²⁺ (d⁸) complex. Absorption peaks were observed at 360 and 425 nm in the Cu²⁺ (d⁹) complex. Due to the d¹⁰ structure of the Zn complex, d-d transitions could not be observed [31]. UV-vis spectrum of compound **4** and Ni²⁺ complex is given in Figure 3.

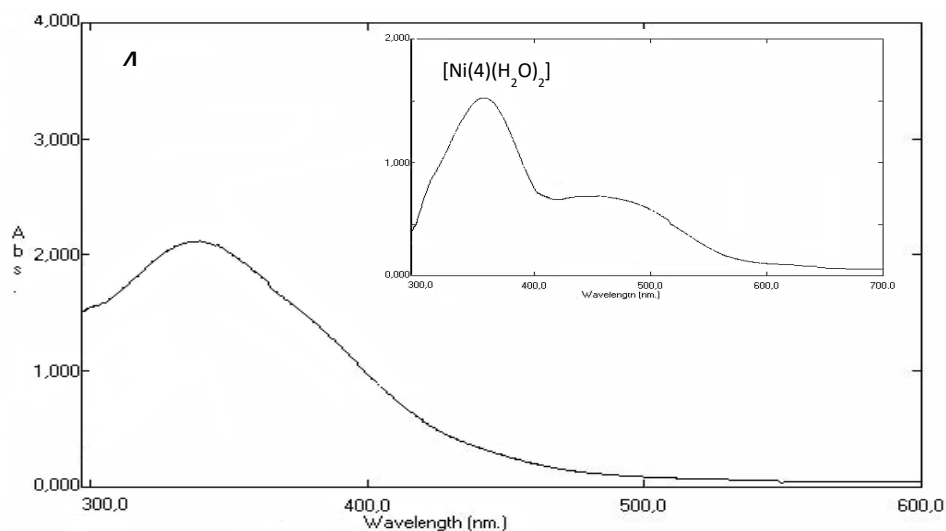


Figure 3. Absorption spectrum of compound **4**. Inset: The absorption spectrum of Ni^{2+} complex

MALDI-TOF analysis was also used for the structure determination of the synthesized ligand. In this way, it is another technique that determines the molecular weights of the compound and shows whether the targeted compound is formed. In this direction, as a result of the analysis, the molecular weight value of the compound was seen in the spectrum of compound **4** (**Figure 4**). The mass value of the decomposition product formed by the cleavage of tert-butyl groups in the compound is also included in the spectrum as the peak value at 930.86. The MALDI-TOF analysis results of the compound confirm the proposed structure of compound **4**.

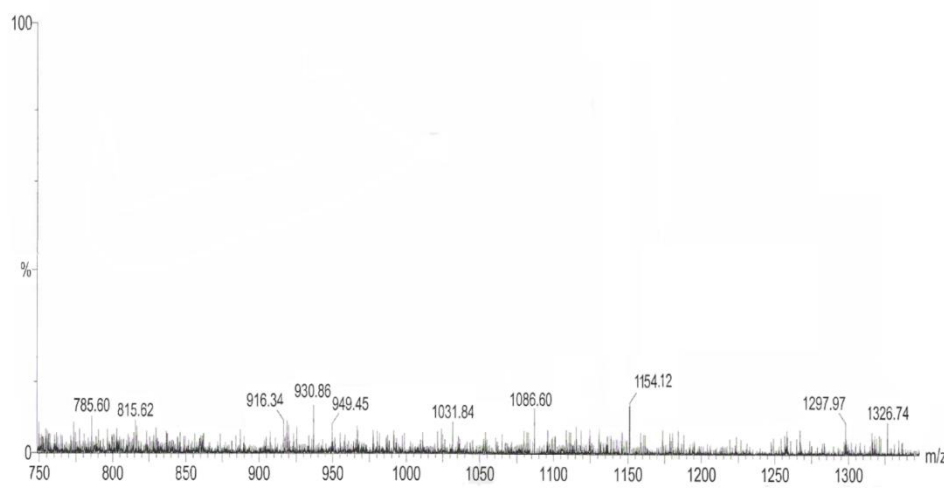


Figure 4. Mass spectrum of compound **4**.

Magnetic susceptibility is the ratio of the magnetic intensity caused by a substance to the magnetizing force. It is a very useful technique for identifying unpaired electrons in paramagnetic complexes and helps to suggest the structure of complexes. In the present study, by determining the magnetic susceptibility of metal complexes, it was tried to determine whether the complexes are paramagnetic or diamagnetic, and thus the probable geometry. The measurement results show us that the complex for zinc is diamagnetic as expected, which means that there are no unpaired electrons in the formation of the complex. These values should be higher if the electrons are unpaired. These values for copper, nickel, and cobalt showed that they were close to the values in the literature for unpaired electrons and that all

metals were in the +2 oxidation state [27]. The magnetic moment value of the Ni(II) complex reported here is 3.20, within the magnetic moment value range ($\mu_{\text{eff}} = 2.9\text{-}3.3 \text{ B.M}$) given at room temperature for the octahedral Ni(II) complexes. In the observed normal range, the complex has high spin, indicating that the Ni(II) complex has a 6-coordinated octahedral geometry. The magnetic susceptibility measurement of Co(II) is 4.52, which is within the normal range for octahedral Co(II) complexes (4.3-5.2 B.M). The magnetic moment value of 1.74 in the copper complex is among the data supporting the octahedral geometry for the Cu(II) complex. The complex of Zn(II) is diamagnetic. According to the empirical formulas of these complexes, an octahedral geometry has also been proposed for the complexes [32].

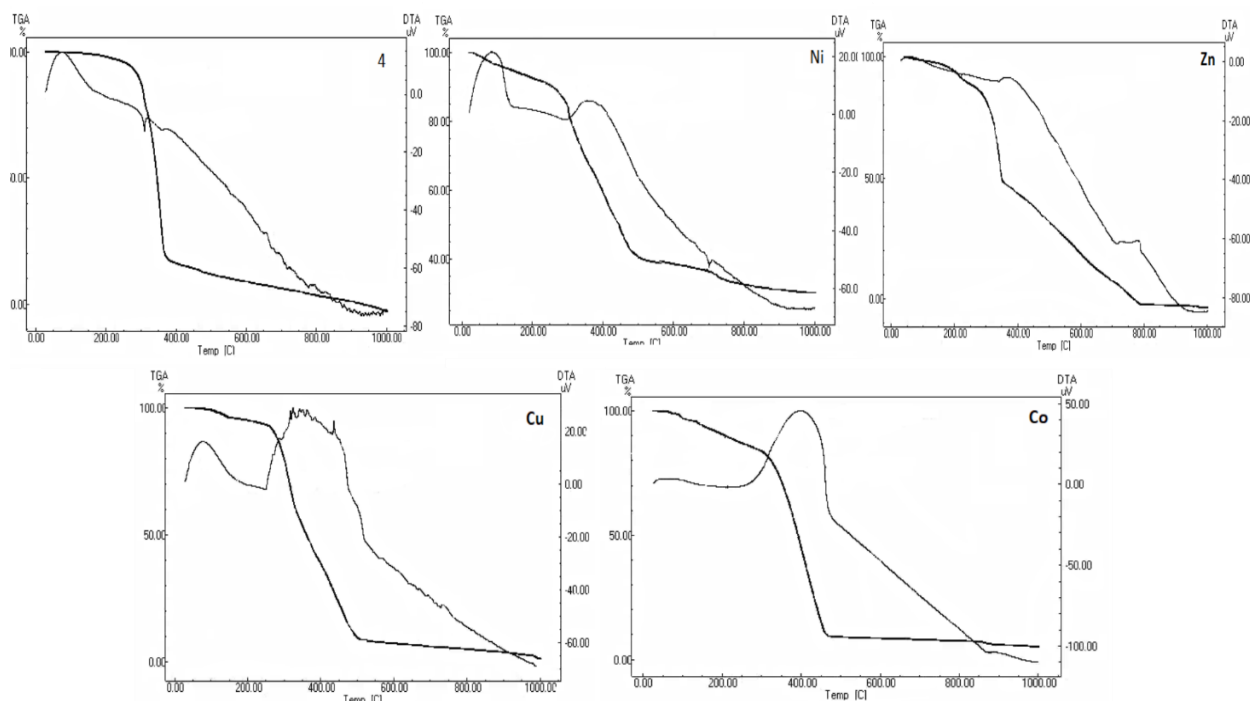


Figure 5. DTA-TG diagrams of compound 4 and metal complexes

Thermogravimetric analysis is important in terms of understanding the relationship between these two data by examining the TG/DTA curves of ligands and complexes, as well as the weight reduction and decomposition temperatures. It is also possible to comment on the decomposition products based on the mass loss. In this study, the thermal analysis results of the complexes were calculated with a mass loss of 2.89 % in Co(II) and Ni(II) complexes, 2.87 % in Cu(II) and Zn(II) complexes. These data have shown us that the water molecules in the complexes are separated in the first decomposition step, and the organic structure decomposes in the following steps. As a result of decomposition, it was determined that metal oxides remained from the complexes. The mass loss in the range of 25-250 °C in the thermogram shows us that there is crystal water in the structure. The presence of water molecules in the structure proves that the complex with octahedral geometry supported by magnetic susceptibility is composed of four oxygen donors and 2 moles of water. The proposed structure of the complex was shown in Figure 6.

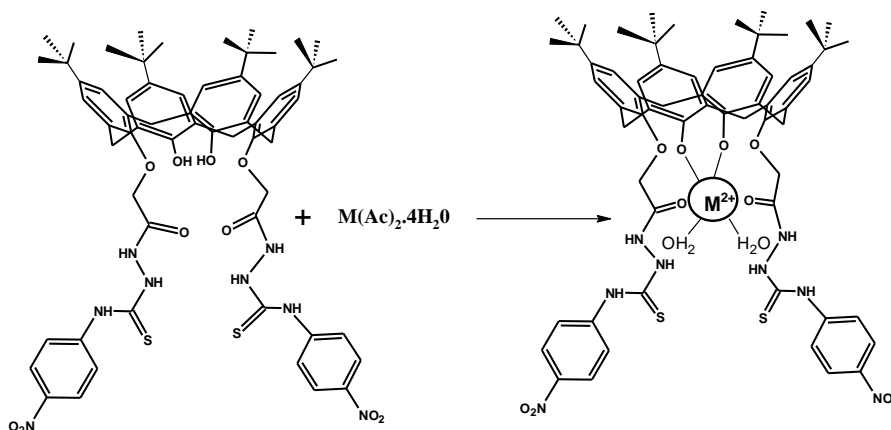


Figure 6. Synthesis of metal complexes and the proposed structure for the metal bonding site

IV. CONCLUSION

In this study, firstly the diester derivative of *p-tert*-butylcalix[4]arene (compound 2) and the hydrazide derivative of this compound (compound 3), and finally compound 4 were synthesized. Previously, similar structures were synthesized but metal extraction studies were carried out with these compounds. In this study, sulfur was added to the structure as a different donor group and it was tried to determine whether sulfur affected complexation. Complexes were synthesized from the reaction of the synthesized ligand with Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , and Zn^{2+} acetates. The structures of the obtained compounds and their complexes were characterized using elemental analysis, IR, $^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$, UV-Vis, magnetic susceptibility, and thermogravimetric analysis techniques. From the data obtained, it was seen that sulfur was not involved in the formation of the complex, but instead, the binding was from the -OH groups in the calixarene body. It was determined that Co(II) , Ni(II) , Cu(II) , and Zn(II) complexes were in octahedral structure. It also seems possible for compound 4 to perform new ion selection studies.

ACKNOWLEDGMENTS: This study was supported by Pamukkale University Scientific Research Projects (Project no: 2011BSP028).

V. REFERENCES

- [1] C. D. Gutsche, B. Dhawan, and H. Kwang, "Academic Press," Anal. Chem., vol. 48, no. 3, pp. 339A-339A, 1976.
- [2] C. David Gutsche and J. A. Levine, "Calixarenes. 6. Synthesis of a Functionalizable Calix[4]arene in a Conformationally Rigid Cone Conformation," J. Am. Chem. Soc., no. 104, pp. 2652–2653, 1982.
- [3] C. D. G. and M. Iqbal, "p-tert-BUTYLCALIX[4]ARENE," Org. Synth., vol. 68, no. September, pp. 234, 1990.
- [4] C. D. Gutsche and L. J. Bauer, "Calixarenes. 14. The Conformational Properties of the Ethers and Esters of the Calix[6]arenes and the Calix[8]arenes," J. Am. Chem. Soc., vol. 107, no. 21, pp. 6059–6063, 1985.
- [5] D. Diamond and M. A. Mckervery, "Calixarene-based Sensing Agents," Chemical Society Reviews, vol. 25, no. 1, pp. 15-24, 1996.
- [6] D. M. Rudkevich, W. Verboom, and D. N. Reinhoudt, "Calix[4]arene Salenes: A Bifunctional Receptor for NaH_2PO_4 ," J. Org. Chem., vol. 59, no. 13, pp. 3683–3686, 1994.

- [7] M. F. Arnaud-Neu et al., "Modulation of cation binding in calix[4]arene amides: synthesis, complexation and molecular modelling studies," *J. Chem. Soc. Trans. 2*, no. 8, pp. 1727–1738, 1999.
- [8] B. Tomapatanaget and T. Tuntulani, "Lower rim tetra-substituted and upper rim ferrocene amide calix[4]arenes: Synthesis, conformation and anion-binding properties," *Tetrahedron Lett.*, vol. 42, no. 45, pp. 8105–8109, 2001.
- [9] R. Ludwig and N. T. K. Dzung, "Calixarene-based molecules for cation recognition," *Sensors*, vol. 2, no. 10, pp. 397–416, 2002.
- [10] N. Galić, M. Rubčić, K. Magdić, M. Cindrić, and V. Tomišić, "Solution and solid-state studies of complexation of transition-metal cations and Al(III) by aroylhydrazones derived from nicotinic acid hydrazide," *Inorganica Chim. Acta*, vol. 366, no. 1, pp. 98–104, 2011.
- [11] C. Alkan, Y. Tek, and D. Kahraman, "Preparation and characterization of a series of thiourea derivatives as phase change materials for thermal energy storage," *Turkish J. Chem.*, vol. 35, no. 5, pp. 769–777, 2011.
- [12] C. L. Allen and J. M. J. Williams, "Metal-catalysed approaches to amide bond formation," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, no. 7, pp. 3405–3415, 2011.
- [13] C. Toussaint, C. Beghidja, and R. Welter, "Cobalt complexes supported by salicylichydrazono derivative ligands and various coordination solvents," *Comptes Rendus Chim.*, vol. 13, no. 3, pp. 343–352, 2010.
- [14] K. Mounika, A. Pragathi, and C. Gyanakumari, "Synthesis, Characterization and Biological Activity of a Schiff Base Derived from 3-Ethoxy Salicylaldehyde and 2-Amino Benzoic acid and its Transition Metal Complexes," *J. Sci. Res.*, vol. 2, no. 3, p. 513, 2010
- [15] S. Budagumpi, N. V. Kulkarni, G. S. Kurdekar, M. P. Sathisha, and V. K. Revankar, "Synthesis and spectroscopy of CoII, NiII, CuII and ZnII complexes derived from 3,5-disubstituted-1H-pyrazole derivative: A special emphasis on DNA binding and cleavage studies," *Eur. J. Med. Chem.*, vol. 45, no. 2, pp. 455–462, 2010.
- [16] S. N. Podyachev, N. E. Burmakina, V. V. Syakaev, S. N. Sudakova, R. R. Shagidullin, and A. I. Konovalov, "Synthesis, IR and NMR characterization and ion extraction properties of tetranonylcalix[4]resorcinol bearing acetylhydrazone groups," *Tetrahedron*, vol. 65, no. 1, pp. 408–417, 2009.
- [17] D. Zhang et al., "A selective fluorescence probe for yttrium(III) based on acylhydrazone Schiff base," *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 12, no. 11, pp. 1154–1156, 2009.
- [18] A. Ali and C. P. Rao, "Formation of mono- and di-amide-calix[4]arene derivatives from the reaction of p-tert-butyl-calix[4]arene and α -chloro-N,N-diethylacetamide in the presence of sodium hydride," *Indian J. Chem. - Sect. B Org. Med. Chem.*, vol. 44, no. 3, pp. 549–552, 2005.
- [19] I. Vatsouro, E. Alt, M. Vysotsky, and V. Böhmer, "Guest exchange in dimeric capsules formed by tetra-urea calix[4]arenes," *Org. Biomol. Chem.*, vol. 6, no. 6, pp. 998–1003, 2008.
- [20] A. Yildirim, S. Karakurt, and M. Yilmaz, "Synthesized Two New Water-Soluble Fluorescents Calix[4]arene 4-sulfo-1,8-naphthalimide Derivatives Inhibit Proliferation of Human Colorectal Carcinoma Cells," *ChemistrySelect*, vol. 6, no. 28, pp. 7093–7097, 2021.
- [21] E. Akceylan, A. Uyanik, S. Eymur, O. Sahin, and M. Yilmaz, "Calixarene-proline functionalized iron oxide magnetite nanoparticles (Calix-Pro-MN): An efficient recyclable

organocatalyst for asymmetric aldol reaction in water,” *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 499, pp. 205–212, 2015.

[22] E. Quinlan, S. E. Matthews, and T. Gunnlaugsson, “Anion sensing using colorimetric amidourea based receptors incorporated into a 1,3-disubstituted calix[4]arene,” *Tetrahedron Lett.*, vol. 47, no. 52, pp. 9333–9338, 2006.

[23] S. Bozkurt, A. Karakucuk, A. Sirit, and M. Yilmaz, “Synthesis of two calix[4]arene diamide derivatives for extraction of chromium(VI),” *Tetrahedron*, vol. 61, no. 44, pp. 10443–10448, 2005.

[24] E. M. Collins et al., “Chemically modified calix[4]arenes. Regioselective synthesis of 1,3-(distal) derivatives and related compounds. X-ray crystal structure of a diphenol-dinitrile,” *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 1*, vol. 3, no. 12, pp. 3137–3142, 1991.

[25] O. K. Taşkin, Ö. F. Öztürk, and E. Canpolat, “Yeni Bir Schiff Bazı ve Geçiş Metalleri ile Oluşturdukları Komplekslerin Sentezi ve Karakterizasyonu Synthesis and Characterization of a New Schiff Base and Its Complexes with Some Transition Metals,” *BEU Fen Bilim. Derg.*, c. 1, s. 1, ss. 34–39, 2012

[26] D. N. Hundekar, A.M., Sen, “Preparation & Characterization of Metal Complexes of N-Acetyl-N-aryloferrocenyl Hydrazidest,” *Indian J. Chem.*, vol. 23, no. June, pp. 477–479, 1984.

[27] K. Shoaib, W. Rehman, B. Mohammad, and S. Ali, “Synthesis, characterization and biological applications of transition metal complexes of [no] donor schiff bases,” *J. Proteomics Bioinforma.*, vol. 6, no. 7, pp. 153–157, 2013.

[28] S. TUNA YILDIRIM, “Aromatik Amin İçeren Schiff Bazı Ligandının Sentezi, Karakterizasyonu ve Bazı Geçiş Metal Komplekslerinin İncelenmesi,” *Erzincan Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 12, s. 3, ss. 1329–1340, 2019.

[29] A. S. El-Tabl, F. A. El-Saied, W. Plass, and A. N. Al-Hakimi, “Synthesis, spectroscopic characterization and biological activity of the metal complexes of the Schiff base derived from phenylaminoacetohydrazide and dibenzoylmethane,” *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 71, no. 1, pp. 90–99, 2008.

[30] G. G. Mohamed, M. M. Omar, and A. M. Hindy, “Metal complexes of Schiff bases: Preparation, characterization, and biological activity,” *Turkish J. Chem.*, vol. 30, no. 3, pp. 361–382, 2006.

[31] G. G. Mohamed, M. M. Omar, and Y. M. Ahmed, “Metal complexes of Tridentate Schiff base: Synthesis, Characterization, Biological Activity and Molecular Docking Studies with COVID-19 Protein Receptor,” *Zeitschrift für Anorg. und Allg. Chemie*, vol. 647, no. 23–24, pp. 2201–2218, 2021.

[32] Z. T. Omar, S. Jadhav, R. Pathrikar, S. Shejul, and M. Rai, “Synthesis, Magnetic Susceptibility, Thermodynamic Study and Bio-Evaluation of Transition Metal Complexes of New Schiff Base Incorporating INH Pharmacophore,” *Polycycl. Aromat. Compd.*, vol. 43, no. 1, pp. 523–537, 2023.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Yanmazlık Özellikleri İyileştirilmiş Akrilik Kauçuk Karışımlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu

 Seda BEKİN AÇAR^{a,*},  Furkan Emin ALACALAR^a,  Mehmet Atilla TAŞDELEN^a

^a Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: seda.acar@yalova.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1282072

Öz

Bu çalışmada poliakrilat kauçuk karışımlarının yanmazlık özellikleri artırılarak florokarbon monomer kauçuğa alternatif malzeme olarak kullanılması amaçlanmıştır. Bunun için, poliakrilat kauçuk formülasyonlarına farklı miktarlarda halojen içermeyen alev geciktirici malzemeler (melamin ve amonyum polifosfat) eklenerek kauçuk hamurları hazırlanmış ve bu hamurların vulkanizasyonu sonucu elde edilen vulkanizatların reolojik, mekanik ve yanmazlık özellikleri incelenmiştir. Önemli reolojik parametreler ile optimum pişme süreleri reometre ile belirlenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için yapılan çekme testi sonucunda ise hazırlanan poliakrilat kauçuk vulkanizatlarının florokarbon monomer kauçuk karışımına oranla daha iyi kopma dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Yanmazlık özelliklerini incelemek için yapılan sınırlayıcı oksijen indeksi testi sonucunda ise poliakrilat kauçuk formülasyonlarına yanmazlık özelliği sağlayan dolgular olan melamin ve amonyum polifosfat malzemelerinin sırasıyla 8 ve 16 phr olacak şekilde eklenmesiyle LOI değerinin önemli ölçüde geliştiği görülmüştür. Dolayısıyla mekanik dayanımın önemli olduğu, gelişmiş yanmazlık ve alev geciktirici özelliğe sahip ve nispeten uygun maliyetle hazırlanan bu poliakrilat reçetesinin, pahalı florokarbon monomer kauçuk karışımlarına muadil olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akrilik kauçuk, Halojen içermeyen alev geciktirici, Kauçuk, Yanmazlık

Preparation and Characterization of Acrylic Rubber Compounds with Improved Flammability Properties

ABSTRACT

In this study, it was aimed to use polyacrylate rubber compounds as an alternative material to fluorocarbon monomer rubber by increasing their flame retardant properties. For this purpose, rubber compounds were prepared by adding different amounts of halogen-free flame retardant materials (melamine and ammonium polyphosphate) to polyacrylate rubber formulations and the rheological, mechanical and flammability properties of vulcanizates obtained by vulcanization of these compounds were investigated. Important rheological parameters and optimum curing times were determined by rheometer. As a result of the tensile test performed to determine the mechanical properties, it was determined that the prepared polyacrylate rubber vulcanizates showed better tensile strength compared to the fluorocarbon monomer rubber compound. As a result of the limiting oxygen index test performed to examine the flammability properties, it was observed that the LOI value improved significantly with the addition of melamine and ammonium polyphosphate materials, which were fillers that provide flammability properties to polyacrylate rubber formulations, at 8 and 16 phr, respectively. Therefore, it was concluded that this polyacrylate recipe, which had improved flame retardant properties where mechanical strength is important and prepared at relatively affordable cost, could be used as a potential substitute for expensive fluorocarbon monomer rubber compounds.

I. GİRİŞ

Son yıllarda, azaltılmış veya arttırılmış sıcaklık etkisine karşı dirençli, alev geciktirici özelliğe sahip ve uygun mekanik dayanım gösteren polimerik malzemelere büyük ilgi duyulmaktadır. Ekonomik nedenlerin yanı sıra sağlık ve can güvenliğinin korunması amacıyla polimerlerin en önemli özelliklerinden biri yanmazlıktır [1, 2]. Polimerik malzemeleri ateşten korumak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Termal olarak kararlı veya düşük alevlenir malzemeler yapmak için kullanılan en yaygın yaklaşım, matris içinde dağılmış alev geciktirici parçacıkların polimere dahil edilmesidir. Bu yöntem, endüstriyel proseslere kolayca uyum sağlaması ve maliyet ile mekanik, termal ve yanmazlık özellikleri arasında iyi bir denge sağlaması nedeniyle genellikle diğerlerine tercih edilir [3].

Akrilat monomerlerinin kopolimeri olan poliakrilat kauçuklar (ACM), yağa ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kauçuklardır [4, 5]. ACM, doymuş bir kauçuktur ve farklı tipte kürlenmeye uygun monomerler ile ticarileştirilebilir [6-8]. Genel olarak kullanım sıcaklık aralığı -40 ile 200 °C arasındadır. Bu polimerler 150 – 170 °C arasında yağ içerisinde kullanılabilirdiğinden akrilonitril bütadien kauçuk (NBR) yerine tercih edilirler. Hidrojene nitril kauçuk (HNBR) ve florokarbon monomer kauçuk (FKM) ile kıyaslandığında daha uygun maliyette olduğundan, onların özelliklerini karşılayabildiği yerlerde tercih sebebidir. ACM ozon, ısı, yağ ve oksidasyon dirençlerine sahipken sıcak su, buhar, alkol ve esterlere dayanıksızdır. Dinamik ve statik sızdırmazlık uygulamaları, şanzıman yağı soğutucu hortumları, ısı altında yağ dayanımı gerektiren parçalar başlıca kullanım alanlarındandır. Ayrıca yüksek performanslı otomobil motorlarında yağ keçeleri ve contalar olarak da kullanılırlar [8, 9].

FKM ısıya ve agresif sıvı ortamlarına karşı dirençleriyle iyi bilinirken [10], ACM ise daha düşük direncin gerekli olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılır [11]. Literatürde, FKM ve ACM kauçukların termal davranışları ve sıvı direnci kapsamlı şekilde incelenmiştir [12-14]. Yanma eğilimi azaltılmış kauçuk bileşimleri hazırlamak için şu yaklaşımlar kullanılmaktadır; 1) metal hidroksit, fosfor içeren katkı maddeleri ve klorlu bileşikler gibi alev geciktirici katkı maddeleri ile birleştirme, 2) elastomerin spesifik reaktiflerle son reaksiyonu, 3) az miktarda özel komonomerler ile kopolimerleştirme yoluyla değiştirilmiş kauçuğun hazırlanması ve 4) kürlenme sisteminin değiştirilmesi [15]. Uygulamada, alev geciktirici bileşik formülünün kauçuğun mekanik özelliklerini bozmaması oldukça önemlidir. Bununla birlikte, alev geciktirici kauçuk bileşimleri yukarıda belirtilen yöntemler kullanılarak hazırlandığında performans, yanma davranışı ve maliyet arasında optimizasyon yapmak zordur. Düşük maliyetli, halojen içermeyen ve mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkisi olmayan bir teknik gereklidir [16].

Yanmazlık özellikleri geliştirilmiş kauçuk bileşimlerinin gerekli olduğu uygulamalarda genellikle FKM tercih edilmektedir. Ancak, FKM kauçukların fiyatları ACM ile kıyaslandığında yaklaşık 3 kat daha yüksektir. Bu nedenle, bu çalışmada ACM kauçuğunun yanmazlık özellikleri geliştirilerek FKM yerine daha düşük maliyetli, alternatif bir malzeme olarak kullanılması amaçlanmıştır. Halojen içermeyen çeşitli alev geciktirici malzemeler ACM formülasyonlarına eklenerek, bu kauçuğun yüksek sıcaklıktaki yanmazlık performansı raporlanmıştır.

II. MALZEME VE YÖNTEM

A. MALZEMELER

Mooney viskozite değeri 35-47 olan, az miktarda klor/karboksil reaktif komonomer ile bir veya daha fazla akrilik ester içeren, kürlenme hızı yüksek, düşük kalıcı deformasyon değerine ve yüksek yağ direncine sahip ACM HyTemp® 4051 ZEON firmasından alınmıştır. 125 m²/g yüzey alanına sahip

Grace marka Perkasil KS300 PD silika dolgusu kullanılmıştır. Plastifiyan olarak, yüksek sıcaklık dayanımına sahip trioktil trimellitat (T.O.T.M.) kullanılmış ve bu kimyasal Plastay Kimya firmasından temin edilmiştir. Bis-[3-(trietoksisilil)-propil]-tetrasülfan silan bağlama ajanı (Si-69) ile dispergator FL proses kolaylaştırıcı Kettlitz'den alınmıştır. Kauçuk reçetelerinde kullanılan vulkanizatör (%50 oktadesiltrimetilamonyumbromür ve %50 ACM bağlayıcıdan oluşan ACP 5550) Brenntag'dan temin edilmiştir. Sodyum stearat ve 2,4,6- triamino-1,3,5-triazin (melamin) Ataman Kimya'dan, ticari ismi Exolite 1314 olan amonyum polifosfat (APP) ise Clariant firmasından satın alınmıştır. Formülasyondaki APP ve melamin yanmazlık özelliği sağlamak amacıyla kullanılmıştır. ACM ile hazırlanan kauçuk bileşimlerini kıyaslamak amacıyla Shore A değeri 70 olan FKM kauçuğu kullanılmış ve bu kauçuk Mesgo'dan temin edilmiştir.

B. DENEYSEL YÖNTEMLER

B. 1. Kauçuk Hamuru Hazırlama

ACM esaslı kauçuk hamurları silindir olarak adlandırılan laboratuvar tipi açık karıştırıcı sistemli hamur makinesi kullanılarak hazırlanmıştır. Orta ölçekli silindir makinesinde kauçuk hamuru şu proses adımları izlenerek elde edilmiştir;

- *ACM polimerinin mastikasyonu;*

Başlangıçta, ACM polimeri, merdaneler arası orta açıklıkta olan silindire alınmıştır. Merdane ve polimer ısınmaya başladıkça merdaneler arası mesafe kısalmıştır. Yapılan mastikasyon işleminin ardından, kauçuk hamur kıvamına getirilmiştir.

- *Dolgu, plastikleştirici ve proses kolaylaştırıcıların eklenmesi;*

Silindirde karışan kauçuğa, dolgu, plastifiyan ve proses kolaylaştırıcılar üç seferde ilave edilip yeterli süre karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir.

- *Oluşan hamurun silindirden alınması;*

Hamur, merdaneler arası kalınlık 6 mm olarak ayarlanıp plaka halinde alınmıştır. Yaklaşık 7 kg civarında kauçuk hamuru elde edilmiş ve bu hamur soğutulmaya bırakılarak 24 saat dinlendirilmiştir.

- *Hamurlara yanmazlık dolguları ve pişiricinin ilavesi;*

Dinlenen hamurlara laboratuvar tipi silindirde gerekli miktarda pişirici ve farklı oranlarda yanmazlık malzemeleri katılmıştır. Karışımın homojen olması için merdaneler arasındaki mesafe minimum seviyeye getirilerek karıştırma işlemi sürdürülmüştür.

- *Hamur hazırlama işleminin tamamlanması;*

Karıştırılan hamurlar homojen hale geldikten sonra, 3 mm kalınlığında plaka halinde silindirden alınmıştır. Alınan tüm hamurlar soğutulmuştur. Soğutulan hamurlar numaralandırılarak karakterize edilmek üzere temiz ve serin ortamda bekletilmiştir.

Hazırlanan kauçuk hamurları ACM-0 (melamin ve APP içermeyen referans numunesi), ACM-2-4 (2 phr melamin ve 4 phr APP içeren karışım), ACM-4-6 (4 phr melamin ve 6 phr APP içeren karışım), ACM-6-8 (6 phr melamin ve 8 phr APP içeren karışım) ve ACM-8-16 (8 phr melamin ve 16 phr APP içeren karışım) olacak şekilde isimlendirilmiştir. Bu kauçuk hamurlarına ait reçete Tablo 1'de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan melamin ve APP miktarları, literatür incelemesi yapılarak kararlaştırılmıştır [17-20].

Tablo 1. Farklı miktarlarda (phr) yanmazlık özelliği sağlayan kimyasallar ile hazırlanan kauçuk hamurlarının reçeteleri

Malzemeler	ACM-0 (phr)	ACM-2-4 (phr)	ACM-4-6 (phr)	ACM-6-8 (phr)	ACM-8-16 (phr)
ACM	100	100	100	100	100
Silika	50	50	50	50	50
T.O.T.M.	3	3	3	3	3
Si-69	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Dispergator FL	1	1	1	1	1
ACP 5550	3	3	3	3	3
Sodyum Stearat	4	4	4	4	4
Melamin	0	2	4	6	8
APP	0	4	6	8	16

Tabloda gösterilen reçeteler ile birlikte, yerine muadil olarak kullanılmak istenen FKM hamuru ayrıca hazır olarak testlerde kullanılmıştır. FKM hamuruna verilen kod ise FKM-0'dır.

B. 2. Reolojik Özellikler

Kauçuk karışımlarının önemli reolojik özellikleri U-Can marka reometre kullanılarak belirlenmiş ve reometre testleri TS ISO 6502-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Buna göre, belirli bir sıcaklık ve basınçta, sabit bir gerilim verilerek, malzemenin zamanla vulkanize olması sonucu meydana gelen torkun ölçülmesi ile optimum pişme süresi gibi reometre parametreleri ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca yoğunluk testleri, reometreden çıkan vulkanizatlar kullanılarak ve TS ISO 1817 standardına uygun olarak, Devotrans marka ZLS 220 A SCS modeli test cihazı ile yapılmıştır.

B. 3. Vulkanizasyon İşlemi

Hazırlanan kauçuk hamurları reometre eğrilerinden belirlenen optimum pişme süreleri boyunca 185°C pişme sıcaklığında ve 150 bar basınçta üst çenesi hareketli ve alt çenesi sabit olan hidrolik sıcak pres ile 2 mm ve 6 mm kalınlığındaki levha kalıplarda vulkanize edilmiştir. Gerekli testlerin yapılması için vulkanize edilmiş kauçuk karışımları, levhalar üzerinden test standartlarına uygun şekilde kesilmiştir.

B. 4. Post-Cure (Son Kürlenme) ve Isıl Yaşlandırma

Hazırlanan kauçuk karışımlarının son kürlenme ve ısıl yaşlandırma prosesleri laboratuvar tipi yüksek yalıtımlı bir etüvde gerçekleştirilmiştir. Sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) testi için tüm numuneler, çekme testi için her bir hamurdan ikişer numune ve sertlik ile kalıcı deformasyon için yapılan takozların her birine ise 175°C'de 4 saat son kürlenme işlemi gerçekleştirilmiştir.

B. 5. Mekanik Karakterizasyon

B.5.1. Sertlik Testi

6 mm kalınlığındaki levhalardan kesilen silindirik örneklerin sertlikleri Loyka LX-A Shore A sertlik ölçüm cihazı ile ASTM D2240 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Her numune için ölçüm iğnesi

temas ettikten sonra 15 saniye bekleyerek ölçüm alınmış ve sonuçların ortalaması Shore A cinsinden verilmiştir.

B.5.2. Kalıcı Deformasyon Testi

16 mm çap ve 9 mm kalınlıkta silindirik şekilde kesilen örneklerin kalıcı deformasyon testleri TS ISO 815-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre numuneler test düzeneği yardımıyla kalınlıklarının %25'i oranında iki demir plaka arasında sıkıştırılarak, 22 saat boyunca 175°C'de etüv fırınında yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır.

B.5.3. Çekme-Kopma Testi

Vulkanize edilmiş ve 2 mm kalınlıkta papyon şeklinde kesilen numunelerin mekanik testleri, TS ISO 37 standardına uygun olarak Devotrans marka test cihazı ile yapılmış ve bu test ile malzemelerin kopma dayanımı ve kopma uzaması değerleri bulunmuştur. Her hamurdan, son kürlenme öncesi ve sonrası 2 numune ölçümü gerçekleştirilmiştir.

B. 6. Sınırlayıcı Oksijen İndeksi (LOI) Testi

Bu test ile normal hava sıcaklıklarında, malzemenin yanması için gereken minimum oksijen oranı belirlenir. 21 değer ve altındaki malzemeler normal havada yanabilirken bu değer daha üste çıkmasıyla alev geciktirme özelliği olduğu belirlenir. 100 mm x 10 mm x 4 mm boyutlarındaki kalıpta basılarak hazırlanan örneklerin LOI testi, TS EN ISO 4589-2 standardına uygun olarak Mares marka test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre, öncelikle her numunenin bir ucundan itibaren 5 cm ölçülerek işaret konur, bu 5 cm'lik kısım yukarıda alev maruz kalacak kısımdır. Tüpün içerisindeki aparata yerleştirilen LOI numunesine, pürmüz ile yukarıdan dikey olarak 30 saniye boyunca ve her 5 saniyede bir teması keserek alev püskürtülmektedir. Yanmaya başlayan numune 3 dakika içerisinde sönmez ya da işaret konulan 5 cm'lik sınırı geçerse bir alt oksijen değerine geçilerek tekrar deneme yapılır. 3 dakika içerisinde söner ve sınırı geçmez ise bir üst oksijen miktarına çıkılarak teste devam edilir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ACM kauçuğunun yanmazlık özelliklerinin artırılarak FKM kauçuğuna muadil olarak kullanılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda seçilen ACM'nin sahip olduğu fonksiyonel gruba uygun olan pişirici sistemi ile takviye edici dolgu olarak silika kullanılmıştır. Hazırlanan ACM ve FKM vulkanizatlarına reometre, yoğunluk, çekme-kopma ve LOI testleri uygulanmıştır.

A. VULKANİZASYON SİSTEMİ

Çoğu ticari akrilik kauçuk, düşük seviyede reaktif kürlenme gruplarına sahiptir. Piyasada bulunan tüm akrilik kauçuklar için evrensel bir kürlenme sistemi bulunmadığından, vulkanizasyon sistemleri reaktif grup tipi ile eşleşmelidir. Bu duruma ilişkin genel olarak, ACM kauçuğu için üreticisi uygun bir vulkanizasyon sistemi önermektedir. ACM'nin özellikleri, çoğu polimerde olduğu gibi, belirli ACM elastomer ailesinin polimer omurgasını oluşturan monomerlere bağlıdır. Bu elastomer ailesi ortak kürlenme gruplarına paylaşan ve aynı veya benzer kürlenme sistemi kullanılarak vulkanize edilebilen poliakrilat elastomerlerinin bir sınıfıdır. Kürlenme sistemini spesifik polimer kür grupları ile eşleştirmek gereklidir. Polimer üreticileri arasında kürlenme grupları farklılık gösterdiğinden, formülasyonda ek değişiklikler yapmadan matris kauçuklarını değiştirmek genellikle mümkün değildir. Fakat, aynı ailedeki poliakrilatlar, istenen fiziksel özellikleri elde etmek için karıştırılabilirler. Örneğin, yağa yüksek dayanım gösteren bir klor sınıfı, orta düzeyde bir yağ ve sıcaklık direnci dengesi elde etmek için düşük sıcaklık klor sınıfı bir poliakrilat ile karıştırılabilir [20].

Bu çalışmada da karboksil grubu içeren kürlenme gruplarına sahip ACM kauçuk, %50 oktadesiltrimetilamonyumbromür ve %50 ACM bağlayıcıdan oluşan ACP 5550 vulkanizatörü kullanılarak çapraz bağlanmıştır.

B. REOLOJİK ÖZELLİKLER

Hazırlanan ACM hamurları ile bu hamurları kıyaslamak için Shore A değeri 70 olan ve Mesgo'dan temin edilen FKM hamurunun (FKM-0) 185°C'de alınan minimum ve maksimum tork (ML ve MH), ön pişme süresi (t_{s2}) ve optimum pişme süresi (t_{90}) değerleri gibi önemli parametreleri içeren reometre verileri ile karışımlara ait yoğunluk değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

ACM'nin referans karışımı olan ACM-0 ile diğer ACM hamur karışımlarının reometre değerleri kendi aralarında kıyaslanırsa, yanmazlık özelliği sağlayan malzemelerin eklendiği tüm miktarlar için, karışım viskozitesiyle orantılı olan ML değerinde bir miktar yükselme görülmüştür. Yanmazlık özelliği sağlayan kimyasallar, aynı zamanda dolgu maddeleri de olduğundan viskozite artışının normal olduğu söylenebilir. Nitekim burada da %10'luk bir viskozite artışı gözlenmiştir. MH değerlerinde de artan dolgu miktarıyla doğru orantılı olarak az da olsa bir artış görülmüştür. Ön pişme süresi (t_{s2}) değerlerinde de bir artış söz konusudur. Bunun sebebi APP'nin pH değerinin 4 olmasından dolayı vulkanizasyona başlangıç yani ön pişme süresinin uzamasıdır. Optimum pişme süreleri (t_{90}) ise dolgunun etkisiyle yine uzamıştır. Sonuç olarak, kauçuk karışımlarına yanmazlık malzemeleri eklendiğinde reolojik özellikler üzerindeki dikkate alınabilecek tek etki t_{s2} sürelerinin artmasıdır. Fakat bu artış, üretim esnasında önemli bir farklılık oluşturmamaktadır. FKM-0 numunesinin reolojik özellikleri ise bu karışımın ACM hamur karışımlarına göre daha kolay ve hızlı işlenebilir bir malzeme olduğunu göstermiştir.

Tablo 2. Hazırlanan kauçuk karışımlarının reolojik özellikleri ve yoğunluk değerleri

Numuneler	ML (dN.m)	MH (dN.m)	t_{s2} (dk)	t_{50} (dk)	t_{90} (dk)	Yoğunluk (g/cm ³)
ACM-0	5,97	13,61	0:52	1:53	10:48	1,29
ACM-2-4	6,64	13,85	1:28	2:27	10:08	1,30
ACM-4-6	6,64	13,95	1:27	2:26	10:10	1,31
ACM-6-8	6,63	14,10	1:40	2:46	10:42	1,32
ACM-8-16	6,62	14,23	1:42	2:45	11:00	1,34
FKM-0	3,55	18,18	0:47	1:09	2:13	1,95

Yoğunluk test sonuçları incelendiğinde ise referans karışımına 2 phr melamin ve 4 phr APP eklenmesiyle yoğunluğun az da olsa arttığı görülmüştür. Bu artış, APP'nin yoğunluğu 1,5 g/cm³ ve melaminin yoğunluğu 1,57 g/cm³ iken ACM yoğunluğunun 1,1 g/cm³ olmasından kaynaklanmaktadır. Kauçuk reçetelerinde APP ve melamin miktarları arttıkça yoğunluklar da artmaya devam etmiştir. Fakat bu artış ne prosesi ne de kaliteyi etkileyecek düzeyde değildir. FKM'nin ise yoğunluğunun direkt yüzde 50 oranında fazla olduğu görülmektedir. Bu yoğunluğun fazla olmasının sonucu olarak, hali hazırda yaklaşık 3 kat pahalı olan FKM'nin, ACM ile aynı ürünü üretmek için miktar olarak 1,5 kat fazla kullanılması sonucu, aradaki maliyet farkı yaklaşık 4,5 kat olacaktır. FKM'nin bu durumda ACM'ye oranla, maliyetinin yaklaşık % 450 daha fazla olduğunu söylemek mümkündür.

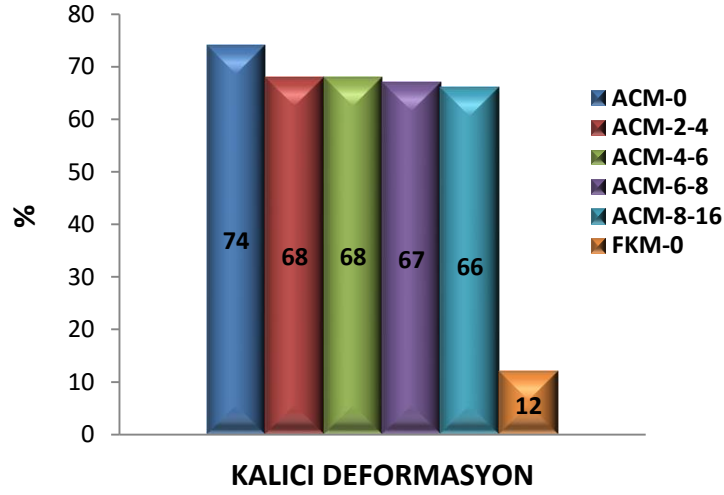
C. MEKANİK KARAKTERİZASYON

C. 1. Sertlik Testi

Hazırlanan ACM karışımları ile FKM bileşiminin son kürlenme öncesi ve sonrasına ait Shore A sertlik değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Buna göre tüm numunelerin son kürlenme sonrası sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Hazırlanan ACM numunelerinde ise yanmazlık sağlayan dolgu maddelerinin ilavesiyle artan rijitlik nedeniyle ACM-0’dan ACM-8-16’ya doğru, her bir numunede ortalama olarak 1 birimlik artış olduğu görülmüştür [21, 22].

C. 2. Kalıcı Deformasyon Testi

Yanmazlık sağlayan dolguların kauçuk karışımlarının kalıcı deformasyonu üzerindeki etkisini belirlemek ve için yapılan kalıcı deformasyon testi sonucunda FKM’nin uzun süreli sıkıştırma sonucunda FKM karışımının kalıcı deformasyon değerinin, hazırlanan ACM karışımlarına göre daha iyi olduğu görülmüş, sonuçlar Şekil 1 ve Tablo 3’te test sonrası görüntüler ise Şekil 2’de verilmiştir. ACM karışımlarında kullanılan küçük tanecik yapısındaki silika ve aynı zamanda pişirici miktarı kalıcı deformasyona etki etmektedir [23]. Hazırlanan ACM reçetelerinde, yanmazlık kimyasallarının kullanılmasıyla kalıcı deformasyon değerlerinin düştüğü, ACM-8-16 karışımında 8 phr melamin ve 16 phr APP kullanıldığında ise kalıcı deformasyonun yaklaşık %11 oranında iyileştiği saptanmıştır.



Şekil 1. Hazırlanan kauçuk vulkanizatlarının kalıcı deformasyon grafikleri

Tablo 3. Hazırlanan kauçuk vulkanizatlarının kalıcı deformasyon değerleri

Numuneler	Kalıcı Deformasyon (%)
ACM-0	74
ACM-2-4	68
ACM-4-6	68
ACM-6-8	67
ACM-8-16	66
FKM-0	12

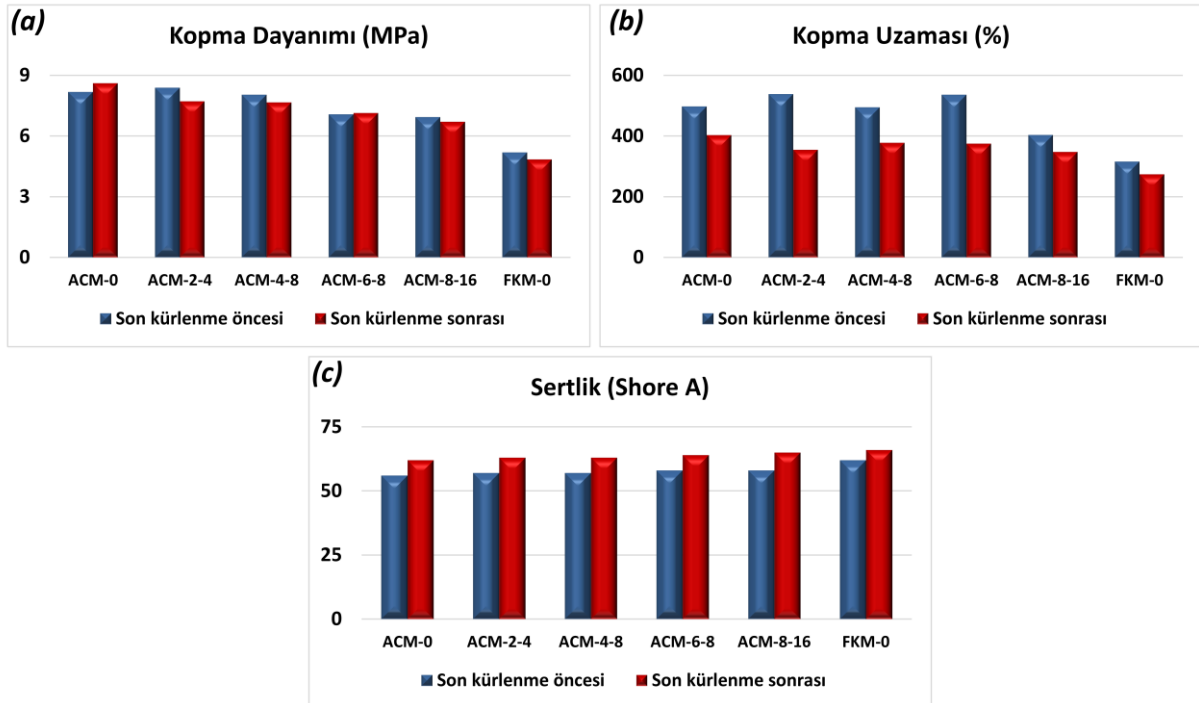


Şekil 2. Soldan sağa doğru sırasıyla ACM-0, ACM-2-4, ACM-4-6, ACM-6-8, ACM-8-16 ve FKM-0 numunelerinin kalıcı deformasyon testi sonrası yükseklik farklarının görüntüleri

C. 3. Çekme-Kopma Testi

Kauçuk vulkanizatların mekanik özelliklerini belirlemek için son kürlenme öncesi ve sonrası çekme-kopma ve sertlik testleri yapılmış ve sonuçların grafikleri Şekil 3'te verilmiş, veriler ise Tablo 4'te özetlenmiştir. Bu testlerde son kürlenme öncesinde vulkanizasyon tamamlanmamış olduğundan son kürlenme sonrası test verilerinin dikkate alınması daha sağlıklı olacaktır. Buna göre, ACM'nin yanmazlık dolguları içermeyen referans karışımı olan ACM-0 hamuru ile yanmazlık dolguları içeren diğer ACM hamurlarının kopma dayanımı ile kopmadaki uzama değerleri kıyaslandığında, 2 phr melamin ve 4 phr APP eklenmesiyle ACM-2-4 karışımının kopma dayanımında %10,5 ve kopma uzamasında %22,2 oranlarında, 8 phr melamin ve 16 phr APP ilavesiyle hazırlanan ACM-8-16 karışımının ise kopma dayanımında %11,9 ve kopma uzamasında %13,7 oranlarında düşüş olduğu görülmüştür. Yanmazlık sağlayan malzemeler de birer dolgu maddesidir. Mekanik özelliklerdeki düşüş, kauçuk matriste dolgu miktarının artmasıyla topaklanmaların da artmasına ve çapraz bağ yoğunluğunun azalmasına atfedilebilir.

Hazırlanan ACM ile FKM vulkanizatları kıyaslandığında, ACM vulkanizatlarının kopma dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerinin FKM vulkanizatlarından daha iyi olduğu belirlenmiştir. FKM-0 ile karşılaştırıldığında ACM-2-4 karışımının kopma dayanımı %59,4, kopma uzaması ise %29,7 oranında daha iyi iken ACM-8-16 karışımının kopma dayanımının %38,5, kopmadaki uzama değerinin ise %27,1 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Kopma uzamasındaki artışın nedeni, yapıdaki çapraz bağ yoğunluğunun azalmasıdır. Dolayısıyla, ACM esaslı kauçuk karışımlarının FKM'ye göre daha üstün mekanik özellik gösterdiği sonucuna varılabilir. Bu durumda mekanik özelliklerin önemli olduğu alanlarda FKM yerine ACM esaslı kauçuk karışımlarını kullanmak daha avantajlı olacaktır.



Şekil 3. Hazırlanan karışımların son kürlenme öncesi ve sonrasına ait (a) Kopma Dayanımı (MPa), (b) Kopma uzaması (%) ve (c) Sertlik (Shore A) grafikleri

Tablo 4. Hazırlanan karışımların son kürlenme öncesi ve sonrasına ait mekanik özellikler

Numuneler	Kopma Dayanımı (MPa)		Kopma Uzaması (%)		Sertlik (Shore A)	
	Son kürlenme öncesi	Son kürlenme sonrası	Son kürlenme öncesi	Son kürlenme sonrası	Son kürlenme öncesi	Son kürlenme sonrası
ACM-0	8,17	8,60	497	402	56	62
ACM-2-4	8,37	7,70	537	354	57	63
ACM-4-6	8,03	7,65	494	377	57	63
ACM-6-8	7,06	7,12	535	374	58	64
ACM-8-16	6,93	6,69	403	347	58	65
FKM-0	5,18	4,83	315	273	62	66



Şekil 4. Soldan sağa sırasıyla ACM-0, ACM-2-4, ACM-4-6, ACM-6-8, ACM-8-16 ve FKM-0 numunelerinin çekme testi sonrasındaki görüntüleri

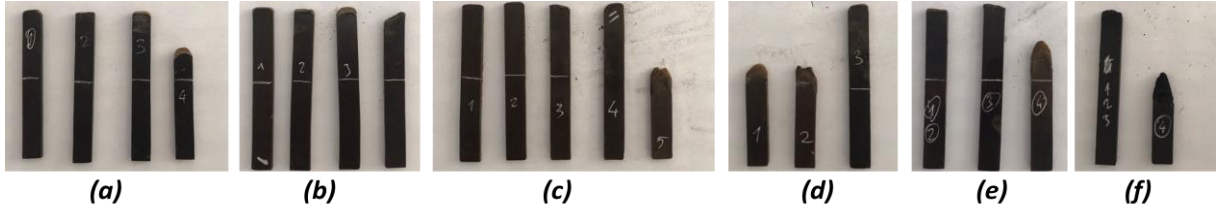
D. SINIRLAYICI OKSİJEN İNDEKSİ (LOI) TESTİ

LOI test sonuçlarına göre, hazırlanan kauçuk karışımlarına yanmazlık özelliği sağlayan melamin ve APP kimyasallarının eklenmesi ve ACM-0'dan ACM-8-16'ya doğru miktarlarının artmasıyla LOI değerlerinin kademeli şekilde arttığı görülmüştür. ACM-8-16 karışımının LOI değeri referans numunesine kıyasla %24 oranında artmıştır.

ACM'nin muadil olarak kullanılmak istendiği FKM karışımının LOI değeri ise Tablo 5'ten de görüleceği gibi 37,5-38,5 arasındadır. ACM karışımlarında en iyi LOI sonucunu veren ACM-8-16 ile FKM-0 karşılaştırıldığında, FKM-0 numunesinin LOI değerinin ACM-8-16'ya göre yaklaşık %12-13 oranla daha fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Hazırlanan kauçuk numunelerinin ortalama LOI değerleri

Numuneler	LOI Değerleri
ACM-0	27,0 – 27,5
ACM-2-4	28,3 – 28,5
ACM-4-6	30,0 – 31,0
ACM-6-8	31,3 – 31,6
ACM-8-16	33,5 – 34,1
FKM-0	37,5 – 38,5



Şekil 5. (a) ACM-0, (b) ACM-2-4, (c) ACM-4-6, (d) ACM-6-8, (e) ACM-8-16 ve (f) FKM-0 numunelerinin LOI testi yapıldıktan sonraki görüntüleri

IV. SONUÇ

Bu çalışmada matris olarak kullanılan ACM kauçuğuna farklı oranlarda yanmazlık özelliği sağlayan melamin ve APP maddeleri eklenerek FKM kauçuğuna muadil bir karışım hazırlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda hazırlanan kauçuk hamurlarının vulkanizasyonu sonucu elde edilen kauçuk vulkanizatlarının reolojik, mekanik ve yanmazlık özellikleri incelenmiştir.

Reometre verilerine göre kauçuk karışımlarına yanmazlık malzemeleri eklendiğinde ön pişme ve optimum pişme süreleri artmıştır. Fakat bu durum, üretim esnasında önemli bir farklılık oluşturmamaktadır. FKM-0 numunesinin reolojik özellikleri ise bu karışımın ACM hamurlarına göre daha kolay ve hızlı işlenebilir bir malzeme olduğunu göstermiştir.

Yapılan çekme testi sonucunda hazırlanan ACM vulkanizatlarının FKM karışımına oranla daha iyi mekanik özellik gösterdiği belirlenmiştir. Hazırlanan ACM ile FKM vulkanizatları kıyaslandığında, ACM vulkanizatlarının kopma dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerinin FKM vulkanizatlarından daha iyi olduğu belirlenmiştir. FKM-0 ile karşılaştırıldığında ACM-2-4 karışımının kopma dayanımı %59,4 ve kopma uzaması %29,7 oranında daha iyi iken ACM-8-16 karışımının kopma dayanımının %38,5, kopmadaki uzama değerinin ise %27,1 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, ACM esaslı kauçuk karışımlarının FKM'ye göre daha üstün mekanik özellik gösterdiği sonucuna varılabilir.

Hazırlanan numunelerin LOI testleri sonucunda yanmazlık özelliği sağlayan dolgu içermeyen referans örneğine kıyasla, ACM-8-16 karışımının LOI değeri %24 daha iyidir. FKM ile kıyaslandığında ise FKM-0 numunesinin LOI değeri ACM-0 karışımından yaklaşık %39-40 civarında daha yüksek iken,

yanmazlık özelliği sağlayan dolguların ACM reçetesine 8 phr melamin ve 16 phr APP olacak şekilde eklenmesiyle elde edilen ACM-8-16 karışımından yalnızca %12-13 oranla daha yüksektir.

Bu çalışmadaki asıl amaç FKM'nin yanmazlık özelliklerine yakın daha düşük maliyetli bir ACM formülasyonu geliştirmektir. Uygulanan testler sonucunda, ACM reçetesine 8 phr melamin ve 16 phr APP eklenmesiyle elde edilen ACM-8-16 karışımının yanmazlık özelliklerinin iyileşerek FKM'ye yaklaştığı, mekanik özelliklerinin ise FKM'den daha üstün olduğu görülmüştür. Dolayısıyla mekanik özelliklerin önemli olduğu alanlarda, iyileştirilmiş yanmazlık özelliklere sahip ve nispeten uygun maliyetli ACM esaslı kauçuk karışımları FKM'ye muadil olarak kullanılabilceği bulunmuştur.

V. KAYNAKLAR

- [1] P. Rybiński, G. Janowska, R. Dobrzyńska, and A. Kucharska, "Effect of halogenless flame retardants on the thermal properties, flammability, and fire hazard of cross-linked EVM/NBR rubber blends," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 115, pp. 771-782, 2014.
- [2] P. Rybiński, G. Janowska, M. Józwiak, and A. Pająk, "Thermal stability and flammability of butadiene–styrene rubber nanocomposites," *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 109, pp. 561-571, 2012.
- [3] P. Rybiński, R. Anyszka, M. Imiela, M. Siciński, and T. Gozdek, "Effect of modified graphene and carbon nanotubes on the thermal properties and flammability of elastomeric materials," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 127, pp. 2383-2396, 2017.
- [4] N. Nakajima and R. DeMarco, "Application of polyacrylate rubber for high performance automotive gaskets and seals," *Journal of Elastomers & Plastics*, vol. 33, pp. 114-120, 2001.
- [5] X. B. Yang, T. Lei, W. Lu, X. Huang, and L. Jiang, "Characterization and study of the vulcanization characteristics of ultra-cold-resistant reactive chlorinated acrylic rubber prepared by emulsion polymerization," *Polymer International*, vol. 72, pp. 189-194, 2023.
- [6] T. M. Vial, "Recent developments in acrylic elastomers," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 44, pp. 344-362, 1971.
- [7] E. Giannetti, R. Mazzocchi, L. Fiore, and E. Crespi, "Ammonium salt catalyzed crosslinking mechanism of acrylic rubbers," *Rubber chemistry and technology*, vol. 56, pp. 21-30, 1983.
- [8] B. Soares, D. Santos, and A. Sirqueira, "A novel thermoplastic elastomer based on dynamically vulcanized polypropylene/acrylic rubber blends," *Express Polymer Letters*, vol. 2, pp. 602-613, 2008.
- [9] J. Blair, "Fluorocarbons, polymers," *Enc Ind Chem Anal*, vol. 13, pp. 73-93, 1971.
- [10] R. Su, G. Liu, H. Sun, and Z. Yong, "A new method to measure the three-dimensional solubility parameters of acrylate rubber and predict its oil resistance," *Polymer Bulletin*, pp. 1-14, 2022.
- [11] H. L. Stephens and A. K. Bhowmick, *Handbook of elastomers*: Dekker New York, NY, USA, 2001.
- [12] I. Banik, A. K. Bhowmick, S. Raghavan, A. Majali, and V. Tikku, "Thermal degradation studies of electron beam cured terpolymeric fluorocarbon rubber," *Polymer degradation and stability*, vol. 63, pp. 413-421, 1999.

- [13] T. M. Aminabhavi, H. T. Phayde, J. D. Ortego, and W. M. Stahl, "Sorption and migration of aliphatic organic esters into VITON® fluoroelastomer membranes," *Journal of applied polymer science*, vol. 63, pp. 1223-1235, 1997.
- [14] M. A. Kader and A. K. Bhowmick, "Thermal ageing, degradation and swelling of acrylate rubber, fluororubber and their blends containing polyfunctional acrylates," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 79, pp. 283-295, 2003.
- [15] H. Kato, H. Adachi, and H. Fujita, "Innovation in flame and heat resistant EPDM formulations," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 56, pp. 287-298, 1983.
- [16] H. Zhang, Y. Wang, Y. Wu, L. Zhang, and J. Yang, "Study on flammability of montmorillonite/styrene-butadiene rubber (SBR) nanocomposites," *Journal of applied polymer science*, vol. 97, pp. 844-849, 2005.
- [17] K.-S. Lim, S.-T. Bee, L. T. Sin, T.-T. Tee, C. Ratnam, D. Hui, et al., "A review of application of ammonium polyphosphate as intumescent flame retardant in thermoplastic composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 84, pp. 155-174, 2016.
- [18] G. Fontaine and S. Bourbigot, "Intumescent polylactide: a nonflammable material," *Journal of applied polymer science*, vol. 113, pp. 3860-3865, 2009.
- [19] S.-H. Chiu and W.-K. Wang, "Dynamic flame retardancy of polypropylene filled with ammonium polyphosphate, pentaerythritol and melamine additives," *Polymer*, vol. 39, pp. 1951-1955, 1998.
- [20] A. O. Patil and T. S. Coolbaugh, "Elastomers: A literature review with emphasis on oil resistance," *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 78, pp. 516-535, 2005.
- [21] S. B. Acar, M. A. Tasdelen, and B. Karaagac, "The effect of POSS nanoparticles on crosslinking of styrene-butadiene rubber nanocomposites," *Turkish Journal of Chemistry*, vol. 47, pp. 417-425, 2023.
- [22] S. B. Acar, M. A. Tasdelen, and B. Karaagac, "Methacrylate-functionalized POSS influence on cross-linking and mechanical properties of styrene-butadiene rubber," *Iranian Polymer Journal*, vol. 30, pp. 697-705, 2021.
- [23] B. G. Soares, D. M. Santos, and A. S. Sirqueira, "A novel thermoplastic elastomer based on dynamically vulcanized polypropylene/acrylic rubber blends," *Express Polymer Letters*, vol. 2, pp. 602-613, 2008.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Tavlama Benzetimiyle Çözümünde Rassal Aramanın Katkısı

 Gökay Görkem GÜNDAY^{a,*},  Nilgün FİĞLALI^b

^a Endüstri Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı, , Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi Kocaeli, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gorkemgokayg@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1215635

Öz

Üretim yapılan bir işletmede üretim planlama ve çizelgeleme, mevcut kaynakların verimli olarak kullanılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bazı işletmelerde bu planlama ve çizelgeleme faaliyetlerinin başarısı bu faaliyetleri yapan kişinin öngörü ve deneyimlerini ne kadar kullanabildiğine bağlı olarak değişmektedir. Akış tipinde üretim yapan, birden çok ürün ve üretim ekipmanı bulunan ve farklı veya benzer rotalarda üretim yapan işletmelerde, işlerin manuel olarak çizelgelenmesi alternatif çözümlerin üretilmesi ve değerlendirilmesi sürecini zaman alıcı hale getirmektedir. Ayrıca çözümün optimum olma garantisi de bulunmamaktadır. Literatürde bu tür problemlerin optimum çözümü için çeşitli matematiksel programlama yöntemleri kullanılmaktadır. Problemdeki kısıtların, iş ve makine sayılarının artması durumunda makul sürede optimum veya optimuma yakın sonuçların elde edilmesi amacıyla sezgisel ve metasezgisel yöntemlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ilaç üretimi gerçekleştiren bir işletmedeki akış tipi çizelgeleme probleminin çözümü tavlama benzetimi yöntemiyle yapılmakta ve rassal arama süreçlerinin yöntem performansına etkileri incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tavlama Benzetimi, Rassal Arama, Akış Tipi Çizelgeleme, İlaç Sektörü

Contribution of Random Search on the Solution of Flow-Shop Scheduling Problems by Using Simulated Annealing

ABSTRACT

Production planning and scheduling is very critical to use existing sources most efficiently in the production facilities. Many of the production facilities the performance of the planning and scheduling is based on the person how much using of foresight and experiences. The scheduling of works and creating alternative solutions on the production facility which has flow type production and has many products, production equipment and different production routes, by manually takes too much time. Moreover the solution is not guaranteed a optimum solution. There is a lot of various mathematical programming techniques are used on the previous studies. If the number of constraints, work and machines are increased the heuristic or meta heuristic techniques are need to be used for obtain optimum or close to optimum results with acceptable time. In this paper the solution of production scheduling is done with simulated annealing and the random search process performance impact is researched on the pharmaceutical company which has flow type production.

Keywords: Simulated Annealing, Random Search, Flow-Shop Scheduling, Pharmaceutical industry

I. GİRİŞ

Kullanıcı ihtiyaçlarının günden güne çeşitlenerek artması, teknolojideki gelişmeler işletmeler arasındaki rekabeti daha zor olmasına neden olmuştur. İşletmeler değişen kullanıcı ihtiyaçlarını en hızlı ve en düşük maliyetlerle karşılayarak rekabet güçlerini arttırmayı hedeflemektedirler. Rekabet gücünü sürdürmek isteyen işletmelerde üretim alanlarında birden çok farklı kaynak ve üretim rotası kullanılmaktadır. Birden çok ürün, kaynak ve üretim rotasının olduğu karmaşık problemlerin çözümünde de yeni yöntemler sürekli araştırılmaktadır. Bir üretim işletmesinde genel amacı işi zamanında teslim etmek, üretimde işlem görmeyi bekleyen ara stokları mümkün olduğunca azaltmak, işin sistemdeki kalış süresini azaltmak, kaynakları verimli kullanmak, işi istenilen kalitede yapmak, makine hazırlık zamanlarını azaltmak ve üretimde işçi maliyetlerini azaltmak olarak sıralanabilir. Üretimin verimli olmasını sağlayan bu temel amaçların gerçekleşmesinde çizelgelemenin çok önemli rolü vardır.[1] Üretim sistemleri incelendiğinde çizelgeleme açısından beş farklı sınıflandırmanın yapılabileceği görülmüştür. Bu beş farklı sınıf sırasıyla, proje planlaması, tek/paralel/atölye tipi çizelgeleme problemleri, otomatik malzeme transferine odaklanmış, lot çizelgeleme modelleri, tedarik zinciri çizelgeleme modelleridir.

Yukarıda sıralanan beş listeden ikinci tip çizelgeleme modelleri tek makine, paralel makine ve atölye tipi üretimleri içermektedir. Tek makine veya paralel makine problemlerinde işler herhangi bir makinede yapılabilmektedir. Atölye tipindeki işler çizelgelenirken toplam tamamlanma süresini en küçük olması, geciken siparişlerin sayılarını en az olması gibi bir veya daha fazla amaç optimize edilmektedir. Genellikle özel donanımların üretiminin yapıldığı üretim sektörlerinde yaygın olarak görülür. Atölye tipi imalatta her işin aynı rota ile ilerlediği durumlarda – örnek olarak bütün işler önce 1 numaralı makinada sonra 2 numaralı makinada işlem görmesi – akış tipi atölye olarak adlandırılmaktadır.

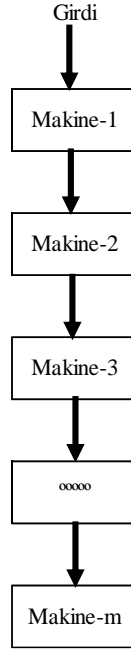
II. AKIŞ TİPİ ÇİZELGELEME

Akış tipi çizelgeleme problemlerinde n-adet işlerin, m-adet makinelerde işlem görmesi, bütün işlere ait alt işlerin de aynı sıra ile yapıldığı çizelgelemedir. Bu çizelgeleme türünde her iş m-adet alt işlemden oluşmaktadır ve her işlem için bir adet makine ataması yapılmıştır. -Akış tipi çizelgeleme problemi, belirli bir performans ölçüsüne göre her bir makine için işlerin sıralamasını bulur. Teknolojik kısıtlar, işlerin aynı makine sırasından geçerek işlenmesini gerektirebilir. Ayrıca, birçok durumda her bir makine için işlerin sıralamasının aynı olduğu, n işin makine üzerinde aynı sırada işlem gördüğü kabul edilmektedir [2]. İşlem basamakları arasında atlanan bir basamak var ise süresi sıfır olarak ataması yapılır. Böylelikle o işin ilgili basamakta bulunan makinede işlem görmediği anlaşılabilir. Bu tip üretimde ürün çeşitliliği atölye tipi üretime göre nispeten daha azdır.

Akış tipi çizelgeleme için daha ileri varsayımlar mevcuttur. Bu varsayımlardan şöyle sıralanabilir: [3]

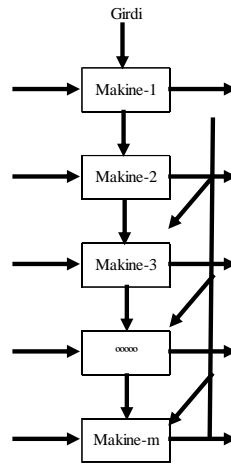
- İşler aynı anda sadece bir makinede işlem görebilir
- İşlerin alt operasyonları önceden yapılamaz, $t=0$ anında işler ilgili makinede işlem görmeye başladıktan sonra belirlenen sırayla işlemler tamamlanır.
- $t=0$ anında işlerin hepsi işlem görmesi için hazır durumdadır.
- Operasyonların gerçekleştirilmesi için makine hazırlık süreleri işlem sırasından bağımsızdır. Bu hazırlık zamanları işlem sürelerine eklenmiştir.
- Makinelerin hazırlık süreleri sıralamadan bağımsızdır.
- Akış içerisinde stoka izin verilir

Akış tipi üretimin de kendi içerisinde farklı tiplerini görmek mümkündür. Saf akış tipi üretimde, tesiste “m” sayıda makine, her işte “m” sayıda operasyon vardır ve operasyonların hepsi farklı bir makineye ihtiyaç duyar. Saf akış tipi üretimin genel gösterimi Şekil 1’de görülebilir. [4]



Şekil 1. Akış Tip Üretim Genel Gösterimi

Birçok üretim tesisinde Şekil-1'deki gibi akış tipi üretim görülememektedir. Bunun yerine genel akış tipindeki üretimler daha çok görülmekte olup, genel akış tipindeki üretimlerde işlerin hepsi m-adet iş istasyonunda işlem görmek zorunda değildir. İşlerin operasyonları ardı sıra makinelerde olmayabilir veya ilk ve son operasyonları işler arası farklılık gösterebilir. Farklılıkların olması işin akışı doğrusallığını bozmamaktadır. Fakat saf akış tipine göre olan bu farklılıklar, işlerin bazı operasyonlarının işlem süreleri değerlerine sıfır değeri verilerek çözülebilir. [5]



Şekil 2. Doğrusal Olmayan Akış Tipi Üretim Gösterimi

Akış tipi üretimde işlemlerin m işlem görerek üretiminin tamamlanması sırasında işlerin art arda makinelerin hepsinde ve makinelerin hepsi için aynı sırayla işlem görüp görmemesi kriterine göre iki gruba ayrılır, permutasyon tipi akış problemleri ve esnek akış tipi üretim.

Permutasyon tipi akış problemi, makineler arasında iş sırası değişikliği yapılamayan akış tipidir. [6] Bu akış tipinde her makinedeki iş sıraları karşılaştırıldığında birbiri ile aynı olduğu görülür. Yani tüm makinelerde uygulanan kural ilk giren ilk çıkar kuralıdır (FIFO). Permutasyon akış tipi üretim genellikle makinelerin arasında malzeme taşıma sistemlerinin olduğu seri üretim tesislerinde görülür. [7]

Bu tip problemler bir makine çizelgeleme problemleri ile benzer olduğu için (n!) kadar farklı çizelgeleme sayısı mevcuttur, n farklı iş kendi içinde sıraya konur ve tüm makinelerde bu sıra içinde işler üretimini tamamlar.

Esnek akış tipi üretim; paralel makine üretim ortamıyla akış tipi üretim ortamının birleşiminden oluşan bir üretim ortamıdır. [8] Bu şekilde üretimin olduğu sistemlerde akış şekline göre daha genelleşmiş bir makine yerleşimi vardır. Belirli adette paralel makineler bulunduran alt operasyonlar birbirlerine sıralı şekilde bağlıdır. Bu şekilde oluşturulan üretim ortamında genel akış tipi üretim sistemindeki gibi işlerin belirli operasyonları bir veya birden fazla makinede işlem görmeyebilir. İşlerin akış içindeki makinelerde işlem görmediği durumlarda işlem süreleri sıfır olarak gösterilir. Permütasyon akış tipindeki gibi her makinede aynı iş sırasının izlenmesi gibi bir kısıt mevcut değildir.

Akış tipi çizelgeleme problemleri genellikle üretim sistemlerinde en çok görülen uygulamalardandır. Esnek akış tipi üretim çizelgeleme problemleri bir makine çizelgeleme problemi ve NP-hard veya NP-complete problemler olduğu kanıtlanmıştır. [9] Bu tip problemlerin çözümünün araştırılmasında metasezgisel yöntemler ise sıklıkla kullanılmaktadır. Metasezgisel yöntemler optimal sonucun bulunmasını garanti edemezler ama genellikle optimal sonuca yakın değerlere ulaşmaktadırlar.

Sayın ve Karabatı [10] iki-makine akış tipi çizelgeleme problemlerinde son işin tamamlanma zamanı (Cmax) ve işlerin ortalama tamamlanma zamanı (C) ölçütlerini eş zamanlı değerlendiren dal-sınır algoritması geliştirmişlerdir. İki makine probleminde, Toktaş ve arkadaşları [11] Cmax ve en büyük erken bitirme (Emax), Liao ve arkadaşları [12] ise Cmax ve geciken işlerin sayısını (nT), Cmax ve işlerin gecikme zamanları toplamı (PT) ölçütleri için dal-sınır algoritmaları sunmuşlardır. Çok makineli çizelgeleme problemlerine ilişkin yapılan çalışmalarda ise Daniels ve Chambers [13] ve Chakravarthy ve Rajendran [14] Cmax ve işlerin en büyük gecikme zamanı (Tmax) ölçütlerinin ağırlıklı toplamını dikkate alan çalışmalar sunmuşlardır. Ravindran ve arkadaşları [15] Cmax ve işlerin toplam akış zamanları toplamı (PF) ölçütlerini es zamanlı eniyileyen üç farklı sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Aynı problem için Pasupathy ve arkadaşları [16] Pareto dereceleme temeline dayanan çok amaçlı genetik algoritma sunmuşlardır. Loukil ve arkadaşları [17] iki amaçlı çizelgeleme probleminde ağırlıklı toplam yaklaşımıyla oluşturulan etkin çözümleri tavlama benzetimi algoritmasını kullanarak belirlemişlerdir. Varadharajan ve Rajendran [18] akış tipi çizelgeleme probleminde Cmax ve PF amaçlarının es zamanlı eniyileyen iki aşamalı tavlama benzetimi algoritması sunmuşlardır. Yagmahan ve Yenisey [19] aynı problem için çok amaçlı karınca kolonisi algoritması geliştirmişlerdir.

Literatür araştırması yapıldığında çalışmaların genellikle iki makine ve iki ölçütlü olduğu, çözüm araştırmasında ise metasezgisel yöntemlere sıklıkla başvurulduğu görülmektedir. Metasezgisel yöntemler çözüm uzayını etkin bir şekilde aramayı sağlayacak temel sezgisel yöntemleri birleştirmeye çabalayan yeni yaklaşık yöntemlerinin geliştirilmesidir. [20] Metasezgisel yöntemler arama sürecine rehberlik eden stratejilerinde amaçlanan her defasında en iyi ya da en iyiye yakın çözümleri bulmak için çözüm uzayını hızlı bir şekilde taramaktadır. Metasezgisel yöntemler basit yerel arama algoritmalarından karmaşık hızlı öğrenme süreçlerine kadar birçok farklı uygulamayı içermektedir, bu uygulamaların hepsinde ortak özellik ise elde edilen çözümler deterministik değil yaklaşık algoritmalarlardır. Metasezgisel yöntemler farklı metodlar ile çözüm uzayını araştırmakta ve kabul edilebilir bir işlem süresi içinde elde edilen en iyi çözümü karar vericiye yön göstermesi veya uygulaması için sunmaktadır.

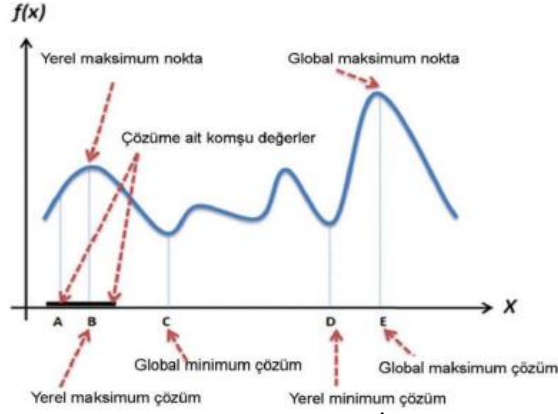
III. TAVLAMA BENZETİMİ

Bu çalışmada kullanılan Tavlama benzetimi algoritması, eniyileme problemlerinin çözümü için geliştirilmiş yerel arama algoritmalarından biridir. Algoritma, metalürji ve malzeme bilimlerinde, belirli bir malzemenin sertlik ya da güç gibi özelliklerinin, ısı ile değiştirilmesine dayanan tavlama süreci ile kombinatoryal eniyileme problemleri arasında bir benzerlik kurarak, eniyileme problemlerine çözüm getirmeyi amaçlar. [21] Yoğun madde fiziğinde, tavlama, bir katının ısı banyosunda düşük enerji durumlarının elde edilmesini sağlayan termal süreç olarak tanımlanmaktadır. Süreç, ısı banyosunun sıcaklığının, katının eriyeceği maksimum sıcaklık değerine yükseltilmesi ve tanecikler en düşük enerji seviyeli duruma gelinceye dek, ısı

banyosunun sıcaklığının dikkatlice azaltılması şeklinde iki adımdan oluşmaktadır. [22] Benzetilmiş tavlama algoritmasında, sıcaklığın kontrollü bir biçimde azaltılması ile küresel en iyinin bulunabilmesi olanaklıdır. [23] Benzetilmiş tavlama algoritması, bir başlangıç çözümünün ve sıcaklığının belirlenmesi ile başlayan ve yeni çözümlerin oluşturulması, değerlendirilmesi ve sıcaklığın uyarlanması ile devam eden bir süreçtir. Tavlama benzetimi ile elektronik devre tasarımı, görüntü işleme, yol bulma problemi, gezgin satıcı problemi, malzeme fiziği simülasyonu, kesme ve paketleme problemi, akış çizelgeleme ve iş çizelgeleme problemlerinin çözümlerinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tavlama benzetimi algoritmasında yeni çözümler rastgele veya önceden belirlenmiş kurallara göre gerçekleşmektedir. Yapılan her tekrarda elde edilen geçmiş çözümler ile yeni elde edilen çözümler karşılaştırılmaktadır. Global en iyi sonucun bulunabilmesi için sadece mevcut çözümleri iyileştiren yeni çözümler değil, mevcut çözümü iyileştirmeyen yeni çözümlerin bir kısmı da kabul edilmelidir. Mevut çözümü iyileştirmeyen yeni çözümlerin kabul edilme olasılığı sıcaklık parametresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. [24] Tavlama benzetimi algoritması, geleneksel algoritmalar ile en iyi çözümü bulmanın zor ya da olanaksız olduğu durumlarda çözüm üretebilmekte, doğrusal olmayan sistemlerle, düzensiz ve gürültülü verilerle ve birçok kısıt ile çalışabilmektedir. [25]

İlaç üretim sektörü yapı itibarıyla ülkemizde hızlı tüketim ürün grubuyla benzer özelliklere sahiptir. Rakip firmaların anlık satış stratejilerini değiştirmesi, anlık kampanyalar, mevsimsel hastalıkların artması ve azalması, satış ve üretimde hızlı dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu dalgalanmalardan dolayı ürünlerin çizelgelemesine başlanmadan önce işler arasında kesin bir öncelikten söz edilebilmesi mümkün değildir. Üretim çizelgeleme faaliyetinden önce kesinleşen bir öncelik mantığını oturtup ürünlerin bu önceliğe göre çizelgelenmesi mümkün değildir. Anlık değişen ürün taleplerine göre çizelgelemenin yeniden gözden geçirilmesi, değişikliklerin uygulanması gerekmektedir. Bu değişikliklerin uygulanması sürecinde ise ilaç üretimine ve işletmeye özgü kısıtların yönetilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ilaç üretimi yapan bir işletmede çizelgeleme problemlerinin çözüm araştırmasında tavlama benzetimi özellikle seçilmiştir. Sıcaklık düşürüldükçe işlerin sıralaması değiştirilerek alternatif çözümler oluşturulmakta ve bu çözümler arasında işletme içinde değişen farklı önceliklere göre uygulanabilir olan çözümü araştırmak daha kolay olmaktadır. Tavlama benzetimi ile en kısa tamamlanma süresini araştırırken işler arasında herhangi bir sıralama önceliği bulunmamaktadır. Sadece toplam tamamlanma zamanını en küçük yapan iş sıralaması araştırılmaktadır. Çizelgeleme öncesinde işlerin birbirleri arasındaki önceliği çalışmanın yapıldığı işletme bilmemektedir. İlaç işletmesinde üretim planlama departmanı çalışanları toplam tamamlanma zamanı en küçük olan çözümü her zaman olduğu gibi kullanmak istemedikleri ve pazarın hızlı değişimine ait deneyimlerini de kullanarak en kısa tamamlanma süresi çözüme yakın diğer alternatifler arasından seçim yapmak istediklerini belirtmiştir. Bu talep çalışmanın yapıldığı işletmeye özgüdür. İşletme çalışanları tavlama benzetiminin bulunduğu en küçük toplam tamamlanma süresine yakın olan diğer komşu çözümlerde, işletmenin o anki satış stratejisine göre daha uygun bir iş sıralaması olup olmadığına bakarak karar vermektedirler. Kimi zaman bulunan en iyi çözüm yerine alternatif çözümlerin iş sıralaması kullanılmaktadır. Daha detaylı açıklamak gerekirse tavlama benzetimin bulunduğu en iyi çözüm yerine, işletmenin pazarlamada görmüş olduğu o anlık tepkilerden ötürü en iyi çözüme yakın alternatif diğer iş sıralamalarından uygun olanını seçmektedir. Bu alternatif seçim uygulamasının kolaylıkla yapılabileceği işlerin sıralamasında her defasında sadece bir adet değişikliğin yapıldığı çözümler arasında geçişi hızlı bir şekilde sağlayabilecek yöntem tavlama benzetimi olduğu için uygulamada tavlama benzetimi kullanılmıştır. Günümüzde, rekabetin yoğun bir şekilde yaşandığı iş ortamı, işletmeleri optimum fakat yavaş olan bir çözüm yerine, hızlı ve kabul edilebilir bir çözüm bulmaya yönlendirmektedir.[26] Çalışmanın yapıldığı işletme için de aynı durum geçerlidir, işletme uzun sürede elde edilen optimum çözümler yerine kısa sürede ulaşılan daha kolay uygulanabilir çözümleri tercih etmektedir.

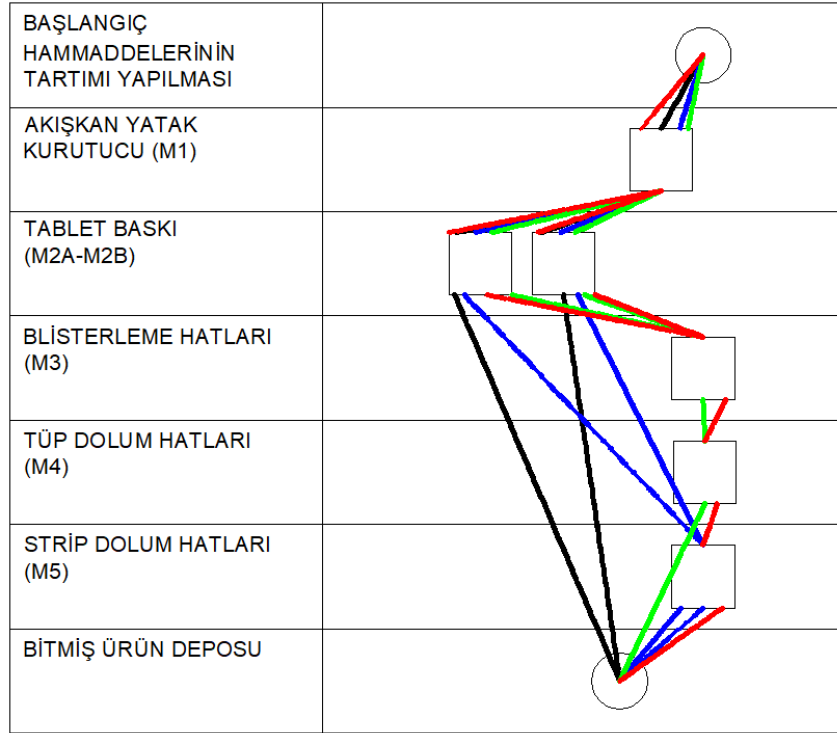


Şekil 3. Genel ve Yerel En İyi

Şekil-3’de gösterildiği gibi tavlama benzetimi algoritması genel en iyiyi bulmak için çalışmakta, optimizasyon algoritmalarındaki kavramları da göstermektedir. [27] Bu araştırma sürecinde bulmuş olduğu yerel en iyi çözümler ise işletmenin pazarlama stratejisine göre kimi zaman daha uygulanabilir ve daha önemli olmaktadır. Yerel en iyi ile elde edilen işlerin sıralaması çizelgeleme dönemi içindeki pazarlama stratejisine daha uygun ise çözüm olarak yerel en iyi kullanılmaktadır. Bu çözümler arasından geçiş farklılığı tavlama benzetimi kullanımının daha etkili olmasını sağlamış, işletme içinde çizelgeleme yapan çalışanlara karar desteği sağlamıştır.

IV. UYGULAMA

Bu çalışmada beşeri ilaç üretimi yapan bir üretim işletmesindeki üretim rotaları kullanılmış, üretim süreleri işletme tarafından paylaşılmadığı için test verileri ile çalışma tamamlanmıştır. İlaç üretiminde çizelgeleme yapılırken diğer üretim sektörlerinde kullanılmayan bazı kısıtlar da kullanılmaktadır. İlaç üretimini diğer üretim sistemlerinden ayıran önemli bir özellik, ayar ve temizlik sürelerinin bulunmasıdır. Her ürün için önceden belirlenmiş temizlik süreleri vardır. Aynı üründen belirli bir süre üretim yapıldıktan sonra, temiz kalma süresi aşıldıysa, temizlik çalışması yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılması gereken çalışma; üretimin yapıldığı alan ve bu alandaki ekipmanlarda genel temizlik yapılmasıdır. Üretime başlayabilmek için makinaların yeniden ayarlanması gerekmektedir. Benzer şekilde bir üretim makinasında bir üründen farklı bir ürüne geçildiğinde yine temizlik işleminin yapılması ve ayar çalışması yapılması gerekmektedir. Bu sürelerin ise ürüne bağlı olarak değiştiği bilinmektedir.



Şekil 4.İlaç Üretim Süreci

Çalışmanın yapıldığı işletmedeki ilaç üretim süreci Şekil-4’de verilmiştir. Her farklı renk farklı bir üretim rotasını temsil etmekte olup ilgili satırdaki fazladan çizilmiş kareler paralel makineleri göstermektedir. Uygulamanın yapıldığı fabrikanın üretiminde beş farklı makine ve yedi farklı iş bulunmakta olup, iki numaralı makine paralel makinedir. Çizelgelemesi yapılacak yedi farklı işin üretim rotası ise Tablo 1’de verilmiştir. Tablodaki M1 makinesi Şekil-4’deki akışkan yatak kurutucuya, M2A ve M2B ise tablet baskı makinesi, M3 blisterleme hattı, M4 tüp dolun hattı ve M5 ise strip dolun hattını göstermektedir.

Tablo1.İşlere Ait Üretim Rotası

ROTA Bilgisi	1	2	3	4	5	6	7
M1	1	1	1	1	1	1	1
M2A	2	2	2	2	2	2	2
M2B	2	2	2	2	2	2	2
M3	0	0	3	0	3	3	0
M4	0	0	4	0	4	4	0
M5	0	3	0	0	0	5	0

Yukarıdaki tabloda görülebileceği gibi Makine 2A ve Makine 2B’de tüm ürünler işlem görmektedir Bu iki makine birbiriyle tamamen aynı özelliklere sahip olduğu için üretim çizelgelemesine göre hangi makine boş ise bu makinede işlem görebilmektedir. Yani paralel makinelere iş ataması yapılırken öncelikle hangi paralel makine boş ise ona iş ataması yapılmaktadır. İşlerden 1-4-7 numaralı işler sadece M1,M2A ve M2B’de işlem görmektedirler. İşlerden 3-5 numaralı işler M1,M2A,M2B,M3 ve M4’de işlem görmektedirler. İki numaralı iş ise M1,M2A,M2B ve M5’de işlem görmektedir. Altı numaralı iş ise M1,M2A,M2B ve M4 ve M5’de işlem görmektedir. Yukarıdaki tabloda belirtilen üretim rotasına göre sıfır değeri olmayan her hücre için belirli bir üretim süresi olmalıdır. Bu süreler ise işlerin makineye atanması durumunda ne kadar sürede tamamlanacağını göstermelidir. Tablo 2’de üretim rotası ile örtüşen üretim süreleri verilmiştir.

Tablo 2.İşlere Ait Üretim Süresi

İşlem Süreleri	1	2	3	4	5	6	7
M1	18	25	40	22	25	25	22
M2A	15	30	80	60	10	18	22
M2B	15	30	80	60	10	18	22
M3	0	0	40	0	50	22	0
M4	0	0	22	0	14	8	0
M5	0	10	0	0	0	12	0

Tablo 1 ile Tablo 2'ye bakıldığında sıfır değeri olan hücrelerin değişmediğini görülmektedir. İşlerin makinelere atanması durumunda ilgili işin tamamlanması için gerekli olan işlem süresi belirtilmiştir. İncelenen problem her makineye aynı anda bir adet iş atanacak şekildedir. Atanan işin tamamlanacağı süre boyunca ilgili makine çalışıyor ve çalışma süresi tamamlanana kadar yeni bir işe başlayamayacağı anlamına gelmektedir. Tablo 3'de ise herhangi bir makinede üretilen herhangi bir işten diğer işe geçildiğinde yapılması gereken ayar işlemlerinin süresi verilmiştir. İlaç üretiminde kullanılan farklı hammaddelerden dolayı makine ekipmanlardaki temizlik süresini üründe kullanılan hammaddeye göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla ürünler arasında yapılan ayar ve temizlik işlemlerinde süreler makinelerin özelliklerine göre değil üründe kullanılan hammadde ve temizlik yöntemine göre değişmektedir. Dolayısıyla üretimde kullanılan ekipmanların ne olduğundan bağımsız olarak makinede çalışılan bir önceki ve bir önceki işe göre ayar süreleri değişmektedir. Örnek olarak herhangi bir üretim makinesinde 3 numaralı iş üretildikten sonra 6 numaralı işe geçiş yapılacak ise 36 birimlik bir ayar çalışması yapılmalıdır.

Tablo3. Ürünler Arasındaki Ayar Süreleri

Ayar Süreleri	1	2	3	4	5	6	7
1	10	12	13	14	15	16	17
2	21	20	23	24	25	26	27
3	31	32	30	34	35	36	37
4	41	42	43	40	45	46	47
5	51	52	53	54	50	56	57
6	61	62	63	64	65	60	67
7	71	72	73	74	75	76	70

Tablo 4'de ürünlerin herhangi bir üretim makinesinde temizlik yapılmadan en fazla ne kadar süre üretilebileceğini göstermektedir. Bu süre temiz kalma süresi olarak tanımlanmakta, bu süreden daha uzun sürelerde iş ataması yapıldığında ilave temizlik ve ayar işlemleri yapılmaktadır. İlaç üretiminin diğer üretim sektörlerinde ayıran diğer bir özellik de işlerin lotlar halinde üretime verilmesi ve lotların bölünmeden üretime devam edilmesidir. Örnek olarak 4 numaralı işten talep edilen üretim miktarı 14br lot olduğunu kabul edelim. Üretilmesi gereken 14br lot üretim akışına göre sırasıyla üretimi tamamlanmalı, iş sıralamasına göre 4 numaralı iş tamamlandıktan sonra ilgili makinede sıradaki işe geçilebilir. Üretilmesi gereken 14br lot farklı şekillerde bölünerek üretilmemektedir. Üretilen ürünün adetleri ise her ürün için sıralamasıyla şu şekildedir, 11/12/13/14/15/16/17.

Tablo4. Ürünlerin Temiz Kalma Süreleri

	1	2	3	4	5	6	7
Temiz Kalma Süreleri	101	102	103	104	105	106	107

Paralel makinelere ait örnek iş atama sonucu Tablo 5'de verilmiştir. İşlerden numarası 2-4-5-6 M2A makinesinde işlem görecektir iken, 1-3-4-7 numaralı işler ise M2B makinesinde işlem görecektir. Bu tablo herhangi bir çözümden rassal olarak seçilmiştir, farklı çözümlerde farklı atamalar gerçekleşmektedir.

Tablo5. Paralel Makine İş Atamasına Ait Örnek

	1	2	3	4	5	6	7
M2A	0	1	0	0	1	1	0
M2B	1	0	1	1	0	0	1

Kullanılan tavlama benzetimin çalışma algoritması şu şekildedir;

Adım-1:

- Problem verilerini, parametreleri oku
- Başlangıç çözümünü oluştur.
- Başlangıç çözümünün amaç fonksiyonun değerini hesapla.

Adım-2:

- Başlangıç çözümünü en iyi çözüm olarak ata.
- Başlangıç çözümünün amaç fonksiyon değerini en iyi çözüm değeri olarak ata.

Adım-3

- Başlangıç çözümünü kullanarak, komşu çözümleri üret.
- Komşu çözümü üretmek için başlangıç çözümündeki işlerin sıralamasındarassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.
- Yeni yer değiştirme ile elde edilen iş sıralamasında rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.
- Yeni yer değiştirme ile elde edilen iş sıralamasında rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.
- Yeni yer değiştirme ile elde edilen iş sıralamasında rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.

-Dört farklı komşu çözümlerin amaç fonksiyonu değerini hesapla.

-Sıcaklığı düşür.

Adım-4:

-Komşu çözümlerden elde ettiğin en iyi sonuç başlangıç çözümünden daha iyi ise bulduğun çözümü kayıt et, amaç fonksiyonu değerini hesapla ve en iyi çözüm değeri olarak ata.

-Değil ise

Rassal sayı üret,

üretilen rassal sayı $<$ üstel (-kriter/T) ise komşu çözümündeki işlerin sıralamasını mevcut çözüm olarak güncelle ve Adım-5'e git.

üretilen rassal sayı $<$ üstel (-kriter/T) koşulu sağlanmıyor ise başlangıç çözümünü kullanmaya devam et. Adım-6'ya git.

Adım-5:

-Komşu çözümü mevcut çözüm olarak güncelle.

-Komşu çözümün amaç fonksiyonu değerini mevcut çözümün amaç fonksiyonu değeri olarak belirle.

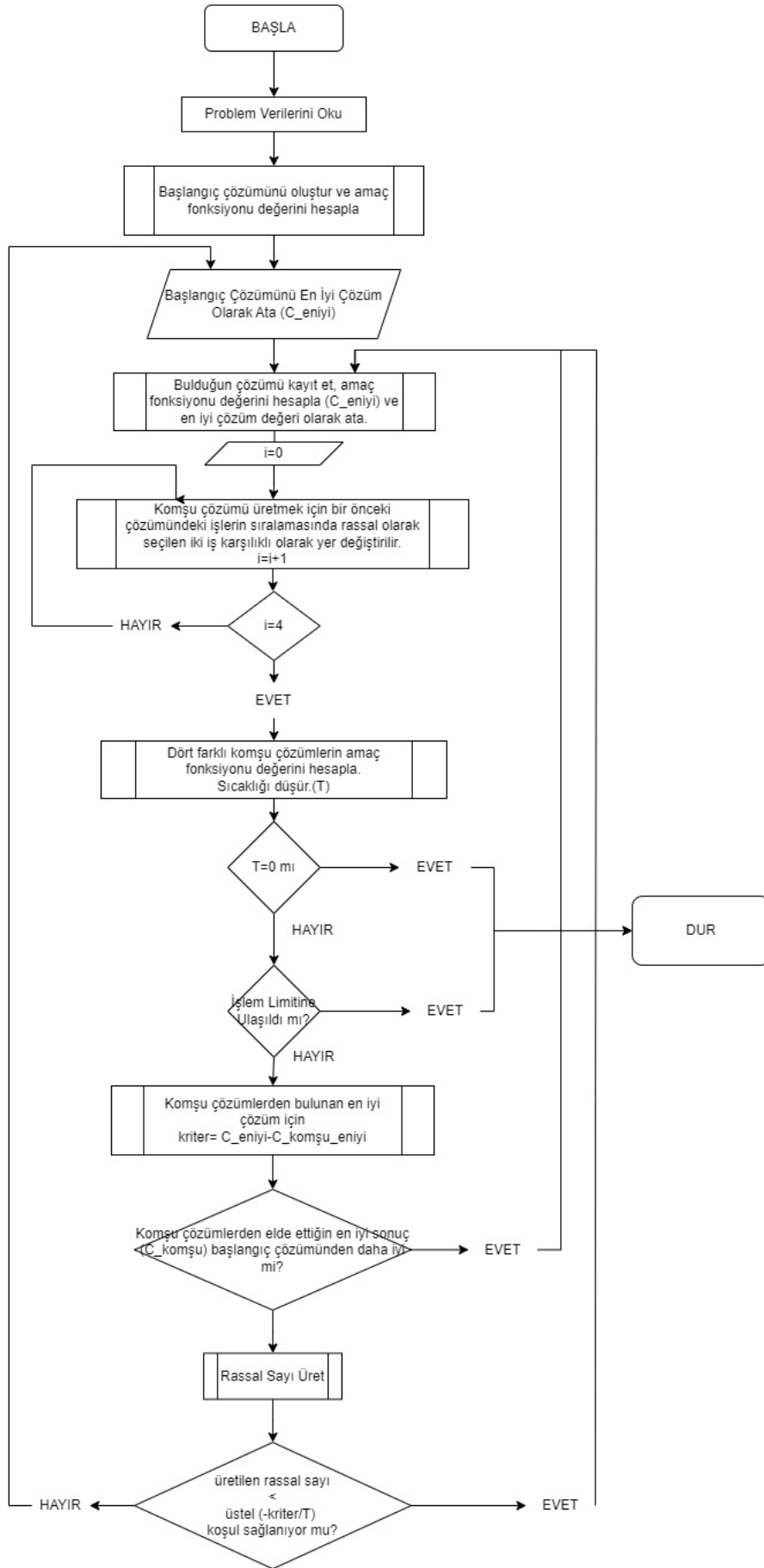
Adım-6

-Sıcaklık 0 değil ve toplam işlem sınırı limit değere ulaşmadıysa Adım-3'e git.

-Sıcaklık 0 veya toplam işlem sınırı limit değere ulaştıysa Adım-7'ye git.

Adım-7

-Algoritmayı durdur, en iyi çözüm ve en iyi çözüm değerini raporla.



Şekil 5 Mevcut Algoritmaya Ait Akış Şeması

Yukarıda verilen algoritmada tavlama benzetiminin standart hali ile kullanılmıştır, her sıcaklık düşüşünde bir önceki çözüm kullanılır, bir önceki çözümde rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir ve mevcut çözüm ile karşılaştırılması yapılır. Bu uygulamada işlerin sıralaması her defasında karşılıklı olarak ikili ikili yer değiştirildiği için belirli bir çözüm üzerinde odaklanmaktadır. Her defasında karşılıklı işlerin değiştirilmesi sonucunda bulunan çözümün bir önceki çözüme göre daha iyi olup olmadığına bakarak bulunan daha iyi çözümler üzerinde yoğunlaşır ve daha iyi çözüm bulmak için araştırmasına devam eder. Bu standart uygulama belirli bir çözüm noktasından başlar ve onun komşuluğundaki diğer çözümleri derinlemesine araştırıp bir sonuca ulaşmaya çalışır.

Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında komşuluk çözümü araştırma mantığı değiştirilmiş, bulunan ilk mevcut çözümden daha iyi olan komşuluk çözümü üzerinde farklı işlemler ile çözüm uzayında başka bir noktaya sıçrama yapılmış ve bu sıçrama sonucuna göre yeni komşuluk çözümleri oluşturulmuştur.

Değiştirilen tavlama benzetimin çalışma algoritması şu şekildedir;

Adım-1:

-Problem verilerini, parametreleri oku

-Başlangıç çözümünü oluştur.

-Başlangıç çözümünün amaç fonksiyonun değerini hesapla.

Adım-2:

-Başlangıç çözümünü en iyi çözüm olarak ata.

-Başlangıç çözümünün amaç fonksiyon değerini en iyi çözüm değeri olarak ata.

Adım-3

-Başlangıç çözümünü kullanarak, komşu çözümleri üret.

-Komşu çözümü üretmek için başlangıç çözümündeki işlerin sıralamasında rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.

-Komşu çözümü üretmek için başlangıç çözümündeki işlerin sıralaması ters çevrilir.

-Komşu çözüm üretmek için başlangıç çözümündeki işlerin sıralamasında rassal olarak seçilen dört iş karşılıklı olarak yer değiştirilir.

-Komşu çözüm üretmek için başlangıç çözümündeki işlerin sıralamasında -Komşu çözümlerin amaç fonksiyonu değerini hesapla.

-Sıcaklığı düşür.

Adım-4:

-Komşu çözümlerden elde ettiğin en iyi sonuç başlangıç çözümünden daha iyi ise bulduğun çözümü kayıtlı et, amaç fonksiyonu değerini hesapla ve en iyi çözüm değeri olarak ata.

-Değil ise

Rassal sayı üret,

üretilen rassal sayı < üstel (-kriter/T) ise komşu çözümündeki işlerin sıralamasını mevcut çözüm olarak güncelle ve Adım-5'e git.

üretilen rassal sayı < üstel (-kriter/T) koşulu sağlanmıyor ise başlangıç çözümünü kullanmaya devam et. Adım-6'ya git.

Adım-5:

-Komşu çözümü mevcut çözüm olarak güncelle.

-Komşu çözümün amaç fonksiyonu değerini mevcut çözümün amaç fonksiyonu değeri olarak belirle.

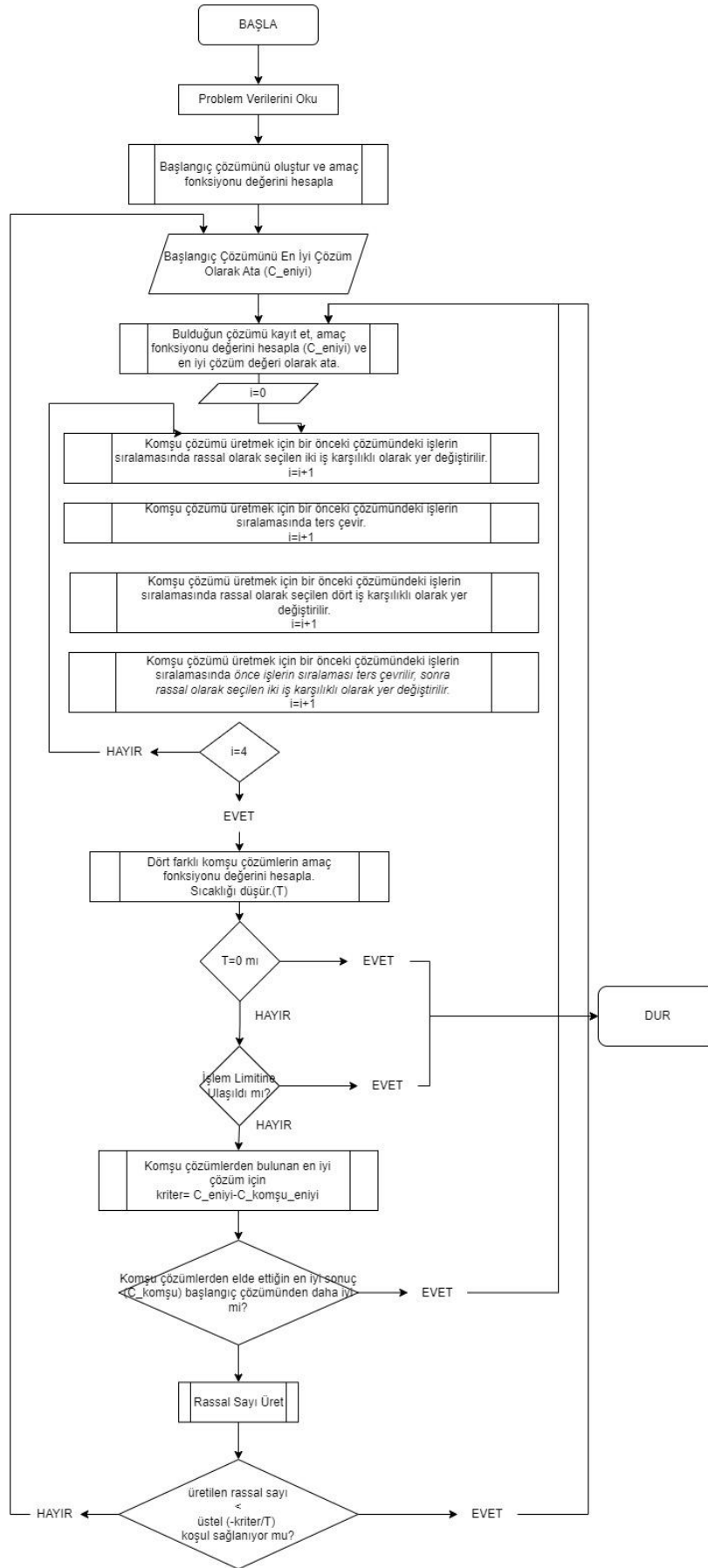
Adım-6

-Sıcaklık 0 değil ve toplam işlem sınırı limit değere ulaşmadıysa Adım-3'e git.

-Sıcaklık 0 veya toplam işlem sınırı limit değere ulaştıysa Adım-7'ye git.

Adım-7

-Algoritmayı durdur, en iyi çözüm ve en iyi çözüm değerini raporla.



Şekil 6. Değiştirilen Algoritmaya Ait Akış Şeması

Değiştirilen tavlama benzetimi algoritmasında başlangıç çözümünü kullanarak elde edilen komşuluk çözümlerinde herhangi bir odaklanma olduğunu söyleyemeyiz. Başlangıç çözümü kullanılarak dört farklı operatör ile işlem yapılması sonucunda çözüm uzayında farklı noktalara hızlı sıçramalar ile en iyi çözüm araştırması yapılmaktadır. Belirli bir noktada elde edilen çözümün altında daha iyi sonuç olup olmadığına bakmaksızın başka bir noktaya atlayıp işlemini sürdürmektedir.

Tavlama benzetimi algoritması kötü çıkan bir çözümü hemen ret etmeyip belirli bir olasılıkla üstel (-kriter/T) koşulunun sağlanıp sağlanmadığına bakarak kötü çıkan çözümü kullanmaktadır. Bu kural her iki algoritmada da Adım-4'de belirtilmiş ve kullanılan programdaki ilgili kodlama bloğuna ait ekran görüntüsü Şekil-7'de verilmiştir. Belirtilen koşul sağlandığında komşuluk çözümü mevcut çözüm olarak kullanılmakta sağlanmadığı durumda ise mevcut çözüm üzerinde değişiklik yapılmadan devam edilmektedir.

```
if criteria <= 0:
    amac = mevcut_amac
    workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=31).value = criteria

    devamke=1
    rassalatamayap=0
    workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=34).value = devamke
    workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=35).value = rassalatamayap

else:
    if random.random() < exp(-criteria/T):
        amac = mevcut_amac
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=32).value = exp(-criteria/T)
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=33).value = amac

        devamke=1
        rassalatamayap=0
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=34).value = devamke
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=35).value = rassalatamayap

    else:
        devamke=0
        rassalatamayap=1
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=34).value = devamke
        workbook2['Sheet1'].cell(row=cool_it*n_rep*9 + temp_it*9, column=35).value = rassalatamayap
```

Şekil 7. Programa Ait Ekran Görüntüsü

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

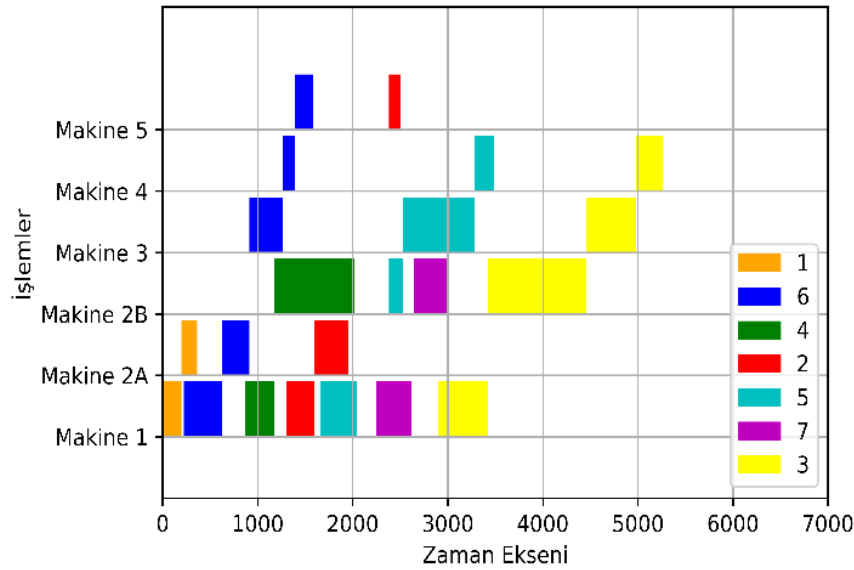
Bu çalışmada ilaç sektöründe akış tipi üretim yapan bir işletmede toplam tamamlanma süresini en küçük yapacak iş çizelgelemesi araştırılmaktadır. Talep edilen şarj adetleri kadar üretimi Tablo4'deki temiz kalma süresinin aşılmadığını sürekli kontrol eden, Tablo1'deki üretim rotasına uygun şekilde, Tablo2'deki üretim sürelerini ve Tablo3'deki ayar sürelerini kullanarak bir çizelge oluşturmaktadır. Bu tablolaradaki veriler ve kurallar kullanılarak yapılan çizelgelemeden beklenen toplam tamamlanma süresinin en küçük olmasıdır. Toplam tamamlanma süresi en küçük olan çözümün bulunabilmesi için tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır.

Tavlama benzetimi herhangi bir rassal sonuç veya önceden belirlenmiş bir çözümü kullanarak çözümün komşuluğunda alternatif çözümlerin aramasını yapar. Bu alternatif çözümlerden elde edilen daha iyi bir çözüm varsa, daha iyi çözüm kullanılarak bir sonraki çözüm aramasında başlangıç çözümü olarak kullanılır. İşletme üretim yapısı itibarıyla akış tipi üretim yapmakta olup ürünleri hızlı tüketim ürünleri karakterine sahiptir. Ürünlerin tüketici ile buluşma süresi ne kadar kısalsın satış miktarları artmaktadır. Benzer şekilde tüketici

satış noktalarında istediği ürünü bulamadığı zaman rakip üreticinin ürünlerini seçmekte, müşteri sadakati düşük seviyededir. Pazar yapısı ve müşteri davranışları incelendiğinde çizelgelemenin her zaman toplam tamamlanma zamanını en küçük yapacak şekilde olması gerekmektedir. Bu duruma ilaveten ilaç üretiminde temiz kalma süresi, değişken ayar süreleri, sabit lot büyüklüğü gibi kısıtlar el ile çizelgeleme yapıldıktan sonra alternatif çözümlerin araştırılmasını zorlaştırmakta, genellikle işletmede çizelgeleme yapan kişi belirli bir miktarda ürünü çizelgeleme takvimine aldıktan sonra toplam tamamlanma süresini daha ne kadar azaltabileceğine yönelik herhangi bir çalışma yapamamaktadır. Tam bu noktada tavlama benzetimi ile hızlıca elde edilen çözümler ve bu çözümlerin sonuçları çizelgeleme sistemini kolaylıkla uyarlanabilmekte, üretim çizelgelemesi yapan çalışanlara alternatif sonuçların neler olduğunu gösterebilmektedir.

İncelenen problemde işler arasında herhangi bir öncelik ayımı olmadığı için işlerin rassal olarak sıralaması yapılır. Rassal olarak işler sıralandıktan sonra paralel makine olan 2A ve 2B’de tanımlı olan işlerden hangisinin işlem göreceği yine rassal olarak seçilir. Örnek olarak iş sıralaması [1, 6, 4, 2, 5, 7, 3] olarak seçilmiş ve tüm makinelerdeki işlem sırası bu sıralamaya uyacak şekilde işlerin atanması ile yürütülmektedir. Paralel makineler için iş atama sıralaması ise [[1, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [0, 1, 1, 1, 1, 0, 0]] şeklindedir.

Tavlama benzetimi ile ilk elde edilen çözümden diğer çözümlere geçiş yapılırken rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak yer değiştirilir. Bu yer değiştirme sonrasında mevcut çözüm ile o ana kadar elde edilmiş en iyi çözüm karşılaştırılır. Mevcut çözüm elde edilen çözümden daha iyi ise kullanılır daha iyi olmayan çözümler ise gelecekte daha iyi çözüm elde edebilmek için belirli bir olasılık fonksiyonu ile kontrol edilir. Bu kontrol sonucunda kabul edilen çözümler kullanılır ve bu çözümden başka bir çözüm elde edilir. Bu şekilde belirli bir sıcaklıktan başlanılarak belirli bir katsayı ile sürekli soğutulur ve her soğuma işleminde belirli miktarda alt soğuma araştırılır. Soğutma sıcaklığı hedef sıcaklığa ulaştığında veya belirtilen toplam adım sayısına ulaşıldığında algoritmanın çalışması durur. Yapılan çalışma python programlama dilinde kodlanmıştır.



Şekil 8. Başlangıç İçin Seçilen Rassal Çözüm Sonucu

Şekil 8’da tavlama benzetiminde rassal olarak seçilen başlangıç çözümü Gantt şeması şeklinde verilmiştir. Yatay eksen zamanı dikey ekseninde ise makineler verilmiştir. Her iş farklı olarak renklendirilmiş ve Gantt şemasında makinelerin ne kadar süre aktif olarak çalıştığı veya çalışmaya başlamadan önce ne kadar boşa kaldığını göstermektedir. Başlangıç çözümünde elde edilen değer 4975br olmuştur (Tablo 6). 300 adet iterasyon sonucunda elde edilen en küçük değer 3816 br olmuştur (Tablo 8).

Tavlama benzetiminde her sıcaklık düşümünde komşuluk çözümü araştırması için rassal olarak seçilen işler karşılıklı olarak yer değiştirilir. Rassal arama yönteminde ise her sıcaklık düşüşünde dört farklı operatör oluşturulmuştur. Rassal arama yönteminde dört farklı komşuluk çözümü arandığı için tavlama benzetimi yönteminde de dört farklı komşulukta çözüm araştırılmıştır. Her sıcaklıkta dört defa işler karşılıklı olarak yer değiştirilmiş ve elde edilen en iyi çözüm bir sonraki sıcaklık düşüşünde kullanılmıştır. Rassal arama yöntemi ile aynı sayıda komşulukta elde edilen sonuçlara göre performans karşılaştırması yapılabilmesine

imkan sağlamıştır. Tablo 6’da tavlama benzetimi kullanılarak elde edilen ilk beş adıma ait sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.Tavlama Benzetimi Yöntemi İle Elde Edilen Çözümleri (İlk 5 Adım)

		Amaç	Mevcut Amaç	Sıcaklık	1.İş	2.İş	3.İş	4.İş	5.İş	6.İş	7.İş
1	0	4.975	9.999	100,00	4	3	6	1	7	5	2
1	1	4.975	4.534	100,00	4	3	6	7	1	5	2
1	2	4.534	4.641	100,00	2	3	6	7	1	5	4
1	3	4.641	4.640	100,00	3	2	6	7	1	5	4
1	4	4.640	4.640	100,00	3	2	6	5	1	7	4
2	0	4.640	4.534	99,00	4	3	6	7	1	5	2
2	1	4.534	4.589	99,00	6	3	4	7	1	5	2
2	2	4.534	4.573	99,00	6	3	4	2	1	5	7
2	3	4.573	4.763	99,00	6	3	1	2	4	5	7
2	4	4.573	5.265	99,00	3	6	1	2	4	5	7
3	0	4.573	4.534	98,01	4	3	6	7	1	5	2
3	1	4.534	5.103	98,01	4	5	6	7	1	3	2
3	2	4.534	5.106	98,01	4	5	6	7	2	3	1
3	3	4.534	5.103	98,01	4	5	6	7	1	3	2
3	4	4.534	5.325	98,01	4	5	6	7	1	2	3
4	0	4.534	4.534	97,03	4	3	6	7	1	5	2
4	1	4.534	4.870	97,03	4	6	3	7	1	5	2
4	2	4.534	5.813	97,03	7	6	3	4	1	5	2
4	3	4.534	5.100	97,03	7	6	5	4	1	3	2
4	4	4.534	5.100	97,03	7	4	5	6	1	3	2
5	0	4.534	4.534	96,06	4	3	6	7	1	5	2
5	1	4.534	4.582	96,06	4	6	3	7	1	5	2
5	2	4.582	5.243	96,06	4	6	7	3	1	5	2
5	3	4.582	5.414	96,06	4	1	7	3	6	5	2
5	4	4.582	4.753	96,06	4	1	3	7	6	5	2

Tabloda başlangıç çözümü olarak 4-3-6-1-7-5-2 seçilmiştir, ilk yer değiştirme işleminde 1 ve 7 numaralı işler karşılıklı olarak yer değiştirilmiştir. İkinci yer değiştirme işleminde ise 4 ve 2 numaralı işler karşılıklı olarak yer değiştirmiş, üçüncü yer değiştirme işleminde 2 ve 3 numaralı işler karşılıklı olarak yer değiştirilmiştir, son yer değiştirme işleminde ise 5 ve 7 numaralı işler karşılıklı olarak yer değiştirilmiştir. Sıralaması değiştirilecek işler rassal olarak seçilmekte ve bir önceki yer değiştirmede elde edilen sıralama kullanılarak değişiklik yapılmaktadır. İlk sıcaklık düşümünde elde edilen en iyi sıralama 4-3-6-7-1-5-2 olmuş ve bu çözüm bir sonraki sıcaklık düşümünde başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Her sıcaklık düşümünde 4 farklı yer değiştirme işlemi yapılmış ve bu işlemler sonucunda elde edilen sonuç bir sonraki sıcaklık düşümüne taşınmıştır. Toplamda 300 adet sıcaklık düşürülmesi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 8’de verilmiştir. Tavlama benzetimi kullanılarak geliştirilen rassal arama yönteminde ise her sıcaklık düşüşünde dört farklı operatör kullanılmış, bu operatör ile başlangıç çözümü kullanılarak rassal başka bir çözüm noktasına sıçrama yapılmaktadır. Bu yöntemin çekirdeğinde tavlama benzetimi kullanılmış olup bulunan sonuç üzerinden yoğunlaşarak daha iyi sonuçların araması yapılmamaktadır. Her sıcaklık düşüşünde bulunan en iyi sonuç dört farklı operatör kullanılarak çözüm uzayının farklı noktalarına sıçramakta ve bu sıçrama sonucunda elde edilen en iyi çözümler bir sonraki çözüme başlangıç çözümü olarak kullanılmaktadır. Kullanılan bu operatörlerin açıklamaları ve yaptıkları işlemlerin tanımlaması aşağıdaki gibidir.

- Yer değiştirme işlemi: bu işlem ile başlangıç çözümünde rassal olarak iki adet iş seçilir ve bu işlerin sıralamadaki yerleri karşılıklı olarak yer değiştirilir.
- Sıralamayı ters değiştirme: bu işlemde başlangıç çözümündeki işlemler sondan başlayarak işlemlerin sıralaması tam tersi olarak değiştirilir.
- İkili yer değiştirme: bu işlemde başlangıç çözümünden rassal olarak ikili grup halinde dört iş seçilir, seçilen bu işler ikili karşılıklı olarak yer değiştirilir.
- Yer değiştirme ve sıralamayı ters çevirme; bir önceki işlemde olduğu gibi sıralama tam ters olarak değiştirilir ve ilk işlemde olduğu gibi başlangıç çözümünden iki iş rassal olarak seçilir ve seçilen işler yer değiştirilir.

Her çözüm adımında bu işlemler sırası ile tekrar edilir ve elde edilen çözüm başlangıç çözümü ile karşılaştırılır. Elde edilen çözüm başlangıç çözümünden daha iyi ise bir sonraki adıma geçilirken elde edilen en iyi başlangıç

çözümü kullanılır. Elde edilen çözüm başlangıç çözümünden daha kötü olması durumunda ise olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılarak elde edilen çözümün kabul edilip olmadığı test edilir. Yapılan test sonucunda elde edilen fonksiyon değeri ile rassal sayının karşılaştırılması yapılır, karşılaştırma sonucu rassal olarak belirlenen değer daha büyük ise elde edilen çözüm bir sonraki adımın başlangıç çözümü olarak kullanılır.

Tablo7.Rassal Arama Yöntemi İle Elde Edilen Çözümleri (İlk 5 Adım)

		Amaç	Mevcut Amaç	Sıcaklık	1.İŞ	2.İŞ	3.İŞ	4.İŞ	5.İŞ	6.İŞ	7.İŞ
1	0	4.970	5.253	100,00	2	1	5	4	7	3	6
1	1	4.970	5.349	100,00	2	1	7	4	5	3	6
1	2	4.970	4.979	100,00	6	3	7	4	5	1	2
1	3	4.979	4.686	100,00	4	1	5	2	3	7	6
1	4	4.686	5.241	100,00	6	4	7	3	5	1	2
2	0	4.686	4.686	99,00	4	1	5	2	3	7	6
2	1	4.686	5.265	99,00	4	2	5	1	3	7	6
2	2	4.686	4.799	99,00	6	7	3	2	5	1	4
2	3	4.799	5.313	99,00	4	7	3	2	5	1	6
2	4	4.799	4.637	99,00	6	2	3	7	5	1	4
3	0	4.637	4.637	98,01	6	2	3	7	5	1	4
3	1	4.637	4.982	98,01	7	2	3	6	5	1	4
3	2	4.637	5.249	98,01	4	1	5	7	3	2	6
3	3	4.637	6.015	98,01	6	2	7	3	4	1	5
3	4	4.637	5.943	98,01	2	1	5	7	3	4	6
4	0	4.637	4.637	97,03	6	2	3	7	5	1	4
4	1	4.637	4.946	97,03	4	2	3	7	5	1	6
4	2	4.637	5.451	97,03	4	1	5	7	3	2	6
4	3	4.637	5.165	97,03	2	6	3	7	1	5	4
4	4	4.637	5.252	97,03	1	4	5	7	3	2	6
5	0	4.637	4.637	96,06	6	2	3	7	5	1	4
5	1	4.637	4.657	96,06	6	2	3	7	5	4	1
5	2	4.657	4.889	96,06	4	1	5	7	3	2	6
5	3	4.889	5.586	96,06	4	2	3	1	5	7	6
5	4	4.889	5.544	96,06	4	1	6	7	3	2	5

Tablo7’de geliştirilen rassal arama yönteminde ilk beş adıma ait sonuçlar paylaşılmıştır. İlk sıcaklık düşüş adımıda rassal olarak seçilen başlangıç çözümündeki işlerin sıralaması 2-1-5-4-7-3-6 olmuştur. Bu sıcaklıkta yukarıda anlatılan dört farklı operatör kullanarak başlangıç çözümünden rassal arama ile farklı çözümler üretilmiştir. Tavlama benzetiminin temel algoritması rassal arama yönteminde de kullanılmış ve her sıcaklık düşüşünde elde edilen sonuç bir sonraki sıcaklık düşüş adımıda başlangıç çözümü olarak kullanılmıştır. Böylelikle her sıcaklık düşüşünde 4 farklı operatör ile 4 farklı rassal çözümün taraması yapılmıştır.

Tablo 8.Tavlama Benzetimi Yöntemi İle Elde Edilen Çözümleri (Son 5 Adım)

		Amaç	Mevcut Amaç	Sıcaklık	1.İş	2.İş	3.İş	4.İş	5.İş	6.İş	7.İş
296	0	3.816	3.816	5,16	5	3	4	2	6	7	1
296	1	3.816	4.008	5,16	5	4	3	2	6	7	1
296	2	3.816	4.370	5,16	5	4	2	3	6	7	1
296	3	3.816	4.978	5,16	1	4	2	3	6	7	5
296	4	3.816	5.630	5,16	1	2	4	3	6	7	5
297	0	3.816	3.816	5,11	5	3	4	2	6	7	1
297	1	3.816	5.748	5,11	1	3	4	2	6	7	5
297	2	3.816	5.665	5,11	1	6	4	2	3	7	5
297	3	3.816	5.687	5,11	1	6	4	2	7	3	5
297	4	3.816	5.328	5,11	1	6	4	2	7	5	3
298	0	3.816	3.816	5,05	5	3	4	2	6	7	1
298	1	3.816	4.635	5,05	5	3	7	2	6	4	1
298	2	3.816	4.419	5,05	5	3	7	6	2	4	1
298	3	3.816	4.992	5,05	5	3	7	1	2	4	6
298	4	3.816	5.250	5,05	5	4	7	1	2	3	6
299	0	3.816	3.816	5,00	5	3	4	2	6	7	1
299	1	3.816	5.105	5,00	5	7	4	2	6	3	1
299	2	3.816	5.105	5,00	5	4	7	2	6	3	1
299	3	3.816	5.103	5,00	7	4	5	2	6	3	1
299	4	3.816	5.100	5,00	7	4	5	1	6	3	2
300	0	3.816	3.816	4,95	5	3	4	2	6	7	1
300	1	3.816	4.161	4,95	5	3	4	2	6	1	7
300	2	3.816	4.153	4,95	3	5	4	2	6	1	7
300	3	3.816	5.190	4,95	1	5	4	2	6	3	7
300	4	3.816	4.722	4,95	1	5	2	4	6	3	7

Tablo 8’de tavlama benzetimi ile elde edilen 300 sıcaklık düşüşü sonrasındaki sonuçların son 5 sıcaklık düşüşü tablo halinde verilmiştir, bu 5 sıcaklık düşüşünün de başlangıç çözümünün aynı olması 296’dan önceki bir sıcaklık düşüşünde bu sonuca ulaşıldığı ve bu elde edilen sonuçlar arasında en iyi sonucun 3816 olduğu görülmektedir. En iyi çözümün elde edildiği işlerin sıralaması ise 5-3-4-2-6-7-1 şeklinde olup son beş sıcaklık düşüşünde 0 numara ile gösterilen başlangıç çözümünde hepsinin aynı çözümü kullanıldığı görülmektedir.

Tablo9.Rassal Arama Yöntemi İle Elde Edilen Çözümleri (Son 5 Adım)

		Amaç	Mevcut Amaç	Sıcaklık	1.İş	2.İş	3.İş	4.İş	5.İş	6.İş	7.İş
296	0	3.778	3.778	5,16	5	3	6	4	2	7	1
296	1	3.778	4.046	5,16	5	3	6	2	4	7	1
296	2	3.778	5.747	5,16	1	7	2	4	6	3	5
296	3	3.778	4.148	5,16	6	3	5	4	1	7	2
296	4	3.778	5.663	5,16	1	7	2	4	6	5	3
297	0	3.778	3.778	5,11	5	3	6	4	2	7	1
297	1	3.778	5.303	5,11	5	7	6	4	2	3	1
297	2	3.778	5.687	5,11	1	7	2	4	6	3	5
297	3	3.778	5.266	5,11	2	4	6	3	5	7	1
297	4	3.778	5.687	5,11	1	6	2	4	7	3	5
298	0	3.778	3.778	5,05	5	3	6	4	2	7	1
298	1	3.778	5.324	5,05	5	1	6	4	2	7	3
298	2	3.778	5.687	5,05	1	7	2	4	6	3	5
298	3	3.778	5.325	5,05	4	1	6	5	2	7	3
298	4	3.778	5.687	5,05	1	4	2	7	6	3	5
299	0	3.778	3.778	5,00	5	3	6	4	2	7	1
299	1	3.778	4.364	5,00	5	3	2	4	6	7	1
299	2	3.778	5.687	5,00	1	7	2	4	6	3	5
299	3	3.778	4.148	5,00	6	3	5	4	1	7	2
299	4	3.778	5.682	5,00	6	7	2	4	1	3	5
300	0	3.778	3.778	4,95	5	3	6	4	2	7	1
300	1	3.778	4.610	4,95	5	4	6	3	2	7	1
300	2	3.778	6.221	4,95	1	7	2	4	6	3	5
300	3	3.778	4.444	4,95	5	2	6	4	3	1	7
300	4	3.778	5.105	4,95	5	7	2	4	6	3	1

Toplamda 300 sıcaklık düşüşü sonrasında durma kuralı işletildiği için son işlem adımı 300 adete ulaştığı için çalışma durdurulmuştur. Son beş sıcaklık düşüşüne bakıldığında hepsinin başlangıç çözümünün aynı olduğu

görülmektedir. Son beş sıcaklık düşüşünün tamamında aynı başlangıç çözümünün kullanılması 296 numaralı sıcaklık düşüşünden daha önce elde edildiğini göstermektedir. Son beş sıcaklık düşüşündeki işlemlere bakıldığında toplam tamamlanma süresinin 3778 br olduğu görülmüştür. Tavlama benzetimi ile 300 adet sıcaklık düşüşü sonucunda elde edilen en iyi sonuç 3816br iken geliştirilmiş rassal arama yöntemi ile elde edilen sonuç 3778br olmuştur. Rassal aramada farklı çözüm noktalarına hızlı hızlı atlayarak bu noktalarda alternatif çözümlerden en iyisini bulmayı hedeflemektedir. Aynı veri setleri, aynı sıcaklık düşüşü sayısı ve aynı komşuluk arama sayısı ile daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar ve tavlama benzetimi kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında önerilen yöntemin aynı işlem adımıyla daha düşük sonuca ulaşabildiği görülmüştür. İki yöntem birbirleriyle karşılaştırmak için başlangıç senaryosundaki işlem süreleri, temiz kalma süreleri ve ayar süreleri değiştirilmemiş sadece üretim adetleri değiştirilmiştir. Üretim adetlerinin değiştirilerek oluşturulan senaryolar Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Test Edilen Üretim Senaryoları

	1.İŞ	2.İŞ	3.İŞ	4.İŞ	5.İŞ	6.İŞ	7.İŞ
Senaryo-0	11	12	13	14	15	16	17
Senaryo-1	11	12	13	14	15	16	27
Senaryo-2	11	12	13	14	15	26	17
Senaryo-3	11	12	13	14	25	16	17
Senaryo-4	11	12	13	24	15	16	17
Senaryo-5	11	12	23	14	15	16	17
Senaryo-6	11	22	13	14	15	16	17
Senaryo-7	21	22	23	24	25	26	27
Senaryo-8	31	32	33	34	35	36	37
Senaryo-9	41	42	43	44	45	46	47
Senaryo-10	51	52	53	54	55	56	57

Üretim adetleri değiştirilerek oluşturulan on farklı senaryo; tavlama benzetimi ve rassal arama yöntemi kullanılarak uygun çizelgeleme sonuçları araştırılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda her senaryo için ulaşılan sonuçların en küçük, ortalama ve en büyük değerleri Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Performans Karşılaştırması Sonucu

	NORMAL			RASSAL		
	En Küçük	Ortalama	En Büyük	En Küçük	Ortalama	En Büyük
Senaryo-1	3337	4324	5679	3240	4110	5815
Senaryo-2	4262	5248	6895	4178	5028	6895
Senaryo-3	4334	5250	6783	4185	5083	6941
Senaryo-4	4252	5509	7235	4128	5236	7408
Senaryo-5	4555	5571	7408	4555	5782	7408
Senaryo-6	4999	5960	7836	4998	6319	7836
Senaryo-7	4102	5160	6757	4063	4947	6641
Senaryo-8	6604	8226	10694	6418	7778	10611
Senaryo-9	9589	11807	14840	9198	11698	15153
Senaryo-10	12427	15179	19105	11931	14413	19603

Tablo 11’de elde edilen sonuçlara bakıldığında rassal arama ile elde edilen sonuçların, tavlama benzerimi ile elde edilen sonuçlara göre her zaman daha küçük olduğu görülmüştür. Çalışma ilaç üretimi yapan işletmede doğrudan kullanılabilir bir yapıda olup, üretim süreleri, ayar süreleri, temiz kalma süreleri ve üretim miktarlarını değiştirilmesi ile firmada üretim çizelgelemesi yapan çalışanlarına yol gösterecek hale gelmiştir. Firma çalışanlarına alternatif çözümler sunarak farklı çizelgelemeler arasında geçiş yapıldığında toplam tamamlanma

zamanın ne kadar değişeceği hızlı bir şekilde sunulabilmektedir. İlerleyen dönemlerde yapılan çalışmaya ek olarak yeni üretim rotaları eklenebilir, ürün sayısı artırılabilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Eren, T. ve Güner, E. “İki ölçütlü beklemez akış tipi çizelgeleme problemi: toplam -tamamlanma zamanı ve maksimum gecikme”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu Bildiri Kitabı*, 231-236, 2005.
- [2] Fink, A. ve Voß, S. “Solving the continuous flow-shop scheduling problem by metaheuristics” *European Journal of Operational Research*, vol. 151, pp. 400-414, 2003.
- [3] Stützle, T. “An ant approach to the flow shop problem”. *In Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing*, Vol. 3, pp. 1560-1564, 1998, September.
- [4] Acar, N. “Üretim Planlaması Yöntem ve Uygulamaları”, Ankara, Türkiye, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, 2000, 214s.
- [5] Kenneth R. Baker, Dan Trietsch, Principles of Sequencing and Scheduling, Newyork, USA, John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Michael L. Pinedo, Planning and Scheduling in Manufacturing Services, Newyork, USA, Springer Science, 2005.
- [7] Kellegöz, Talip. “Toplam geç bitirme zamanının en küçüklenmesi performans ölçütlü permütasyon akış tipi çizelgeleme problemlerinin çözümünde genetik algoritma yaklaşımı”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2006.
- [8] Şerifoğlu, F. S., & Ulusoy, G. “Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: a genetic algorithm approach.” *Journal of the Operational Research Society*, vol.55, no.5, pp. 504-512”, 2003.
- [9] Garey M R, Johnson D S, 1979. “Computers and intractability, Vol. 174. “San Francisco, USA, W.H. Freeman and Company, 2005.
- [10] S. Sayin and S. Karabati, “A bicriteria approach to the two-machine ow shop schedulingproblem”, *European Journal of Operational Research*, vol.113, pp. 435-449, 1999.
- [11] B. Toktaş, M. Azizoğlu, and S. Köksalan, “Two-machine flow shop scheduling with two criteria:Maximum earliness and makespan”, *European Journal of Operational Research*, vol. 157 pp. 286-295, 2004.
- [12] C. J. Liao, W.C. Yu, and C.B. Joe, “Bicriterion scheduling in the two-machine flowshop”, *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, pp. 929-935, 2004.
- [13] R. L. Daniels and R. J. Chambers, “Multi-objective flow-shop scheduling”, *Naval Research Logistics*, vol. 37, pp. 981-995, 1990.
- [14] K. Chakravarthy and C. Rajendran, “A heuristic for scheduling in a owshop with the bicriteriaof makespan and maximum tardiness minimization”, *Production Planning and Control* vol. 10, pp.707-714, 1999.




- [15] D. Ravindran, A. Noorul Haq, S. J. Selvakumar, and R. Sivaraman, "Flow shop scheduling with multi objective of minimizing makespan and total flow time", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 25, pp. 1007-1012, 2005.
- [16] T. Pasupathy, C. Rajendran, and R. K. Suresh, "A multi-objective genetic algorithm for scheduling in flow shops to minimize the makespan and total flow time of jobs," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 27, pp. 804-815, 2006.
- [17] T. Loukil, J. Teghem, and D. "Tuytens, Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics", *European Journal of Operational Research* vol.161, pp. 42-61, 2005.
- [18] T. K. Varadharajan and C. Rajendran, "A multi-objective simulated-annealing algorithm for scheduling in flow shops to minimize the makespan and total flow time of jobs", *European Journal of Operational Research* vol.167, pp.772-795, 2005.
- [19] B. Yagmahan and M. M. Yenisey, "A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem", *Expert Systems with Applications* vol.37, pp.1361-1368, 2010.
- [20] Sarıççek İ, Endüstriyel Çizelgeleme Dersi, 5, Erişim: <https://slideplayer.biz.tr/slide/2624694/>
- [21] Onan A, "Metasezgisel yöntemler ve uygulama alanları", c.17, s.2, ss.113-128, 2013.
- [22] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. ve Vecchi, M.P. "Optimization by simulated annealing", *Science*, vol. 220. No. 4598. pp.671-680, 1983.
- [23] Buseti, F. "Simulated annealing overview", 2013. Erişim: <http://163.18.62.64/wisdom/Simulated%20annealing%20overview.pdf>, (11.09.2013),.
- [24] Henderson, D., Jacobson, S.H. ve Johnson, A.W. "The theory and practice of simulated annealing" "Glover et al. (eds) Handbook of Metaheuristics, Kluwer Academic Publishers", 2003.
- [25] Goffe, W.L., Ferrier, G.D. ve Rogers, J. "Global optimization of statistical functions with simulated annealing", *Journal of Econometrics*, vol. 60. No.1-2, pp.65- 99, 1994.
- [26] Kocamaz, M. ve Çiçekli, U.G. "Paralel makinaların genetik algoritma ile çizelgelenmesinde mutasyon oranının etkinliği" *Ege Akademik Bakış*, vol.10, no.1, pp.199-210, 2010.
- [27] Çelik, Y. "Optimizasyon problemlerinde bal arılarının evlilik optimizasyonu algoritmasının performansının geliştirilmesi", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye , 2013.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Creation of Historical Building Information Modelling (HBIM) Library, A Case Study of Registered House (No:56), Akçakoca

 Nuray BENLİ YILDIZ ^{a,*},  Zehra SÖNMEZ ^b,  Nuray ÖZKARACA ^c

^a Mimarlık Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Galata Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

^c Mimarlık Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, TÜRKİYE

zehrakalpaki096@gmail.com.tr

DOI: 10.29130/dubited.1241508

ABSTRACT

Building Information Modelling (BIM) is a methodology created by adapting information technologies to the construction industry, creating 3D parametric and object-based models, and adding time and cost data to the models. In recent years, the creation of digital cultural heritage is a current field in terms of protecting cultural heritage and transferring it to future generations. Development of technology and the increase in opportunities, destinations that cannot be physically visited due to access difficulties or pandemics are trying to transfer their cultural richness to digital environments. For this purpose, Historical Building Information Modelling (HBIM), which is the version of BIM applied to historical buildings, emerges as an important tool. The digitalization of cultural heritage structures by modelling is a process that requires intensive labour due to the lack of uniform details, and the fact that they were made with different construction techniques at different times and periods. For this reason, this process will be improved with the creation, dissemination, classification, and accessibility of parametric object libraries with HBIM. In this direction, the research method; is based on the analysis and synthesis of the literature review and case study in particular on modelling and library studies as a case study. As a field study, it was created in three dimensions with HBIM on a registered civil architecture example that has lost its originality in Düzce province, Akçakoca district, and the building and library elements were modelled and transferred to BIM. The original state of the building has been created to be experienced interactively. As a result, the building and its elements are defined by parametric objects. With the development of the HBIM library, the elements of the structures of similar typology become digitally accessible and digital legacies are created much more easily and effectively. HBIM studies create a comprehensive three-dimensional data set in digital documentation, restitution periods and restoration studies.

Keywords: Historic Building Information Modelling (HBIM), Building Information Modelling (BIM), conservation of cultural heritage buildings, digital cultural heritage, HBIM library, Akçakoca, Düzce

Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM) Kütüphanesi Oluşturulması, Tescilli Yapı (No: 56) Örneği, Akçakoca

Öz

Yapı bilgi modellemesi (BIM), bilgi teknolojilerinin inşaat sektörüne uyarlanarak 3B parametrik ve nesne tabanlı model oluşturulması, modellere zaman ve maliyet verisi eklenmesiyle oluşturulan bir metodolojidir. Son yıllarda kültürel mirasın korunması, gelecek kuşaklara aktarılması açısından dijital kültürel mirasın oluşturulması, güncel bir çalışma alanı haline gelmiştir. Teknolojik imkânların artması sayesinde erişim zorlukları, pandemi ve ekonomi gibi sebeplerle fiziki ulaşım sağlanamayan tarihi alanlar, sahip oldukları kültürel zenginlikleri dijital ortamlara aktarmaktadır. Bu amaç doğrultusunda BIM'in tarihi yapılar üzerinde uygulanan versiyonu olan Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM) önemli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Kültürel miras yapılarının modellenerek

dijitalleştirilmeleri; tek tip detaylarının olmaması, farklı zaman ve periyotlarda, farklı yapım teknikleriyle yapılmış olmaları sebepleri ile yoğun emek gerektiren bir süreçtir. Bu sebeple HBIM ile parametrik nesne kütüphanelerinin oluşturulması, yaygınlaştırılması, sınıflandırılması ve erişilebilir hale getirilmesi ile bu süreç iyileştirilmiş olacaktır. Bu doğrultuda araştırma yöntemi; modelleme ve kütüphane çalışmaları özelinde literatür taramasının analiz edilerek sentezlenmesine ve alan çalışmasına dayanmaktadır. Alan çalışması olarak Düzce ili, Akçakoca ilçesinde bulunan özgünlüğünü yitirmiş tescilli bir sivil mimarlık örneği üzerinden HBIM ile üç boyutlu olarak oluşturulmuş, yapı ve kütüphane elemanları modellenerek, BIM'e aktarılmıştır. Binanın özgün hali interaktif olarak deneyimlenme imkânı oluşturulmuştur. Sonuç itibarıyla bina ve elemanları parametrik objelerle tanımlanmıştır. HBIM kütüphanesi geliştirilmesiyle benzer tipolojideki yapıların öğeleri, dijital olarak ulaşılabilir hale gelmekte ve dijital miraslar çok daha kolay ve efektif olarak hayta bulunmaktadır. HBIM çalışmaları dijital belgeleme, restitüsyon dönemleri ve restorasyon çalışmalarında üç boyutlu kapsamlı bir data seti oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tarihi Yapı Bilgi Modellemesi (HBIM), Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), kültürel miras yapılarının korunması, dijital kültürel miras, HBIM kütüphanesi, Akçakoca, Düzce

I. INTRODUCTION

Building Information Modelling (BIM) is a methodology created by adapting information technologies to the construction industry to create 3D parametric and object-based models, adding time and cost data to the models. with the developing technology, the traditional methods of doing and executing business, such as making a new structure, and surveying the existing structure, are undergoing serious changes. The transformation that depends on the measurement technologies is the developments in photogrammetry and 3d laser scanning techniques. On the other hand, Building Information Modelling (BIM) provides detailed data on the stages of the structure such as design, construction, operation, repair, maintenance, and demolition by creating digital twins and provides serious advantages in obtaining an integrated project. BIM can provide many different data such as design alternatives, cost estimation, material identification and measurement, data management, obtaining as-built projects, construction site organization, and obtaining application projects [1]. In addition to these, information flow can be continued throughout the life cycle of the building on issues such as conflict analysis, interdisciplinary coordination, building, energy, acoustic simulations, production, prefabrication, project management, and real estate management. In existing buildings and historical/heritage buildings (HBIM), the purposes of using BIM methodology are; monitoring of conservation status, heritage management, preventive maintenance, analysis of response options, conservation and restoration planning, construction simulation, disaster preparedness, etc. BIM methodology is used for monitoring the conservation status, heritage management, preventive maintenance, analysis of response options, conservation, and restoration planning, construction simulation, disaster preparedness, etc. oriented towards goals [2]. Modelling and digitizing cultural heritage buildings; It is a labor-intensive process due to the lack of uniform details and the fact that they were made at different times and periods, with different construction techniques.

II. HISTORICAL BUILDING INFORMATION MODELING (HBIM)

The concept of heritage is divided into three as natural, cultural and mixed (natural and cultural) according to the definition of UNESCO (The United Nations Organization for Education, Science and Culture). [3]. All of these are values that reflect universal values and should be passed on as a legacy to future generations [4]. It is not possible to preserve all the artifacts from the past and transfer them to future generations due to economic problems, urbanization problems, natural disasters, wear and tear of materials [5]. The scale and understanding of protection is changing from the past to the present, and thus there are changes in the content and method of protection [6]. In recent years, a new method called "HBIM (Historical Building Information Modelling)" has emerged with the integration of Building

Information Modelling (BIM) in the protection of historical buildings [7]; [8]. Although it is not as common as BIM, it has been observed that the use of HBIM has started at the international level in recent years and the studies conducted with this method have been increasing [8].

BIM is a technological tool that provides a digital representation of the physical and functional properties of a new or existing building with parametric elements. While computer-aided drawing programs produce a project by transferring the project in mind to two dimensions with the traditional method, BIM creates the project in mind with three-dimensional parametric elements and automatically obtains two-dimensional drawings from this model. BIM provides a secure platform for coordinated data sharing in a multidisciplinary study [9]; [10]. The coordinated data sharing feature makes BIM a suitable platform for archiving, preservation, management and research of cultural heritage. BIM can function as a very good decision-making and management tool when it is maintained throughout the life cycle of the structure, such as maintenance, repair and operation of cultural heritage assets [11]. HBIM can be defined as a process that digitally demonstrates all the elements that make up a cultural heritage, or in technical terms as object-oriented parametric modelling. The HBIM process involves assembling 'smart' objects (building components and areas) into a building or a group of buildings in a virtual environment. HBIM objects corresponding to relevant pieces of information are integrated into the information model in a structured way. In this way, HBIM creates a digital information resource for the cultural heritage asset. [11]. In recent years, the creation of digital cultural heritage is a new and interesting area in terms of protecting cultural heritage and transferring it to future generations. Thanks to the development of technology and the increase in opportunities, historical areas that can not be reached due to access difficulties and pandemics are trying to quickly transfer their cultural diversity to digital platforms. For this purpose, Historical Building Information Modelling (HBIM), which is the version of BIM applied on historical buildings, emerges as an important tool. The digitization of cultural heritage structures by modelling them becomes difficult due to the fact that they do not have uniform details, they can show different angles and deviations, they are made with different construction techniques at different times and periods. For this reason, the creation and classification of parametric object libraries with HBIM is of great importance for the dissemination of HBIM. The availability of this library will greatly speed up and facilitate the transition to the HBIM process.

The HBIM process consists of the stages of data collection, laser scanning process for BIM, mapping information and information sharing, respectively (Figure 1) [12]. The second stage, called "Scan to BIM", is the name given to obtaining a model using BIM techniques by obtaining a point cloud, especially through terrestrial laser scanning devices. The information shared as the final stage of HBIM has the potential to include historical analyses about the heritage structure, time and cost calculations, energy simulations, studies related to the processes of maintenance, repair and interventions. With the HBIM model obtained, the data integrated into the digital model can be used by different disciplines [13]. Beyond Virtual Reality (VR) or Augmented Reality (AR), it can also be done in the form of gamification, as seen in the application developed for the ancient city of Teos. [14].

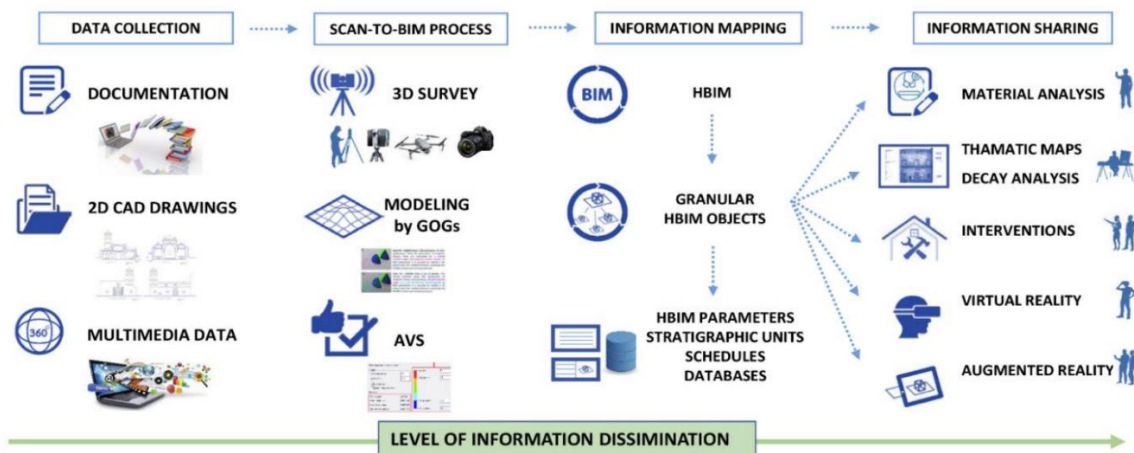


Figure 1. HBIM process and phases of work [12].

In the study conducted in this context, many international sources have been found and four new studies [15], [13], [16] ve [17] have been found in Turkey. Bastem and Çekmiş (2021) conducted a systematic literature review on the studies published between 2009 and 2020 in the nine most widely used academic databases. In this context, 194 primary studies have been identified about the HBIM process and its stages. By examining the identified studies, an up-to-date workflow was created for the usage areas and process of HBIM. The tools, methods and software that may be needed during the HBIM implementation and possible difficulties that may be encountered are expressed. In addition, it is foreseen that HBIM will replace the traditional relief and restoration process in the near future. By using the SWOT (strengths, weaknesses, opportunities, and threats) analysis method, Kömürcü and Benli Yıldız (2021) evaluated the HBIM working method, the opportunities and threats presented by using it, and identified the strengths and weaknesses of HBIM technology. As a result of the SWOT analysis, it is emphasized that HBIM application will make a positive contribution to heritage structures, eliminate their weaknesses and increase potential opportunities. On the other hand, Özeren and Kormaz (2021) evaluated the detail levels and usage possibilities of the 3D models to be used in the HBIM platform. In Turkey, 4 different levels of detail have been defined and it has been suggested to use these levels for heritage buildings. Within the scope of the study, a traditional house model was obtained as a field study and it was conveyed that additional technology, software and equipment were needed as the detail requirement increased. The point cloud data of the Augustus Temple in Ankara were obtained by Acar et al. (2022) and the model based on these data was placed in the field. It has been made available to people through the mobile application with AR. It has been stated that the development of such studies has a significant impact on the documentation, protection and transfer of cultural heritage. It has been stated that the interfaces to be developed can also be used in the field of education and tourism, and that building information models can become more compatible with the proliferation of research with mobile devices and applications. Within the scope of these studies, the relevant literature was scanned and analysed and a field study was carried out. As a field study, the building was created in three dimensions on a registered civil architecture example in Düzce province, Akçakoca district, and the building and library elements were modeled and transferred to BIM. In this way, the building, which has lost its original qualities with the major renovations it has undergone, and has become a place in the urban memory of the local people, has been created in a three-dimensional environment by providing access to the young generations in an interactive environment. Since it is not allowed to enter the building, it was modelled in the dimension of the exterior lines and joinery details of the building, transferred to BIM and interactively experienced from the outside of the building, creating knowledge and experience about the structure and its context.

III. DOCUMENTATION, MODELING AND VISUALIZATION WITH HBIM

A SURVEY, RESTITUTION, RESTORATION AND DATA ANALYSIS I

Researching the historical processes of cultural heritage structures; It can be summarized as building production techniques, determination of traditions, and the process of obtaining data about the building. [5]. In this process, with the development of technology, in the documentation of historical buildings; terrestrial and aerial laser scanners, digital handheld cameras [18], point clouds and three-dimensional data obtained from photographs and motion cameras are used. By processing point clouds, 2-dimensional (2D) scaled precision images (orthophotos) such as site, floor, ceiling plans, sections and facades are obtained. Modelling can be started over these images by 2D drawings via computer aided drawing (CAD) programs [19] or directly with BIM programs after the point clouds are obtained. Photos, pictures and documents related to the original state of the building can be embedded in HBIM as semantic data. By obtaining restitution models according to the different periods of the building, it makes more information about the history of the building accessible.

B THREE DIMENSIONAL MODELING II

Today, the evolution of new information and communication technologies has led to a significant transformation in the activities of contemporary society. [20]. Technological advances have made it possible to create highly detailed 3D models of heritage buildings, sculptures and artifacts, faithful to their current conditions. [21]. With HBIM, real measurements can be made via point cloud data and heritage buildings, building elements up to door, window, woodworking details can be modelled with the software deemed appropriate from BIM programs. Through these models, data such as material, period, intervention can be processed and building survey and restitution models can be prepared. These models may also include historical, spatial, and intervention metadata for documentation purposes. Thus, many potential measures of protection, improvement, renovation or re-functioning, etc. restoration studies can be carried out with evaluations [22]. As shown in Figure 2, with the acquisition of a 3D model, the future changes of the structure can be easily updated by changing parametric objects or adding new ones [23].

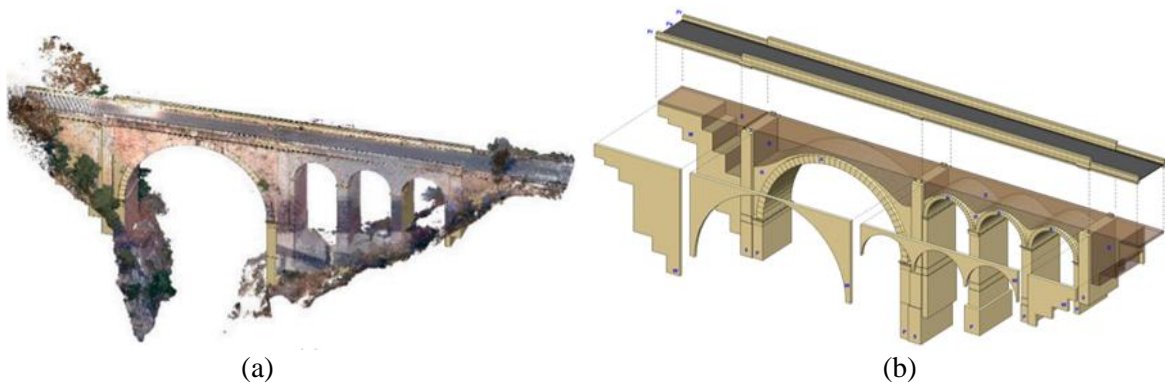


Figure 1. (a) Point cloud of the historical Isbor Bridge (b) Modelling of building elements with family (rvt) [24]

C CREATION OF THE HBIM LIBRARY III

The HBIM process involves combining 'intelligent/parametric' objects (building materials and components), a structure or a building community in a virtual environment. HBIM objects corresponding to relevant pieces of information are integrated into the information model in a structured manner, creating a digital information resource for the cultural heritage asset [11]. In this direction, with HBIM, a virtual library can be created in which all the information about that heritage, as well as the elements of the architectural heritage, are stored in the entire model. Thus, researchers and heritage-related experts from different countries can access and study information about structures that are not physically accessible at the moment thanks to the library created, and have the opportunity to use them in their projects when necessary.

With HBIM, parametric object libraries are created by examining the taxonomic and typological common features and the way they come together, of unique architectural elements belonging to a certain state, period, region, movement in the study of Almainani and Nawarinin (2019), it is focused on converting Ottoman-era architecture belonging to Islamic architecture (HIAC) in Hejaz city into a BIM-based 3D object library in accordance with construction methods, structural elements and architectural components. Structural elements and architectural components are also arches, domes, wooden decorations, etc. It is divided into sub-sections and modeled parametrically. The authors report that they have developed the "Islamic architecture library" software add-on based on the examples mentioned (Figure 3).



Figure 2. Transferring a historical bay window, from point cloud to 3D Model, then to BIM [25]

Similarly, Baik et al. (2014) have established HBIM Library for civil architecture samples in Jeddah city. In this study, the process was accelerated by using laser scanning techniques and automatic/semi-automatic surface knitting utilities for custom-made or uniquely produced wooden ornaments. Gökmen et al. (2021), on the other hand, examined the muqarnas element, which was typically used in mosques of the Seljuk period, specifically for the only mosque in Kayseri, and defined it as a productive algorithm by computationally analysing the growth and branching behaviours through geometric and trigonometric relations consisting of the 2D projection of the muqarnas. (Figure 4).

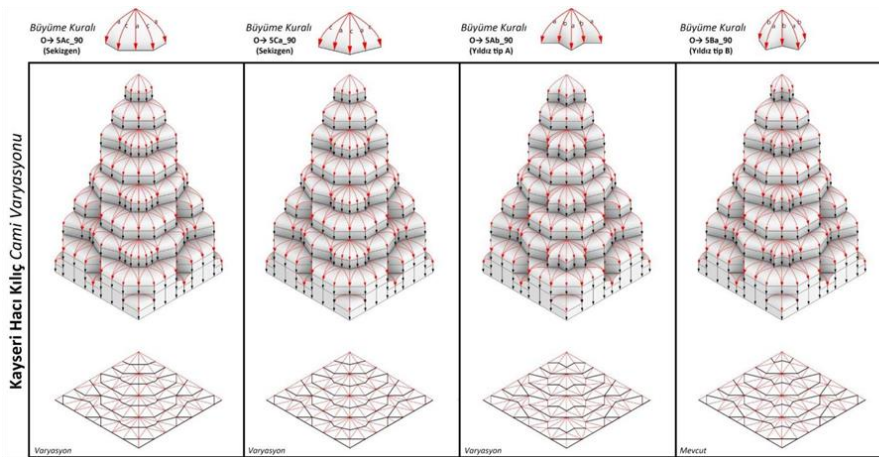


Figure 3. Different Muqarnas variations [25]

In the conference paper of Altun and Özkar (2021) , the pattern on the brick wall panel used in In Anadolu Selcuklu architecture was examined and algorithmically analysed. In this direction, it has been possible to reduce hundreds of different shape alternatives to a single object with minimal parameters, depending on the parametric relationship rules, through the HBIM/BIM Library. [26].

D FIELD STUDY: AKÇAKOCA DISTRICT, YUKARI NEIGHBORHOOD REGISTERED HOUSE WITH INVENTORY NUMBER 56 IV

Although the Upper neighbourhood of Akçakoca District, Düzce Province, has remained from the Ottoman settlement in general, organic planned urban texture is seen. A new orthogonal grid-textured settlement system was built in place of the houses that burned down as a result of a large-scale fire at

the beginning of the 20th century. There are 84 registered houses in the area, among other registered building types. The historical texture has largely survived to the present day due to the fact that there are a lot of registered buildings, they are partially well preserved, and life continues inside the buildings. Within the scope of the street rehabilitation project in the area, laser scanning, point cloud and orthophoto data were created in 2007 by the BHA zoning planning firm. The first study was not accepted by the Kocaeli Cultural Heritage Preservation Regional Board as a result of the failure to carry out the individual survey, restitution and restoration works of the registered buildings in the area, and the study was terminated after the street survey and application drawings were obtained.

Akçakoca Municipality's collective grant application to the Ministry of Culture and Tourism for the same area in 2018 resulted in a positive result for the street rehabilitation of Cumhuriyet Street and Gören Street, the preparation of the survey, restitution and restoration projects of the registered houses on these streets. The second street rehabilitation project was undertaken by Yıldız Architecture Office. Measurement details in the field; Measurement operations were performed with an on-site laser scanning device, a point cloud was obtained. The resulting raw scan data is combined with 3d laser scanning, scene 5.5 program. After the merging process was completed, the colour was assigned to the point data in each coordinate from the photos obtained with the integrated camera of the device and the colouring process was performed. The resulting point cloud data was transferred out of the program and converted to a format that can be used in computer aided design (CAD) programs. In addition, the obtained point cloud data was transferred as a 2-dimensional orthophoto in dwg format (Yıldız Architectural Office, 2020). In this process; While there are 12 registered houses within the scope of the project, the measurements and drawings of this house could not be made within the scope of the collective grant, as a result of the beneficiary's non-consent of one house. The house that is the subject of the field study of this study is the housing structure with inventory number 56, located on 251 Island 7 plots. Although the building is the most qualified residential structure that is often found in old photographs and is considered worthy of being recorded, it has lost its original qualities today. In two street rehabilitation studies carried out at different times in the same historical area, serious differences were determined on the basis of this structure (BHA Zoning Planning, 2007; Yıldız Architectural Office, 2020). In the first survey study, 2D CAD drawings and some photographs of the single facade of the original state of the building were obtained. Later in the building, the windows in the attic were closed, the windows were converted to plastic-based materials, the arches and ornaments on the roof were destroyed, the facade was plastered and painted. Thus, in the process of the second study conducted in the field, it became impossible to have an idea of the original state of the structure without previous reports and drawings. Within the scope of the street rehabilitation project in the building, an application project was proposed by taking the old survey and application drawings as reference. (Figure 5).



Figure 4. Current state of the building (a) (1. author, 2020), (b) Application project (BHA Architecture, 2007)

The "scan to BIM" process of the study could not be followed because the registered house did not give permission, the previous laser scans could not be reached, and therefore the point cloud could not be reached. While 2-dimensional drawings with orthophoto and dwg extension of a single facade can be

accessed in the first relief drawings, the study was carried out in the form of transfer from two dimensions to three dimensions due to the fact that a maximum of 2 facades can be reached in the photographs. Within the scope of the HBIM study, the windows, doors, shutters of the two facades of the building were modeled one by one from the beginning (Figure 6). While modelling the building elements, Sketch Up software was preferred due to its ease of modelling, widespread use and ease of transfer.

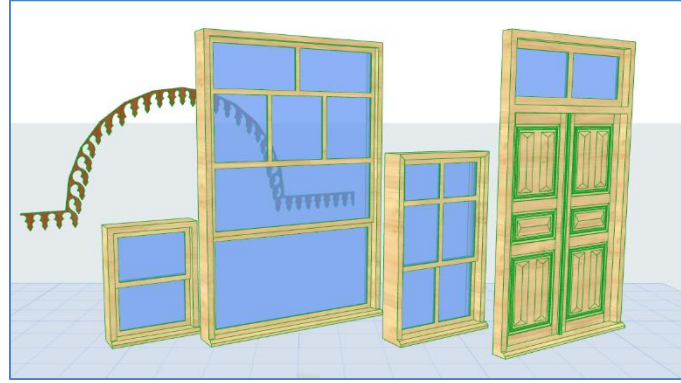


Figure 5. Intermediate step of HBIM library creation.

After the Sketch Up model was created, the models were defined as sub-elements of BIM objects in the Archicad (Graphisoft) program. Thanks to this, it is possible to access it from the settings of the corresponding building element. If the subject of the door leaf is to be detailed, after a door leaf is transferred to the BIM program individually, it is placed on the appropriate plane and defined as a "door leaf" sub-object, and then it is possible to reach various variations in accordance with the sub-parameters of the door element. As can be seen from Figure 7, hundreds of different types of doors can be easily obtained as a result of different combinations with many different sub-elements such as width, height dimensions, handle and kick plate, opening lines, materials (separately for the door leaf, frame, handle), details of the door placement on the wall, brick arch, sill, interior-exterior moldings, shutter, hilly lighting.

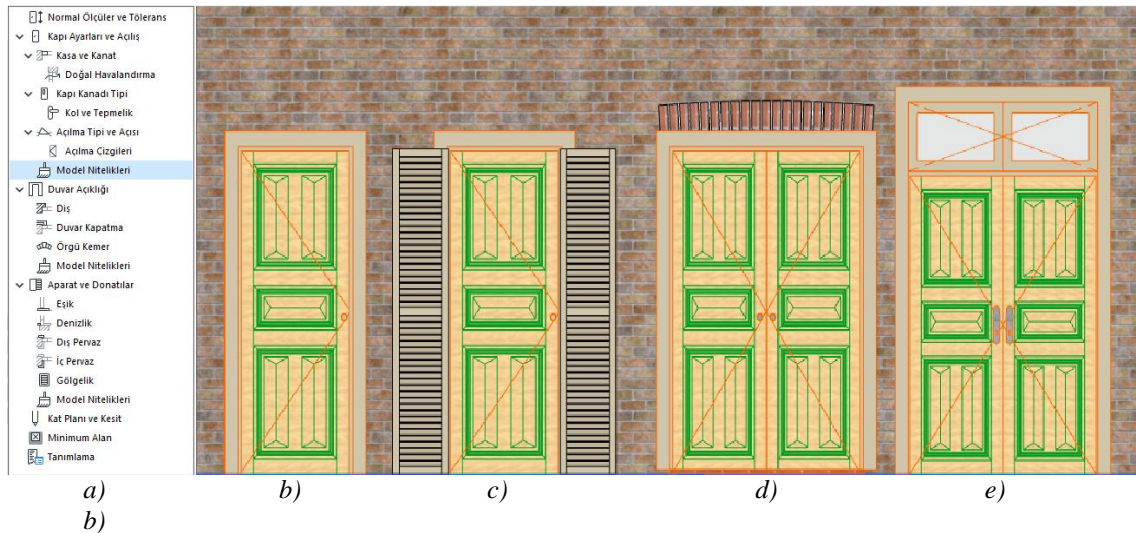


Figure 6. Creating door leaf alternatives as parametric objects 7a) Door parameters, 7b) single wing version 7c) Single wing, lowered version, 7d) Double-winged version with a mesh belt, 7e) Double wing, hilly version

After the structural elements were modeled, the walls of the structure were described as three-dimensional with wooden carcasses and brick mesh. A photo-realistic image of the building, whose modelling was completed, was created in the BIM program. Thus, the modelling of the building in

accordance with the first survey project was completed and its phases at different times were brought together (Figure 8).

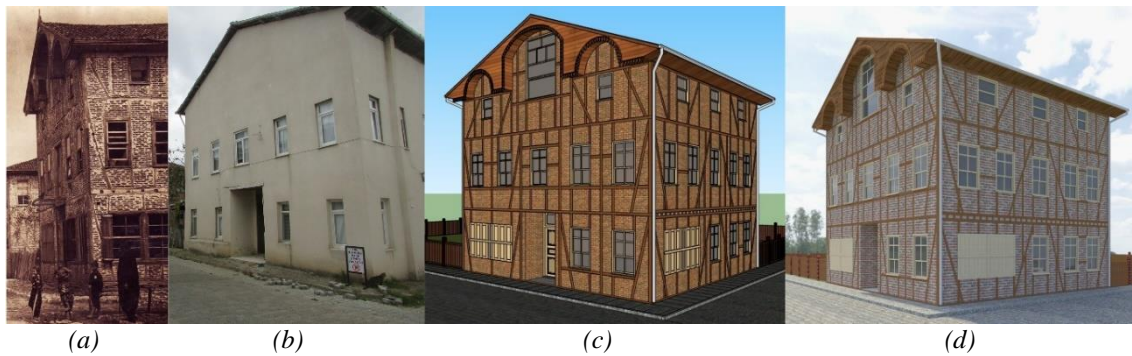


Figure 7. a) The old picture of the registered structure, b) current state, c) the modeled version of the structure, d) photorealistic image of the structure

The created model was transferred to a program called Enscape, which provides photo-realistic image creation and interactive interaction, a similar data transfer is also possible for the Graphisoft BIMx program. It is possible to assign materials, control natural and artificial light, place landscape elements, people, vehicles in Enscape software. With this software, the model was transferred to the virtual environment via the web page and interactive access was provided by the web address [27] (Figure 9). In this environment, the user, employer or visitors can make interventions such as walking around the building, adjusting the perspective, and clarifying the edge contours. Easier and faster access is provided by transferring the web page to which the model is transferred to the data matrix. (Figure 9). As the next step, the QR code is placed in a corner of the building and it is aimed that the visitors coming to the historical neighbourhood will have the QR code read and experience the original state of the building on their mobile devices or with virtual reality glasses.



Figure 8. Provided interactive access to the virtual environment of the proprietary structure (<https://api2.enscape3d.com/v1/view/8e96842b-29a8-4408-ac83-99c07b6489de>)

Apart from this method, it is also possible to model directly by means of parametric window elements in BIM programs. In the Revit (Autodesk) program, family; in Archicad (Graphisoft) GDL (Geometric Description Language) are used to create parametric objects. It is also possible to create parametric doors and windows with the İdeCAD Odt program, which is a sub-program of IDECAD. Although it is possible to transfer models to each other in any program that can transfer files in 3ds, Obj, IFC (Industry

Foundation Classes) format, the number of polygons, surface quality and transfer success vary. The work flow chart of the case study is given in Figure 10.

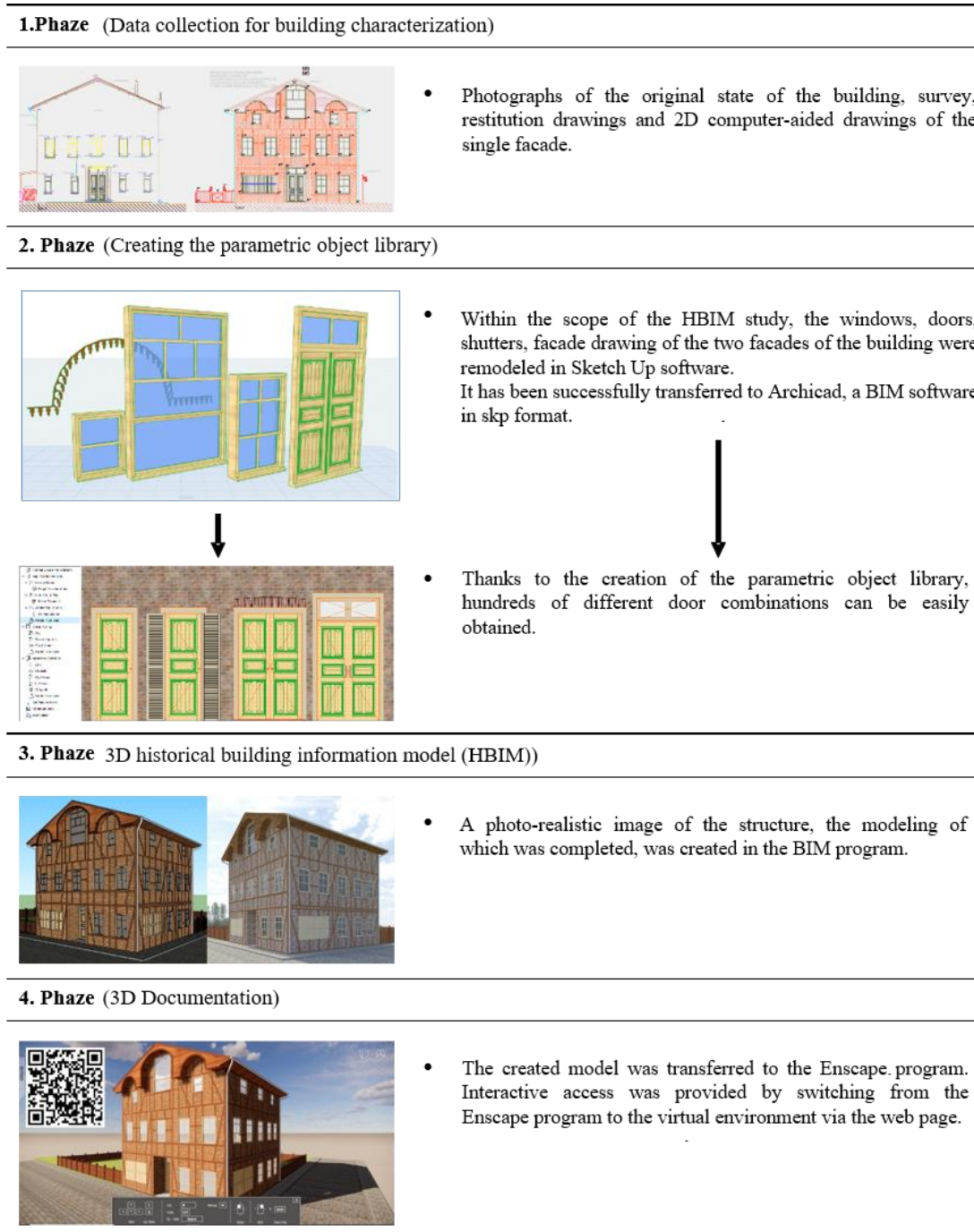


Figure 9. HBIM Case study procedure sequence

IV. DISCUSSION

When the literature review and the field study are evaluated, it is seen that parametric objects are one of the most important elements of BIM and HBIM. Unless metadata is not processed into the model, the information transfer part to the future will be inadequate.

Details such as doors, windows, shop shutters, railings, pediment decorations can be defined parametrically thanks to the use of parametric object-based software of the case study. In this case, as a result of creating, classifying these elements as parametric objects, sharing them as open sources would be expanded. Documenting structures in another part of Anatolian houses' elements, transferring them to the BIM environment, introducing them, and converting them into a digital heritage would provide great convenience and speed. At the same time, a large number of usage alternatives are created by providing a variety of objects such as doors and windows.

In geographies containing many cultural heritages, the conversion of buildings, and traces of structures into digital heritage will of course be a difficult, time-consuming and costly process. With the creation of HBIM libraries, this process can be shortened, simplified or even partially semi-automated.

With HBIM, the decision-making process can be managed through a single platform where more controlled analyses and simulations can be made. At the same time different stakeholders can provide information and control about the structure, periods and interventions, instead of sudden decisions that need to be taken during the repair. Similarly, it can be decided which of the repair alternatives to be made is more sustainable. Also, The HBIM model can be used for energy calculations. The supporting process of the building can be modelled by performing static calculations and simulations.

In addition, limiting the number of visitors according to the time and place, as in the process of epidemic diseases, can prevent both the risk of contamination and the damage of the building due to the crowd. By making fire evacuation simulations, emergency action plans can be developed. Besides it is possible to switch the building to smart building with the advanced technologies.

In cases where these studies are not carried out, it is possible for us to lose this cultural diversity and not to reach it with sufficient efficiency. As indicated in the field study, the measurements taken earlier provided qualified data on the original appearance of this particular building, so that it could be modelled, transferred to HBIM and virtual reality. Otherwise, the most qualified residential structure belonging to the historical neighbourhood would have been deleted from the urban memory along with people's memory. It has become impossible to make a match between the old photographs and the current state, and to define the place of the building in the memories.

V. CONCLUSION

Architectural Heritages are valuable universal values, and the preservation and transfer of these values to future generations is fixed by international conventions. HBIM is an up-to-date method that is frequently used at the international level for the protection and transfer of cultural heritage as digital heritage. With HBIM, cultural heritage is modelled with the help of parametric objects in a computer environment and historical background, material composition, structural components, distortions, etc. are added to these parametric objects outside the geometry of the structure all information can be integrated. Thus, it provides the opportunity to edit and update all the information about the architectural structure, to carry out conservation, evaluation and restoration interventions of the structure in the most accurate and effective way. Also, HBIM; It has led to the creation of new areas of use in taking the survey of historical buildings, 3D modelling, re-functioning, creating the HBIM library, embodying cultural heritage in the digital world with VR (virtual reality)-AR (augmented reality), increasing virtual museums and virtual applications in museums.

The use and dissemination of HBIM will make it easier for us to better protect our cultural heritage and pass it on to future generations; protect our cultural heritage buildings from threats. In addition to the protection of registered heritage buildings, the protection of non-registered rural heritage and modern heritage is almost as important. Archiving these structures using HBIM methods and keeping them as digital cultural heritage means preventing them from being completely lost.

There are multi-layered structures in geographies such as Turkey that have witnessed the lives of many ancient civilizations. It is not possible to reach all of these layers due to physical, temporal and economic reasons. With HBIM, heritage structures that cannot be reached in these layers can be digitized and their original state can be obtained digitally. With this model, concepts such as community awareness, common cultural heritage concepts, and urban memory can be kept alive for users living and visiting the historical area.

In terms of archiving, the digitization of archiving techniques in the Directorate of Surveying and Monuments will also increase the continuity and controllability of information. At the simplest level, archiving point clouds obtained as a result of laser scanning with cloud technology, which can also be accessed at the public's common service, will be much more effective than physical archives.

Transferring cultural heritage structures to HBIM is a more dynamic and accessible expression system in order to reflect data collecting. For this reason, sharing the HBIM library with open code under a certain legal protocol will be an important step for its widespread use.

One of the most important elements in the transition to digital with HBIM is the creation of a parametric object library. In this direction, HBIM libraries should be created regularly by classifying them in regional and historical terms. For this reason, architects need to master parametric design methods as well as three-dimensional modelling techniques. In this way, architects can take more creative, goal-oriented approaches that can actively contribute to the program, not just a user in BIM programs. Thus, it will begin to play an active role on object libraries and therefore on HBIM. It is possible to increase our influence in recognizing, promoting, disseminating our own cultural heritage and transferring it to younger generations.

V. REFERENCES

- [1] M. de C. J. Barbosa, "As-built building information modeling (BIM) workflows : from point cloud data to BIM," Ph.D. dissertation, Universidade de Lisboa, Portugal, 2018.
- [2] G. Rocha, L. Mateus, J. Fernández, and V. Ferreira, "A scan-to-bim methodology applied to heritage buildings," *Heritage*, vol. 3, no. 1, pp. 47–65, 2020, doi: 10.3390/heritage3010004.
- [3] UNESCO, "Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage Adopted by the General Conference at Its Seventeenth Session", Paris, 16 Nov 1972: Fre. UNESCO.
- [4] M. Vecco, "A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible," *J. Cult. Herit.*, vol. 11, no. 3, pp. 321–324, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.culher.2010.01.006.
- [5] Z. Ahunbay, "Tarihi çevre koruma ve restorasyon." İstanbul, Türkiye, Yapı Dergisi, Mimarlık Tasarım Kultur Sanat. Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, 1996, p. 173.
- [6] H. Aladağ, "Kültür varlıklarının korunmasında koruma yönetimi süreci," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [7] M. Murphy, E. McGovern, and S. Pavia, "Historic building information modelling (HBIM)," *Structural Survey*, vol. 27, no. 4, pp. 311–327, 2009, doi: 10.1108/02630800910985108.
- [8] D. P. Pocobelli, J. Boehm, P. Bryan, J. Still, and J. Grau-Bové, "BIM for heritage science: a review," *Heritage Science.*, vol. 6, no. 1, p. 1-15, 2018, doi: 10.1186/s40494-018-0191-4.
- [9] R. Garber, *BIM Design, Realising the Creative Potential of Building Information Modelling.* West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2014 pp. 122-131.

- [10] E. Kuytan and N. Benli Yıldız, “Yapı Bilgi Modellemesinin (YBM) İnşaat Yönetimi Açısından Değerlendirilmesi,” Conference: 2. International Congress on Construction materials Engineering and Architecture, Ankara, Turkey, 2021, ss. 13-27
- [11] S. Antonopoulou and P. Bryan, BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model, Swidon, England, Historic England, 2017, pp. 5-8
- [12] F. Banfi, “HBIM, 3D drawing and virtual reality for archaeological sites and ancient ruins,” *Virtual Archaeology Review*, vol. 11, no. 23, pp. 16–33, Jul. 2020, doi: 10.4995/var.2020.12416.
- [13] E. Kömürcü and N. Benli Yıldız, “Historic Building Information Modelling (HBIM),” In Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA (Vol. 4, No. 1, , Alanya, Turkey, 2021, pp. 589-597 doi: 10.38027/iccaua2021tr0072n25.
- [14] G. Varinlioğlu, G. Alankuş, A. Aslankan, and G. Mura, “Dissemination of digital heritage through gamebased learning,” *Metu J. Fac. Archit.*, vol. 36, no. 2, pp. 23–40, 2019, doi: 10.4305/METU.JFA.2018.2.9.
- [15] S. S. Bastem and A. Cekmiş, “Development of historic building information modelling : a systematic literature review literature review,” *Build. Res. Inf.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–32, 2021, doi: 10.1080/09613218.2021.1983754.
- [16] M. Korumaz and Ö. Özeren, “Miras Yapı Bilgileri Modellemede (HBIM) Detay Düzeylerine Göre Modelleme ve Kullanım Amaçları,” “IARCAS” 1st International Architectural Sciences and Application Symposium, 27-19 Ekim, 2021, Isparta, Türkiye, pp. 381-390
- [17] Acar A, Atalay Satoğlu FB, Say S, Tunca M, Çetin MC, Çalışkan Ş, Aydın Altay S, Gürol Öngören P, Karakaya F.. “Kültürel Mirasa yönelik coğrafi Konum Tabanlı Mobil artırılmış gerçeklik Teknolojisi Uygulaması araştırması Ve geliştirilmesi”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* vol. 37, no. 4, pp. 1931-44, 2022 <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.932478>., doi: 10.17341/gazimmfd.932478.
- [18] Y. Kaya, Y. A. Yiğit, A. Ulvi, and M. Yakar, “Arkeolojik Alanların Dokümantasyonunda Fotogrametrik Tekniklerinin Doğruluklarının Karşılaştırmalı Analizi : Konya Yunuslar Örneği,” *Harita Dergisi*, vol. 165, pp. 57–72, 2021.
- [19] E. U. Sağın, K. Şerifaki, and B. İpekoğlu, “Kuşadası’nda Geleneksel Ahşap Bir Konut Yapısının Özgün Değerleri İle Korunması”, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, 2017, pp. 443–452.
- [20] Corneliussen, H.G., Herman, C., Gajjala, R.. “ICT Changes Everything! But Who Changes ICT?”. In: Kreps, D., Ess, C., Leenen, L., Kimppa, K. (eds) This Changes Everything – ICT and Climate Change: What Can We Do?. HCC13 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 537. Springer, Cham, 2018, pp. 250–257 doi: 10.1007/978-3-319-99605-9.
- [21] F. Remondino, “Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning,” *Remote Sensing*, vol. 3, no. 6, pp. 1104–1138, 2011, doi: 10.3390/rs3061104.
- [22] G. Frosini, C. Biagini, P. Capone, V. Donato, and T. Giusti, “HBIM and fire prevention in historical building heritage management,” in ISARC 2016 - 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2016, pp. 182–190, doi: 10.22260/isarc2016/0023.
- [23] F. Fassi, C. Achille, A. Mandelli, F. Rechichi, and S. Parri, “A New Idea Of Bim System For Visualization, Web Sharing And Using Huge Complex 3D Models For Facility Management,” *The*

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-5/W4, 40, 2015, pp. 359-366.

[24] C. A. León-Robles, J. F. Reinoso-Gordo, and J. J. González-Quiñones, "Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 3: 121, 2019, doi: 10.3390/ijgi8030121.

[25] Baik, A., Alitany, A., Boehm, J., & Robson, S. "Jeddah Historical Building Information Modelling" JHBIM"—Object Library. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. 5, pp. 41–47, 2014 doi: 10.5194/isprsannals-II-5-41-2014.

[26] C. Priavolou, "To BIM or not to BIM? Lessons learned from a Greek Vernacular Museum Building," *AIMS Environmental Science*, vol. 7, no. 2, pp. 192–207, 2020, doi: 10.3934/environsci.2020012.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bipolar ve Unipolar SPWM Tekniklerinin Düşük Maliyetli Sistemlerde Deneysel İncelenmesi

 Serdar YILMAZ ^a,  Hüseyin YILDIZ ^{b, *}

^a İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

^b İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1259818

ÖZ

Doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren invertör tasarımları, kullanım alanına bağlı olarak maliyet, gürültü ve uyarlanabilirlik bakımından farklı özelliklerde sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Tasarım ihtiyaçlarına bağlı olarak, yüksek performans veya düşük maliyetli invertör sistemleri ve algoritma tasarımları yapılmaktadır. Çalışmada düşük maliyetli sistemler için, ATmega2560 mikrodenetleyici ve BTS7960S motor kontrol kartı kullanılarak bipolar ve unipolar Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (SPWM) teknikleri incelenmiş, düşük güçlü indüksiyon motoru kullanılarak farklı modülasyonların hız kontrol kabiliyetine etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. 24V ve 20A güç ünitesi ile beslenen sistemde gerilim trafo kullanılarak 220 volta yükseltilmiştir. Motor çalışması ve çıkış akımı sinyalleri 10Hz ile 100Hz sinyal frekansı aralığında raporlanarak, belirtilen frekans aralığında çıkış sinyallerinin analizleri yapılmıştır. Bipolar ve unipolar SPWM algoritmaları için farklı frekans değerlerine ait toplam harmonik bozulma (THD) ve ortalama kare hatası (RMSE) büyüklükleri hesaplanarak yorumlanmıştır. Çalışmada düşük maliyetli devre elemanları kullanılarak bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının her ikisinin de hız kontrolü uygulamalarında kullanılabilmesi, unipolar SPWM algoritmasının bipolar SPWM algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Unipolar SPWM, Bipolar SPWM, Invertör, İndüksiyon motor kontrolü

Experimental Investigation of Bipolar and Unipolar SPWM Techniques in Low Cost Systems

ABSTRACT

Inverter designs that convert direct current (DC) to alternating current (AC) require systems with different features in terms of cost, noise and adaptability depending on the usage area. Depending on the design requirements, high performance or low cost inverter systems and algorithm designs are realized. In the study, bipolar and unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) techniques were investigated for low-cost systems using ATmega2560 microcontroller and BTS7960S motor control card, and the effect of different modulations on speed control capability was experimentally studied by using a low-power induction motor. In the system fed with 24V and 20A power units, the voltage was increased to 220 volts by using a transformer. Motor operation and output current signals were reported in the signal frequency range of 10 Hz to 100 Hz, and output signals were analyzed in this frequency range. Total harmonic distortion (THD) and mean square error (RMSE) sizes of different frequency values for bipolar and unipolar SPWM algorithms were calculated and interpreted. In the study, it has been shown that both bipolar and unipolar SPWM algorithms can be used in speed control applications by using low-cost circuit elements, and unipolar SPWM algorithm gives better results than bipolar SPWM algorithm.

Keywords: Unipolar SPWM, Bipolar SPWM, Inverter, Induction motor control

I. GİRİŞ

İnvertörler, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren devre ve sistem tasarımlarıdır. Literatürde her biri kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip farklı invertör tasarımları mevcuttur. En yaygın türleri, kare dalga invertörler, sinüs dalga invertörler, çok seviyeli invertörler ve Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) invertörleri olarak sıralanabilir. Kullanıcı ihtiyaçlarına uygun olacak şekilde yüksek performanslı veya düşük maliyetli olmak üzere çok çeşitli tasarımlar gerçekleştirmek mümkündür. Örneğin; PWM invertörleri, AC dalga formunu oluşturmak için PWM yöntemini kullanan invertörlerdir. Yüksek güçlü uygulamalarda kullanılabilir ve düşük harmonik bozulma ile yüksek kaliteli bir çıkış dalga formu üretebilirler [1, 2]. Çok seviyeli invertörler ise; bir çıkış voltajı dalga formu üretmek üzere tasarlanmıştır; örneğin, üç seviyeli bir invertör, üç farklı voltaj seviyesi üretir. Bu invertörler, rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda kullanılır ve düşük harmonik bozulma ile yüksek kaliteli bir çıkış dalga formu üretmek için tasarlanmaktadır. Bu kapsamda SPWM tekniği, rüzgâr ve güneş enerji paneli DC-AC dönüşüm devreleri, indüksiyon ısıtma devreleri, AC motor sürücü sistemleri, çok katlı invertör DC-AC güç dönüşüm devreleri ve DC batarya şarj devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2].

2007 yılında Erkan Deniz ve ekibi tarafından gerçekleştirilen yayında, beş seviyeli izole DC kaynaklı kaskat inverterin SPWM tekniği ile kontrolü çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, çok seviyeli inverterler, taşıyıcı SPWM ve kaskat inverter hakkında simülasyon deneyler yapılarak veriler sonuçlar tartışılmıştır. 3 fazlı kaskat invertör devresi, IGBT transistörler ile köprü devresi oluşturulmuştur. Köprü devreleri ayrı 3 farklı RL yüke aktarımı çalışılmış ve SPWM kontrol tekniği kullanılmıştır. Kaskat kullanımın kazanımları, SPWM tekniğinin sağladığı avantajlar, toplam harmonik bozulmalar üzerinde elde edilen sonuçlar ile değerlendirilmiştir [3]. İlhami Colak ve ekibi 2012 yılında yayınlanan çalışmalarında, düzenli modülasyon şemalarında dikkat edilmeyen yan bant harmoniklerini ortadan kaldırarak toplam harmonik bozulmayı (THD) azaltan bir SPWM modülasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Önerilen SPWM algoritması, sayısal sinyal işlemcisi (DSP) kart ve üç fazlı tam köprü invertöre uygulanmıştır. Önerilen SPWM yapısına, modülatördeki taşıyıcı ve referans sinyallere dijital filtreleme uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen araştırmada simülasyon ve deneysel çalışmalar birlikte sunulmuştur. Önerilen yenilikçi SPWM algoritması, eZdsp F2812 dijital veri işleme kartı kullanılarak geliştirilmiş ve üç fazlı tam köprü invertöre uygulanmıştır. Simülasyon çalışmaları, geliştirilmiş SPWM modülatörünün doğruluğunu kanıtlamak için Matlab/Simulink kullanılarak gerçekleştirilir. DSP kontrollü tam köprü invertör, 380 V üç fazlı AC hat çıkışları üretmek için 200Vdc besleme kullanılarak da çalıştırılmıştır. Çalışma, taban ve yan bant frekanslarındaki harmonik giderme sorunları açısından başarılarını göstermektedir [4]. Jino Joy ve ekibi tarafından yapılan 2016 yılındaki çalışmada, SPWM ve Uzay Vektör SVPWM teknikleri, Sabit Mıknatıslı Fırçasız DC (PMBLDC) motor sürücü sisteminin değişen yüke sahip bir Kanonik Anahtarlama Hücresinin (CSC) hız kontrolü, tork dalgalanması azaltılması ve Güç Faktörü Düzeltmesi (PFC) tartışılmıştır. Sinüzoidal SPWM ve Uzay Vektör SVPWM beslemeli sensörsüz PMBLDC motor sürücüsüne sahip bir Kanonik Anahtarlama Hücresinin performansları Konvansiyonel ve bulanık mantık denetleyicileri altında karşılaştırılmıştır. Bu kontrolörlere sahip bir sensörsüz güç faktörü düzeltmesi (PMBLDC) motorun performans parametreleri önce MATLAB/Simulink yazılımı ile analiz edilmiştir. PMBLDC motor, yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşma performans parametrelerine dayalı olarak SVPWM ve SPWM teknikleri karşılaştırılmıştır. SPWM tekniği ile performans karşılaştırmasında bulanık mantık kontrollü motor, PI kontrollü motora oranla daha hızlı nominal değerlerine ulaştığı ve düşük toplam harmonik bozulma (THD) değerlerine sahip olduğu raporlanmıştır [5]. K. Latha Shenoy ve ekibi 2017 yılında yayınlanan çalışmada fotovoltaik panelleri için maksimum güç noktası izleyen (MPPT) SPWM tabanlı sürücü devre tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada öncelikli olarak 3,5KW güce sahip fotovoltaik paneller için teorik sistem modellemesi hesaplanmıştır. Fotovoltaik panellerin farklı radyasyon ve ısınım değerlerinde maksimum güç transferi için “perturb & observe” MPPT algoritması tercih edilmiştir. Çalışma Matlab/Simulink üzerinde gerçekleştirilmiştir. MOSFET anahtarlı bir tam köprü invertör devre ve 5kHz anahtarlama frekansı ile anahtarlama için iki kutuplu bir SPWM tekniği kullanılmıştır. İnvertör, 50Hz frekanslı bir sinüs dalgası ile 5kHz frekanslı üçgen dalga formu karşılaştırılarak üretilen darbeler

yardımıyla tetiklemektedir. Yük voltajının THD analiz edilerek, LC filtresi sayesinde çıkış gerilimi üzerindeki gürültüler giderilmektedir [6].

SPWM tekniği geniş kullanım fırsatları sunması nedeniyle Lisans/lisansüstü eğitim amacıyla E. A. Samiotis ve ekibi tarafından 2018 yılında bir çalışmada yayınlanmıştır. Çalışmada SPWM invertör darbe üretici devresi için bir eğitim kiti geliştirilmesi ve uygulanması amaçlanmıştır. MULTISIM programı için gerekli modelleri oluşturularak, sinyal üreticisinin program üzerinde deneyimlenmesi ve bir SPWM üreticinin nasıl çalıştığı anlatılmıştır. Tasarlanan simülasyon devresinde LM412 JFET girişli Op-Amp LM360 karşılaştırıcı Op-Amp devreleri bulunmaktadır. MULTISIM programı üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında uygulama için devre PCB üzerinde kurulmuş ve devre testleri yapılmıştır. Sinüs sinyali 50Hz civarında tutulurken karşılaştırma için üçgen dalga değişimi 100Hz-2Khz arasında düzenlenmiştir. Çalışmada eğitim amacıyla ortaya konan çalışmanın sonuçları başarılı olarak değerlendirilmiştir [7]. J. Haema ve ekibi tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen çalışmada, İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması için Tam Köprü Rezonans Çevirici devre sunmayı amaçlamıştır. Endüksiyonlu ısıtma uygulaması için tam köprü rezonans inverteri tasarımı önerilmiştir. Çalışmadaki analizler için voltajı 220V ila 110V 50Hz arasında değiştiren düşürücü transformator, AC'den DC voltajlarına değişen tam köprü doğrultucu, kapı-sürücü devresine ayarlanmış devreyi oluşturan Darbe Genişliği Modülasyonu PWM sinyali, güç kullanan tam köprü inverter MOSFET'ler, elektrik topraklamasını ayıran ve ısıtma bobini ile bobinin voltajını dengeleyen yüksek frekanslı transformatorler kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, metal yüzey 10 saniye içinde ısınmaya başlamaktadır ve 20 saniye süre sonra 595°C ulaşmaktadır [8]. 2019 yılında Y. Birbir ve ekibi tarafından yayınlanan çalışmada PIC16F877 mikrodenetleyicisi kullanarak SPWM invertör tasarımı gerçekleştirilmiştir. SPWM sinyalinin taşıyıcı ve referans sinyalleri konusunda detaylara değinilmemiştir. Tam köprü invertör fonksiyonu için iki farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. İlk kontrol yöntemi olarak iki kutuplu, tam köprü invertör çıkışına PWM anahtarlama uygulanmıştır. Bipolar PWM anahtarlamanın çıkış dalga biçimi, pozitif ve negatif dönüşümlerle aynı anahtarlama frekansı değerinde oluşturulur. Sistemin anahtarlama frekansı, üçgen dalga taşıyıcı sinyal ile aynıdır. İkinci kontrol yöntemi olan invertör çıkışı, tek kutuplu bir gerilim anahtarlama PWM olarak çalıştırılmaktadır. Devre tasarımı, uygulaması ve deneyler sonunda her iki tekniğin de (unipolar-bipolar) birbirine göre artı ve eksi özelliklere sahip olduğu tartışılmaktadır. Deneylerde çıkış geriliminin toplam harmonik bozulma miktarı %0,7 ile %6,2 arasında değişmektedir. İntertör prototipinin 100W güç oranı, yük olarak 50 Watt dirençli yük ve 50 Watt gölge kutuplu motor ile test edilmiştir. Toplam harmonik bozulma THD, değerlendirildiğinde, tek kutuplu gerilim anahtarlama düzenine sahip SPWM, Bipolar gerilim anahtarlama daha iyi bir harmonik profili ortaya koymaktadır [9]. Maher G. M. Abdolrasol ve ekibinin 2021 yılında yayınlanan çalışmasında DC-AC dönüşümler için MATLAB/Simulink programı üzerinde SPWM tekniğiyle invertör simülasyonu çalışması gerçekleştirilmiştir. 3KW'lık yerel bir yüke güç sağlayan, fotovoltaiik paneller ve depo bataryalarının, değişen yüke uygun olarak, SPWM darbesi için gereken en iyi modülasyon indeksi hesaplanması yapılmıştır. Anahtarlama için 6 adet izole kapılı bipolar transistör (IGBT), SPWM modülasyon indeksini denetlemek için PI kontrolör ve bu kontrol parametrelerini hesaplamak içinde sürü parçacık optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada SPWM referans ve taşıyıcı sinyal frekanslarına atıfta bulunulmamış fakat yük üzerinde oluşturulan 50Hz 415Vrms gerilim ve 3kW aktif güçten bahsedilmiştir. Ayrıca çalışma uygun PI katsayılarıyla gerçekleştirilen kontrol ile toplam harmonik bozulmanın (THD) daha az olduğu bildirilmiştir [10]. Charles I. Odeh ve ekibi tarafından 2021 yılında yayınlanan bir çalışmada, SPWM tekniği, kademeli H-köprü (CHB) çok seviyeli invertörde (MLI) her bir faza, bir dizi çıkış gerilim seviyesini oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışmada, çoklu veya kademeli olarak adlandırabileceğiniz, orta ve yüksek gerilim uygulamalarına uygun, inverter için klasik seviye veya faz kaydırmalı özelliklerde SPWM tekniği kullanılmaktadır. Çalışmada 3 Fazlı ve 7 kademeli olarak seri bağlı H-köprü devresi RL yüküyle MATLAB/SIMULINK programıyla simüle edilmiş ayrıca deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kontrol için alan programlamalı kapı dizilerine (FPGA) sahip dijital sinyal işleme kartı kullanılmıştır. Üç faz izoleli DC gerilim doğrultucu köprülere bağlanmıştır. Bu köprüler, 3 sargılı bir transformator aracılığıyla üç fazlı AC güç kaynağı tarafından sağlanmıştır. Her bir DC gerilim değeri 100V ve modülasyon indeksi 0,95'tir. DC gerilimler 200V'tan 100V'a ve tekrar 200V'a değiştirilebilmektedir. Çıkış akımlarında, sabit tepe değerini ve sinüzoidal dalga biçimini koruduğu görülmektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda, her bir faz için birbirinden izole 100V

DC gerilim, 50Hz temel frekans, 5kHz taşıyıcı frekans ve 3,9KW çıkış gücü olarak elde edilmektedir. Sonuç olarak, kademeli H köprülerin tamamındaki gerçek güç değişimleri çok dar bir bant içinde tutulabilmekte ve önerilen kontrol yaklaşımı, faz ve seviye kaydırma tabanlı taşıyıcı SPWM teknikleri arasında aracılık yapan hibrit bir modülasyon yapısı sunmaktadır [11]. Güneş panellerinden güç aktarımı için, literatürde yer alan bir çalışmada mikrodenetleyici tabanlı SPWM tekniği uygulaması gerçekleştirilmiştir. PIC 18F4431 mikrodenetleyicisi tek fazlı SPWM sinyal ve tam köprü doğrultucu devresi kurulmuştur. Sürücü devresinin çıkış gerilimi 10V-20V aralığında değişmektedir. Köprü devresi MOSFET ve IR2110 tüm devre sürücüsünden oluşmaktadır. Elde edilen tek fazlı PWM sinyalin daha az harmonik oluşturmuş, ölü zaman kontrol devresi, sistemi güvenilir, kompakt ve düşük maliyetli olmasını sağlamıştır [12]. S. Syed Abdul Haq ve ekibi tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışmada I tipi dört seviyeli invertörün kapasitör voltaj dengelemesi için SPWM tekniğiyle kullanılmıştır. Dört aşamalı FC tip I invertör, klasik ve gelişmiş dört kademeli invertöre göre daha az sayıda anahtara ve bileşene sahip olması yüksek performanslı-gerilim uygulamaları için etkili kılınmaktadır. Önerilen kontrol yöntemlerinin etkinliği ve yeterliliği, sabit ve geçici koşullar altında ve çeşitli modülasyon hızları ve yüklerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, kapasitör voltajını kontrol etmek için geliştirilen kontrol yönteminin etkinliğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan SPWM tekniğine ait taşıyıcı ve referans sinyallerin detaylarından bahsedilmemektedir [13]. MATLAB/Simulink üzerinde simülasyon olarak gerçekleştirilen 2021 yılı araştırma çalışmasında M. S. Endiz ve ekibi, çok kademeli DC kaynakların invertör devresi üzerinden SPWM tekniği ile AC güç dönüşüm çalışması gerçekleştirilmiştir. SPWM tekniği, bipolar ve unipolar olarak iki farklı referans sinyal algoritması ile çalışılmıştır. Algoritmalar, tek fazlı tam köprü inverter devresi üzerinde uygulanarak çalışmalar yapılmış, çalışmanın sonucunda unipolar SPWM tekniğinin daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Özellikle unipolar SPWM tekniğinin daha fazla kontrol noktası oluşturması, invertör üzerindeki kontrol kabiliyetlerini artırmakta ve sonucunda yük üzerindeki gücün toplam harmonik bozulmalarını (THD) azaltmaktadır [14]. Çok kademeli H-köprü ile tasarlanan invertör devresi 2022 yılında yapılan bir yayında A. Sedaghati ve ekibi tarafından araştırılmıştır. Araştırma sonucunda invertör devresindeki kademeli gücü dengeleyen ve güneş enerji panellerinin daha uzun ömürlü olmasına katkı sunan algoritma önerilmektedir. Çalışmada deneysel gerçek devre ve cihazlar yerine, OPAL-RT OP4510 gerçek zamanlı modül sistem kullanılmıştır. Sistemin modülasyon tekniklerini uygulamak için bir dSPACE MicroLabBox kompakt prototipleme ünitesi ve dSPACE ControlDesk yazılımı tüm sistemin takip edilmesi için sistemde yer almıştır. Bu çalışmada, aşamalar arasındaki güç sapmasını en aza indirmek için dengeli elektrikli merdiven modülasyonu (BPSCM) adı verilen yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma, rasgele bir vektörün örnek uzayı olarak invertör hücrelerinin güç analizine dayalı olarak geliştirilmiştir ve basit hesaplamalar kullanılarak devreler üzerinde uygulanabilmektedir. Önerilen yöntem, yük açısına bağlı olmadığı ve yöntem, $\pm 90^\circ$ yük açısı için güç sapması sıfır olacak ve sapma değeri yalnızca $\phi = 0^\circ$ için maksimum olacak şekilde tasarlanmıştır, bu literatürde yer alan minimum güç sapmasından çok daha küçüktür. Çalışmada, BPSCM'nin avantajları; basit hesaplama, anahtarlama modeli, kademe sayısı ile önceden belirlenir ve yük üzerindeki açıdan bağımsız olduğu yayınlanmıştır [15]. A. K. Bilhan ve ekibi tarafından yapılan çalışmada üç fazlı DC/AC dönüştürücü inverter devreleri için farklı yaklaşımlara sahip SPWM teknikleri Matlab/Simulink benzetim çalışmaları yapılmış ve R-L yük üzerinde akım ve gerilim dalga şekilleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sinyaller için çıkış frekansı 50Hz olarak kabul edildiğinden bahsedilmiştir [16]. M. Dursun ve ekibi tarafından benzer şekilde SPWM üç fazlı gerilim kaynaklı invertörler için tekrar edilmiş ve çalışmada 1 kW'lık bir omik yük üzerinde oluşan akım, gerilim grafikleri ile gerilimde meydana gelen THD değerleri değerlendirilmiştir [17]. Benzer bir çalışmada Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) tekniği, 6 anahtarlı 3-seviyeli bir dönüştürücü Dev C++ programı ile simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Topolojisinde, her biri çift sarımlı bobinlere bağlı olan altı adet IGBT yarıiletken anahtar ve bobin gerilimleri kullanılarak 6 anahtarlı 3-seviyeli bir dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu yarıiletken anahtarların çalışması için gerekli sinyaller, bir bulanık mantık denetleyici tarafından üretilmiştir. Bu sinyallerin üretilmesinde UVDGM tekniği kullanılmıştır. Kullanılan modülasyon tekniği, RLC yük için çıkış akımının THD bileşenlerini azaltmayı amaçlamıştır [18]. Bahador Fani ve ekibinin 2022 yılında yayınladıkları derleme çalışmasında, mikro şebekelere ait literatürdeki yaklaşık 190 çalışma incelenmiştir. Çalışmada özellikle mikro şebekelerin ağ kontrol uyumu sorunları dikkatle incelenmiştir. Çalışmada mevcut araştırmalardaki frekansların, şebeke frekansı olan 50Hz olduğu görülmektedir [19]. 2023 yılında H. Chen tarafından gerçekleştirilen araştırma, gelişen AC güç kumanda

sistemleri için DSP ve FPGA kartları dijital faz kilitli kapalı çevrim kontrol imkanlarını ortaya koymaktadır. Bu amaca uygun olarak deniz araçları kumanda sistemleri için kontrol ve hız güvenilirliği açısından FPGA donanımına sahip güç kontrol sistemleri avantajları simülasyon testleri ve çalışmanın sonuçları ile ortaya konmuştur [20]. 2023 yılında gerçekleştirilen A. Kumari ve ekibine ait çalışmada, fotovoltaik panellerden güç elde edebilmek için 5 seviyeli invertör ile MLI tasarımı kullanılmıştır. Daha fazla güç elde etmek için MPPT algoritması bulanık mantık kontrolcüyle takip edilmiştir. Çalışmada THD değerinin %8,72 değerlere kadar düşürüldüğü ve çıkış frekansının 50Hz olduğu bilgisi verilmiştir. Ancak çalışmalar sadece MATLAB/Simulink üzerinde simülasyon olarak gerçekleştirilmiştir [21]. 2023 yılında, İ. Ekberi ve ekibinin gerçekleştirdikleri çalışmada, üç seviyeli MLI tasarım ve hibrit aktif güç kontrol algoritması ile PV sisteme MPPT çalışılmıştır. Çalışmalar MATLAB programında simülasyon olarak yapılmış ve 50Hz şebeke akımları için THD değerinin %3,5 orana kadar düşürüldüğü raporlanmıştır [22]. 2023 yılında T. Atar ve ekibinin yayınladıkları çalışmada üç faz ve beş seviyeli MLI tasarımlarının sinüzoidal yapıya yakın davranışları sayesinde düşük anahtarlama ve yüksek verimlilikte çıkış gerilimi elde edilebileceği gösterilmiştir. MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, güç elektroniği araştırmaları için düşük THD değerlerine sahip invertör devre parametreleri ortaya konmuştur. THD değerinin %0,5'lere düştüğü ve anahtarlama frekansının 1-5PWM aralığında olduğu gösterilmiştir [23].

Literatürde düşük gerilim depolama cihazları ile indüksiyon motorlarının çalıştırılmasına ilişkin çalışmalar mevcuttur. Ancak incelenen çalışmaların çoğunlukla bilgisayar destekli simülasyon sonuçlarını [3, 5, 6, 10, 14, 16-23] içermekte olup, çalışmalarda deneysel katkılar sunulmuşsa da 50Hz sabit referans sinyaliyle elde edilen deneysel sonuçları içermektedir. Çalışmalarda referans sinyal frekans ve genliğine dair kısıtlı bilgi bulunmakta ve çoğunlukla ihtiyaç duyulan çıkış gücüne bağlı olarak inverter devresindeki anahtarlama frekans değişikliği verilmektedir [23].

Bu kapsamda, düşük gerilim kaynakları ile indüksiyon motorlarının kontrolünde bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının deneysel incelenmesi ele alınmıştır. Birinci bölümde SPWM teknikleri ve kullanım alanlarına ilişkin tanımlamalar yapılarak literatür incelemesi yapıldı. İkinci bölümde, bipolar ve unipolar SPWM tekniklerinin temel yapısı anlatıldı. Literatürde yer alan yarım köprü ve tam köprü invertör devreleri ve özellikleri ele alındı. Üçüncü bölümde, deney düzeneği ve deneyde kullanılan cihazlar tanıtılarak deney sonuçları raporlandı. Farklı frekansa sahip referans sinyalleri kullanılarak sürücü çıkışı gerilim değerleri, motor akımları ve motor çalışma hızı bilgileri elde edilerek sonuçlar grafiksel olarak sunuldu. Son bölümde ise, deneylerde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bulgular tartışıldı. Motor çıkış akımları dikkate alındığında unipolar SPWM tekniğinin referans sinyali açıkça daha iyi temsil ettiği gösterildi. Literatürde Unipolar ve Bipolar SPWM tekniklerinin çok çeşitli bilgisayar benzetimi uygulamalarına ulaşmak mümkündür. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda ise 50 Hz sabit frekansta devre tasarımı ve uygulamasına ilişkin çalışmalara ulaşılabilmektedir. Çalışmada literatürden farklı olarak SPWM tekniğinin farklı genliklerde çıkış sinyal kalitesine etkisi ve indüksiyon motoru hız performansına etkisi deneysel olarak çalışılarak raporlanmıştır. Özellikle deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının kıyaslanarak verilmesi ve doğrulanması açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

II. YÖNTEM

Darbe genişliği modülasyonu (PWM) veya darbe süresi modülasyonu (PDM), bir elektrik sinyali tarafından iletilen ortalama gücü etkin bir şekilde, zaman ekseninde kare dalgalara bölünmesidir. Yüke beslenen akım veya gerilimin ortalama değeri, besleme ve yük arasındaki anahtar hızlı bir şekilde açık kapatarak kontrol edilmesidir. Kapalı sürelerle kıyasla anahtar ne kadar uzun süre açık kalırsa, yüke sağlanan toplam güç o kadar yüksek olur. PWM uygulamalarında, sinyalin periyot döngüsü içinde, V_P veya 0 değerinde kalma oranı görev döngüsü, İngilizcesi olan ve sıklıkla kullanılan Duty Cycle terimi ile ifade edilmektedir. PWM sinyalinin bir periyodu içinde yarı süresinde V_P değerinde olması ve diğer yarı süresinde 0 olması, yarısında açıkken diğer yarısında kapalı olduğu, yani Duty Cycle'in %50 olduğu anlamına gelir. V_P 'nin periyodun %75'ini alan sürede açık olduğu durumda ise Duty Cycle %75 ile ifade edilir [1, 2].

PWM tekniği köprü devrelerinde kullanılarak invertör tasarımları gerçekleştirilir. Bir invertördeki PWM tekniği iki sinyalden oluşur. Biri referans sinyal iken diğeri taşıyıcı sinyaldir. İnvörtörün modunu değiştirmek için gereken darbe, bu iki sinyal arasındaki karşılaştırma ile üretilebilir. Bu PWM tekniğinin gelişmiş uygulamalarıyla SPWM ve türevi olan teknikler ortaya çıkmaktadır. Sinüzoidal PWM tekniğinde kare dalga yerine sinüs dalga referans olarak kullanılır ve taşıyıcı üçgen dalga seçilmektedir. Bu sinyale ait gerilimin RMS değeri modülasyon indeksi tarafından kontrol edilir ve sinüs dalgası formunda yüke aktarılır [26].

A. SPWM TEKNİĞİ

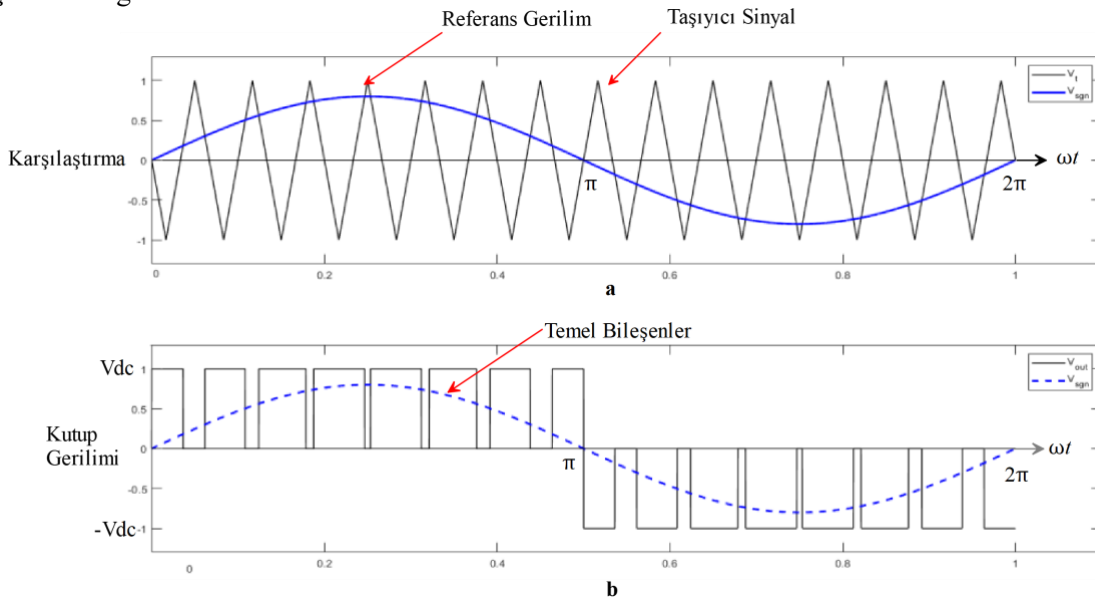
SPWM teknikleri içinde kullanımı en yaygın olarak bilinen teknik bipolar SPWM tekniğidir. Bipolar SPWM Tekniği, Mikrodenetleyici tarafında oluşturduğu yük ve uygulama açısından kolaylıklar sunmaktadır. Diğer taraftan bu avantajlara karşın yük üzerinde istenen AC sinyalin toplam gürültü harmonikleri (THD) açısından dezavantajlara sahiptir. Tasarımda yük üzerinde oluşacak olan gürültüler dikkate alınarak SPWM tekniği tercih edilmelidir [5, 14].

Bipolar SPWM tekniği detaylarını ortaya koymak adına; referans sinyali, taşıyıcı (üçgen) sinyal ve yük üzerinde oluşan PWM sinyal aynı zaman ekseninde 2 farklı grafikte Şekil 1(a,b)'de verilmiştir. İnvörtörün her bir kutup anahtarlama durumlarını belirlemek amacıyla Şekil 1a'da olduğu gibi sinüzoidal AC referans gerilim, gerçek zamanlı olarak yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmadan sonra, artı ve eksi yönlü her bir kutup için anahtarlama durumları belirlenmekte ve Şekil 1b'de verilen sinyal grafikleri elde edilmektedir [9].

Eğer $V_{ref} > V_c$ ve $V_{ref} > 0$ (referans gerilim taşıyıcı sinyalden büyük) Q1-Q4 ikili MOSFET iletime geçer ve böylece yük gerilimi $V_y = V_{dc}$ olur.

Eğer $V_{ref} < V_c$ ve $V_{ref} < 0$ (referans gerilim taşıyıcı sinyalden küçük) Q3-Q2 ikili MOSFET iletime geçer ve böylece yük gerilimi $V_y = -V_{dc}$ olur.

Elde edilen bu SPWM anahtarlama sinyalleri MOSFET yarım veya tam köprü devresini sürmek için kullanılır. Bir mikrodenetleyici tarafından oluşturulan SPWM sinyali invertör köprü devresiyle RL tepkisi gösteren motor veya transformatör devre elemanları üzerine uygulanır. Referans sinyalin yarım periyodu başına bir veya daha fazla kare voltaj darbesi üreterek bir sinüs dalgasının etkisini yeniden oluşturmak için anahtarlama devrelerinin yardımıyla DC gerilim kaynağı yük üzerinde AC sinyal oluşmasını sağlar.

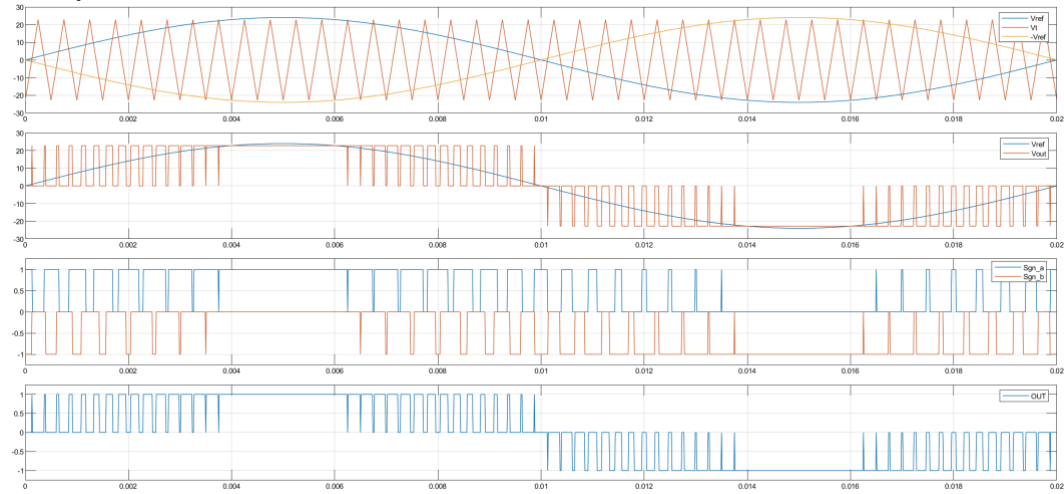


Şekil 1. (a) Referans Sinyal ve Taşıyıcı Dalga (b) SPWM Anahtarlama Sinyali

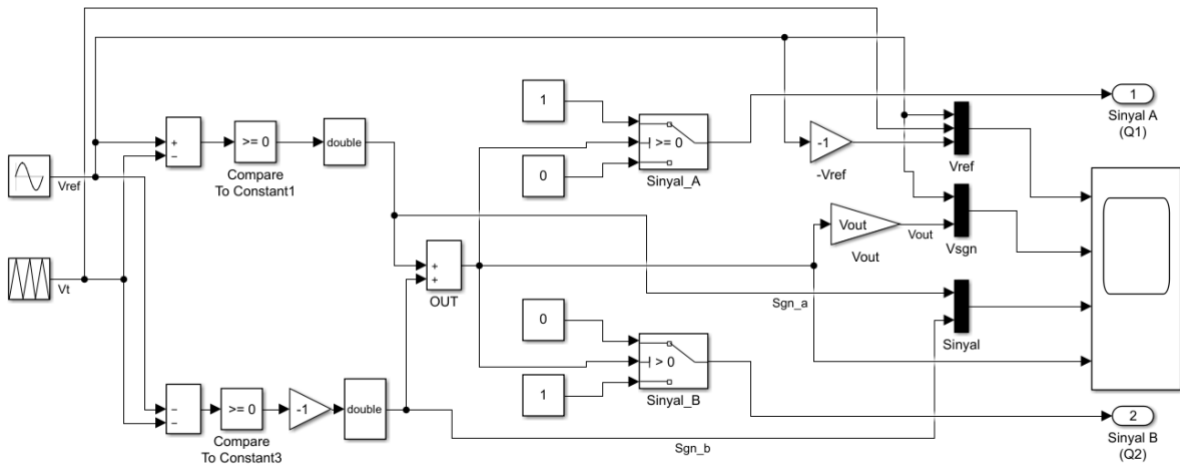
Unipolar SPWM tekniğinde ise 2 farklı referans sinyal kullanılarak taşıyıcı sinyal ile karşılaştırması yapılır. Referans sinyaller arasında 180° derece faz farkı vardır. Her bir referans sinyal ile taşıyıcı sinyal karşılaştırılır ve referans sinyallere ait birer dizi oluşturulur. Eğer referans sinyal taşıyıcı sinyalden

büyük ise diziye 1 değeri, diğer durumda ise 0 değeri gönderilir. Böylece her bir referans sinyaline ait birer dizi oluşur. Elde edilen bu dizi değerleri birbirinden çıkarılarak sonuç dizisi bulunur. Sonuç dizisi ile köprü devresi anahtarlama işlemi gerçekleştirilir [9, 12].

Şekil 2’de Unipolar SPWM tekniği ile üretilmiş MATLAB simülasyon çalışması örnek olarak verilmiştir. Burada sinyal genliği (DC gerilim kaynağı) 24V, sinyal frekansı $f=50$ Hz, taşıyıcı sinyal frekansı $f_i=2$ kHz’dir. Şekil 2a referans sinyal, 180° kaymış sinyal ve taşıyıcı sinyali göstermektedir. Genellikle taşıyıcı sinyal genliği V_t referans sinyali V_{ref} ’dan küçük olarak seçilir ($V_t=0.98 V_{ref}$ alınmıştır). Şekil 2b’de referans sinyali (V_{ref}) ile ve sürücü çıkış sinyali (V_{out}) birlikte verilmiştir. Referansın tepe değerine yaklaştıkça çıkış sinyallerinin sıklaştığını, sıfıra yaklaştıkça ise ayrıklaştığı açıkça görülür. Unipolar SPWM tekniğinde iki farklı referans sinyali kullanılır, ilk referans sinyali çıkışı P_a , ikinci referans sinyali ise P_b çıkışları ile ifade edilir. P_a ve P_b sinyallerinin farkı kontaktör çıkışlarının işaretini belirlemektedir. Şekil 2c’ P_a ve $-P_b$ sinyallerini ve Şekil 2d ise P_a ve P_b sinyallerinin farkını göstermektedir. SPWM sinyallerini oluşturmak için kullanılan MATLAB Simulink blok yapısı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Unipolar SPWM Sinyaller (a) Referans ve Taşıyıcı sinyaller (b) Referans ve sürücü çıkış sinyalleri (c) P_a ve P_b çıkışları (d) Q_1 ve Q_2 mosfet çıkışları.



Şekil 3. Unipolar SPWM sniyali için MATLAB Simulink blok yapısı.

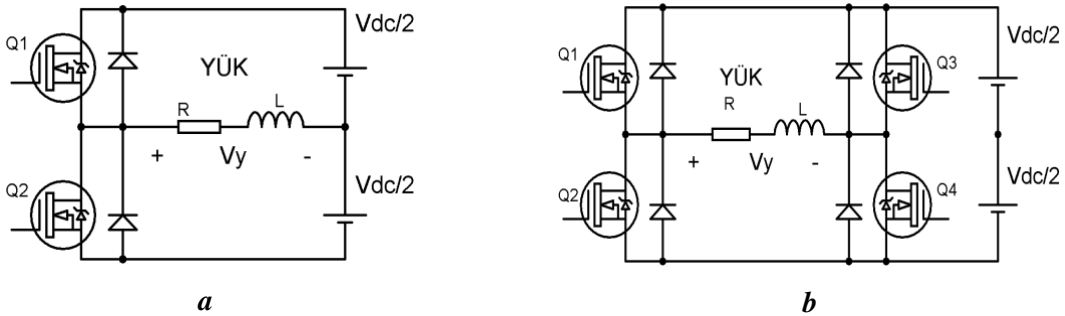
A. İNVERTÖR DEVRE YAPISI

İnvertör tasarımlarında DC gerilimi AC gerilime dönüştürmek için köprü devre tasarımlarına ihtiyaç vardır. Bu devreler H harfine benzediği için H-Köprü devre tasarımları olarak adlandırılmaktadır. Köprü devresi transistör sayısı veya devre yük çıkışına bağlı olarak yarım köprü veya tam köprü devresi olarak adlandırılırlar. Bipolar bağlantı transistörleri (BJT'ler), metal-oksit-yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler) ve yalıtımlı kapılı bipolar transistörler (IGBT'ler) dahil olmak üzere çeşitli farklı elektronik devre elemanları kullanılarak uygulanır. BJT'ler en eski transistör tiplerinden biridir ve düşük maliyetleri ve basit sürücü gereksinimleri nedeniyle H-köprü devre tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, BJT'lerin daha düşük anahtarlama hızları ve ayrı bir akım sınırlayıcı direnç ihtiyacı gibi bazı sınırlamaları vardır. MOSFET'ler, ise H köprüsü devre tasarımlarında kullanılabilen başka bir transistör türüdür [8]. Yüksek frekanslarda anahtarlama kabiliyeti ve yüksek giriş empedansı avantajlarına sahip olmaları onları yüksek frekanslı uygulamalar için ideal kılar. Bununla birlikte, güç kaybına yol açabilecek nispeten yüksek bir dirençleri vardır. IGBT'ler, BJT'lerin ve MOSFET'lerin en iyi özelliklerini birleştiren daha yeni bir transistör türüdür. MOSFET'ler gibi hızlı anahtarlama hızlarına sahiptirler ve BJT'ler gibi yüksek akım ve gerilimi işleyebilirler. Endüstriyel motor kontrolü, rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri, indüksiyon ısıtıcı devreleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Her bir transistör yapısının; akım ve gerilim işleme yetenekleri, anahtarlama hızları ve açık direnç gibi kendine özgü özellikleri olması nedeniyle, invertör köprü devre tasarımı için cihaz seçimi, özel uygulamaya ve gereksinimlere bağlıdır [1, 2].

BJT, MOSFET IGBT ler için referans eklense güzel olur. Yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için kaç anahtarın kullanıldığına bağlı olarak bir H-köprü devresi "yarım köprü" veya "tam köprü" olarak tasarlanır ve adlandırılırlar. Yarım köprü iki anahtar MOSFET kullanır ve tam köprü ise dört anahtar MOSFET kullanır. H-köprü devresi olarak da bilinen tam köprü devresi, yarım köprü devresine göre avantajlara sahiptir. Özellikle; çift yönlü bir çıkış sinyali üretmek daha fazla çıkış gücü oluşturma, çıkış sinyalinde daha düşük gürültü oluşturma sayılabilir [8].

Bir yarım köprü devresi, yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için biri yüksek taraf, diğeri alçak taraf olmak üzere iki MOSFET anahtar kullanır. H-köprü devresine kıyasla yarı sayıda anahtar kullandığı için "Yarım Köprü devresi" olarak da adlandırılır.

H-köprü devresi olarak da bilinen tam köprü devresi, yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için dört MOSFET anahtar olarak devre elemanı kullanır. Uygulanan voltajın polaritesini değiştirerek yükün pozitif veya negatif voltaj kaynağına bağlanmasını sağlar. H-köprü devresi, yarım köprü devresinden daha karmaşıktır ve daha fazla anahtarlama seçeneğine sahiptir. Dönüş yönünün ve hızının kontrol edilmesi gereken DC motor kontrolü gibi uygulamalarda kullanışlıdır [8].



Şekil 4. (a) Yarım Köprü (b) Tam Köprü MOSFET Devre.

Vy çıkış üzerinde oluşan gerilim değerini göstermektedir. Yarım Köprü RMS yük gerilim değeri (1) ile hesaplanabilir ve Tam Köprü RMS yük gerilim değeri (2) denklemlerinde verilmektedir.

$$V_y = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_{dc}^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

$$V_y = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_{dc}^2 dt \right)^{1/2} = V_{dc} \quad (2)$$

PWM ve SPWM tekniğinde ile invertör devre tasarımlarında DC-AC dönüşümlerinde toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion - THD) kavramı ortaya çıkmaktadır. THD en genel anlamıyla çıkış sinyalindeki harmoniklerin güç frekansına oranıdır. THD, PWM sinyalini AC analog bir sinyale dönüştürmek için kullanıldığında, filtrelerin performans değerini göstermektedir. Yüksek THD değerleri, yük üzerine aktarılan sinyalin filtrelerinin düzgün bir şekilde çalışmadığını ve sinyalde bozulmaların olduğunu gösterir. THD değerinin düşük olması, PWM sinyalinin kalitelisi ve düzgün bir şekilde AC analog bir sinyale dönüştürülerek yüke aktarıldığını ifade eder [25, 26].

THD değeri (3) denklemi ile hesaplanır. V_n , n'inci rms değerinin harmoniğini ifade etmektedir.

$$THD = \frac{1}{V_y} \sqrt{\left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)} \quad (3)$$

Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE), nicel verileri tahmin etmede bir modelin hatasını ölçmenin standart bir yoludur. (4) ile deneysel olarak ölçülen y_i ile olması gereken \hat{y}_i sinyal arasındaki hata hesaplanabilir. Böylece elde edilen alternatif akım sinyalinin ne kadar başarılı bir şekilde ölçüldüğü hesaplanabilir.

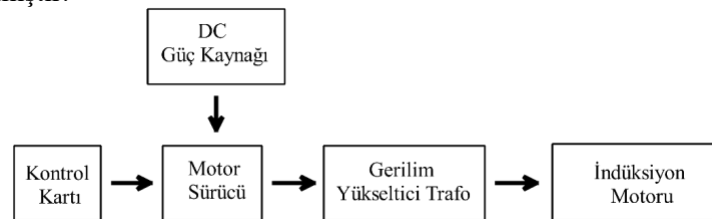
$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n} \right)} \quad (4)$$

Köprü devreleri ile invertör tasarımında Op-Amp aktif devre elemanlarıyla SPWM tekniğinin uygulanması mümkündür. Fakat Op-Amp devre elemanları ile gerçekleştirilecek olan tasarımlarda hassas ve doğru sonuçlar için kapasitörlerin tam değerlerde seçilmesi, sabit frekanslar için düzenlenmesi ve farklı frekans çıkış sinyalleri için devre elemanlarının tekrardan hesaplanarak, analog devrenin tekrardan kurulması gerekmektedir [7].

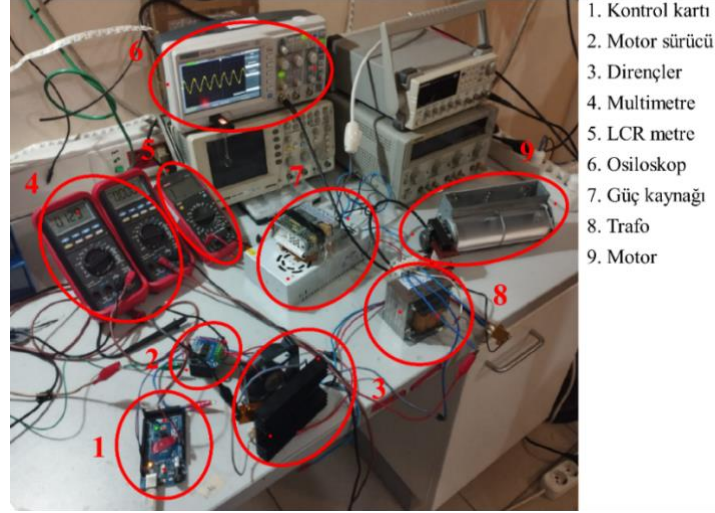
III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

A. DENEY DÜZENEGİ

SPWM tekniğine yönelik örnek sinyal formları Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 5'te deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 6 ile deney düzeneğinde kullanılan tüm elemanlar gösterilmiş, Şekil 7 ile devre şeması verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının listesi Tablo 1'de verilmiştir. Deney düzeneği şematik diyagramda gösterildiği üzere DC güç kaynağı, Kontrol kartı, Motor Sürücü, Gerilim Yükseltici Trafo ve İndüksiyon motoru olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan DC güç kaynağı 20A akım ve 24V gerilim üretebilmektedir. ATmega2560 mikroişlemcisine sahip bir mikrodenetleyici olan Arduino Mega kontrol kartı olarak kullanılmıştır.

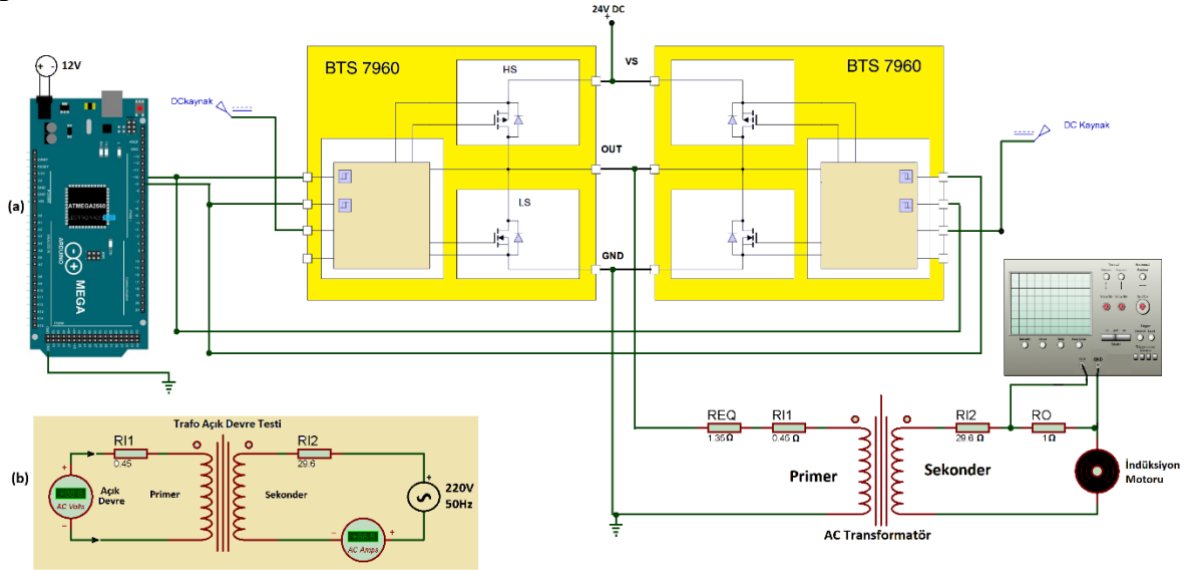


Şekil 5. Deney düzeneği şematik gösterimi.



Şekil 6. Deney düzeneği.

Mikrodenetleyici kartı 16Mhz çalışma frekansına sahiptir. Devre kontrol kartının, D9 ve D10 pinleri Timer 2 zamanlayıcısına bağlıdır, 8 bit çözünürlükte 30kHz sinyal üretebilmektedir ve bu sinyaller köprü devresi anahtarlama sinyali için kullanılmıştır. Kontrol kartında üretilen SPWM anahtarlama sinyalleri (D9 ve D10 pinleri), BTS7960B çift yönlü motor sürücüyü uygulanmıştır. Motor sürücü çıkış sinyalleri trafonun girişine bağlanarak yükseltilmiş ve indüksiyon motoru sürülmüştür (Şekil 6). Motora aktarılan sinyal, 1Ω direnç üzerinden akım sinyali olarak okunup kaydedilmiştir. Motor ve trafo arasına bulunan 1Ω direnç devreye seri bağlı olması nedeniyle üzerinde oluşan akım sinyaline karşılık gelmektedir.



Şekil 7 (a) Deney düzeneği devre şeması (b) Trafo açık devre Test devresi.

Motor sürücü kartı 28V gerilim ve 20A akım sinyaline kadar çalışabilmektedir. Üretici tarafından 20kHz frekansına kadar çalışabileceği belirtilmiş olsa da deneylerde 10 kHz'in üzerinde çift yönlü tetiklendiğinde çıkış sinyallerinde bozulmalar gözlenmiştir. Bu nedenle SPWM taşıyıcı sinyal genliği (f_i) 10kHz olarak seçilmiştir. Trafo giriş özellikleri primer sargıda $R_1=0.45\Omega$ ve $L_1=0.0036H$, sekonder tarafında ise $R_2=29.6\Omega$ ve $L_2=1.30H$ olarak ölçülmüştür. İdeal trafo sistemlerinde karşılıklı endüktans katsayısı Denklem (5) ile hesaplanır [24]. Burada k trafonun efektif değeridir ve karşılıklı endüktans katsayısının idealden sapmasını göstermektedir. Trafoya ait karşılıklı endüktans katsayısını ölçmek için açık devre testi yapılmıştır. Açık devre testinde devrenin çıkış katı sekonder sargısından $f=50$ Hz, $V_{rms}=220$ V olacak şekilde gerilim uygulanmıştır. Sekonder akımı (I_2) ve açık devre gerilimi (V_1) ölçülerek kaydedilmiştir. Denklem (6-7) kullanılarak karşılıklı endüktans katsayısı hesaplanmıştır. Ölçülen $I_2=0,533A$ ve $V_1=9,96V$ değerleri için $M=0.059H$ ve $k=0.8625$ olarak bulunmuştur [24].

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

$$V_1 = I_2 \omega M \quad (6)$$

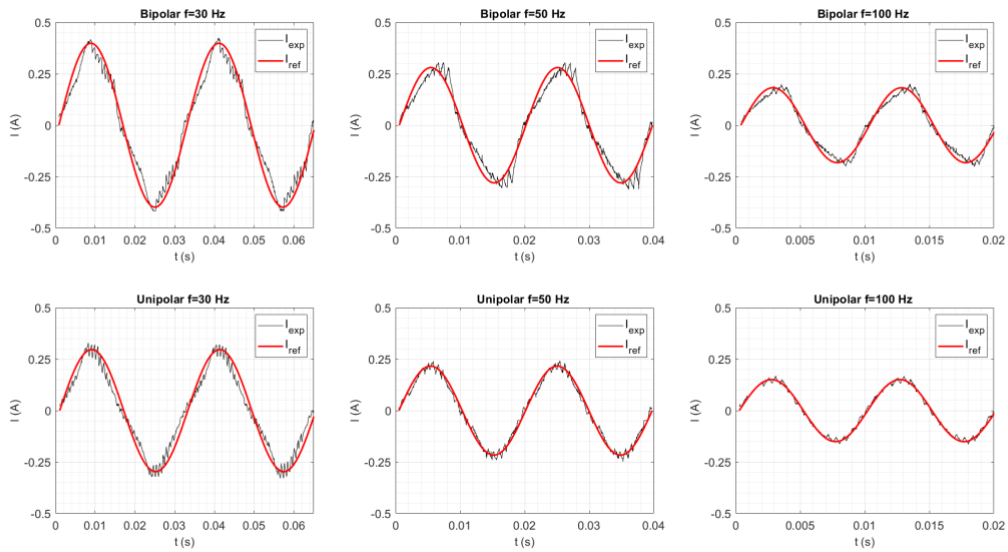
$$M = \frac{V_1}{I_2 2\pi f} \quad (7)$$

Tablo 1. Deneyde kullanılan cihazların listesi

Cihaz Türü	Marka/Model
Osiloskop	AA TECH / ADS-3072B Dijital Storage Oscilloscope
	Gw INSTRON / GDS-1022 DSO
Inductance Meter	UNI-T / UT600
Multimetre	BRYMEN BM510
	FLUKE 106

B. DENEY SONUÇLARI

Çalışmamızda iki farklı SPWM tekniği incelenmiştir. Bölüm 2’de bahsedildiği üzere tek fazlı invertör tasarımında bipolar ve unipolar olmak üzere iki farklı sinyal üretme algoritması mevcuttur [25]. Akım verileri motor ile seri bağlı 1Ω direnç üzerinden osiloskop vasıtası ile zamana bağlı olarak kayıt altına alınmış, Matlab™ programı kullanılarak akım sinyalleri kritikleri yapılmıştır. Şekil 8’de sırası ile 30Hz, 50Hz ve 100Hz frekansları için bipolar ve unipolar SPWM algoritmaları ile elde edilmiş motor giriş akımları ve tam sinüs referans sinyali ile kıyaslaması verilmiştir. Frekans düştükçe indüktif etki azaldığından devre üzerinde direnç etkileri baskın hale gelmektedir. Bu nedenle akım genlikleri her iki yöntem için de frekans düştükçe artmaktadır. Grafiklerden anlaşıldığı üzere unipolar SPWM algoritmasının akım formu her frekans için bipolar algoritması ile üretilen akım sinyalinden daha iyidir. Tablo 2’de farklı referans frekansı için bipolar ve unipolar SPWM akım sinyalleri ve sinyal özellikleri verilmektedir. Her iki yöntemde de elde edilen çıkış sinyali frekansları eşittir.



Şekil 8. Farklı frekanslarda Bipolar ve Unipolar SPWM sinyalleri.

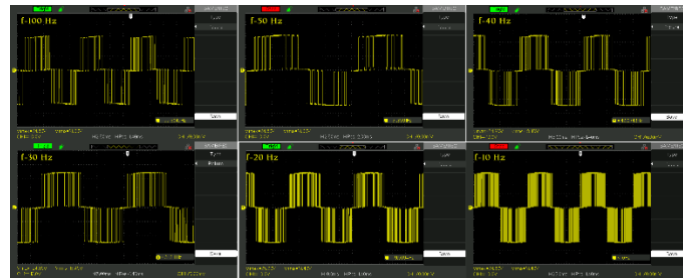
Tablo 2. Farklı frekanslarda Bipolar ve Unipolar SPWM ölçüm sonuçları.

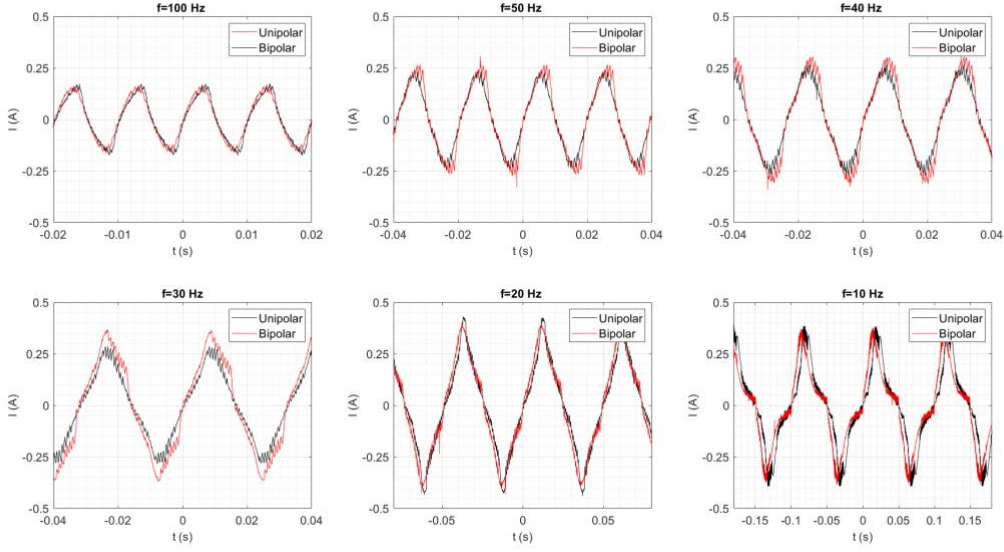
	f_{ref} (Hz)	f_{exp} (Hz)	I_{max} (A)	I_{rms} (A)	THD	RMSE
Bipolar SPWM	10	10.055	0.391	0.276	-8.3261	7.04
	20	20.397	0.433	0.306	-15.854	2.68
	30	31.039	0.398	0.282	-18.728	1.546
	40	41.994	0.327	0.231	-16.171	1.978
	50	50.996	0.28	0.198	-15.493	1.537
	100	100.5	0.182	0.129	-15.923	0.989
	Unipolar SPWM	10	10.056	0.345	0.244	-9.133
20		20.398	0.406	0.287	-12.831	3.972
30		31.041	0.297	0.21	-17.155	1.381
40		42.001	0.297	0.21	-17.155	1.381
50		50.996	0.216	0.153	-22.579	0.613
100		100.56	0.151	0.107	-26.014	0.369

1. bölümde, literatürde yer alan makalelere ait değerlendirmeler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Deneysel çalışmaların içerisinde değişken frekanslı referans (çıkış) sinyali kullanılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu tür çalışmalar genellikle simülasyonlar şeklinde sunulmuş ve elde edilen sonuçlara göre, THD (Toplam Harmonik Distorsiyon) oranları %10 ile %40 arasında değişmektedir [21, 22, 25]. Benzer şekilde, çok katmanlı invertör tasarımında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda ANN (Yapay Sinir Ağı) algoritmasının kullanılmasıyla THD oranları %0,5 ile %20 arasında indirildiği görülmüştür [23]. Deneysel çalışma sonucunda Bipolar ve Unipolar SPWM algoritmalarında elde edilen THD ve RMSE değerleri Tablo 2 ile verilmiştir. THD oranları literatüre uygun olarak % 15-25 arasında değişirken RMSE değerleri ise 0.3 ile 7 arasında değişmektedir.

Elde edilen akımların genliği I_{max} Bipolar SPWM algoritmasında daha yüksek ve THD değerleri unipolar SPWM tekniğine göre daha iyidir. Bu durum bipolar SPWM tekniğinde daha az yüksek frekanslı gürültü olduğunu göstermektedir. Ancak RMSE değerleri ve referans sinyal ile uyumu dikkate alındığında açıkça unipolar SPWM tekniğinin, bipolar SPWM tekniğine göre daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 8).

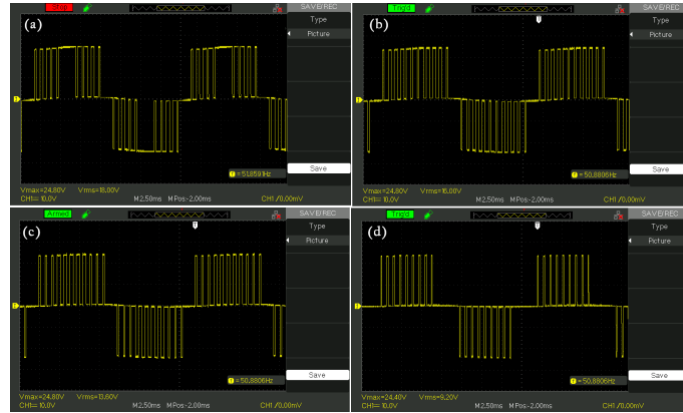
Şekil 9 ile bipolar ve unipolar SPWM algoritması ile üretilen sinyalin motor çıkışı gerilim değerleri görülmektedir. Şekil 10'de ise motor akımının farklı frekans değerlerinde zamanla değişimi verilmiştir. Düşük frekanslarda eğriyi temsil eden tetikleme sinyallerinin arttığı, sistemde oluşan kalıcı sapmanın ise azaldığı görülmektedir (Şekil 9). Trafo tasarım frekansı 50Hz'den uzaklaştıkça (yükseldikçe veya düştükçe) akım formunun bozulduğu açıktır (Şekil 10). Frekans düştükçe akım genlikleri yükselmekte, sinyal üzerinde gürültü artma, referans sinyal ile uyum azalmaktadır. 10Hz ve 20Hz gibi düşük frekanslarda indüktif etki azaldığından, sinyal genliği artmasına rağmen akım formunda büyük sapmalar meydana gelmektedir (Şekil 10).

**Şekil 9.** Farklı frekanslarda SPWM sinyal çıkışı (V).

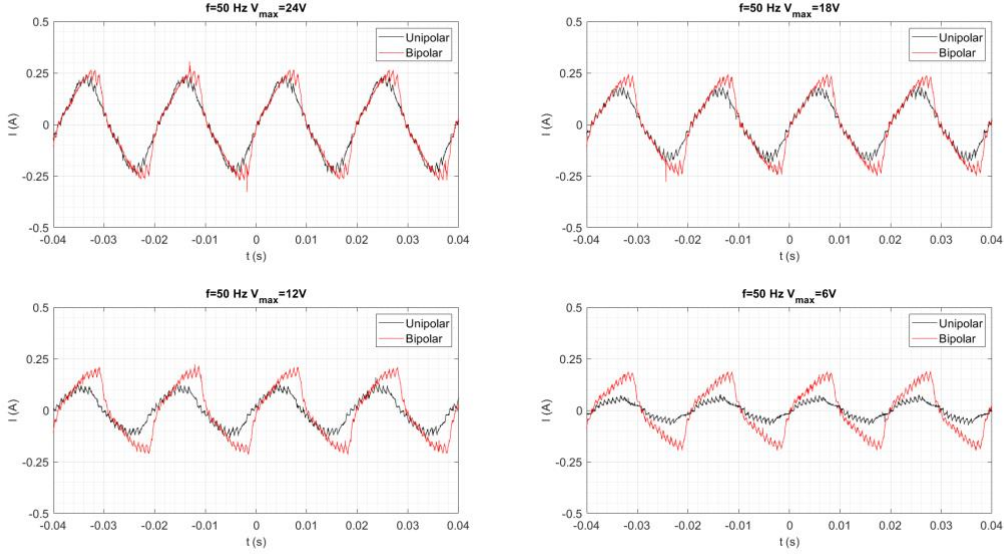


Şekil 10. Bipolar ve Unipolar Farklı frekanslarda motor akım profili.

İnvertör yapıları farklı frekansta sinyaller üretmek için kullanıldığı gibi, sabit frekansta farklı genliklerde sinyal üretmek için de kullanılabilir. Şekil 11 ve Şekil 12 ile 50 Hz frekansında sırası ile 24 V, 18V, 12V ve 6V genliklerinde sinüzoidal sinyal üretilerek sürücü çıkışları ve motor akımları incelenmiştir. Taşıyıcı sinyal formunun genliğin artması ile birlikte sıklaştığı, akım genliğinin referans sinyal genliği ile düştüğü ve aynı zamanda sinyal formunun bozulduğu açıktır. Bu durum referans sinyal gerilimi ile kaynak çıkış gerilimi arasındaki farkın açılmasından kaynaklanmaktadır [23].

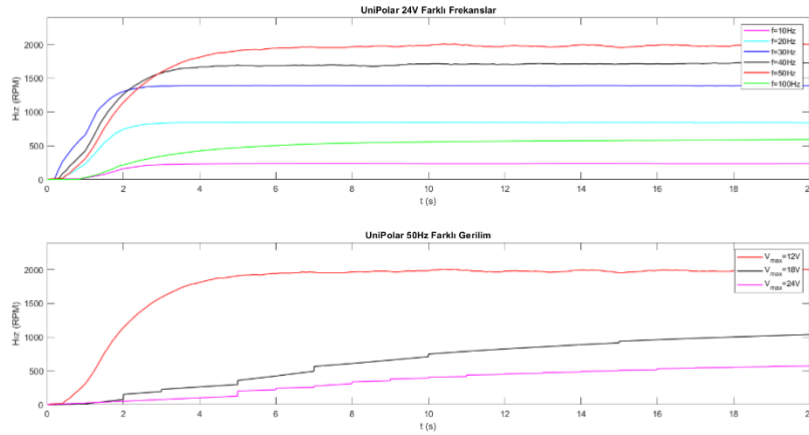


Şekil 11. Farklı genliklerde SPWM sinyal çıkışı ($V_{max}=24$ V(a). $V_{max}=18$ V(b). $V_{max}=12$ V(c). $V_{max}=6$ V(d)).



Şekil 12. Farklı genliklerde 50Hz unipolar SPWM motor akım profilleri.

Şekil 13'te unipolar SPWM tekniği ile üretilen sinyallerin motor dönüş hızının zamanla değişimi verilmiştir. Hız verileri, rotor bölümüne IR kontrast sensörü yerleştirilerek farklı bir mikrokontrolcü yardımı ile alınmıştır. Birinci grafiklerde 24V gerilim sabit tutularak sırası ile 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz ve 100Hz frekanslarında motor hız verileri (RPM) görülmektedir. İkinci grafikte ise referans sinyal frekansı 50Hz sabit olmak üzere, sırası ile genliği 6V, 12V, 18V ve 24V referans sinyallerinde elde edilen hız verileri görülmektedir. Hız profilleri incelendiğinde, referans sinyal frekansının artması ile nominal hız artmakta, düşük frekanslarda motor kalkış ivmesi artarak kalkış süresi düşmektedir. 10Hz ve altında sinyal frekansında akım formu iyice bozulduğundan kalkış esnasında motor dengesiz hareket etmekte veya hiç hareket edememektedir. 100Hz frekansında indüktif etkinin artması ile akım genliği düştüğünden motor kalkış esnasında çok zorlanmaktadır (Bakınız, Şekil 10). Sabit kaynak geriliminde farklı genliklerde 50Hz sinyal ile motor çalışmaları görülmektedir. Beklendiği gibi genliğin düşmesi ile nominal motor hızları düşmekte ve motor hızlanma süreleri artmaktadır. $V_{max}=6V$ için akım profiline bozulması nedeni ile motor hareket etmemiştir.



Şekil 13. Unipolar 24V Farklı Frekans ve 50Hz Farklı Gerilim Hız Profilleri.

IV. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

İncelenen çalışmalar çoğunlukla; güneş enerji sistemleri, DC kaynaklar veya çok katmanlı DC kaynaklardan AC güç elde edilmesi için kullanılan tasarım ve algoritma yöntemleri yenilikçi olarak sunulmakta ve detaylı olarak Giriş bölümünde verilmektedir. Ayrıca motor sürücü [5], ısıtma [8] ve deniz taşıt güç sistemleri [20] için SPWM uygulamaları literatürdeki araştırmalarda görülmüştür.

Literatürde incelenmiş olarak çalışmalar çoğunlukla sabit frekanslı referans (çıkış) sinyali ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, literatürde yer alan Bipolar ve Unipolar SPWM algoritmaları, yenilikçi ve özgün olarak düşük maliyetli invertör sistemlerinde, değişken referans sinyaliyle kullanılmak üzere deneysel olarak incelenmiştir. Mikrokontrolcü ile farklı frekans ve genliklerde üretilen SPWM sinyalleri trafo vasıtası ile yükseltilecek tek fazlı bir indüktif motor sürülmüştür. Motor akımı, motor hareket hızı ve SPWM sinyal çıkışlarının detaylı analizi yapılmıştır. Bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının akım profilleri karşılaştırıldığında, her iki algoritmada elde edilen sinyallerin frekansları aynıdır [14]. 50Hz referans sinyal için 50.996Hz akım sinyalleri olduğu görülmektedir. Bipolar SPWM için I_{rms} değeri 0.198A, THD değeri -15.493 ve RMSE değeri 1.537dB iken, unipolar SPWM için I_{rms} değeri 0.153A, THD değeri -22.579 ve RMSE değeri 0.613dB'dir (Tablo 2) [22, 23]. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere bipolar SPWM algoritmasının akım genliği daha yüksek görünse de, unipolar SPWM sinyallerinin referans sinyale olan uyumu ve hata değeri (RMSE) açıkça daha iyidir. Bunun yanında bipolar SPWM algoritmasının trafo tasarım frekansından uzaklaştıkça unipolar SPWM algoritmasına göre büyük bozulmalara uğradığı açıktır (Şekil 8-10). Akım sinyallerinde oluşan şekil bozuklukları motor hareketinde titreşime neden olduğu görülmüştür. İnvörtör yapıları farklı frekansta sinyaller üretmek için kullanıldığı gibi, sabit frekansta farklı genliklerde sinyal üretmek için de kullanılabilir. Genel olarak uygulamalarda genlik değişimine ihtiyaç duyulmasa da çok serbestlik dereceli asenkron motorların kontrolünde sabit frekansta genlik değişimi ile motor dönüş yönü ayarlanabilmektedir. Şekil 11-12 incelendiğinde kaynak geriliminin %50-%100'ü içerisinde üretilen referans sinyallerinin motor hızı kontrolü için uygun olduğu görülmektedir. Frekans düştüğünde sinyal formu bozulmasına karşın nominal hızların düşmesi ve hareket ivmesinin artması nedeni ile motor titreşimleri azalmakta, motor hareketleri düzenli hale gelmektedir (Şekil 13). 10 Hz'in altında motor harekete geçmemiş olup, 100Hz'in üzerinde sinyal üretildiğinde akım genlikleri çok düştüğünden motor harekete geçememiştir. Sonuç olarak, bipolar SPWM ve unipolar SPWM algoritmalarının her ikisi ile üretilen sinyallerin de motor kontrol sistemlerinde kullanılabilir olduğu görülmüş olup, düşük maliyetli devre elemanları ile oluşturulan sistemlerin motor sürücü yapılarında kullanılabilmesi gösterilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Barnes, *Practical variable speed drives and power electronics*. Practical professional books from Elsevier. Oxford ; Burlington, MA: Newnes, 2003.
- [2] F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/AC Inverters*. CRC Press. ISBN 13: 978-1-4665-1138-5, 2013.
- [3] E. Deniz ve H. Altun, "Beş Seviyeli İzole DC Kaynaklı Kaskat İnvörtörlerin SPWM Tekniği İle Kontrolü", *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, c. II, sy 1, ss. 1-9, 2007.
- [4] I. Colak ve E. Kabalci, "Developing a novel sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique to eliminate side band harmonics", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 44, sy 1, ss. 861-871, Oca. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.024.
- [5] Jino Joy ve S. Ushakumari, "Performance comparison of a Canonical Switching Cell with SPWM and SVPWM fed sensorless PMBLDC motor drive under conventional and fuzzy logic controllers", *Journal of the Franklin Institute*, c. 354, sy 14, ss. 5996-6032, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.jfranklin.2017.07.043.
- [6] K. Latha Shenoy, C. G. Nayak, ve R. P. Mandi, "MPPT Enabled SPWM based bipolar VSI design in photovoltaic applications", *Materials Today: Proceedings*, c. 5, sy 1, ss. 1372-1378, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.223.

- [7] E. A. Samiotis, D. T. Trigonidis, G. A. Vokas, P. Papageorgas, ve A. G. Anastasiadis, "Simulation and Implementation of a SPWM Inverter Pulse Generator Circuit for Educational Purposes", *Energy Procedia*, c. 157, ss. 594-601, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.224.
- [8] J. Haema ve R. Phudunghin, "Full Bridge Resonant Inverter for Blade Induction Heating Application", *Energy Procedia*, c. 156, ss. 391-395, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.106.
- [9] Y. Birbir, K. Yurtbasi, ve V. Kanburoglu, "Design of a single-phase SPWM inverter application with PIC micro controller", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 22, sy 2, ss. 592-599, Nis. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2018.11.014.
- [10] M. G. M. Abdolrasol, M. A. Hannan, S. M. S. Hussain, ve T. S. Ustun, "Optimal PI controller based PSO optimization for PV inverter using SPWM techniques", *Energy Reports*, c. 8, ss. 1003-1011, Nis. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.180.
- [11] C. I. Odeh, A. Lewicki, ve M. Morawiec, "A Single-Carrier-Based Pulse-Width Modulation Template for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters", *IEEE Access*, c. 9, ss. 42182-42191, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065743.
- [12] S. M. M. Islam ve G. M. Sharif, "Microcontroller based sinusoidal PWM inverter for photovoltaic application", *1st International Conference on the Developements in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, Dhaka: IEEE, ss. 1-4, Ara. 2009, doi: 10.1109/ICDRET.2009.5454227.
- [13] S. Syed Abdul Haq, R. JeyaRohini, P. Meenalochini, K. Jeyakanth, C. Immanuel, ve T. HarishBabu, "A sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique for capacitor voltage balancing of nested I-type four-level inverter", *Materials Today: Proceedings*, c. 45, ss. 2435-2439, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.014.
- [14] M. S. Endiz ve R. Akkaya, "Matlab/Simulink ile Bipolar ve Unipolar PWM Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *European Journal of Science and Technology*, Nis. 2021, doi: 10.31590/ejosat.900868.
- [15] A. Sedaghati, P. Horrillo-Quintero, H. Sánchez-Sáinz, ve L. M. Fernández-Ramírez, "Staircase modulation improvement to balance output power of stages of cascade H-bridge multilevel inverter", *Computers and Electrical Engineering*, c. 103, s. 108331, Eki. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108331.
- [16] A. Kocalmış Bilhan ve S. Sünter, "3 Fazlı Evirici Devresi için SDGM, SHEDGM, HIDGM ve UVDGM Tekniklerinin Karşılaştırılması", *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 100-110, Haz. 2018, doi: [10.17100/nevbiltek.402693](https://doi.org/10.17100/nevbiltek.402693).
- [17] M. Dursun ve M. Kenan Döşoğlu, "Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici için SDGM, ÜHDGM ve HDGM Tekniklerinin MATLAB/SİMULİNK ile Karşılaştırmalı Analizi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, sy 4, ss. 983-999, Ağu. 2018, doi: 10.29130/dubited.437845.
- [18] A. Saygin ve A. Kerem, "6-Anahtarlı 3-Seviyeli Eviricide Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniğinin Uygulaması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 565-587, Haziran 2017.
- [19] B. Fani, "Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control", *Advances in Electrical Engineering*, 2022.
- [20] H. Chen, "Simulation research on ship electric propulsion speed regulation system based on variable structure control and FPGA", *Optik*, c. 272, s. 170265, Şub. 2023, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.170265.

- [21] A. Kumari, Y. Gopal, D. K. Dhaked, K. P. Panda, ve Y. N. V. Kumar, "A single source five-level switched-capacitor based multilevel inverter with reduced device count", *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, c. 5, s. 100235, Eyl. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100235.
- [22] E. Akbari ve A. Zare Ghaleh Seyyedi, "Power quality enhancement of distribution grid using a photovoltaic based hybrid active power filter with three level converter", *Energy Reports*, c. 9, ss. 5432-5448, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.368.
- [23] T. Atar, S. Balci, ve A. Kayabasi, "Determination of output current THD of multilevel inverter by ANN", *Measurement*, c. 210, s. 112525, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112525.
- [24] H. Yıldız, "Analytical Solution of a Multi-Winding Coil Problem With an Air Core in Spherical Coordinates," *Journal of Polytechnic-Politeknik Dergisi* , 2022.
- [25] B. H. Yuditya, R. N. Hasanah, L. Ardhenta, ve T. Taufik, "Performance Comparison of Single-Phase Multilevel Inverter with SPWM Unipolar and Bipolar Switching Techniques", *FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, Bandung, Indonesia: IEEE, ss. 102-107, Eyl. 2020, doi: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249911.
- [26] N. Vazquez and J.V. Lopez, *Inverters- In Power Electronics Handbook*, pp. 289-338, *OReilly Online Book, King Juan Carlos University, Madrid, Spain*.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Antalya İlindeki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yeşil Hidrojen Üretiminin Ekonomik Analizi

 Ahmet ARSLAN ^a,  Talha ERTÜRK ^a,  Battal DOĞAN ^{a,*},  Murat Kadir YEŞİLYURT ^{b,*}

^a Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarların e-posta adresi: battaldogan@gazi.edu.tr; kadir.yesilyurt@bozok.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1266905

ÖZ

Çevresel sorunlar, azalan ve sınırlı fosil yakıtlar ile artan enerji ihtiyacı alternatif çevreci enerji kaynaklarını önemli hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilebilmektedir. Ancak, elektrik enerjisinin uzun mesafelere kablolarla taşınmasının maliyeti oldukça yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin hidrojen üretiminde kullanılması ve üretilen hidrojenin taşınması durumunda enerji maliyetleri azalacaktır. Bu çalışmada, Antalya ilinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin, hidrojen çiftliği konseptine uygun olarak hidrojen üretiminde kullanımının ekonomik açıdan incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Antalya ilinin, insan sirkülasyonu bakımından yoğun olması ve bu ilde biyokütle enerjisi potansiyelinin, potansiyel güneş radyasyonunun ve güneşlenme süresinin fazla olmasının yanı sıra bu il güneş enerjisi, coğrafi konum, yeryüzü şekilleri, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi açısından verimlidir. Antalya ilinin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik veriler kamu kuruluşlarından ve özel kuruluşlardan temin edilerek, bu kaynaklardan üretilen elektriğin direkt şebekeye verilmesi durumunda elde edilecek gelir hesaplanmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik kullanılarak yeşil hidrojen üretilmesi durumundaki gelir de belirlenmiştir. Antalya’da bulunan yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak yıllık üretililecek hidrojen miktarının yaklaşık %77’si hidroelektrik enerjisinden, %12’si biyokütle enerjisinden, %6’sı güneş enerjisinden ve %5’i rüzgâr enerjisinden elde edileceği tespit edilmiştir. Hidrojen üretiminden elde edilen gelir elektrik üretimi gelirinden %33.68 daha fazladır. Bu durum hidrojen ekonomisi açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil hidrojen, Yenilenebilir enerji, Hidrojen çiftliği

Economic Analysis of Green Hydrogen Production from Renewable Energy Sources in Antalya Province

ABSTRACT

Environmental problems, decreasing and limiting fossil fuels, and increasing energy needs make alternative environmentally friendly energy sources important. Electricity can be generated from renewable energy sources. However, the cost of transporting electrical energy over long distances by cables is quite high. If the electricity obtained from renewable energy sources is used in hydrogen production and the produced hydrogen is transported, energy costs will decrease. In this study, an economic examination of the usage of electrical energy obtained from renewable energy sources in Antalya province in hydrogen production was carried out by the concept of a hydrogen farm. Antalya province is crowded in terms of human circulation and in this province biomass energy potential, potential solar radiation, and sunbathing duration are high; meanwhile, this province is efficient in terms of solar energy, geographic location, landforms, hydroelectric, and solar energy. The data on the renewable energy resources of Antalya province were obtained from public and private institutions, and the income to be obtained if the electricity produced from these sources was directly supplied to the grid was calculated. In addition, the income in the case of green hydrogen production using electricity produced from

renewable energy sources was also determined. It has been determined that approximately 77% of the annual hydrogen production that can be produced using renewable energy sources in Antalya will be obtained from hydroelectric energy, 12% from biomass energy, 6% from solar energy, and 5% from wind energy. Income obtained from hydrogen production is 33.68% more than electricity generation revenue. This situation is essential in terms of the hydrogen economy.

Keywords: *Green hydrogen, Renewable energy, Hydrogen farm*

I. GİRİS

Fosil kökenli yakıtların teknolojinin gelişmesi ve aşırı kullanım sonucu hızla tükenmesi araştırmacıları alternatif yakıt arayışına yönlendirmiştir. Alternatif yakıt olarak hidrojen kullanımı son yıllarda araştırılmaktadır. Hidrojen doğada saf halde bulunmadığından üretilmesi gerekmektedir. Hidrojen enerjisi çok farklı yollarla doğrudan veya dolaylı olarak elde edilebilmektedir [1]. Hidrojen doğalgaz buhar reformasyonu, kömür gazlaştırma, termokimyasal su ayırma, yüksek sıcaklıkta elektroliz yoluyla üretilmektedir. Bu üretim için güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır [2]. Hidrojen üretimi gri, mavi ve yeşil olarak renk kodlarına ayrılır. Gri hidrojen kömür gazlaştırma, mavi hidrojen doğal gaz buhar reformasyonu ile yeşil hidrojen ise yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Yeşil hidrojenin üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin suyun elektrolizinde kullanılması ile gerçekleştirilir. En çok tercih edilen ve en gelişmiş elektroliz yöntemlerinden biri alkali elektrolizdir. Alkali elektrolizörler ortalama %85 verime sahiptir. Alkali elektrolizleri 80°C de çalışır [3]. Literatürde; hidrojenin, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak sunulmuştur.

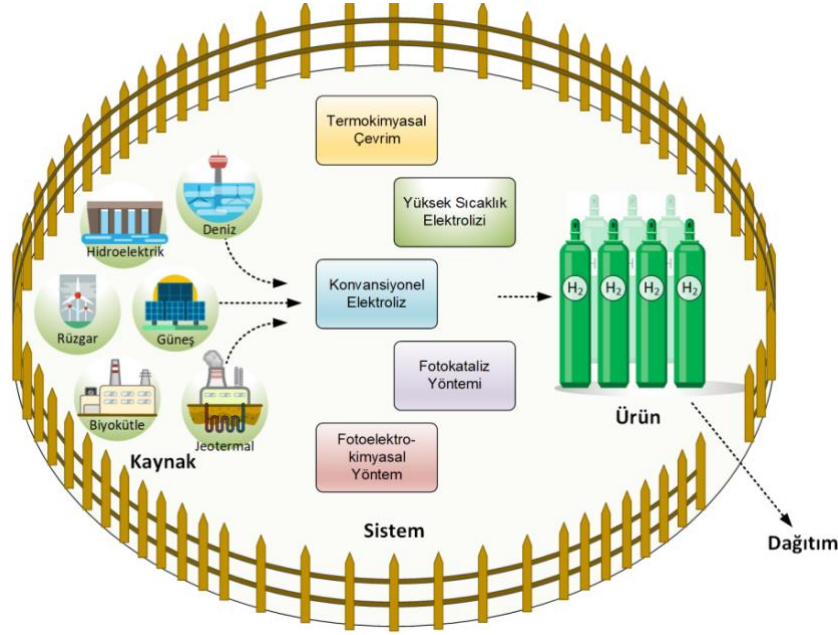
Kai ve ark. [4] çalışmalarında, Yakushima adasında hidroelektrik enerjisini kullanarak suyun elektrolizi ile hidrojen üretimini araştırmışlardır. Adalar; güneş ve rüzgâr açısından verimli olduğundan, yeşil hidrojen üretimi için uygun bölgelerdir. Acar ve Dinçer [2] yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında farklı hidrojen üretim yöntemlerinin maliyetlerini, enerji ve ekserji verimlerini karşılaştırmışlardır. Little ve ark. [5] yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin depolanarak şebekeden bağımsız güç kaynaklarına elektriksel entegrasyonunu incelemişlerdir. Öztürk ve ark. [6] çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinin gelecek dönem projeksiyonunu çalışmışlardır. Akyüz [7] çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş ve rüzgâr enerjisi) üretilen elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde kullanımını incelemiştir. Güneş kaynaklı enerjiden elektrik üretimi ve suyun elektrolizi ile hidrojen üretiminin ekonomik açıdan değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir. Balıkesir bölgesinde 1 kW rüzgâr ve 0,56 kW elektroliz ünitesinden yıllık 20,3 kg hidrojen üretilebileceği belirlenmiştir. Dursun [8] hibrit güç sisteminin akü grubu enerji verimliliğini, üç farklı güç kontrol algoritması kullanarak araştırmıştır. Sistemde yer alan proton geçirimli membran tipi elektrolizör Matlab-Simulink ortamında modellenerek, sistemin hidrojen üretim kapasitesini hesaplamış ve deneysel yolla üretilen hidrojen miktarı ile karşılaştırmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sistemin yıllık hidrojen üretim kapasitesi, İstanbul'un 2010 meteorolojik şartlarına göre 34,3 kg olarak belirlenmiştir. Tutar ve Eren [9] çalışmalarında, hidrojen ekonomisinin SWOT analizini gerçekleştirmişlerdir. Üretim, depolama ve taşıma açısından hidrojenin zayıf ve güçlü yanlarını ortaya çıkaran çalışmada gelecek dönemlerde hidrojen çağının başlayacağını belirtmişlerdir. Veziroğlu ve Şahin [10] güneş-hidrojen enerjisi sistemi ve sentetik fosil yakıt sistemini, üretim maliyetleri, çevresel zararlar ve kullanımı dikkate alınarak karşılaştırmıştır. Veziroğlu ve Momirlan [11] çalışmalarında, hidrojen üretim teknolojilerini incelemişlerdir. Smith ve ark. [12] Hollandalı hidrojen paydaşları arasındaki mevcut fikirlerin modellenmesini ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Hidrojenin önümüzdeki yıllarda üretim ve depolama açısından daha ekonomik çözümlere ihtiyacının olduğunu belirlemişlerdir. Seymour ve ark. [13] Avrupa'da hidrojen ve yakıt hücrelerinde kamu araştırmalarının girdi ve çıktı göstergelerini karşılaştırmışlardır. Dinçer ve Acar [14] hidrojen üretiminde belirli kavramsal öğelerin tartışılmasını ve önemini araştırmışlardır. Yeşil

hidrojen üretiminin yaygınlaştırılmasının üretim maliyetlerindeki düşüşe bağlı olacağını ifade etmişlerdir. Çelik ve Yıldız [15] yeşil hidrojen üretim yöntemlerini değerlendirmişlerdir. Son yıllarda hidrojen üretimine yönelik yapılan farklı üretim yöntemleri elektroliz yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Afgan ve ark. [16] hidrojen üretiminin çok kriterli prosedür ve sürdürülebilirlik endeksi derecelendirmesine yönelik araştırma gerçekleştirmişlerdir. Wang ve ark. [17] öncelikle suya ve biyokütleyle dayalı hidrojen üretim teknolojilerini analiz etmişlerdir. Hidrojen üretim teknolojilerinin ekonomik, teknolojik ve çevresel etkilerini karşılaştırmışlardır. Rosyid ve ark. [18] hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından, nükleer enerjiden veya mevcut elektrik santrallerinin tam zamanlı işletilmesinden elde edilen elektriğin kullanılmasını araştırmışlardır. Toprak [19] çalışmasında rüzgâr enerji santralinden üretilen elektrik enerjisini elektroliz sisteminde kullanarak hidrojen üretim miktarını belirlemiştir. Bu çalışmada İzmir-Çeşme-Germiyan köyünde yer alan 3 adet rüzgâr türbinli santralin yıllık ürettikleri enerji değerlerini baz almıştır. Üretilen elektrik enerjisine göre üretilebilecek hidrojen miktarları ve birim elektrik enerji maliyeti ile birim hidrojen enerji maliyet değerlerini hesaplamıştır. Ayrıca rüzgâr santralinde yük faktörlerinin değişimine göre üretilecek enerji ve hidrojen miktarlarını da belirlemiş ve maliyet analizleri yapmıştır. Bir yılda 1. türbin 21582 kg, 2. türbin 21772,1 kg ve 3.türbin 22178,4 kg hidrojen üretebilme potansiyeline sahiptir. Santralin yıllık ortalama yük faktörünü 0,30 mertebesinde belirlenmiştir. Bu değere göre hidrojen maliyetini 4,097 \$/kg olarak bulmuştur. Aslan ve Özcan [20] sürdürülebilir kalkınma ile enerjinin ilişkisini değerlendirmişler ve hidrojen ekonomisi kavramları üzerine araştırma yapmışlardır.

Çalışma kapsamında Antalya ilindeki yenilenebilir enerji kaynaklarından yeşil hidrojen üretimi hidrojen çiftliği konsepti ile planlanmıştır. İlimizin güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütleden toplam elektrik üretimi belirlenmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi miktarı ve toplam maliyeti detaylı analizlerle araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle yenilenebilir kaynaklardan bir veya ikisi birlikte kullanılarak hidrojen üretimi potansiyeli hesaplanmaktadır. Çalışmada Antalya ilinin güncel nüfus ve elektrik üretim tesisleri kapasiteleri kullanılmıştır. Ek olarak; Antalya ilinde yaşayan ve ili turizm amaçlı ziyaret eden nüfusun enerji giderleri de dikkate alınmıştır. Şehirdeki yenilenebilir enerji kaynaklarından toplam elektrik üretimi belirlenmiş ve bu enerjinin yeşil hidrojene dönüşüm potansiyelinin ülkemiz ekonomisine katkısı hesaplanmıştır.

II. YÖNTEM

Bu çalışmada yenilenebilir enerji potansiyeli göz önüne alınarak Antalya ili için Şekil 1’de gösterilen hidrojen çiftliği konsepti oluşturulmuştur. Bu kapsamda, Antalya ilinde bulunan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyogaz enerji santralleri belirlenmiştir. Santrallerin kurulu güç verileri kamu kurumlarından ve özel kurumlardan temin edilmiştir. Elde edilen verilerle yenilenebilir enerji santralleri için yıllık potansiyel elektrik üretimleri hesaplanmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin suyun elektrolizinde kullanılması suretiyle üretilebilecek hidrojenin potansiyeli ve ekonomik değeri belirlenmiştir.



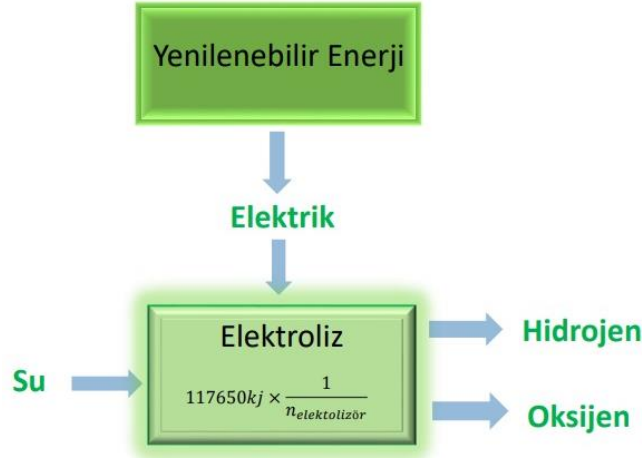
Şekil 1. Hidrojen çitliği konsepti [3]

A. ANTALYA NÜFUS VERİLERİ

Türkiye Cumhuriyeti Kültür ve Turizm bakanlığından alınan verilere göre 2021 yılında Antalya ilini yurtdışından 12.989.618 ve yurtiçinden 3.669.437 olmak üzere toplam 16.659.055 kişi turizm amaçlı ziyaret etmiştir. Yabancı misafirler ortalama 3,89 gün; yerli misafirler ise ortalama 2,74 gün kalmıştır. Strateji ve Bütçe başkanlığından alınan verilere göre Türkiye'nin yıllık kişi başı elektrik tüketimi 2002-2019 yılları arasında yıllık ortalama %3,8 artış göstererek 1.932 kWh/kişi seviyesinden 3.652 kWh/kişi seviyesine yükselmiştir. TÜİK tarafından yayınlanan Antalya ili 2023 yılı nüfusu 2.671.301 kişidir.

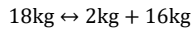
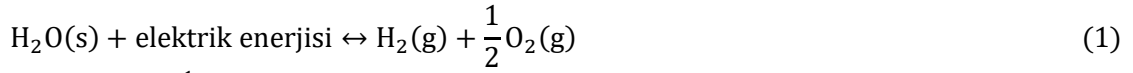
B. ELEKTROLİZ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

Dünyadaki hidrojen üretiminin %20'lik bölümü elektroliz yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Elektroliz yöntemi ile en saf hidrojen elde edilir. Hidrojen, elektrik enerjisinin gerekli olduğu elektrokimyasal yöntemlerle üretilebilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi yeşil hidrojen üretimi için gereklidir. Kullanılacak olan elektrolizör elektrolit ve akışkana bağlı olarak Alkali, PEM (Proton Elektrolit Membranlı) ve Katı Oksit olarak sıralanabilir. Alkali elektroliz yönteminin verimi, birçok etkene bağlı olarak değişebilir. Elektroliz yöntemi ile üretilecek 1 kg yeşil hidrojen için gerekli enerji miktarı 117.650 kJ kadardır [21]. Elektrolizör verimine bağlı olarak verimi değişen ve çalışma kapsamında %85 verimle çalıştığı kabul edilen sistemde 1 kg hidrojen üretmek için 138.411 kJ enerji gereklidir.



Şekil 2. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojenin iş akış şeması

Sudan hidrojen üretiminin kimyasal reaksiyonu aşağıda verilmektedir.



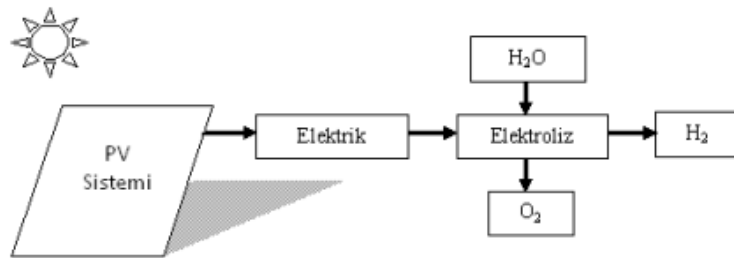
Bu kimyasal eşitlikle 1 kg su kullanılarak 0,111 kg H₂ üretilir. Yeşil hidrojen üretimi sırasında zararlı emisyonlar oluşmamaktadır. Bu nedenle çevresel açıdan uygun bir üretim metodu olduğu söylenebilir.

C. GÜNEŞ ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Antalya ili Akdeniz bölgesinde yer almaktadır. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına (GEPA) göre Antalya ilinin yıllık güneşlenme süresi toplam 2.741 saattir. Buna göre Antalya günde ortalama 7,5 saat güneşlenme süresine sahiptir. Gelen yıllık toplam Güneş enerjisi 1.527 kWh/m²'dir. Güneş enerjisi kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$W = P \times t \times d \quad (4)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), kurulu güç (P), tesisin günlük çalışma saati (t) ve bir yılda çalıştığı gün sayısı (d)'dir. Güneş enerjisi destekli yeşil hidrojen üretimi için iş akış şeması Şekil 3'de gösterilmiştir. PV sistemi ile üretilen elektrik enerjisi elektrolizöre aktarılarak sudan hidrojen üretimi gerçekleştirilecektir.



Şekil 3. Güneş enerjisi destekli yeşil hidrojen üretimi iş akış şeması [22]

Çalışmada Antalya’da bulunan güneş enerji santrallerinin yaklaşık yıllık üretim miktarları Tablo 1’de verilmiştir. Bu veriler Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) ve Antalya ili tesislerinin kurumsal internet sayfalarından alınmıştır. Santraller içerisinde en yüksek güneş enerjisi kurulu gücü 23,4 MW’dır.

Tablo 1. Antalya’da bulunan güneş enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
AKSEKİ BÜYÜKALAN 1 GES	AKSEKİ	23,4	46.800
TAŞKESİĞİ GES	KORKUTELİ	10,39	20.751,739
SERRA GES	AKSEKİ	5,6	11.200
KÜÇÜKKÖY GES	KORKUTELİ	18,61	37.220
G3-ANTALYA-2-1	AKSEKİ	20	40.000
G3-ANTALYA-1-1-2	AKSEKİ	9	18.000
G3-ANTALYA-1-1-1	AKSEKİ	11	22.000
G3-ANTALYA-3-19 GES	KORKUTELİ	10	20.000

Antalya’daki güneş santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik ve tekabül ettiği enerji miktarı Eşitlik 5’te gösterilmiştir.

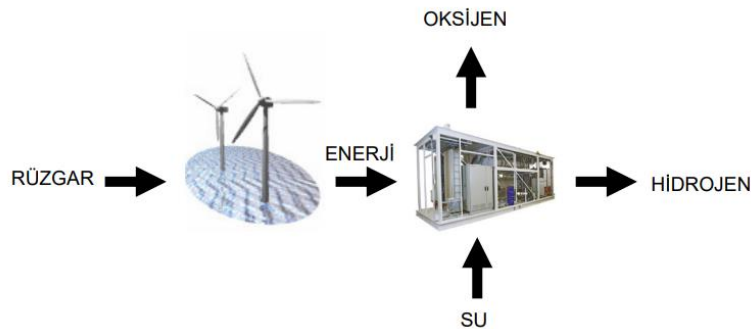
$$215.971.739 \text{ kWh} \cong 7,775 \times 10^{11} \text{ kJ} \quad (5)$$

Antalya’daki güneş enerjisi santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektroliz yöntemiyle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{7,775 \times 10^{11} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 5.617.328,103 \text{ kg} \quad (6)$$

D. RÜZGÂR ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Rüzgârın oluşmasındaki en temel etken; sıcak havanın yoğunluğunun soğuk havanın yoğunluğundan az olması nedeniyle sıcak havanın yükselmesi ve bu şekilde havanın yer değiştirmesinden kaynaklanan akımlardır. Sıcak hava ile soğuk havanın yer değiştirmesinin temel kaynağı güneştir. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinin asıl kaynağı güneştir. Güneş açısından verimli olan Antalya ilinde rüzgâr kaynaklı yenilenebilir enerji potansiyeli yüksektir. Rüzgârın hızı kinetik enerjinin sebebidir. Bu kinetik enerji rüzgâr türbini yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgâr türbini yatay ve dikey olmak üzere ikiye ayrılır ve kullanılacağı yere göre farklılık gösterir. Rüzgâr enerjisinden üretilen elektrik Şekil 4’de verildiği gibi elektroliz yönteminin enerji ihtiyacını karşılamaktadır.



Şekil 4. Rüzgâr enerjisi destekli hidrojen üretimi için akış şeması [23]

Atmosferde havanın yüksekliğe bağlı olarak yoğunluğu değişmektedir. Bu değişim aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir.

$$\rho = \rho_0 - (1,194 \times 10^{-4} \times H) \quad (7)$$

Burada; türbinin bulunduğu yükseklikteki havanın yoğunluğu (ρ), deniz seviyesindeki havanın yoğunluğu (ρ_0) ve rakım (H) ile gösterilmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinindeki süpürme alanı Eşitlik 8’de verilmektedir.

$$A = \frac{\pi \times R^2}{4} \quad (8)$$

Burada; türbinin taradığı alan (A) ve kanat çapı (R) ile gösterilmektedir.

Bir rüzgâr türbininin gücü aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (9)$$

Burada; türbin gücü (P), türbinin bulunduğu yükseklikteki havanın yoğunluğu (ρ), türbinin taradığı alan (A) ve havanın ortalama hızı (v) ile gösterilmektedir.

Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$W = P \times t \times d \times n \quad (10)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), türbin gücü (P), günlük çalışma saati (t), yılda çalıştığı gün sayısı (d) ve türbin-jeneratör grubu verimi (n) ile gösterilmektedir.

Antalya ilinde ön lisans alan rüzgâr türbinleri Tablo 2’de verilmektedir. Bu çalışmada, hidrojen üretim potansiyeli belirlendiğinden; kurulmamış olan, ancak ön lisans almış olan santraller de hesaplara dahil edilmiştir.

Tablo 2. Antalya’da bulunan rüzgâr enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANS ALINAN YILLIK ÜRETİM (MWh)
D1 RES	MANAVGAT	10	35.000
D3 RES	AKSEKİ	10	35.000
DÖKÜKDAĞI RES	MANAVGAT	30	105.000

Antalya ilinde ön lisans alan rüzgâr santrallerinden potansiyel olarak üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı Eşitlik 11 ile hesaplanabilir.

$$175.000 \text{ MWh} \cong 6,3 \times 10^{11} \text{ kJ} \quad (11)$$

Antalya’daki rüzgâr enerjisi santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektrolizle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı Eşitlik 12 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{6,3 \times 10^{11} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4.551.661,356 \text{ kg} \quad (12)$$

E. HİDROELEKTRİK ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Suyun hareketinden ve yükselti faktöründen yararlanılarak hidrolik enerji ile elektrik üretilebilmektedir. Bu tesislerde; suyun kinetik enerjisi, hidrolik türbin yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Hidrolik sistemlerde kullanılan türbinler yükseltiye (düşü), türbin çıkış güçlerine, türbin miline, suyun akış doğrultusuna ve suyun etki tipine göre sınıflandırılabilir. Suda oluşan enerjiyi aktarmak için kullanılan hidrolik sistemlerin enerjisi Eşitlik 13 ile hesaplanmaktadır.

$$P = \dot{m} \times g \times h \quad (13)$$

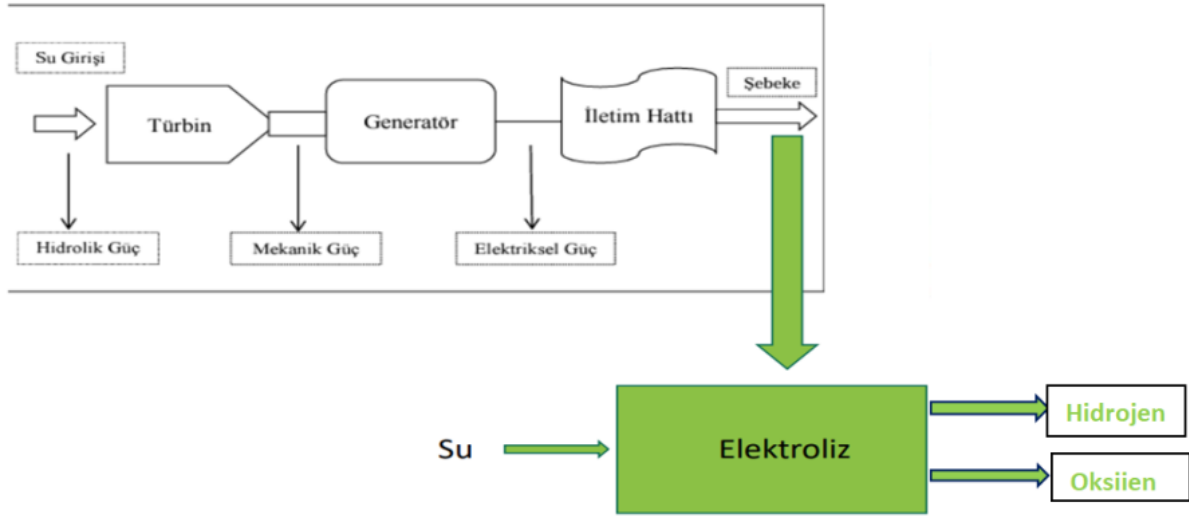
Burada kurulu güç (P), kütleli debi (\dot{m}), yerçekimi ivmesi (g) ve düşü (h) ile gösterilmektedir.

Hidroelektrik santralinden elde edilen elektrik enerjisi aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir.

$$W = P \times t \times d \times n \quad (14)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), kurulu güç (P), günlük çalışma saati (t), yıllık çalışma gün sayısı (d) ve türbin-jeneratör verimi (n) ile gösterilmektedir.

Hidroelektrik santralinden üretilen elektrik kullanılarak Şekil 5'teki gibi yeşil hidrojen üretilebilmektedir. Burada su hem elektrik hem de hidrojen üretiminde kilit rol oynamaktadır. Bu tesisler emisyonlar açısından çevrecidir.



Şekil 5. Hidroelektrik enerjisinden hidrojen üretimi iş akış şeması

Antalya ilinde yer alan hidroelektrik üretim tesislerinin kurulu güç bilgileri Tablo 3'te verilmiştir. Antalya ili hidroelektrik güç açısından ülkemizde önemli merkezlerinden birisidir. Bu nedenle yeşil hidrojen üretimi açısından ayrıca incelenmelidir.

Tablo 3. Antalya’da bulunan hidroelektrik enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
TOCAK 1 HES	KUMLUCA	4,76	14.930
ALAKIR HES	KUMLUCA	2,06	14.060
KOZDERE HES	KUMLUCA	9,265	40.690
GÖKÇELER BARAJI VE HES	GAZİPAŞA	2,45	8.660
GÖNGELE HES	ALANYA	4,45	13.350
DEREKÖY REG. VE HES	KUMLUCA	5,64	11.950
YALNIZARDIÇ HES	ALANYA	41,36	97.941
MANAVGAT BARAJI VE HES	MANAVGAT	48	147.000
OYMAPINAR HES	MANAVGAT	540	1.620.000
ÇANDIR 1 REG. VE HES	KONYAALTI	1,71	6.500
KARGI REG. VE HES	ALANYA	6,144	13.706
ESKİKÖY REG. VE HES	SERİK	2,63	8.806
DİM HES	ALANYA	38,25	122.890
ÇENGER REG. VE HES	AKSEKİ	20,12	75.805
BUCAKKÖY HES	ALANYA	9,303	48.846
DEĞİRMEN REG. VE HES	AKSEKİ	6,84	19.807,644
ANAK REG. VE HES	MANAVGAT	3,75	15.066
KÜRCE REG. VE HES	KUMLUCA	12,046	47.655
TINAZTEPE HES	AKSU	7,5	37.783
KEPEZ 2 HES	KEPEZ	6	16.000
KEPEZ 1 HES	KEPEZ	26,4	114.000
KIZILDÜZ/ŞAHMALLAR HES	GAZİPAŞA	30	90.000
SİNANHOCA REG. VE HES	İBRADI	104,14	312.430
İLERİ REG. VE HES	ALANYA	9,72	29.160

Antalya’daki hidroelektrik santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı aşağıda gösterilmiştir.

$$2.927.035,644 \text{ MWh} \cong 1,05373 \times 10^{13} \text{ kJ} \quad (15)$$

Hidroelektrik enerji santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektrolizle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{1,05373 \times 10^{13} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 76.130.509 \text{ kg} \quad (16)$$

F. BİYOKÜTLE ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Biyokütle organik bir enerji kaynağıdır. Zirai ürünler, orman ürünlerine benzer maddelerin kalıntıları, kentsel atıkların organik bileşenleri gibi maddeler biyokütle olarak kabul edilir. Biyokütle sıvı ve gaz yakıtlara biyokimyasal veya termokimyasal yollar kullanılarak dönüştürülebilir. Yakıtlar biyogaz elde edilmesi için kullanılabilir veya organik yakıt olarak direkt yakma ile yakıtın enerjisi de kullanılabilir. Türkiye’de 3.225 belediye bulunmakta olup, bunlar arasında sadece 3.129 belediye atık hizmeti vermektedir. Bu hizmeti alan toplam ortalama nüfus 57.800.347 kişidir. Kentsel atık miktarlarının ortalaması alındığında günlük olarak kişi başına düşen miktar 1,15 kg olarak belirlenmiştir [24]. Bu değere göre, bir kişi yıllık olarak ortalama 0,42 ton atık oluşturmaktadır [25]. Atık hizmeti alan toplam

nüfusun ortalama yıllık atık miktarı 24.276.145 ton/yıl'dır. Çöp gazının ısı değeri 18-27 kJ/Nm³ arasında değişmektedir. Çöp gazının ortalama enerji potansiyeli yaklaşık olarak 4,85 milyon kWh olarak bulunmuştur [26]. Bu değerler dikkate alınacak olursa ülkemiz devasa kentsel organik katı atıklara sahiptir. Bu da kentsel katı atıkların oldukça iyi bir biyogaz üretim potansiyeline sahip olduğunu açıklamaktadır.

Biyokütle tesisinden elde edilen türbin gücü ($W_{\text{türbin}}$) Eşitlik 17 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$W_{\text{türbin}} = \dot{m}_{\text{buhar}} \times (h_2 - h_3) \quad (17)$$

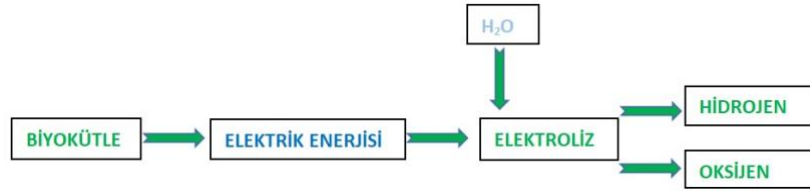
Burada; yakma sistemindeki buhar kütleli debisi (\dot{m}_{buhar}) ve özgül entalpi (h)'dir. Özgül entalpi değeri; özgül entropi (s) değerlerine göre bulunur.

Biyokütle enerjisinden üretilen gazın türbinden ve jeneratör sisteminden geçişi sonucu elde edilen elektrik enerjisi (W_{elektrik}) Eşitlik 18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{\text{elektrik}} = W_{\text{türbin}} \times \eta_{\text{jeneratör}} \quad (18)$$

Burada türbinin verim değeri ($\eta_{\text{jeneratör}}$) ile gösterilmiştir.

Şekil 6'da biyokütle kaynaklı elektroliz sistemi kullanılarak yeşil hidrojen üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 6. Biyokütle enerjisinden elektroliz ile hidrojen üretimi iş akış şeması

Antalya ilindeki biyokütle kaynaklı güç santralleri kurulu gücü Tablo 4'te verilmiştir. Bu tesislerde toplanan atıkların çürütülmesi ve yakılması sonucunda elde edilen elektrik enerjisi çevresel açıdan önem arz etmektedir. Böylesine önemli bir kaynaktan üretilen elektrik, hidrojen gibi çevreci bir yakıtın sudan üretilmesinde kullanılabilir.

Tablo 4. Antalya'da bulunan biyokütle enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
ITC ANTALYA BES	KEPEZ	28,27	212.025
AGT BİYOKÜTLE TESİSİ	DÖŞEMEALTI	5,37	30.072
ITC ALANYA BES	ALANYA	5,66	39.620
AREL ENERJİ MANAVGAT BES	MANAVGAT	3,6	25.200
TEMİZ ÇEVRE BES	SERİK	6,78	47.460
ANTKEM BES	KEPEZ	4,05	30.375
T-ENERGY KUMLUCA BES	KUMLUCA	9,375	75.000

Aşağıda; Antalya'daki biyokütle santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı gösterilmiştir.

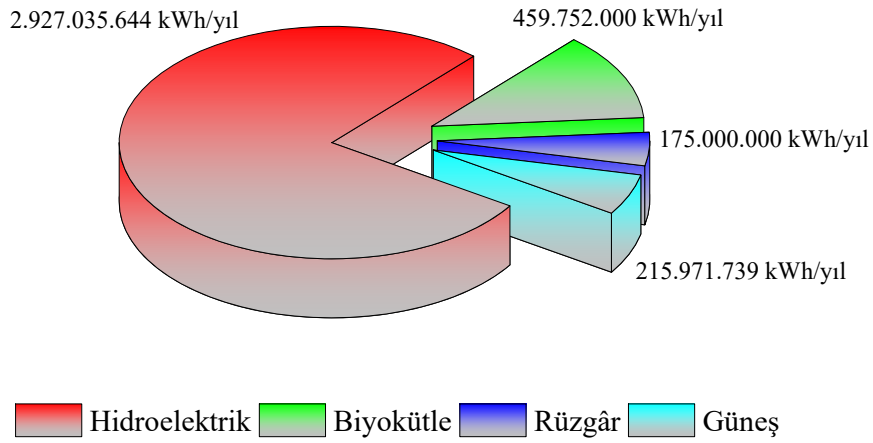
$$459.752 \text{ MWh} \cong 1,6551 \times 10^{12} \text{ kJ} \quad (19)$$

Antalya'daki biyokütle enerji santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak üretilen yıllık hidrojen miktarı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1,6551 \times 10^{12} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 11.957.864,62 \text{ kg} \quad (20)$$

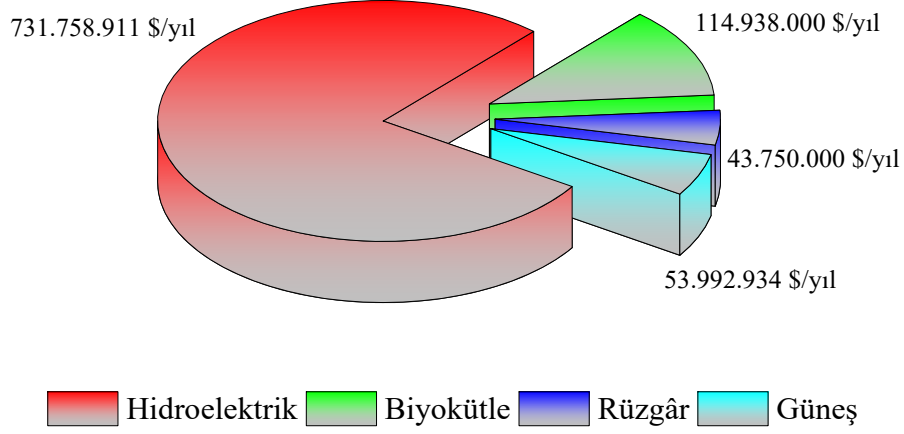
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür taramasına ve EPDK'dan alınan verilere göre Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretililecek elektrik enerjisi potansiyeli Şekil 7'de gösterilmiştir. Hidroelektrik santrallerinden toplam 2.927.035.644 kWh/yıl, biyokütle enerji santrallerinden toplam 459.752.000 kWh/yıl, güneş enerji santrallerinden toplam 215.971.739 kWh/yıl ve rüzgâr enerji santrallerinden toplam 175.000.000 kWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. En yüksek enerji potansiyeli hidroelektrik santrallerinde meydana gelmiştir. Bu enerjinin hidrojen üretiminde kullanılması çevresel etkiler açısından önemlidir.



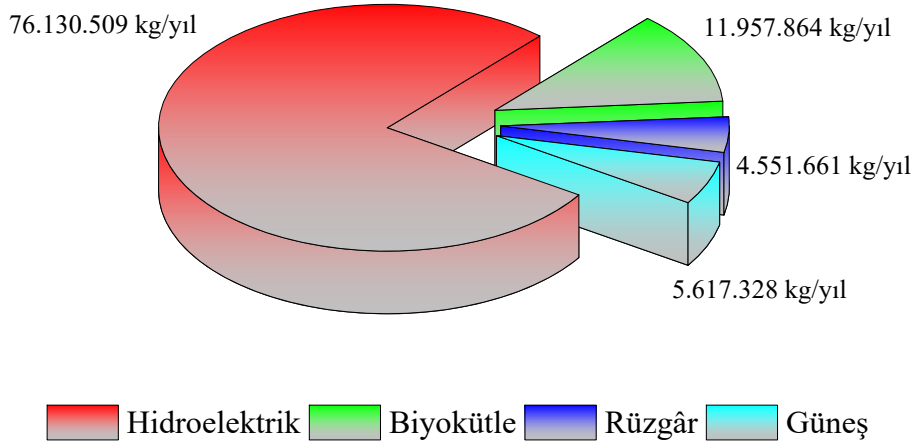
Şekil 7. Antalya'daki yenilenebilir kaynaklardan üretililecek yıllık elektrik enerjisi miktarları

Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi, günümüz piyasa şartlarında (elektrik satış fiyatı 0,25 \$/kWh) şebekeye aktarılacak olursa, elde edilen gelir Şekil 8'de gösterilmektedir. Toplam gelir 944.439.845 \$/yıl'dır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin ekonomik boyutu oldukça yüksek olup ülkemizin enerji ekonomisine katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak söz konusu elektrik üretiminin hidrojen üretimine yönlendirilmesi elde edilecek geliri arttıracaktır.



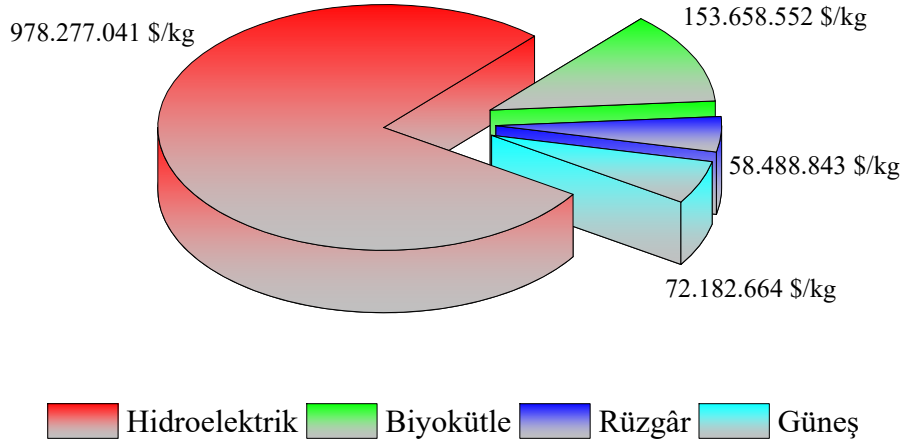
Şekil 8. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilecek elektrik geliri miktarları

Bu çalışma kapsamında Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklı elektriğin kullanımıyla üretilen yeşil hidrojen miktarları hesaplanarak Şekil 9'da verilmiştir. Toplam hidrojen üretiminin yaklaşık %77'si hidroelektrik enerjisinden, %12'si biyokütle enerjisinden, %6'sı güneş enerjisinden ve %5'i rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir. Antalya ilindeki hidroelektrik santralleri hidrojen üretimi açısından oldukça verimlidir. Kurulu gücü yüksek olan santrallere elektrolizör eklenerek hidrojen üretimi yapılması önümüzdeki yıllarda ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Ülkemiz enerji üssü olma yolunda çalışmalarına devam etmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının çevreci bir dönüşüme sahip hidrojen üretiminde kullanılması ayrıca önemlidir.



Şekil 9. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak yıllık üretililecek hidrojen miktarları

Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde değerlendirilmesi ile ekonomik kazanç sağlanabilir. Şekil 10'da Antalya ilindeki yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojenin ekonomik değeri verilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin Avrupa'da satış fiyatı 12,85 \$/kg'dır. Bu nedenle; elektrik enerjisinin, hidrojen üretimine yönlendirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 10. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynaklardan üretilen hidrojenen elde edilebilecek yıllık gelir miktarı

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Antalya ilindeki yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik direkt şebekeye transfer edilirse 944.439.845 \$/yıl gelir elde edilecektir. Ancak bu elektrik enerjisi yeşil hidrojene dönüştürülürse 1.262.607.100 \$/yıl olarak gelir sağlanacaktır. Yapılan hesaplara ve analizlere dayanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojen satışından elde edilen gelir direkt elektrik satışından elde edilen gelirden %33,68 oranında daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Maddi gelirin yanında çevresel kazançlar ve taşıma maliyetlerindeki azalma ülke ekonomisi açısından önemlidir. Araştırma kapsamındaki bulgulara ve analizlere dayanılarak Antalya ilinde hidrojen çiftliği konsepti uygulanabilir kabul edilmiştir. Antalya ilinin potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin direkt şebekeye verilmesi yerine, bu elektriği kullanarak hidrojen üretilmesi ekonomik açıdan daha verimlidir. Türkiye yıllık güneşlenme süresi ve m² başına düşen radyasyon miktarı fazla olan bir ülkedir. Bu nedenle ülkemiz güneş enerjisi bakımından zengin bir konuma sahiptir. Ayrıca sıcaklık farklarından dolayı oluşan rüzgârın enerji potansiyeli yüksektir. Türkiye turizm amaçlı insan sirkülasyonunun fazla olduğu ve tarım konusunda önemli bir yere sahip olan bir ülkedir. Bu durum biyokütle için organik ve kentsel atığın yakıt olarak kullanılmasında alternatif yakıt seçeneği oluşturur. Ülkemizin akarsu ve göl gibi kaynakları mevcut olup bu kaynakların düşü farkından yararlanılarak hidroelektrik enerjisi üretilmesi potansiyeli yüksektir. Ülkemiz; jeotermal enerjinin de kullanılabildiği önemli ülkeler arasındadır. Türkiye'nin her ilinin kendine özgü yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli olduğu düşünülürse ülkemizin hidrojen çağına geçişi hızlandırılabilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür taramasında önümüzdeki dönemlerde fosil yakıtların tükeneceği ve alternatif yeşil yakıt seçenekleri üzerine çalışmaların yoğunlaşacağı görülmektedir. Türkiye'nin mevcut konumu ve potansiyeli itibari ile bu tarz yeşil enerji kökenli çalışmaların yaygınlaştırılması ve hayata geçirilmesi önem arz etmektedir. Bugün kullanılan fosil yakıtların gerek fiyat artışı gerek karbondioksit salımlarına olan etkisi göz önüne alındığında, gelecek potansiyeli olan ve temiz enerji kapsamında olan, yeni ve alternatif yakıtların ileriki dönemlerde daha yaygın olarak kullanımının artması temenni edilir.

V. KAYNAKLAR

[1] Kilinc, N., (2008), Hidrojen enerjisinin ve enerji teknolojilerinin ekonomideki yeri Pazar gelişimi ve Pazar payı üzerine bir araştırma, T.C. Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

- [2] Acar, C., Dincer, I., (2013), Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario L1H 7K4, Canada
- [3] Dincer, I., Javani, N., Karayel, G., K., (2021), Türkiye için hidrojen çiftliği konsepti raporu
- [4] T. Kai, Y. Uemura, H. Takanashi, T. Tsutsui, T. Takahashi, Y. Matsumoto, K. Fujie, M. Suzuki 2007, Ademonstration project of the hydrogen station located on Yakushima Island— Operation and analysis of the station, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan, Department of Bioengineering, Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan Faculty of Human Sciences, Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa 221-8686, Japan Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibari-ga-oka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan United Nations University, 5-53-70 Jingumae, Shibuya, Tokyo 150-8925, Japan
- [5] Little, M., Thomson, M., Infield, D. 2006, Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage, CREST (Centre for Renewable Energy Systems Technology), Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK
- [6] M. Öztürk, A. Elbir, N. Özek, A. K. Yakut, 2011, Güneş Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta/Türkiye
- [7] Akyüz E., 2010, Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Elektrik ve Hidrojen Üretiminin Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, Türkiye
- [8] Dursun E., 2013, şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit enerji sisteminin analizi, marmara üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, İstanbul
- [9] Tutar F., Eren M. V., 2011, Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye, Niğde Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü, Şırnak Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü
- [10] Veziroğlu N. T., Şahin S., 2008, 21st Century's energy: Hydrogen energy system, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Teknikokullar, Ankara, Turkey
- [11] Veziroğlu N. T. Ve Momirlan M., 2004, The properties of hydrogen as fuel tomorrowin sustainable energy system for a cleaner planet, aInstitute of Physical Chemistry, "I.G. Murgulescu", Romanian Academy, Spl. Independentei 202, Bucharest 77208, Romania
bClean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA
- [12] Smit R., Weeda M., De Groot A., 2006, Hydrogen infrastructure development in The Netherlands, Energy Research Centre of The Netherlands (ECN), P.O. Box 1, 1755 ZG Petten, The Netherlands
- [13] Seymour H. E., Borges F. C., Fernandes R., (2007), Indicators of European public research in hydrogen and fuel cells—An input–output analysis, Research Group on Energy and Sustainable Development, Mechanical Engineering Department, Instituto Superior Técnico, Pav. De Mecânica 1-2º, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
- [14] Dincer I., Acar C., (2017) Innovation in hydrogen production, Clean Energy Research Laboratory, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario, L1H 7K4, Canada Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, Yıldız Mh., 34349 Besiktas, Istanbul, Turkey Faculty of

Engineering and Natural Sciences, Bahcesehir University, C, Cıragan Caddesi No: 4- 6, 34353, Besiktas,,Istanbul, Turkey

[15] Celik D., Yildiz M., (2017), Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles, Kocaeli University, Department of Chemical Engineering, 41380, Kocaeli, Turkey

[16] Afgan H. N., Veziroglu A., Carvalho M. G., (2007), Multi-criteria evaluation of hydrogen system options Instituto Superior Tecnico, Av. Rovisco Pais, 1094 Lisbon, Portugal International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL 33146, USA

[17] Wang M., Wang G., Sun Z., Zhang Y., Xu D., (2019), Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation, Guodian New Energy Technology Research Institute Co.Ltd, Beijing 102209, P.R. China Beijing Key Laboratory of Power Generation System Functional Material, Beijing 102209, P.R. China School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, P.R. China

[18] Rosyid O. A., Jablonski D., Hauptmanns U., (2007), Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy, Department of Process Design and Safety, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Germany

[19] Toprak K., (2006), rüzgar enerji santralleri yardımıyla hidrojen eldesinin ekonomik analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[20] Aslan O., Ozcan B., (2008), Sürdürülebilir kalkınma ve Hidrojen enerjisi, Istanbul University, Istanbul-Türkiye

[21] Cengel Y. A., Cimbala J. M., Kanoglu M., (2022), Yenilenebilir Enerji Temelleri ve Uygulamaları, 1

[22] A.S. Joshi, I. Dincer, B.V. Reddy, “Exergetic assessment of solar hydrogen production methods”, International Journal of Hydrogen Energy vol 35, pp. 4901–4908, 2010.

[23] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001) Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 0 471 48997 2,2001.

[24] 30. T.C. Başbakanlık Türkiye İstatistik Kurumu, Belediye Atık İstatistikleri. 2008. TÜİK Haber Bülteni, Sayı:50, TÜİK, Ankara, Türkiye.

[25] Sezgin N., Özcan H., Varınca K., Borat M. 2003. Katı Atık Depo Gazından Elektrik Üretiminin Türkiye’de Uygulanabilirliğine İki Örnek: İstanbul ve Bursa Tesisleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 3: 89-96



[26] Özcan M., Öztürk S., Yıldırım M. 2011. Türkiye’nin Farklı Kaynak Tiplerine Göre Biyogaz Potansiyellerinin Belirlenmesi, IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 10-12 Mayıs, Kocaeli, Türkiye.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Solitary Wave Solutions to the General Class of Nonlocal Nonlinear Coupled Wave Equations

 Şenay PASİNLİOĞLU^{a,*},  Gulcin M. MUSLU^a

^a Department of Mathematics, Faculty of Science and Letters, Istanbul Technical University, Maslak, Istanbul, TÜRKİYE

* Corresponding author's e-mail address: pasinliogl@itu.edu.tr
DOI: 10.29130/dubited.1249987

ABSTRACT

In this paper, we study a general class of nonlocal nonlinear coupled wave equations that includes the convolution operation with kernel functions. For appropriate selections of the kernel functions, the system becomes well-known nonlinear coupled wave equations, for instance Toda lattice system, coupled improved Boussinesq equations. A numerical scheme is proposed for the solitary wave solutions of the system using the Pethiashvili method. Using the different kernels, the validity of the numerical method has been tested.

Keywords: Coupled Boussinesq equations, Petviashvili's iteration method, solitary wave solutions.

Yerel ve Lineer Olmayan Kupl Dalg Denklemlerinin Genel Sınıfı için Yalnız Dalg Çözümleri

ÖZET

Bu makalede çekirdek fonksiyonları ile konvolüsyon işlemi içeren, yerel ve doğrusal olmayan kupl dalg denklemlerinin genel bir sınıfını inceliyoruz. Çekirdek fonksiyonlarının uygun seçimleri için sistem, Toda kafes sistemi, kupl Boussinesq denklemleri gibi iyi bilinen doğrusal olmayan kupl dalg denklemleri haline gelir. Petviashvili yöntemi kullanılarak, sistemin yalnız dalg çözümleri için bir sayısal şema önerilmiştir. Farklı çekirdekler kullanılarak, sayısal yöntemin geçerliliği test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kupl Boussinesq denklemler, Petviashvili iterasyon yöntemi, yalnız dalg çözümleri.

I. INTRODUCTION

In this paper, we consider the nonlinear nonlocal coupled wave equations

$$u_{1tt} = [\beta_1 * (u_1 + g_1(u_1, u_2))]_{xx}, \quad x \in R, t > 0, \quad (1)$$

$$u_{2tt} = [\beta_2 * (u_2 + g_2(u_1, u_2))]_{xx}, \quad x \in R, t > 0, \quad (2)$$

where g_1 and g_2 are nonlinear functions of $u_1 = u_1(x, t)$ and $u_2 = u_2(x, t)$, the subscripts indicate partial derivatives. Here the symbol * indicates the convolution

$$\beta_i * v = \int_R \beta_i(x - y)v(y)dy. \quad (3)$$

The functions $g_i(u_1, u_2)$ ($i = 1, 2$) satisfy the exactness condition $\frac{\partial g_1}{\partial u_2} = \frac{\partial g_2}{\partial u_1}$ and assume that $g_i(u_1, u_2) \in C^2(R^2)$, $i = 1, 2$. The general kernel functions $\beta_i(x)$ are integrable. The Fourier transforms of kernel functions satisfy the following condition

$$0 \leq \hat{\beta}_i(k) \leq C_i(1 + k^2)^{-r_i/2} \quad \text{for all } k \in R \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

for some constants $C_i > 0$, $r_i \in R$ and $r_i \geq 2$.

The system (1)-(2) turns into well-known coupled systems of nonlinear wave equations for some appropriate selections of the kernel functions $\beta_i(x)$. For the kernel functions $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \delta$, the system (1)-(2) reduces to the coupled nonlinear wave equations

$$u_{1tt} - u_{1xx} = [g_1(u_1, u_2)]_{xx}, \quad (5)$$

$$u_{2tt} - u_{2xx} = [g_2(u_1, u_2)]_{xx}, \quad (6)$$

where δ is the Dirac delta function.

In the case of the exponential kernel [1], $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2}e^{-|x|}$, the system (1)-(2) becomes the coupled improved Boussinesq equations

$$u_{1tt} - u_{1xx} - u_{1xxtt} = [g_1(u_1, u_2)]_{xx}, \quad (7)$$

$$u_{2tt} - u_{2xx} - u_{2xxtt} = [g_2(u_1, u_2)]_{xx}. \quad (8)$$

In various contexts, the system (7)-(8) has been obtained to describe bi-directional wave propagation, for example, in a diatomic lattice [2], in a Toda lattice model [3] and in a two layered lattice model [4].

If the kernel functions are chosen as $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2c\kappa}e^{-\frac{|x|}{c}}$, $\kappa = \frac{\rho}{a}$ and $c = \frac{\ell}{\sqrt{12}}$, and taking $g_1(u_1, u_2) = (b - 1)u_1 - \frac{b^2}{2}u_1^2 + \frac{b}{2}u_2^2$ and $g_2(u_1, u_2) = bu_1u_2 - u_2$ the system (1)-(2) becomes the Toda lattice system

$$\frac{\rho}{a}u_{1tt} = bu_{1xx} - \frac{b^2}{2}(u_1^2)_{xx} + \frac{b}{2}(u_2^2)_{xx} + \frac{\rho}{a12}u_{1xxtt}, \quad (9)$$

$$\frac{\rho}{a}u_{2tt} = b(u_1u_2)_{xx} + \frac{\rho}{a12}u_{2xxtt}, \quad (10)$$

where ρ is the linear mass density, a is a constant, b is a coupling parameter and ℓ is the characteristic length. These equations describe the propagation of longitudinal and transversal waves on molecules of DNA (deoxyribonucleic acid) [3], [5]. This system has been treated numerically in [3] and theoretically in [5]. The Cauchy problem for (9)-(10) has been studied in [6], [7].

In the case of the double-exponential kernel [8],

$$\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2(c_1^2 - c_2^2)} (c_1 e^{-|x|/c_1} - c_2 e^{-|x|/c_2}), \quad (11)$$

the system (1)-(2) becomes the coupled higher-order Boussinesq equations

$$u_{1tt} - u_{1xx} - \eta_1 u_{1xxtt} + \eta_2 u_{1xxxxtt} = [g_1(u_1, u_2)]_{xx}, \quad (12)$$

$$u_{2tt} - u_{2xx} - \eta_1 u_{2xxtt} + \eta_2 u_{2xxxxtt} = [g_2(u_1, u_2)]_{xx}, \quad (13)$$

where c_1 and c_2 are real, positive constants and $\eta_1 = c_1^2 + c_2^2$ and $\eta_2 = c_1^2 c_2^2$.

The uncoupled form of Eqs. (12)-(13) appears as a model for a dense chain of particles with elastic couplings [9] and for longitudinal waves in a nonlocal nonlinear elastic medium [10]. It can be found in [11] different types of the kernel functions used in the literature.

In this paper, we focus on a general class of kernel functions. The global existence of the system (1)-(2) with initial conditions

$$u_1(x, 0) = \phi(x), \quad u_{1t}(x, 0) = \phi_1(x), \quad (14)$$

$$u_2(x, 0) = \psi(x), \quad u_{2t}(x, 0) = \psi_1(x) \quad (15)$$

has been proved in [12]. For special cases of kernel functions, the exact solitary wave solutions for the system (1)-(2) can be found in the literature. However, solitary wave solutions for the general cases of kernel functions are unknown. The aim of our study is to generate the solitary wave solutions of the nonlocal nonlinear coupled system by using the Petviashvili method numerically.

We organized this paper as follows. In Section II, we present the Petviashvili's iteration method and we obtain the solitary wave solutions of the system (1)-(2) numerically by using this method. In Section III, we perform some numerical tests for the nonlinear nonlocal coupled wave equations. The conclusion is given in Section IV.

II. THE PETVIASHVILI'S ITERATION METHOD

In this section, we propose the Petviashvili method to obtain the solitary wave solutions of the nonlinear nonlocal coupled wave eqs. (1)-(2). The Petviashvili's method was first introduced in [13] to obtain the solitary wave solutions of nonlinear wave equations numerically. The conditions in which convergence and necessary to obtain the optimal convergence rate were found in [14]. It has been reported in some articles that this method can be applied to nonlinear dispersive wave equations [15]-[21]. In this method, a stabilizing factor is added to the fixed point iteration scheme. The detailed information about this method can be found in [17], [22], [23].

To apply this method to our system, we first use the ansatz

$$u_1(x, t) = \phi(\xi), \quad u_2(x, t) = \psi(\xi), \quad \xi = x - ct, \quad (16)$$

where c is the wave propagation speed. Using the asymptotic boundary conditions and substituting these solutions into (1)-(2) and then integrating twice we have

$$c^2 \phi = \beta_1 * [\phi + g_1(\phi, \psi)], \quad (17)$$

$$c^2 \psi = \beta_2 * [\psi + g_2(\phi, \psi)]. \quad (18)$$

Taking the Fourier transform,

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}(k) e^{ikx} dk, \quad \hat{u}(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{ikx} dx, \quad (19)$$

of the Eqs. (17)-(18), we find

$$[c^2 - \hat{\beta}_1(k)] \hat{\phi}(k) = \hat{\beta}_1(k) \hat{g}_1, \quad (20)$$

$$[c^2 - \hat{\beta}_2(k)] \hat{\psi}(k) = \hat{\beta}_2(k) \hat{g}_2. \quad (21)$$

The numerical calculation of $\hat{\phi}(k)$ and $\hat{\psi}(k)$ for the Eqs. (20)-(21) can be given in the form

$$\hat{\phi}_{n+1}(k) = \frac{\hat{\beta}_1(k)}{c^2 - \hat{\beta}_1(k)} \hat{g}_{1n}, \quad (22)$$

$$\hat{\psi}_{n+1}(k) = \frac{\hat{\beta}_2(k)}{c^2 - \hat{\beta}_2(k)} \hat{g}_{2n}, \quad (23)$$

where $\hat{\phi}_n(k)$ and $\hat{\psi}_n(k)$ are the Fourier transforms of $\phi_n(x)$ and $\psi_n(x)$ which are the n th iterations of the numerical solutions. We add stabilizing factors $M_{1,n}$ and $M_{2,n}$ to ensure the convergence [13]. The new algorithm can be given in the form

$$\hat{\phi}_{n+1}(k) = (M_{1,n})^{\gamma_1} \frac{\hat{\beta}_1(k)}{c^2 - \hat{\beta}_1(k)} \hat{g}_{1n}, \quad (24)$$

$$\hat{\psi}_{n+1}(k) = (M_{2,n})^{\gamma_2} \frac{\hat{\beta}_2(k)}{c^2 - \hat{\beta}_2(k)} \hat{g}_{2n}, \quad (25)$$

where the stabilizing factors are

$$M_{1,n} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (c^2 - \hat{\beta}_1(k)) [\hat{\phi}_n(k)]^2 dk}{\int_{-\infty}^{\infty} \hat{\beta}_1(k) \hat{g}_1(k) \hat{\phi}_n(k) dk}, \quad (26)$$

$$M_{2,n} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (c^2 - \hat{\beta}_2(k)) [\hat{\psi}_n(k)]^2 dk}{\int_{-\infty}^{\infty} \hat{\beta}_2(k) \hat{g}_2(k) \hat{\psi}_n(k) dk}, \quad (27)$$

and γ_1 and γ_2 are free parameters. Solitary wave solutions for nonlocal nonlinear coupled wave equations can only be constructed under the assumptions

$$c^2 - \hat{\beta}_1(k) \neq 0 \quad \text{and} \quad c^2 - \hat{\beta}_2(k) \neq 0 \quad \text{for all } k \in R. \quad (28)$$

III. NUMERICAL EXAMPLES

In this section, we give some numerical experiments. We first compare the numerical solutions obtained by the Petviashvili's method with the exact solutions available in the literature. Then, we obtain the

solitary wave profile for the nonlinear nonlocal coupled wave equations (1)-(2), generated by the Petviashvili method.

In all experiments, we choose the spatial interval $-100 \leq x \leq 100$ and the number of spatial grid points $N = 1024$. The numerical operations are performed by using Matlab. We use three different errors to control the overall iterative process. These are the stabilization factor error

$$M = |1 - M_{i,n}|, \quad M_{i,n} \text{ are given by (26)-(27), } i = 1,2 \text{ and } n = 0,1,2 \dots, \quad (29)$$

the residual error

$$\text{RES}(n) = \|\mathcal{R}_1 \phi_n\|, \quad \text{RES}(m) = \|\mathcal{R}_2 \psi_m\|, \quad n, m = 0,1,2 \dots, \quad (30)$$

where

$$\mathcal{R}_1 \phi = c^2 \phi - [\beta_1 * (\phi + g_1(\phi, \psi))], \quad (31)$$

$$\mathcal{R}_2 \psi = c^2 \psi - [\beta_2 * (\psi + g_2(\phi, \psi))], \quad (32)$$

and error between two consecutive iterations

$$\text{Error}_1(n) = \|\phi_n - \phi_{n-1}\|, \quad \text{Error}_2(m) = \|\psi_m - \psi_{m-1}\|, \quad n, m = 0,1,2 \dots. \quad (33)$$

In Example 1 and Example 2, we use exponential kernels $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2}e^{-|x|}$ with Fourier transforms are $\hat{\beta}_1(k) = \hat{\beta}_2(k) = \frac{1}{1+k^2}$ to compare the solitary wave solutions obtained by the Petviashvili's method with the exact solutions.

Example 1. In this experiment, we compare our numerical solution with the exact solution of the uncoupled improved Boussinesq equations to test our scheme. For the kernel functions $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2}e^{-|x|}$, if we take nonlinear functions g_1 and g_2 as $g_1(u_1, u_2) = u_1^2$ and $g_2(u_1, u_2) = u_2^2$, we obtain uncoupled improved Boussinesq equations

$$u_{1tt} = u_{1xx} + u_{1xxtt} + (u_1^2)_{xx}, \quad (34)$$

$$u_{2tt} = u_{2xx} + u_{2xxtt} + (u_2^2)_{xx}. \quad (35)$$

Since equations (34) and (35) are the same, we only use the first equation. The solitary wave solution of (34)-(35) is given by

$$u_1(x, t) = u_2(x, t) = \alpha \operatorname{sech}^2 \left(\frac{1}{A} \sqrt{\frac{\alpha}{6}} (x - At - x_0) \right), \quad (36)$$

where $\alpha = 0.25$ is the initial amplitude, and $A = \sqrt{1 + \frac{2}{3}\alpha}$ is the velocity of the pulse with $A^2 > 1$ [24].

In the left side of Figure 1, we compare the numerically obtained solitary wave solution of (34)-(35) with exact solitary wave solution. In the right side of Figure 1, we present the variation of the stabilization factor error M, the residual error RES and Error given by (29)-(33). We choose $\gamma_i = 1.2$ and initial guess $u_1 = e^{-x^2}$. It can be seen from the figure, the solitary wave profile obtained by proposed method is compatible with the exact solitary wave solution of equations (34)-(35).

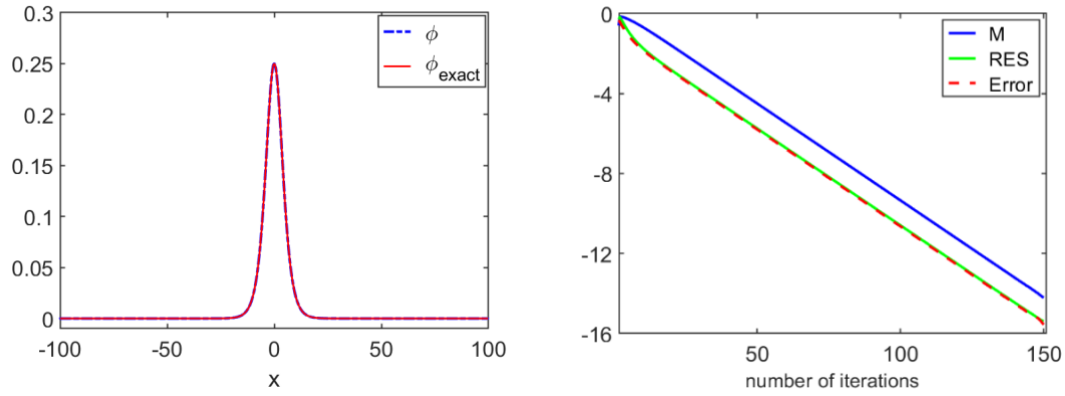


Figure 1. The numerical and exact solitary wave profiles of the uncoupled improved Boussinesq equation and the variation of errors.

Example 2. For the kernel functions $\beta_1(x) = \beta_2(x) = \frac{1}{2}e^{-|x|}$, if we choose $g_1(u_1, u_2) = -bu_1^2 + u_2^2$ and $g_2(u_1, u_2) = 2u_1u_2$ we obtain the following system

$$u_{1tt} = u_{1xx} - b(u_1^2)_{xx} + (u_2^2)_{xx} + u_{1xxtt}, \quad (37)$$

$$u_{2tt} = u_{2xx} + 2(u_2u_1)_{xx} + u_{2xxtt}, \quad (38)$$

where $u_1(x, t)$ and $u_2(x, t)$ describe the longitudinal strain and the transverse strain respectively. This system emerges from a weakly nonlinear model of wave propagation in a simple cubic lattice [25]. The solitary wave solutions of the system (37)-(38) are given by

$$u_1(x, t) = u_{1c}(x - ct), \quad u_2(x, t) = \alpha u_{1c}(x - ct), \quad (39)$$

where

$$u_{1c}(x) = \frac{3}{4}(c^2 - 1)\text{sech}^2(\gamma x), \quad \alpha = \sqrt{2 + b}, \quad \gamma = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{c^2 - 1}{c^2}}. \quad (40)$$

The stability of the solitary wave solutions for this system has been studied numerically by [3] and [25].

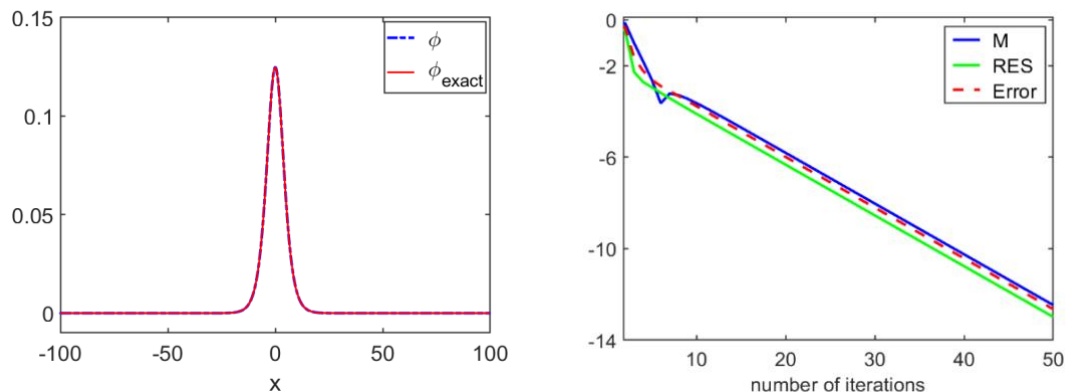


Figure 2. The numerical and exact solitary wave profiles of the system of (37)-(38) and the variation of errors.

In Figure 2, we show the only one solution of the system (37)-(38) because the solutions are linearly dependent. Figures for the solution of the second equation of the system (37)-(38) are the same. Here we choose $b = -1$, $c = 1.08$ and initial guess $u_1 = e^{-x^2}$. It can be seen from the Figure 2 the solitary

wave profile obtained by the proposed method is compatible with the exact solitary wave solution of equations (37)-(38).

In the following examples, we use kernel functions whose Fourier transforms are known. To our knowledge, the exact solitary wave solutions of the system (1)-(2) with the following kernels are unknown. So, we construct the solitary wave solutions of the system (1)-(2) with the following kernels by using the Petviashvili iteration method given in Section II.

Example 3. In this example, we take the general kernel function with the Fourier transform is

$$\hat{\beta}_i(k) = \frac{1}{1+k^2+\eta k^2 \sin^2(k^2)}, \quad i = 1,2, \quad (41)$$

where η is a positive parameter. Choosing $g_1(u_1, u_2) = u_1^2 + u_2^2$ and $g_2(u_1, u_2) = 2u_1u_2$, we carry out some numerical experiments for different values of η . In Figure 3, we show the numerical solutions obtained by the proposed method for the system (1)-(2) with (41).

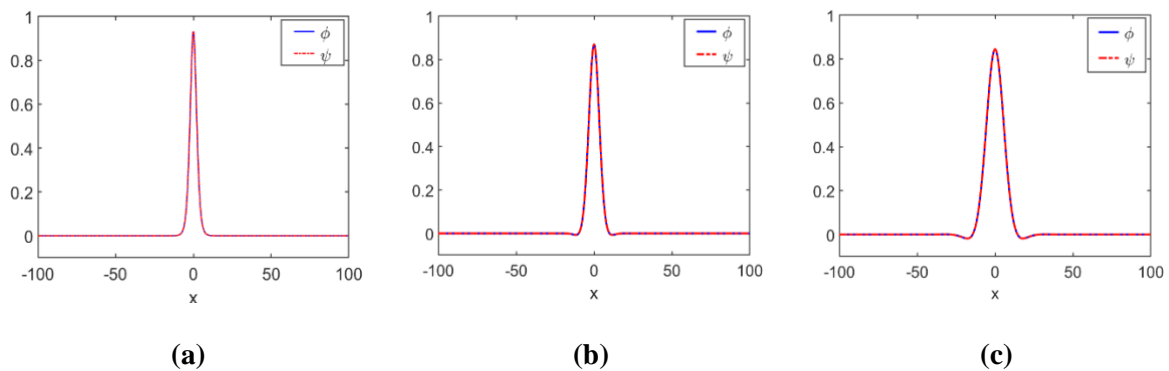


Figure 3. The numerical solitary wave profiles obtained by proposed method for the the system (1)-(2) with (41).

In this case, we take (a) $\eta = 0.1$, (b) $\eta = 5$ and (c) $\eta = 50$ for $c = 1.5$. We see that the amplitude of the solitary wave solution decreases as we increase values of η . Since the exact solution of the system (1)-(2) with (41) is not known, we cannot compare our numerical solution with the exact solution. Therefore we show the stabilization factor error $|1 - M_n|$, the residual error RES, and Error with the number of iterations in semi-log scale in Figure 4, respectively, for $\eta = 0.1$, $\eta = 5$ and $\eta = 50$. From these results we observe that the solitary wave solutions for the system (1)-(2) with (41) by the proposed method converges rapidly to the exact solutions of the given system.

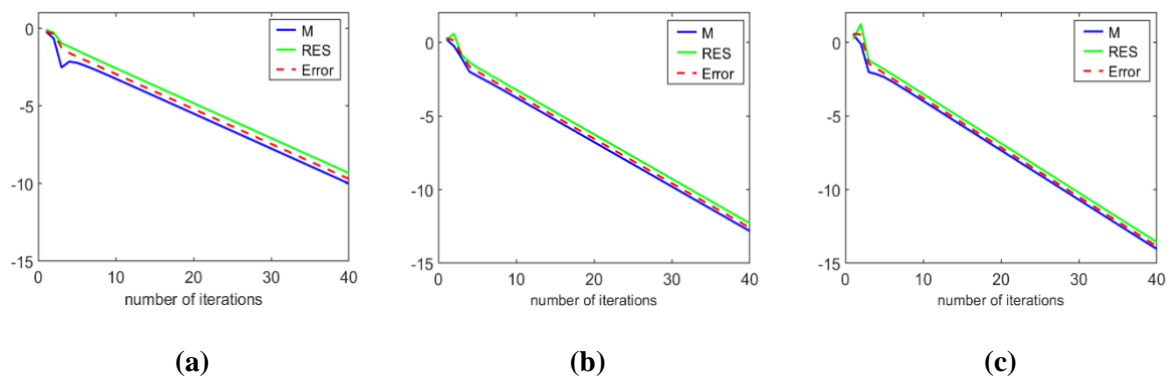


Figure 4. The variation of errors for $\eta = 0.1$, $\eta = 5$ and $\eta = 50$ in semi-log scale.

Example 4. In this example, we take the general kernel function with the Fourier transform is

$$\hat{\beta}_i(k) = \frac{1}{1+k^2+k^4} + \frac{\mu}{1+k^4}, \quad i = 1, 2, \quad (42)$$

where μ is a positive parameter. We choose the wave speed c satisfying the condition (28). In this case, we choose $g_1(u_1, u_2) = u_1^2 + u_2^2$ and $g_2(u_1, u_2) = 2u_1u_2$. We carry out some numerical tests for (a) $\mu = 0.5$, (b) $\mu = 1$ and (c) $\mu = 2$ with $c = 2.5$.

In Figure 5, we present the numerical solitary wave profiles of the system (1)-(2) with (42). We see that the amplitude of the solitary wave solution decreases as we increase values of μ .

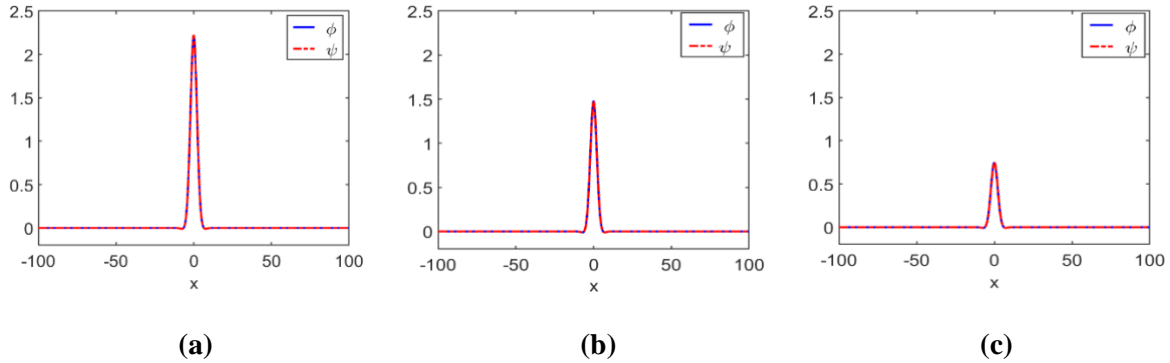


Figure 5. The solitary wave profiles obtained by proposed method for the system (1)-(2) with (42).

In the Figure 6, we show the variation of three errors $|1 - M_n|$, RES and Error. The presented figures show that the solitary wave solutions for the system (1)-(2) with (42) by the proposed method converges rapidly to the exact solutions of the given system.

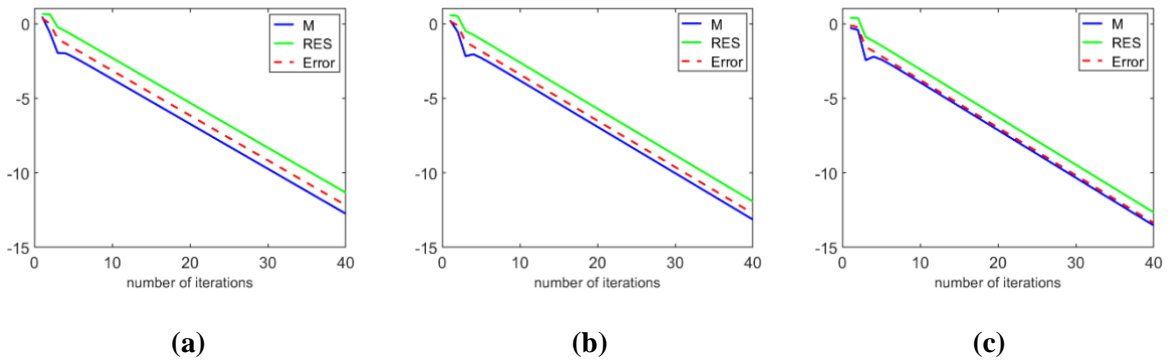


Figure 6. The variation of errors for $\mu = 0.5$, $\eta = 1$ and $\eta = 2$ in semi-log scale.

IV. CONCLUSION

In this work, we study a general class of nonlinear nonlocal coupled wave equations (1)-(2). Since the solitary wave solution for the nonlocal nonlinear coupled system is not known for general kernels, we propose a method for numerically constructing the solitary wave profile by using the Pethviashvili's method. The efficiency of the numerical methods is tested for different kernels. As it can be seen from the presented figures, our proposed numerical scheme converges considerably well with the solution.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors very gratefully acknowledge to the editor and the anonymous reviewers for the constructive comments and valuable suggestions which improved the first draft of paper.

V. REFERENCES

- [1] A.C. Eringen, "On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves," *Journal of Applied. Physics*, vol. 54, pp. 4703–4710, 1983.
- [2] J.A.D. Wattis, "Solitary waves in a diatomic lattice: analytic approximations for a wide range of speeds by quasi-continuum methods," *Physics Letters A*, vol. 284, pp. 16–22, 2001.
- [3] P.L. Christiansen, P.S. Lomdahl, V. Muto, "On a Toda lattice model with a transversal degree of freedom," *Nonlinearity*, vol. 4, pp. 477–501, 1991.
- [4] K.R. Khusnutdinova, A.M. Samsonov, A.S. Zakharov, "Nonlinear layered lattice model and generalized solitary waves in imperfectly bonded structures," *Physical Review E*, vol. 79, Article ID 056606, 2009.
- [5] S.K. Turitsyn, "On a Toda lattice model with a transversal degree of freedom. Sufficient criterion of blow-up in the continuum limit," *Physics Letters A*, vol. 267, pp. 173–267, 1993.
- [6] A. De Godefroy, "Blow up of solutions of a generalized Boussinesq equation," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 60, pp. 123–138, 1998.
- [7] S. Wang, M. Li, "The Cauchy problem for coupled IMBq equations," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 74, pp. 726–740, 2009.
- [8] M. Lazar, G.A. Maugin, and E.C. Aifantis, "On a theory of nonlocal elasticity of bi-Helmholtz type and some applications," *International Journal of Solids and Structures.*, 43, pp. 1404–1421, 2006.
- [9] P. Rosenau, "Dynamics of dense discrete systems," *Progress of Theoretical Physics*, vol. 79, pp. 1028–1042, 1988.
- [10] N. Duruk, A. Erkip, and H.A. Erbay, "A higher-order Boussinesq equation in locally non-linear theory of one-dimensional non-local elasticity," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 74, pp. 97–106, 2009.
- [11] N. Duruk, H.A. Erbay, A. Erkip, "Global existence and blow-up for a class of nonlocal nonlinear Cauchy problems arising in elasticity," *Nonlinearity*, vol. 23, pp. 107–118, 2010.
- [12] N. Duruk, H.A. Erbay, A. Erkip, "Blow-up and global existence for a general class of nonlocal nonlinear coupled wave equations," *Journal of differential equations*, vol. 250, pp.1448-1459, 2011.
- [13] V.I. Petviashvili, "Equation of an extraordinary soliton," *Plasma Physics.*, 2, pp. 469– 472, 1976.
- [14] D.E. Pelinovsky and Y.A. Stepanyants, "Convergence of Petviashvili's iteration method for numerical approximation of stationary solutions of nonlinear wave equations," *SIAM Journal on Numerical Analysis*. Vol. 42, pp. 1110– 1127, 2004.
- [15] M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, "Spectral renormalization method for computing self-organized solutions to nonlinear systems," *Optics Letters*, vol. 30, pp. 2140–2142, 2005.
- [16] G. Fibich, Y. Sivan, M. Weinstein, "Bound states of nonlinear Schrödinger equations with a periodic nonlinear microstructure," *Physica D*, vol. 217, pp. 31–57, 2006.



- [17] T.I. Lakoba, J. Yang, “A generalized Petviashvili iteration method for scalar and vector Hamiltonian equations with arbitrary form of nonlinearity,” *Journal of Computational*, vol. 226, pp. 1668–1692, 2007.
- [18] A. Duran, J. Alvarez, “Petviashvili type methods for traveling wave computations: I. Analysis of convergence,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 266, pp. 29–51, 2014.
- [19] G.M. Muslu, H. Borluk, “Numerical solution for a general class of nonlocal nonlinear wave equations arising in elasticity,” *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 97, no. 12, pp. 1600–1610, 2017.
- [20] A. Duran, “An efficient method to compute solitary wave solutions of fractional Korteweg-de Vries equations,” *International Journal of Computer Mathematics*, vol. 95, pp. 1362–1374, 2018.
- [21] V.A. Dougalis, A. Duran, D. Mitsotakis, “Numerical approximation to Benjamin type equations. Generation and stability of solitary waves,” *Wave Motion*, vol. 85, pp. 34–56, 2019.
- [22] D. Olson, S. Shukla, G. Simpson, D. Spirn, “Petviashvili’s method for the Dirichlet problem,” *Journal of Scientific Computing*, vol. 66, pp. 296–320, 2016.
- [23] Z.H. Musslimani and J. Yang, “Self-trapping of light in a two-dimensional photonic lattice,” *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 21, no. 5, pp. 973–981, 2004.
- [24] I.L. Bogolubsky, “Some examples of inelastic soliton interaction,” *Computer Physics Communications*, vol. 13, pp. 149–155, 1977.
- [25] R.L. Pego, P. Smereka and M.I. Weinstein, “Oscillatory instability of solitary waves in a continuum model of lattice vibrations,” *Nonlinearity*, vol. 8, pp. 921–941, 1995.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Burdur ili Kabakgillerinde Watermelon mosaic virus ve Cucumber mosaic virus'unun Belirlenmesi

 Handan ÇULAL KILIÇ^{a,*},  Ahmet KAHRAMAN^a

^a Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Isparta, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: handankilic@isparta.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1283096

Öz

Burdur ili kabakgil üretim alanlarında 2021 yılında gerçekleştirilen sörvey çalışmalarında Watermelon mosaic virus (WMV) ve Cucumber mosaic virus (CMV)'nü saptamak amacıyla 92 kabakgil yaprak örneği toplanmıştır. Sürveyler sırasında bitkilerde mozayik, kıvrıcıklaşma, deformasyon, nekroz ve sararma belirtileri gözlemlenmiştir. Örnekler WMV ve CMV'ye spesifik antikorlar kullanılarak DAS-ELISA (Double antibody sandwich enzyme linked immunosorbent assay) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. DAS-ELISA testi sonucunda alınan 92 adet yaprak örneğinin 13'ünde (%14.13) WMV, 15'inde (%16.30) CMV enfeksiyonu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kabakgiller, virüs, WMV, CMV, DAS-ELISA

Detection of Watermelon Mosaic Virus-2 and Cucumber Mosaic Virus in Cucurbits in Burdur Province

ABSTRACT

In order to determine of Watermelon mosaic virus (WMV) and Cucumber mosaic virus (CMV) in cucurbit growing areas in Burdur province, totally 92 cucurbit leaf samples were collected in 2021. It was observed that the virus symptoms in plants were mosaic, curling, deformations, necrosis and chlorosis in leaves during surveys. The samples were tested by DAS-ELISA (Double antibody sandwich enzyme linked immunosorbent assay) using WMV and CMV specific polyclonal antibodies. As a result of DAS-ELISA test, WMV-2 infection was detected in 13 (14.13%) and CMV infection in 15 (16.30%) of 92 leaf samples.

Keywords: Cucurbits, virus, WMV, CMV, DAS-ELISA

I. GİRİŞ

Sürekli artan dünya nüfusuna paralel olarak tarımsal üretime olan talebinde artması tarımsal arazilerden elde edilecek ürünlerde verim ve kalitenin artmasını kaçınılmaz hale getirmektedir. Türkiye ve dünyada en çok yetiştirilen sebzeler; domates, hıyar, kavun, karpuz ve biberdir [1]. FAO (2022) verilerine göre dünyada en fazla kavun üretimi 13.5 milyon ton ile Çin’de yapılmaktadır. İran ve Türkiye, Çin’den sonra en fazla kavun üretimi yapan ülkelerdir. Ülkemiz karpuz üretiminde üçüncü, kabak üretiminde ise onbirinci sırada yer almaktadır [2].

Cucurbitaceae familyası içerisinde bulunan kabakgil bitkileri yüksek su içeriklerine sahip olmalarından dolayı yaz mevsiminde bolca tüketilen sebzelerdendir. Kavun (*Cucumis melo* L.), hıyar (*C. sativus* L.), kabak (*Cucurbita* sp.) ve karpuz (*Citrullus lanatus* L.) bu familyanın önemli türleridir [3].

Göller bölgesinde yer alan Burdur ilinde 56.644 dekar (da) sebze alanında 196.615 ton sebze üretimi yapılmaktadır. İlde kabakgil üretimi ise yaklaşık 12.735 dekar alanda gerçekleştirilmektedir. Bu alanda 10.591 ton hıyar (sofralık), 83 ton hıyar (turşuluk), 29.314 ton karpuz, 14.556 ton kavun, 1874 ton kabak (sakız) üretimi yapılmaktadır [4].

Kabakgillerde çok sayıda abiyotik ve biyotik faktörler etkili olmaktadır. Bu faktörlerden virüsler kabakgillerde önemli zararlar oluşturmaktadır. Dünyada farklı araştırmacılar tarafından tespit edilen önemli virüs hastalıkları şunlardır: Cucumber mosaic Virus (CMV), Watermelon mosaic virus (WMV), Zucchini yellow mosaic virus (ZYMV), Kabak mozayik virüsü (Squash mosaic virus, (SqMV) ve Papaya ring spot virus (PRSV) bunlardan bazılarıdır [5].

CMV, geniş bir konukçu dizisine sahip olup *Bromoviridae* familyası içerisinde yer almaktadır. Üç ikozahedral partikülden oluşmaktadır. Yaprak bitleri ile non-persistent olarak, mekaniksel olarak ve tohumla taşınabilmektedir [6].

WMV, *Potyviridae* familyası *Potyvirus* cinsine ait bir virüstür. Kıvrımlı iplikçik şeklindedir. Bu virüste mekaniksel ve 29 yaprak biti türü ile taşınmaktadır ve en yaygın türler, *Myzus persicae* (Sulzer) ve *Aphis craccivora* (Koch)’dır [7].

Virüs hastalıkları ile kimyasal mücadele yapılamamaktadır. Sadece kültürel önlemlerle kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Bu sebeple öncelikle virüslerin doğru ve uygun zamanla teşhis edilmesi önem taşımaktadır.

Bu çalışma, Burdur ili kabakgil üretim alanlarında Hıyar mozayik virüsü ve Karpuz mozayik virüsü’nün belirlenmesi amacıyla yürütülmüştür.

II. MATERYAL VE METOD

A. BİTKİ ÖRNEKLERİNİN TOPLANMASI

Burdur ili kabakgil üretim alanlarında CMV ve WMV’nin saptanması amacıyla sörveyler yapılmıştır. Sörveyler sırasında virüs benzeri semptom sergileyen karpuz, kavun, hıyar ve kabak bitkilerinden 92 yaprak örneği alınmıştır (Tablo 1). Alınan örnekler, numaralandırılarak buzdolabı poşetlerine konulmuş ve laboratuvara getirilerek çalışmalarda kullanılmaya kadar -20 °C de muhafaza edilmiştir. Arazi çıkışları 2021 yılı kabakgil üretim döneminde gerçekleştirilmiştir. Toplam 92 kabakgil örneği toplanmıştır (Tablo 1). Arazi çalışmalarında; yapraklarda mozayik, sararma, bitki boyunda kısılma, nekrotik leke oluşumu, damar açılması, kabarcıklanma ve klorotik lezyonlar semptomu sergileyen bitkiler tercih edilmiştir.

Tablo 1. Burdur ilçelerinden alınan kabakgil örnek sayısı

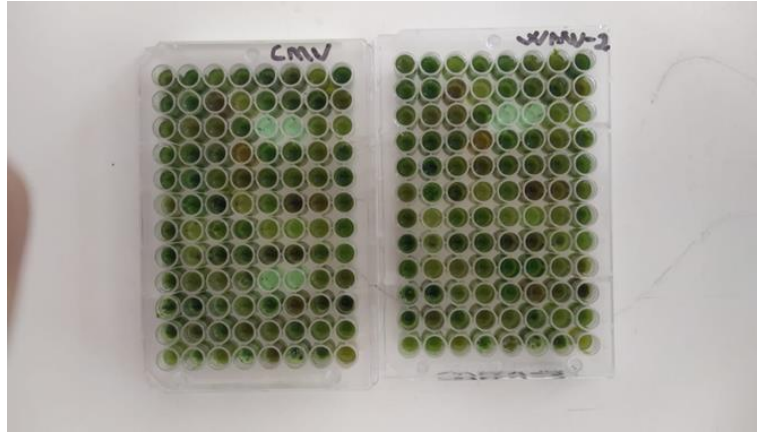
Burdur İlçeleri	Kavun	Karpuz	Kabak	Hıyar	Toplam
Çeltikçi	2	3	20	10	35
Bağsaray	2	-	16	15	33
Bucak	4	-	6	5	15
Ağlasun	2	-	2	5	9
Toplam	10	3	44	35	92

B. SEROLOJİK TEST YÖNTEMİ

Virüslerin teşhisinde DAS-ELISA yöntemi kullanılmıştır. Testleme de CMV ve WMV virüslerine spesifik ELISA kitleri kullanılmıştır. Kitler DSMZ firmasından temin edilmiş ve yöntem, firmanın belirttiği şekilde uygulanmıştır.

Buna göre;

1. ELISA tabaklarının her bir çukurcuğu 1:1000 oranında kaplama tamponu ile seyreltilmiş virüslere özgü antikor ile hazırlanmış tampon çözelti ile kaplanmış ve 37 °C’de 4 saat bekletilmiştir.
2. Yıkamayı takiben ekstraksiyon tampon çözeltisinde örnekler 1:20 oranında ezilerek her bir çukura 200’er µl konulmuş ve buzdolabında tüm gece bekletilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Ekstraksiyon tampon çözeltisinde ezilen örneklerin ELISA tabaklarına eklenmiş hali.

3. Yıkama işlemi tekrarlanmıştır.
4. Konjugat buffer ve konjugatlar sulandırılarak her bir çukura ilave edilmiş ve 37 °C’de tekrar bekletilmiştir.
5. İnkubasyondan sonra tekrar tüm çukurlar yıkama tamponu ile yıkanmıştır.
6. Substrat tamponu ile hazırlanmış olan substrat her bir çukura ilave edilmiş ve oda sıcaklığında bekletilerek renk değişimi gözlenmiştir.

Sonuçlar 405 nm dalga boyunda okunmuştur. Kontrol bitkisinin absorbans değerlerine göre kontrol değerinin en az iki katı okuma değeri veren örnekler pozitif olarak kabul edilmiştir [8].

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Burdur ili kabakgil alanlarında yapılan srveylerde, yapraklarda mozayik, sararma, kabarcıklanma, damar açılması, nekrotik lekeler ve bitkide gelişme geriliği, bitki boyunda kısıalma, deformasyon, gözlemlenmiştir (şekil 2,3,4). Çalışmada srvey alanlarında gözlemlenen belirtiler farklı araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir [9], [10].



şekil 2. Karpuz bitkisinde mozayik, deformasyon belirtileri



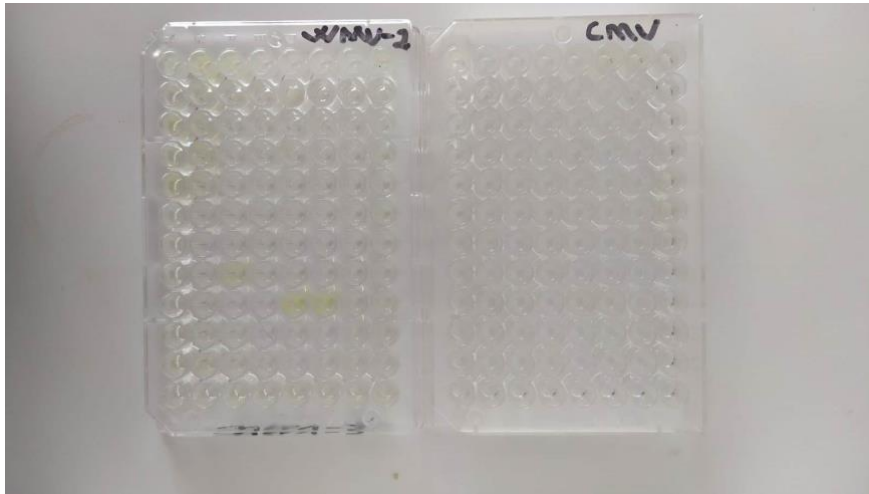
şekil 3. Kabak bitkisinin yapraklarında deformasyon ve bitki boyunda kısıalma



Şekil 4. Hıyar bitkisinde mozayik, deformasyon ve kabarcıklanma symptomu

Çalışma kapsamında Burdur iline bağlı Çeltikçi, Bağsaray, Bucak ve Ağlasun ilçeleri kabakgil üretim alanlarından toplanan yaprak örnekleri CMV ve WMV antiserumları ile DAS-ELISA testine tabi tutulmuştur (Şekil 5).

DAS-ELISA testi sonuçlarına göre; toplanan 92 kabakgil örneğinin 15' i CMV, 13'ü ise WMV ile enfekteli bulunmuştur. Örneklerin hiçbirinde karışık enfeksiyona rastlanmamıştır.



Şekil 5. ELISA tabaklarında CMV ve WMV'nin oluşturduğu reaksiyonlar

ELISA testlerinin sonucunda test edilen örneklerin; %16.30'unun CMV, %14.13'ünün WMV ile enfekteli olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Toplanan kabakgil örneklerinde virüslerin bulunma durumu

Bitki	Örnek sayısı	CMV	% Hastalık	WMV	% Hastalık
Hıyar	35	4	11.42	6	17.14
Kabak	44	10	22.72	6	13.63
Kavun	10	1	10	1	10
Karpuz	3	-	-	-	-
Toplam	92	15	16.30	13	14.13

Burdur iline bağlı farklı ilçelerden toplanan 35 hıyar örneğinin 10 adedinde virüs enfeksiyonu tespit edilmiştir. Toplanan örneklerde CMV enfeksiyon oranı %11.42 olarak belirlenirken, WMV %17.14 olarak belirlenmiştir.

Kabak bitkisinde ise; test edilen örnek sayısı 44 iken, enfekteli örnek sayısı 16 dır. Kabak bitkisinde CMV enfeksiyon oranı %22.72, WMV enfeksiyon oranı %13.63'dür.

Kavun alanlarından alınan 10 örneğin 2 adedinde virüs tespit edilmiş ve yöredeki enfeksiyon oranı %20 olarak belirlenmiştir. Kavun alanlarında örneklerin %10'u CMV, %10'u ise WMV ile enfekteli olduğu belirlenmiştir. Karpuz alanlarından alınan örneklerde ise tekli veya karışık herhangi bir enfeksiyona rastlanmamıştır.

Ülkemizin farklı bölgelerinde kabakgil üretim alanlarında bu iki virüsün varlığı farklı yöntemlerle araştırılmıştır [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

Şevik ve Sökmen [9] Samsun ilinde yaptıkları çalışmada, CMV, ZYMV ve WMV'nin kabakgillerde oldukça yaygın virüsler olduğunu belirtirken; Kızmaz vd. [15], Diyarbakır ve Mardin ili örneklerinde de WMV ve CMV'nin en yaygın virüsler olduğunu ifade etmişlerdir.

Eskişehir ili kabakgil üretim alanlarında virüslerin belirlenmesinde DAS-ELISA yöntemi kullanılmış ve WMV enfeksiyon oranı %44.87 olarak tespit edilirken CMV bizim çalışmamıza benzer olarak %17.30 olarak tespit edilmiştir [19].

Kastamonu'da yapılan çalışmada; test edilen örneklerde virüslerin bulunma oranlarının, WMV için %36.63, CMV için %3,96 olduğu bildirilmektedir [8]. İzmir, Aydın, Manisa ve Balıkesir illeri kabakgil alanlarında en yaygın virüsün WMV ve CMV olduğu yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur [21].

Daha önce aynı bölgede yapılan çalışmalarda ise Topkaya [22] Burdur ili kabakgil üretim alanlarında 5 örnekten 2 adedinde ZYMV, 2 adedinde ise WMV tespit etmiştir. Çulal-Kılıç vd [23] aynı bölgede yaptıkları farklı bir çalışmada da 94 kabakgil örneğinin % 9.5'unun ZYMV ile bulaşık olduğunu tespit etmişlerdir.

Burdur ilindeki kabakgil üretim alanlarında CMV'nin varlığı ilk olarak yapılan bu çalışma ile tespit edilmiştir.

Burdur ili ve ilçelerindeki kabakgil üretim alanlarında CMV ve WMV'nin tanınması ile ilgili yapılan arazi çalışmalarında virüs benzeri semptom sergileyen yaprak örnekleri toplanmış ve bu örnekler serolojik çalışmalarda kullanılmıştır. Bu semptomlu örneklerin CMV ve WMV ile bulaşık olmaması ve negatif sonuç vermesi, farklı virüslerinde bu örneklerde bulunabileceği ihtimalini uyandırmaktadır. Bu bakımdan daha sonraki çalışmalarda örnek sayısı artırılarak farklı viral etmenlerin varlığını tespit etmeye yönelik çalışmaların yapılması planlanmaktadır.

IV. SONUC

Virüs hastalıklarıyla mücadelede izlenecek programları belirlemeden önce virüslerin tanılanması gerekmektedir. Kabakgil yetiştiriciliğini sınırlayan ve etkin mücadele yöntemi bulunmayan CMV ve WMV'nin, Burdur ili kabakgil üretim alanlarında tanılanması amacıyla yürütülen bu çalışma daha sonra yapılacak olan çeşitli çalışmalara basamak oluşturacaktır. Ayrıca bu çalışma ile bölgede bulunan üreticiler bilgilendirilerek, hastalıkların oluşturduğu zararın minimuma indirilmesinde katkı sağlayacaktır.

Bundan sonra bölgede varlığı tespit edilen CMV ve WMV'nin karakterize edilmesi ve ırklarının ortaya konularak aralarındaki farklılıkların saptanması ile ilgili çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Kültür bitkilerini virüs hastalıklarından korumada etkili bir strateji olan dayanıklılık çalışmalarına ağırlık verilmelidir.

Ayrıca bu virüslerin kontrol altına alınabilmesi için vektörü olan yaprak bitleri ile mücadele edilmesi, bölgedeki populasyon durumlarının belirlenmesi ve virüse ara konukçuluk yapan yabancı otların yok edilmesi gerekmektedir. Böylece kimyasal mücadelesi yapılamayan ve çok sayıda kültür bitkisinde zararlı olan CMV ve WMV'nin kontrol altına alınması söz konusu olacaktır.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Engindeniz, "Türkiye'de sebze üretimi ve gelecek için bazı öneriler," *MPM Verimlilik Dergisi*, s. 2 ss. 99-117, 2009.
- [2] FAO, [Online] Available: <https://www.fao.org/faosta/en>, 2022.
- [3] A. Günay, "Özel sebze yetiştiriciliği," *Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi*, 117, 1993.
- [4] TÜİK, [Online] Available: <https://biruni.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul>, 2021.
- [5] H. Lecoq and C. Desbiez, "Viruses of cucurbit crops in the Mediterranean region: an ever changing picture," *Advances in Virus Research*, vol. 84, pp. 67-126, 2012.
- [6] M. Jacquemond, "Cucumber mosaic virus," *Advances in Virus Research*, vol. 84, pp. 439-504, 2012.
- [7] M.A. Kamberoğlu, C. Desbiez and A.F. Çalışkan, "Characterization of an emerging isolate of watermelon mosaic virus in Turkey," *International Journal of Agriculture Biology*, vol. 17, pp. 211-215, 2015.
- [8] Ş. Topkaya, "Kastamonu ili ve çevresinde kabakgil yetiştirilen alanlarda enfeksiyon oluşturan viral etmenlerin saptanması," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, vol. 9, no.1, ss. 65-72, 2020.
- [9] M. Şevik and M. Arlı-Sökmen, "Viruses infecting cucurbits in Samsun, Turkey," *Plant Disease*, vol. 87, no. 4, pp. 341-344, 2003.
- [10] S. Yeşil and Ertunç, F. "Virus diseases of cucurbits in Konya province," *Proceedings of the Xth EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*, 2012, pp. 791-796.



- [11] M. A. Şevik ve M.A. Sökmen, “Samsun ilinde kabakgil bitkilerinde görülen virüs hastalıkları,” *IX. Türkiye Fitopatoloji Kongresi*, Tekirdağ, Türkiye, 2001, ss. 180-189.
- [12] M. Özasan, T. Aytekin, B. Bas, I. H., Kılıç, I.D. Afacan and S. Dağ, “Virus diseases of cucurbits in Gaziantep- Turkey,” *Plant Pathology Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 24-27, 2006.
- [13] A. Karamanlı, “Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC)’ nde kabakgil yetiştirilen alanlarda Hıyar mozaik virüsü (Cucumber Mosaic Virus, CMV) ve Kabak Sarı Mozaik Virüsü (Zucchini Yellow Mosaic Virus, ZYMV)’nün surveyi,” Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Adana, Türkiye, 2007.
- [14] N. Yardımcı and H. Özgönen, “First report of Cucurbit Aphid-Borne Yellows Virus in Turkey,” *Australasian Plant Disease Notes*, vol. 2, p. 59, 2007.
- [15] M., Kızmaz, Z.A. Sağır ve S. Baloğlu, “Diyarbakır ve Mardin illeri kabakgil üretim alanlarında görülen viral hastalıkların yaygınlıklarının ve etmenlerinin belirlenmesi,” *Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, vol. 53, no. 4, ss. 397-406, 2016.
- [16] A. Çat, N. Yardımcı ve H. Çulal- Kılıç, “Antalya İli ve İlçelerindeki örtüaltı hıyar (*Cucumis sativus* L.) ve kabak (*Cucurbita pepo* L.) üretim alanlarında viral etmenlerin saptanması,” *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 1, ss. 129-132, 2016.
- [17] S. Topkaya, C. Desbiez and F. Ertunç, “Presence of cucurbit viruses in Ankara and Antalya province and molecular characterization of coat protein gene of *Zucchini yellow mosaic virus* Turkish isolates,” *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 28, no. 4, pp. 2442-2449, 2019.
- [18] M. Usta, Güller, A. and Günay, A. “The molecular characterization of the coat protein sequence and differentiation of CMV- subgroup I on tobacco from native flora in Turkey,” *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, vol. 48, no. 2, pp. 523-534, 2020.
- [19] M. Karabıyık ve S. Yeşil, “Eskişehir ili kabakgil ekim alanlarında görülen virüs hastalıklarının belirlenmesi,” *Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Dergisi*, vol. 58, no. 4, 591-600, 2021.
- [20] A.Karanfil ve S. Korkmaz, “Güney Marmara Bölgesi kabakgil üretim alanlarında cucumber mosaic virus enfeksiyonunun tespiti ve kılıf protein gen diziliminin filogenetik analizi,” *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, vol.58, no. 2, 239-246, 2021.
- [21] A. Kaya and Erkan, S, “İzmir, Aydın, Manisa ve Balıkesir illerinde üretilen kabakgillerdeki viral etmenlerin tanılanması ve yaygınlıklarının belirlenmesi,” *Bitki Koruma Bülteni*, vol. 51, no. 4, 387-405, 2011.
- [22] Ş. Topkaya, “Kabak sarı mozaik virüsü izolatlarının kodladığı genlerin diziliminin belirlenmesi ve moleküler karakterizasyonu,” Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, 2015.
- [23] H. Çulal-Kılıç, K. Doğan N. Yardımcı and L. Isparta, “Detection of Zucchini yellow mosaic virus from cucurbits in Burdur province Turkey,” *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 4, 4510-4512, 2016.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Kocaeli Körfez Geçiş Köprüsü Kuzey Ankraj Derin Kaya Temeli Geçici Susuzlaştırma Problemleri ve Çözüm Yöntemleri

 Mehmet İNCE ^{a,*}  Hasan TAŞAN ^b

^a Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mehmetince18966@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1258379

ÖZ

İnceleme sahası Osmangazi Köprüsü Dilovası tarafındaki kuzey ankraj temel kazı çukuru alanıdır. Kuzey ankraj bloğu ana kayaç olarak dolomitik kireçtaşı üzerine oturmaktadır. Proje tasarım aşamasında ankraj kazısı nihai kotunda (-19,00 m) karşılaşılabilecek yeraltısuyu miktarı 400 m³/gün (yaklaşık 17 m³/saat) olarak hesaplanmıştır. Kuzey Ankraj kazı çukuru susuzlaştırma çalışması jet grout yöntemiyle yapılmasına karar verilmiştir. Proje inşaat aşamasında planlı jet grout çalışmalarının tamamlanmasına paralel kuzey ankrajda kazı çalışmalarına başlanmış fakat kazının ilk metrelerinde kazı alanına giren yeraltısuyu debisi 183 m³/saat olarak kaydedilmiştir. Kazı kotu -7,00 m seviyelerine ulaştığında su debisi yaklaşık 2100 m³/saat'e ulaşmıştır. Karşılaşılan problemin kuzey ankraj inşaat programını dolayısı ile proje genel iş programını en az etkilemesi için sahada art arda etkin ve hızlı sonuç alınabilecek alternatif susuzlaştırma metodlarının denemeleri yapılmıştır. Çimento enjeksiyonu ve tespit edilen karstik boşluklara beton atılması metodlarıyla temel inşaatına izin verebilir şekilde susuzlaştırma sağlanmıştır. Susuzlaştırma probleminin çözümüne yönelik alternatif metod denemeleri ve ilave susuzlaştırma çalışmaları bütçeye ciddi ilave maliyet getirmiştir. Bu vaka çalışmasıyla benzer jeolojik ortamlarda karşılaşılabilecek temel kazılarında susuzlaştırma problemleri ve alternatif, daha etkin sonuçlar elde edilebilecek susuzlaştırma yöntemleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ankraj, Debi, Karstik Boşluk, Enjeksiyon, Susuzlaştırma, Jet Grout

Kocaeli Bay Crossing Bridge North Anchorage Deep Rock Foundation Temporary Dewatering Problems and Solution Methods

ABSTRACT

The study area is the north anchorage foundation excavation pit on the Dilovası side of Osmangazi Bridge. The northern anchor block rests on dolomitic limestone as the main rock. During the project design phase, the groundwater quantity to be encountered at the final excavation level (-19,00 m) was estimated to be 400 m³/day (approximately 17 m³/hour). It was decided to carry out the dewatering of the north anchor excavation pit using the jet grout method. In parallel with the completion of the planned jet grout works during the construction phase of the project, excavation works were started in the north anchorage, but the groundwater inflow into the excavation area in the first meters of the excavation was recorded as 183 m³/hour. As the excavation reached the levels of -7,00 m, the water flow rate reached approximately 2100 m³/hour. In order to minimize the impact of the encountered problem on the construction schedule of the northern anchor and thus the overall project schedule, alternative dewatering methods were tested in the field, one after the other, that could provide effective and fast results. With the methods of cement injection and concrete pouring into the determined karstic cavities, dewatering has been achieved at a level that allows the construction of the foundation. The alternative method trials for solving the dewatering problem and additional dewatering works resulted in a significant additional cost to the budget. With this case study, dewatering problems in foundation excavations that may be encountered in similar geological environments and alternative, more effective dewatering methods have been revealed.

Keywords: Anchorage, Permeability, Karst Void, Injection, Dewatering, Jet Grout

I. GİRİŞ

Bu çalışma, İzmit Körfez Geçişi Köprüsü'ndeki kuzey ankraj uygulamalarında derin kaya temelinde ortaya çıkan geçici susuzlaştırma problemlerini ve çözüm yöntemlerini sunmaktadır. İzmit Körfez geçiş köprüsü kuzey ankrajda nihai kazı kotunda beklenen yeraltı suyu debisi $400 \text{ m}^3/\text{gün}$ ($17 \text{ m}^3/\text{saat}$) (TAR, 2013) olarak hesaplanmıştır [13]. Ancak kazının ilerleyen derinliklerinde (yaklaşık 11 metre, -7 m seviyeleri) yeraltı suyu debisi $2100 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'e kadar yükselmiştir. Yeraltı suyu debisinin hesaplanandan yüksek olması, başlangıçta tasarlanan ve sahada uygulanan susuzlaştırma yönteminin yeterli verimi sağlayamaması nedeniyle ilave yöntemlere başvurulmasını gerektirmiştir. Kazı çalışmasının ilave susuzlaştırma çalışmalarıyla eşzamanlı olarak devam etmesi, kazı şevlerindeki güvenlik risklerini en aza indirmek için püskürtme betonu ve kaya bulunu uygulamaları yapılmıştır. İnklinometre ve sörvey noktaları ölçümleriyle şev hareketleri izlenmiştir.

Ankraj çukurunun denize çok yakın olması nedeniyle kazı derinleştikçe su gelişinin arttığı tespit edilmiş ve bunun üzerine yeni bir zemin araştırması yapılmıştır. Uzman yorumlarına göre ilk raporda öngörülen su girişinin dört katı kadar su girişi olabileceği sonucuyla karşılaşılmıştır. İş programları ve yapım metotları değiştirilmiş ve gereken ek finansman için yeniden onaylar alınmıştır.

Susuzlaştırma, inşaat çalışmalarının kuru ve güvenli bir ortamda gerçekleştirilmesi için yeraltı ve yerüstü suyunun inşaat alanına girişini engelleme veya inşaat sahasından uzaklaştırma amacıyla yapılan çalışmalarını ifade eder. Susuzlaştırma yöntemleri, projenin jeolojik koşullarına bağlı olarak değişebilir. Yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında zeminlerde yeraltı su seviyesinin düşülmesi için pompa sistemleri kullanılması ve kaya ortamlarında ise kazı çukuru çevresine su geçirimsiz perde oluşturulması şeklindedir. Karstik kayaçların olduğu jeolojik ortamlarda hidrojeolojik verilerin gerekli hassasiyette araştırılmasının önemi tartışılmazdır. Güvenli olmayan parametrelere dayalı hesaplamalar, her ölçekte inşaat projesinde zaman ve maliyet kayıplarına yol açabilecek yanıltıcı sonuçlara neden olabilir.

Ford ve Williams (2007) [5] karsttaki yeraltı suyu ve kimyası, çözelti mağaralarının özellikleri, mağaralar ve mineraller konularını çalışmışlardır. Goldscheider ve Drew (2007) [7] karstik akifer sistemlerini incelemek için çeşitli yöntemlerin kullanılabilirliği ve karst hidrojeolojisi alanında çalışan bilim insanları ve öğrencilerin temel bilgilere erişebileceği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Özler (2011) [11] Gebze, Dilovası ve yakın çevresinde yaygın olan karstik kireçtaşlarının yeraltı suyu kaynaklarını araştırmış ve bu bölge için hidrojeoloji haritasını hazırlamıştır. Lombardi ve Deere (1993) [9], kaya kütlelerinin mekanik ve hidrolik özelliklerini çimento karışımları kullanarak iyileştirmek için EYS (Enjeksiyon Yoğunluk Sayısı) kuralını çalışmışlardır. Yıldız (2011) [14] jet grout yöntemleri, makine ve ekipman, imalat parametre hesapları ve kalite kontrol yöntemleri konularında çalışmalar yapmışlardır. Wang, Linb ve Xiaotian (2018) [15] Çin'in Donghai Adası'nda 32.55 m derinliğinde bir dairesel temel kazıda potansiyel sızıntı risklerini belirlemede kullanılan saha deneyleri, sayısal simülasyonlar ve susuzlaştırma çalışmaları bir vaka analizi olarak incelemişlerdir. Bir kazı alanının zemin tabakaları çoklu akiferlerden oluştuğunda hidrojeolojik durum karmaşıktır ve inşaat sırasında karşılaşılabilecek risk artar. Nanjundaswamy (2015) (16) susuzlaştırmanın amacını, hatalı tasarımın potansiyel sonuçlarını, susuzlaştırma tasarımı ve saha uygulama yöntemlerini özetlemektedir. El-Garhy ve Youssef (2007) [17] bu makalede, farklı drenaj sistemleri için yeraltı su seviyesi düşüşünü hesaplamak için kullanılan matematiksel formüller içeren bir bilgisayar programı hakkında bilgi vermektedir. Geliştirilen program, drenaj sistemleri için matematiksel formüller kullanarak el hesabıyla yapılan su seviyesi düşüşü hesaplamalarıyla test edilmiştir. Ayrıca, genellikle farklı drenaj sistemlerini analiz etmek için kullanılan üç analiz yöntemi değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Bu yöntemler matematiksel formül yöntemi, akış ağı yöntemi ve sayısal modelleme yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

Bu vaka çalışması, kuzey ankrajın derin kaya temelinde karşılaşılan susuzlaştırma ve ilişkili problemler, muhtemel nedenleri, çözüme için yapılan metot denemeleri ve etkili sonuçlar elde edilen metot uygulamalarını ortaya koymaktadır. Benzer jeolojik ortamlarda gerçekleştirilecek inşaat projelerinde zaman ve mali kayıpların önlenmesi amacıyla kazanılan deneyimler paylaşılmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

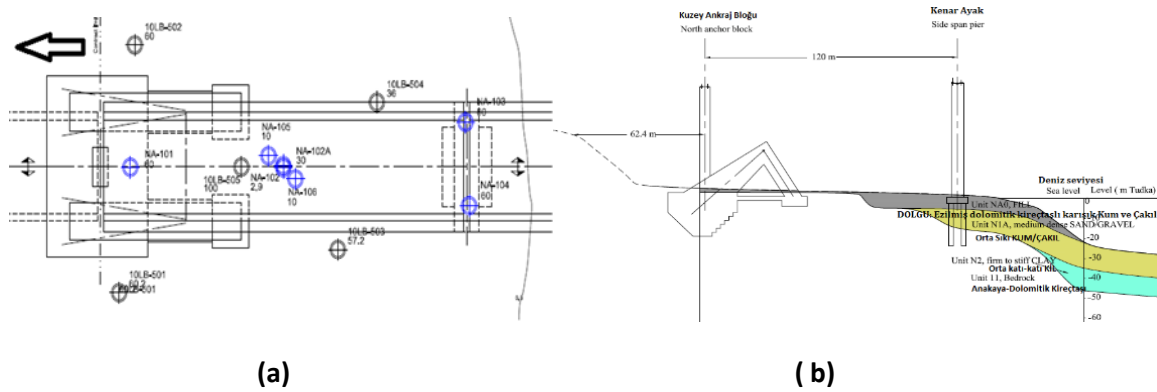
İlk adımda, tasarıma uygun olarak Jet Grout uygulanmış, ancak çok yüksek basınç nedeniyle kaya çatlakları daha da genişlemiştir. Bu yüzden çalışmalar durdurulmuştur. Daha sonra çeşitli yöntemler denemek üzere kimyasallarla enjeksiyonlar, çimento enjeksiyonu, doğrudan beton ve şatkrit gibi farklı metotlar uygulanmıştır. Ancak bu yöntemlerden tam sonuç alınamayınca Paker Enjeksiyonu çalışması ile önce tek sıra, ardından 2 ve 3 sıra ile sızdırmazlık perdesi yapılmıştır. Ayrıca büyük karstik boşluklar betonla doldurulmuştur. Çok ince sızıntılar ise şatkrit ile engellenmiştir

Çalışma alanı İzmit Körfez Geçişi Köprüsü'nün Dilovası tarafında yer alan "Kuzey Ankraj" inşaat alanıdır. Ankraj temeli Paleozoyik kireçtaşı üzerine otururken daha kuzeyde Tepecik kireçtaşı yer alır. İnceleme alanı Şekil 1'de görülmektedir. İzmit Körfezi, Marmara Denizi'nin doğusunda yer alır ve devamıdır. Kuzey Anadolu Fayı (KAF) boyunca tektonik hareketlerle şekillendirilmiştir. KAF Avrasya Plakası ile Anadolu Bloğu arasındaki tektonik sınırı oluşturan sağ yanal doğrultu atımlı faydır ve büyük tahribata neden olan büyük depremler üretebilmektedir. Tektonik ve jeomorfolojik özellikler, bölgedeki Kuzey Anadolu Fay Sistemi ile ilişkilidir [1].



Şekil 1. İnceleme alanı.

Kuzey ankraj dolomit kireçtaşı olarak tanımlanan ana kaya üzerindedir. Kuzey ankraj alanı morfolojisinde kil dolgulu sık aralıklı kırıklar ve erime boşlukları gözlemlenmiştir. Ankraj alanı kuzeyindeki Tepecik kireçtaşını (kuzey) Paleozoyik kireçtaşından (güney) ayıran kesme zonları ve aktif olmayan faylarla çok karmaşık bir jeolojiye sahiptir. Ana kaya, kıyıya bakan yüzeylerden güneye dik olarak iner. İnce bir yüzeysel çamur veya kum tabakası birimi tipik olarak özellikle dik yamaçların tabanında deniz tabanını kaplar. Ana kaya kireçtaşı, orta aralıklı süreksizlikler, yarı yatay tabakalar, yüksek güvenli blok mukavemeti, hafif ayrışma ve iyi statik eğim stabilitesi gösterir. Kuzey ankraj bloğu ve kara kuleleri nihai tasarım konumunda genel stabilizeyi etkileyebilecek büyük fay, kesme zonu veya olumsuz bir yapı izlenmemektedir [8]. Ankraj temelini üzerine oturduğu Paleozoyik kireçtaşında kalsit dolgulu bir dizi eklemler/kırıklar olduğu gözlemlenmiştir [6]. Zemin araştırma kuyu lokasyonları ve idealize Kuzey Ankraj alanı stratigrafisi Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2.a) Kuzey ankraj kuyu lokasyon planı [8] b) İdeal kuzey ankraj alanı stratigrafisi (ölçeksiz)

Kuzey ankraj araştırma kuyularına ait bazı permeabilite test sonuçları Tablo 1’de görülmektedir. Kazı çukuru çevresinde geçirimsiz perde oluşturma amaçlı jet grout, ilk tasarım susuzlaştırma yöntemi olarak uygulanmıştır. Alandaki kazı çalışmalarının ilk metrelerinde bu uygulamadan gerekli verimin alınmadığının anlaşılmasıyla beraber karşılaşılan susuzlaştırma probleminin çözümüne yönelik ilave metotlar devreye sokulmuştur. Susuzlaştırma kapsamında uygulanan bu metotlar “Saha Uygulamaları” başlığı altında detaylı olarak açıklanmıştır.

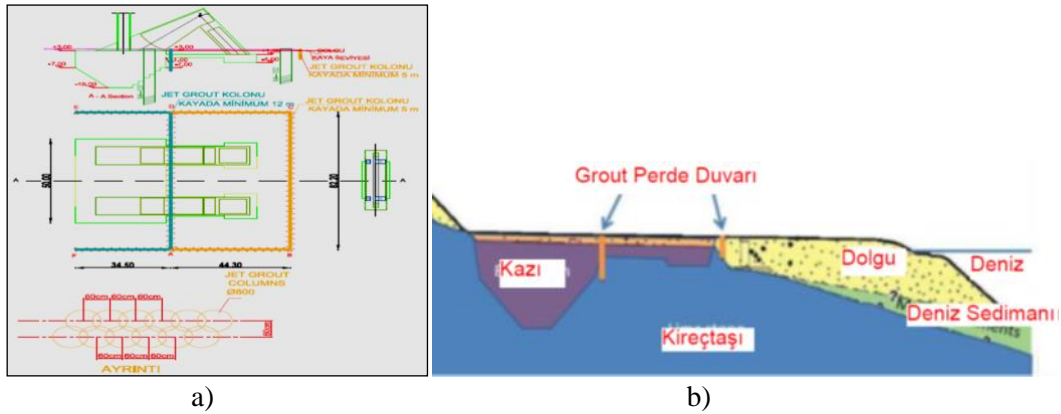
Tablo 1. Permeabilite deneyi ölçüm değerleri [10]

Araştırma Kuyusu	Yeraltı Su Seviyesi(m)	Derinlik Aralıkları(m)	Permeabilite k(m/s)	Tarih	Kaya
NA-101	3.9	13.5-16.5	2.28E-06	18/08/2011	Kireçtaşı
		16.5-19.5	7.45E-07	18/08/2011	
		19.5-22.5	8.63E-07	7/8/2011	
		22.5-25.5	5.27E-07	7/8/2011	
		25.5-28.5	2.27E-06	7/8/2011	
		28.5-31.5	7.72E-07	6/8/2011	
		31.5-34.5	6.65E-07	6/8/2011	
NA-102a	3.7	6.5-9.5	3.88E-08	15/08/2011	

III.SAHA UYGULAMLARI

A. Jet Grout Metodu (İlk Tasarım ve Uygulanan Metot)

Etki çapları 80 cm olan merkezden merkeze 60 cm olan 2 sıra kesişen kolonlar (kaya içinde kolon oluşturulması mümkün değildir, kolon ifadesi, sadece etki çapının ifadesi olarak kullanılmaktadır) ile kazı çukuru çevresinde su geçirimsiz perde oluşturulması tasarlanmıştır. Kolon derinlikleri, ankrajın temel kazı derinliği -1,00 m olan güney kısmında zemin artı 5 m, -19,00 m olan kuzey kısmında ise zemin artı 12 m olarak uygulanmıştır. Jet grout hatları ve derinlikleri gösterir plan Şekil 3’te verilmektedir. En uygun jet grout parametresinin belirlenmesi için sahada deneme enjeksiyonları yapılmıştır. Çimento olarak CEM II A 42,5 kullanılmıştır. Jet grout hattı üzerinde iki farklı alanda 3 farklı parametre ile 21 adet jet grout uygulaması yapılmıştır. Deneme jet grout uygulaması sonrası zemin kısımlarda kolon çap kontrolleri, kaya ortamında ise enjeksiyon şerbetinin kırıklara nüfuzu gözlemek için seçilen deneme kolonlarının merkezinden karotlu sondaj yöntemi ile örnekler alınmıştır. Saha kalite kontrolleri sonucu nozul çapı 2.4 mm, basınç 450 bar, çekme hızı 40 cm/dakika, tij dönüş hızı 25 rpm olan deneme parametresi uygulama parametresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. a) Kuzey ankraj bölgesinde jet grout planı [4] b) Jet grout perde duvarı görünümü

Jet grout uygulamalarının tamamlanması sonrası ve kazı derinliği yaklaşık 3,00 m seviyelerinde yeraltısuyu su debisi ölçümü yapılmıştır. Drenaj pompaları aktif haldeyken kazı taban alanı sörvey okumaları alınmış ve yeraltısuyunun statik su seviyesine (+0,62 m) kadar yükselmesine izin verilmiştir. Statik seviyede zamana karşı kazı çukuruna dolan su miktarı 183 m³/saat olarak hesaplanmıştır. Yeraltısuyu debi hesabı çalışmasından bir görüntü Şekil 4’te görülmektedir.



Şekil 4. Kazı alanına giren yeraltısuyu debisinin ölçümü

Alternatif susuzlaştırma yöntem denemeleri esnasında kazı çukuruna atılan dalgıç pompalarla geçici susuzlaştırma yapılarak kazı çalışmalarına devam edilmiştir. Yatay drenaj hattında 700 mm ve 500 çelik borular kullanılmıştır. Kazı çukurundaki dalgıç pompalar yatay tahliye hattına bağlanmıştır. Su, iki çökertme havuzundan geçtikten sonra denize deşarj edilmektedir. Çökertme havuzundan alınan su numunelerinin sonuçları ilgili devlet kurumuna iletilmiştir. Yatay drenaj hattı ve kazı alanından bir görüntü Şekil 5’te görülmektedir.

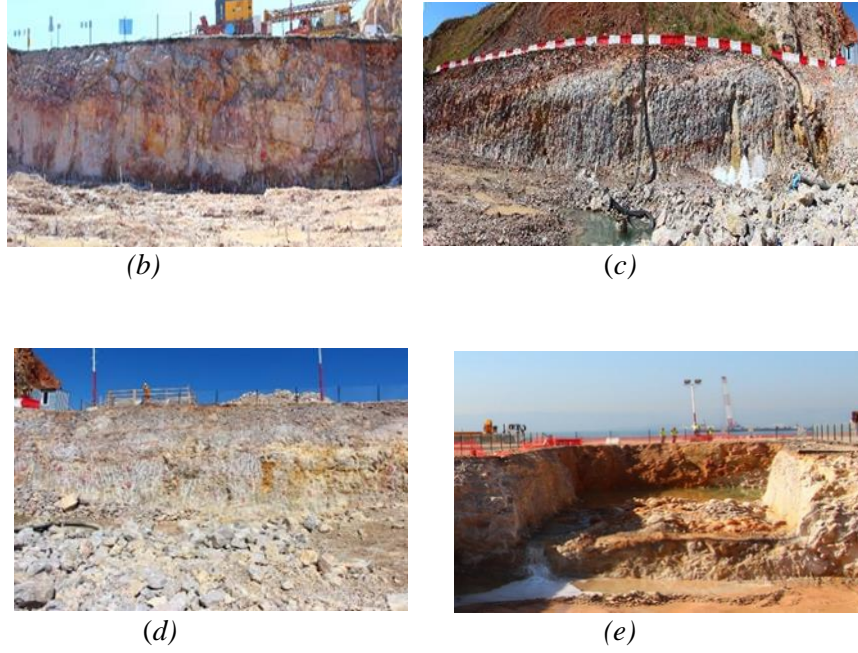


Şekil 5. a) Ankraj çevresi yatay drenaj hattı b) Kullanılan drenaj pompalarından birine ait görüntü c) Yatay drenaj hattı planı

Kazı derinliği yaklaşık 4,00 m seviyesindeyken kazı şevleri üzerinden kayaç durumlarının görülmesi amaçlı çekilen fotoğraflar Şekil 6. a), b), c), d) ve e) de görülmektedir.



(a)



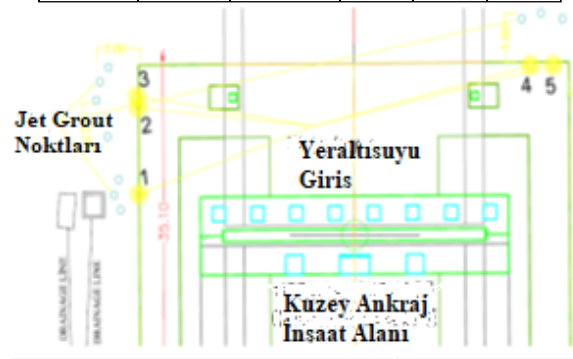
Şekil 6. (a) Kuzey ankray kazı şev yönleri (b) Batı şev kesiti (c) Kuzey şev kesiti (d) Doğu şev kesiti (e) Güney şev kesiti

B. Jet Grout Metot

Kuzey ankray kuzey batı ve kuzey doğu köşelerindeki ana su giriş noktalarının 3,00 m gerisinden, 2,00-5,00 m aralıklı, 102 mm çaplı, derinliği 17 metre olan 8 adet kuyu açılmıştır. Jet grout planı Şekil 7’de verilmiştir. Sondaj sıvısına katılan boya, sondaj noktasına yakın kazı alanına giren kaynak noktalarında gözlenmiştir. Su + çimento, su + çimento + bentonit ve su + çimento + kum olmak üzere 3 farklı deneme karışımı kullanılmıştır. Denemelerde kullanılan toplam çimento ve bentonit miktarları Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Her bir kuyuda kullanılan çimento ve bentonit miktarları

Kuyu No	Tarih	Çimento (Kg)	Bentonit (Kg)	Taze Grout Sıcaklığı (C°)	Taze Grout Yoğunluğu
1	04.05.2013	9700	475	26,2	1,51
2	06.05.2013	3150	-	27,4	1,62
3	07.05.2013	2400	400	26,5	1,65
4	08.05.2013	5250	250	27,1	1,61
5	08.05.2013	4100	200	27,2	1,61
6	08.05.2013	1400	100	27,4	1,62
7	09.05.2013	2725	75	27,1	1,64
8	08.05.2013	1550	-	27,4	1,61
6 (2. Trial)	09.05.2013	2400	50	27,3	1,63
3 (2. Trial)	10.05.2013	50	50	25,8	1,3
4 (2. Trial)	10.05.2013	50	50	25,8	1,3
Toplam Miktar		32775	1650		



Şekil 7. Yüksek basınçlı jet grout noktaları Aplikasyon planı

C. Kimyasal Enjeksiyon

Kimyasal enjeksiyonda poliüretan, üreasilikat, akrilik veya koloidal silika esaslı ürünler kullanılmaktadır. Yoğun su akışının olduğu yerlerde diğerlerine göre daha hızlı kürlenme özelliğine sahip oldukları için poliüretan ve üreasilikat bazlı ürünler tercih edilirken, hareket beklenen çatlak ve zeminlerde akrilik bazlı ürünler tercih edilmektedir. Daha özel durumlarda ise suyun nüfuz edebildiği her türlü zemine girebilen koloidal silika bazlı ürünler tercih edilmektedir. Katalizörler ile köpükleşme faktörü, hacimsel olarak 7-25 arasında ayarlanabilmektedir [3]. Üç farklı noktada farklı karışım oranları ve delgi düzeni kullanılarak Paker ile poliüretan enjeksiyon denemesi yapılmıştır (Şekil 8).

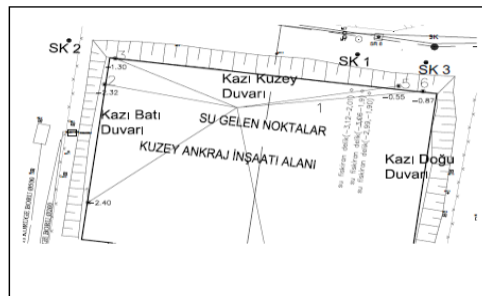


Şekil 8. Poliüretan enjeksiyon uygulaması

Birinci denemede, kazı şevi yüzeyinden 8 m derinlikte kuyu açılmıştır. Paker, kuyu ağzına bağlanmış 600 kg poliüretan ve 60 l katalizör (catalytic) malzeme enjekte edilmiştir. İkinci denemede, kazı şevi yüzeyinden 6 m derinlikte kuyu açılmış 175 kg poliüretan ile 17,5 l katalizör enjekte edilmiştir. Üçüncü denemede ise, şev yüzeyine 15 derece açıyla 2,50 m derinlikte kuyu açılmış 250 kg poliüretan ve 25 l katalizör enjekte edilmiştir.

D. Derin Kuyu Pompaj Sistemi

4 ana kaynak noktasındaki yeraltısuyunun kontrol altına alınması amacıyla, kazı alanı gerisinde bu kaynaklara yakın 3 noktada derin kuyu açılarak dalgıç pompalarla statik su seviyesi kazı kotu altına düşürmesi hedeflenmiştir. Derin kuyular (SK-1, SK-2, SK-3) lokasyon planı Şekil 9'de verilmektedir. Ana su giriş noktalarının gerisinde SK-1, SK-2, SK-3 noktalarında su sondajları yapılmıştır. SK-1 ve SK-2 kuyuları 27,00 m derinliğinde açılmış, SK-3 ise 18,00 m derinliğindedir. Kuyu çapları 254 mm olarak açılmış daha sonra 308 milimetreye genişletilmiştir. Kuyulara 6inçlik pompalar yerleştirilmiştir. Filtreli PVC boru çapı 200 mm olarak seçilmiştir. Sondaj ve pompa yerleştirme çalışmalarının görüntüleri Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 9. Derin kuyular lokasyon planı



Şekil 10. Sondaj ve pompa yerleştirme çalışmaları

SK-1: 12. metreye kadar olan derinlikte yeraltı suyu debisi $10 \text{ m}^3/\text{gün}$, statik su seviyesi 5 m, dinamik su seviyesi 10 m olarak tespit edilmiştir. 3, 15 ve 21 metrelerde kırıklı akiferle karşılaşmıştır. Kritik debi 25 l/s olarak bulunmuştur. 6 inçlik dalgıç pompa 20. metreye yerleştirilmiştir.

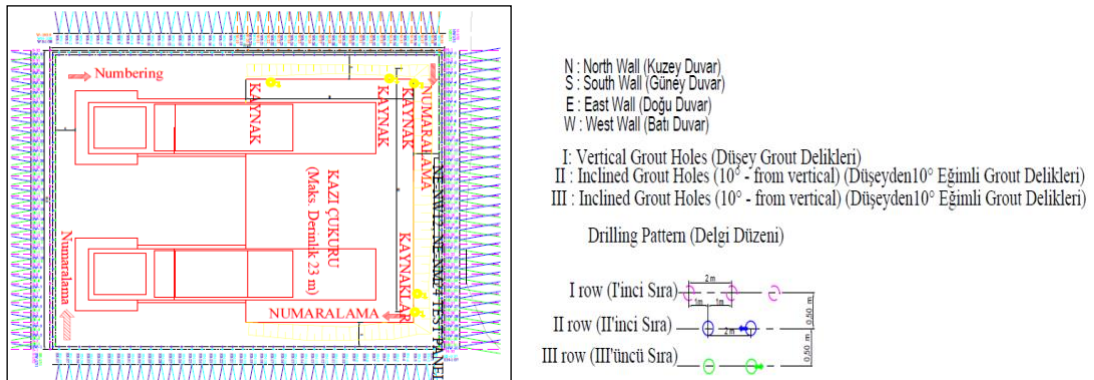
SK-2: 200 mm çaplı filtreli/kapalı borular 26. metreye kadar yerleştirilmiştir. Statik su seviyesi 5 m ve dinamik su seviyesi 10 m olarak tespit edilmiştir. 3, 15 ve 21 metrelerde kırıklı akiferle karşılaşmış, kritik debi 25 l/s olarak bulunmuştur. 21. metrede su debisi $85 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak gözlenmiştir. 6 inçlik dalgıç pompa 25. metreye yerleştirilmiştir.

SK-3: 225 mm çaplı filtreli/kapalı borular 15. metreye kadar yerleştirilmiştir. Statik su seviyesi 5 m ve dinamik su seviyesi 10 m olarak tespit edilmiştir. 5, 9 ve 12 metrelerde kırıklı akiferle karşılaşmış, debi 75 l/s olarak rapor edilmiştir. Bu denemeler devam ederken yeraltı suyu debisi $1.030 \text{ m}^3/\text{saat}$ seviyesine yükselmiştir.

E. Çimento Enjeksiyonları

Çimento enjeksiyonu, çimentonun belirli oranda suyla karıştırılarak elde edilen sıvının, zemin türüne ve uygulama metoduna göre, zemin veya kaya içerisine enjekte edilmesidir. Uygulanacak zemin türüne göre karışım oranını belirlemek ve uygulama metodunu tayin etmek esastır. Enjeksiyon yapılan yerde geçirimli özellikteki birimlerin, bu birimlerin altındaki geçirimsiz birimlere perde enjeksiyonu ile bağlamak en çok istenen durumdur. Geçirimsiz birimlerin çok derinde olması durumunda, enjeksiyon perdesi askıda kalacak şekilde oluşturulur ve su kaçaklarının etkisini azaltması için sızma boyu uzatılmış olur. Enjeksiyon delikleri ve sonrasında enjeksiyonların yapılma sistemi “ano” olarak adlandırılır ve belirli aralıklarla yapılır. Bir anonun delgi ve enjeksiyonu tamamlandığında diğer anoya geçilir. Ano uzunluğu yatayda 6-12-24 metre, kuyu aralıkları 1.5 – 3 metre alınabilir. Ano uzunluğunun ve delik aralıklarına karar vermek için enjeksiyon yapılacak alanın genel özelliklerini (kırık – çatlak, boşluk durumlarını vb.) küçük ölçüde yansıtan bir yer seçilerek deneme enjeksiyonları yapılır [12].

Enjeksiyon perdesi, güney ve kuzey duvarlarda 3 sıra batı duvarda 2-3 sıra ve doğu duvarda 2 sıra olarak uygulanmıştır. Kazıya yakın olan II. ve III. sıralar kazı şev çizgisinden 5.0-4.0 metre mesafede 10 derece eğimli olarak çapraz delgi düzeniyle delinmiştir. En dıştaki düşey I. sırası ise bu 2 sıraya şaşırtmalı şekilde delinmiştir. Sıralar arası 0.50 metre, delikler arası mesafe ise 2.00 metredir. Eğimli deliklerin derinliği 28.50 metre iken, düşey deliklerin derinliği 28.00 metredir. Enjeksiyon delgi pateni ve enjeksiyon planı Şekil 11’de görülmektedir.



Şekil 11. Enjeksiyon planı

6 adet enjeksiyon karışım türü (SF-M1, SF-M2, SF-M3, SF-M4, SF-M4, SF-M5, SF-M6) kullanılmıştır. Bu karışımların ana bileşenleri su, çimento (Cem-II A-M 42,5 R), bentonit, kimyasal katkı (Rheobuilt T1, Meyco SA430) ve kum içermektedir. Her bir karışımın bileşenleri Tablo 3'te verilmiştir. Enjeksiyon limit değerleri Tablo 4'te görülebilir. Enjeksiyon kademeleri 3.0 metre olarak hedeflenmiştir. Enjeksiyon refü basıncı, kademe derinliğine bağlı olarak değişmektedir (Tablo 5).

Tablo 3. Karışım bileşenleri

Lab. No. Karışım No.	Su/Çiment o oranı	Bentonit %	Kum (oran)	Kimyasal Katkı		Yoğunluk (gr/cm3)	Viskozite - Marsh Hunisi			
				Rh. T1 (1)	Myc. (2)		*Prepakt			
							0 dak.	15 dak.	30 dak.	45 dak.
18 SF-M1	0,65	-	-	2	-	1,71	34,4	35	35,2	35,5
20 SF-M2	0,65	-	-	2	1,2	1,69	41	41,5	43	44
21 SF-M3	0,65	0,8	-	2	1,2	1,64	43	43,8	43,9	44
29 SF-M4	0,65	0,8	0,5	1,8	1	1,82	12*	-	15*	-
28 SF-M5	0,65	0,8	0,75	1,8	1	1,86	12*	-	13*	-
25 SF-M6	0,65	1	1	1,8		1,9	12*	-	13*	-

Tablo 4. Her bir karışım için enjeksiyon limit hacimleri

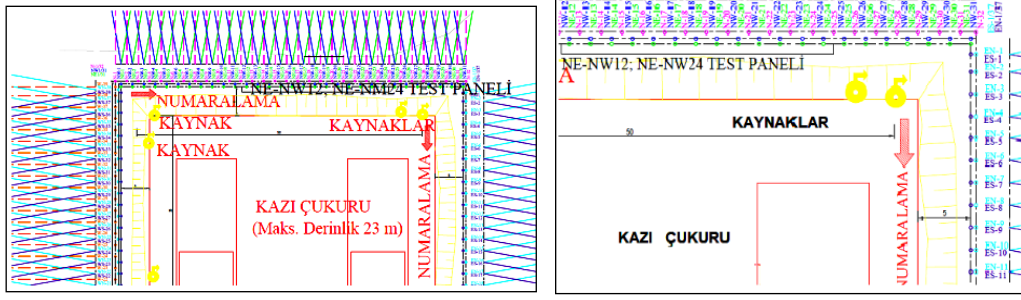
Karışım No.	Limit Hacim(l)	Limit Hacim(l)	Açıklama
		Karstik kanal, boşluk	
SF – M1	3000	-	Basıncı gerekli refü basıncının %50'inden az ise, limit hacim ulaşılmaması sonrası karışımı değiştir
SF – M2	4000	1000	
SF – M3	1000	1000	
SF – M4	5000	4000	
SF – M5	5000	7000	
SF – M6	6000	7000	
Priz Süresi: 8 saat			

Tablo 5. Refü basınçları

Derinlik (m)	Refü Basıncı-PE(Bar)
0,1-1,0	2
1,0-3,0	4
3,0-10,0	10
10,0-28,0 (28,50)	15

Genel olarak enjeksiyona M1 karışımı ile başlatılmıştır. Refü basıncına çıkılamaması durumunda takip eden karışıma geçilmiştir. Basılan enjeksiyon kazı çukurundan çıkması durumunda bir sonraki karışım ile enjeksiyona tekrar başlanmıştır. Bu işlem, refü basıncı elde edilene kadar tekrarlanmıştır.

Enjeksiyon test panel alanı ankrajın kuzey tarafında NE-NW12; NE-NW24 numaralı noktalar arasında seçilmiştir. Enjeksiyon parametreleri, kuyu aralıkları, karışım, penetrasyon ve test alanındaki enjeksiyonun etkinliği gözlenmiştir. Yukarı kademeli enjeksiyon yöntemi kullanılarak test paneli enjeksiyonları tamamlanmıştır. Enjeksiyon test paneli planı Şekil 12'de görülmektedir.

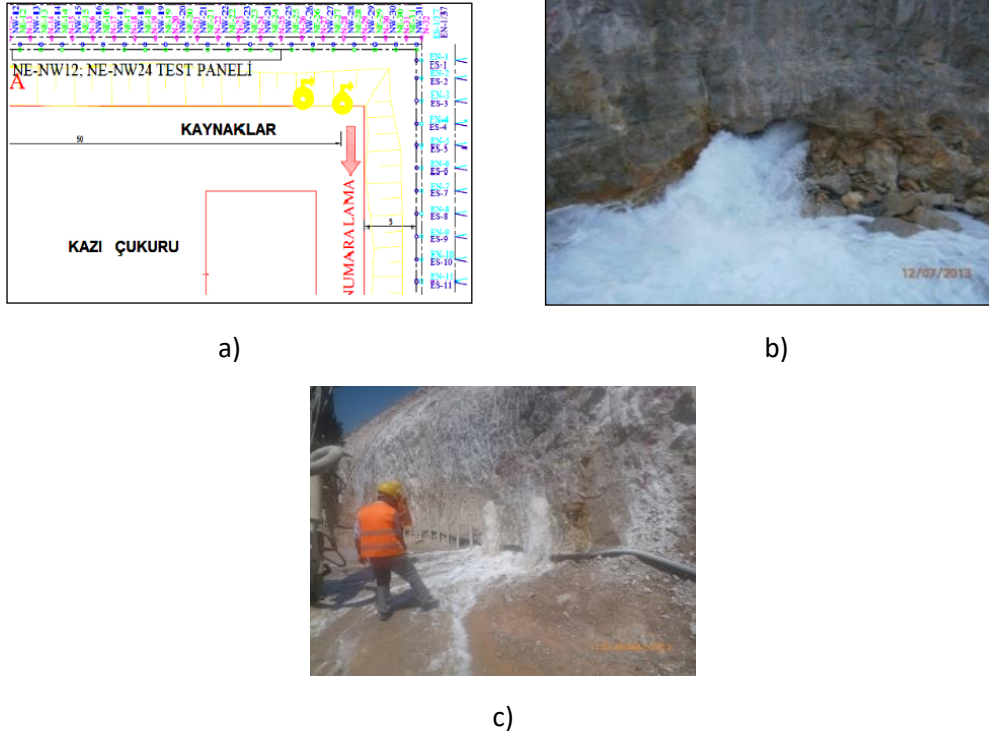


Şekil 12. Enjeksiyon deneme paneli (NE-NW12-NE-NW24)

Test paneli enjeksiyon sonuçları değerlendirmeleri sonrası, deneme enjeksiyon parametreleri kullanılarak normal enjeksiyon çalışmalarına hız verilmiştir.

F. Geniş Çaplı Karstik Boşluklara Beton Atılması

Kuzey ankraj kuzey doğu köşesi -7.00 m (Derinlik 10 m) kotunda büyük çaplı karstik boşluk tespit edilmiştir. Kazı çukuruna giren su debisi yaklaşık 2100 m³/saat olarak belirlenmiştir. Kazı çukuruna giren su miktarının yaklaşık %75'nin bu karstik boşluktan kaynaklandığı hesaplanmıştır. Öncelikli olarak bu karstik boşluğun ıslah edilmesine karar verilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. a) Kuzeydoğu ana yeraltısuyu giriş noktaları planı b) Kuzeydoğu ana yeraltısuyu girişi c) Kuzeydoğu kazı şev dibi patlatma deliğinden yeraltısuyu girişleri

Kuzey doğu köşesindeki enjeksiyon kuyuları (NE-26, NE-28 ve NE-27) 90 mm çapında 6 metre derinliğinde delinmiştir. Karstik boşluk yakalandığı halde, beton mikser oluğu kullanılarak 4 m³ SAP400 betonu dökülebilmştir. Bu kısımda karstik boşluğu daha fazla noktada yakalamak için ek olarak 16 adet kuyu (140 mm çapında ve 12 metre derinlikte) delinmiştir. Kuyular arasındaki mesafe 1 m olarak uygulanmıştır. Kazı çukurundaki su pompaları kapatılarak su seviyesinin yükselmesine izin verilmiştir. SAP400 karışımı beton kullanılmıştır. Karstik boşluğa toplam yaklaşık 40 m³ beton dökülmüştür. Beton dökümü süresince bir dalgıç yardımıyla dökülen betonun kazı çukuruyla irtibatı kontrol edilmiştir. Beton dökümü sırasında betonun kazı çukuruyla irtibatı rapor edilmiştir. 12 saatlik

beton priz bekleme süresi sonunda kazı çukurundaki su drenajı başlatılmıştır. Operasyon sonunda, ana karstik boşluktan gelen suyun miktarında yaklaşık %70'lik bir azalma gözlenmiştir. Beton dökümü ve sonrasındaki işlemlerle ilgili görüntüler Şekil 14'te görülebilir.



Şekil 14. Bu şekil ana yeraltı suyu giriş noktasındaki ıslah çalışmalarından alınmış

Ana karstik boşluktaki su akışını tamamen kesmek ve boşluğu kazı tarafında da betonla doldurmak için özel çelik bir kapak tasarımı yapılmıştır. Karstik boşluktan gelen suyun kontrol altına alınması amacıyla kum torbalar kullanılarak su, 200 mm çaplı koruge boru içine alınmıştır. Çelik plakanın kaya yüzeyine tutturulması için toplamda 12 adet delik açılmıştır. Bu deliklerin aralığı 2-3 metre, derinlikleri ise 0,50 metredir. Çapı 32 mm olan donatı çubukları grout malzemesiyle deliklere ankrajlanmıştır. Çelik kapak çerçevesi, bu ankrajlı donatılara kaynaklanmıştır. Plaka yerleştirilmeden önce karstik boşluk Şekil 44'te görüldüğü gibi püskürtme beton ile doldurulmuştur. Püskürtme beton uygulaması sonrası çelik kapak kayaya ankraj edilmiş çelik çerçeveye kaynaklanmıştır. Çelik kapak üzerindeki kaynaklı beton dirseği aracılığıyla, karstik boşluğa 5 m³ SAP 400 karışımı beton dökülmüştür. Beton dökümü sonrasında çelik çerçeve etrafından gelen sulara karşı delikler açılmış ve mekanik paker kullanılarak deliklere sırasıyla 2 bar basınçla enjeksiyon yapılmıştır. Yapılan çalışmaların fotoğraflar Şekil 15'te sunulmaktadır. Bu çalışmalar sonunda, karstik boşluktan gelen su debisi yaklaşık 119 m³/saat seviyesine düşmüş ve toplam kazı alanına giren su debisi yaklaşık olarak 319 m³/saat seviyesine düşmüştür.



Şekil 15. Karstik boşluğun kazı iç kısmından kapatılma çalışmaları

F.1. Kuzey Kazı Şevi Üzerindeki Lokal Karstik Boşlukların Enjeksiyonu

Bu yöntemde öncelikle su kum torbaları kullanılarak çelik boru içine alınmıştır. Çelik borunun etrafına çelik mesh yerleştirilmiş ve ardından püskürtme beton ile kapatılmıştır (Şekil 16).



Şekil 16. Küçük çaplı karstik boşlukların enjeksiyonu

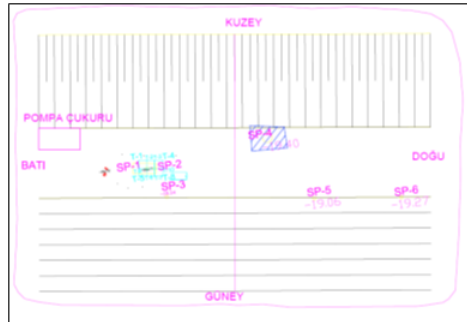
Püskürtme betonu priz süresinin sonunda, enjeksiyon valfi ve manometre çelik boruya bağlanmıştır (Şekil 17). M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 karışımları kullanılarak 2 bar basınçla enjeksiyon uygulanmıştır. Enjeksiyon çalışması sonrasında su tamamen kesilmiştir.



Şekil 17. Karstik boşluğa enjeksiyon uygulaması

F.2. Nihai Kazı Kotunda Ortaya Çıkan Kaynakların Islahı

-19.00 m kotunda kuzey ankraj kazısı tamamlanmış fakat bu kotta da ortaya çıkan yeni basınçlı artezyen kaynakları sebebiyle kazı çukuruna giren su debisi yaklaşık $600 \text{ m}^3/\text{saat}$ 'e yükselmiştir. Kazı tabanında 6 noktadan yeraltısu girişi gözlenmiştir. Kaynakları gösterir plan Şekil 18'de görülmektedir. En fazla su girişleri SP-1 ve SP-2 kaynaklarında görülmüştür. SP-1, SP-2, SP-3 kaynaklarına ilk etapta aşağıdaki yöntemlerle müdahale edilmiştir.



Şekil 18. -19.0 metrede karşılaşılan kaynakları gösterir plan

İlk etapta 6 adet kuyuya (SP-1 – SP-6) mekanik paker bağlandıktan sonra aşağıdaki verilen parametrelerle enjeksiyon yapıldı. Enjeksiyon karışım ve karışım limit değerleri Tablo 6 ve 7'de verilmektedir. Refü basıncı maksimum 4 bar, bekleme süresi 10 dakika ve refü koşulu $0,5 \text{ L / m / dk}$ olarak uygulanmıştır. Uygulama esnasından tüm karstik boşlukların birbiriyle bağlantılı olduğu anlaşılmıştır. İstenen refü değerlerine çıkılamamıştır.

Tablo 6. Enjeksiyon karışım özellikleri

Lab. No.	Su/ Çimento (oranı)	Bentonit (%)	Kum (oran)	Kimyasal		Yoğunluk (gr/cm ³)	Viskozite – Marsh Hunisi				
				Katki	Myc.		*Prepakt				
Karışım No.				Rh. T1 (1)	-2	0	15	30	45		
20											
SF-M2	0.65/1.0	-	-	2.0	1.2	41	41,5	43	44		
21											
SF-M3	0.65/1.0	0,8	-	2.0	1.2	43	43,8	43,9	44		
31											
SF-M4/1	0.65/1.0	0,8	0,50	1,8	1,4	1,820					
30											
SF-M5/1	0.65/1.0	0,8	0,75	1,8	1,4	1,850	16*		23*		
33	0.65/1.0	1,0	100	1,8	1,6		*Akmadı				

Tablo 7. Enjeksiyon akış şeması

Karışım No.	Limit Hacim (L)	Limit Hacim(L)	Limit Hacim (L)	Açıklama
	Su Kaybı Yok (A)	Su kaybı – Çatlak (B)	Su kaybı – açık karstik kanal, boşluk (C)	
SF – M2	200	200	200	Karışım değişimi 2 bar
SF – M3	200	200	200	
SF – M4/1	200	400	600	
SF – M5/1	200	400	600	
	Priz Süresi: 8 saat			

En fazla su girişi olan SP-1 ve SP-2 kaynaklarının ıslahı için bu kaynaklar çevresinde 10 m derinlikte 10 adet kuyu açılması, tüm irtibatlı kuyulara mekanik paker bağlanması, 4 bar refü basıncıyla 4.0+4.0+2.0 m, 0.0-0.30 (2 bar) kademelerde belirli bir sırada enjeksiyon yapılmasına karar verildi. Ancak, delgiler sırasında daha yüksek bir debiye sahip artezyen kaynağıyla karşılaşmıştır. SP-1 ve SP-2 çevresinde karşılaşılan yüksek debili kaynaklar Şekil 19’da görülmektedir.



Şekil 19. SP-1 ve SP-2 kaynakları

Enjeksiyon yöntemi ile sonuç alınamayacağı anlaşıldıktan sonra SP-1 ve SP-2 kaynaklarına beton dökülmesine karar verildi. Sonucun başarısız olması durumunda mevcut su debisinin çok daha üstünde bir su debisi ile karşılaşma riski göze alınarak SP-1 ve SP-2 kuyuları 90 mm çapa genişletildi. Genişletilmiş kuyulara beton pompası bağlanabilen çelik borular yerleştirilmiştir. Çelik borular sağlam kayaya 25 mm donatı çubuklarla ankraj edildi. Bu donatılar çelik boruya kaynatıldı. Kuyulara SAP 400 karışımı ile beton basıldı. Bu yöntemle bu 2 ana kaynağın ıslahı sağlanırken bu kuyuyla irtibatlı diğer kaynaklarda da su debilerinin azaldığı gözlemlendi. Kaynakların ıslah çalışmalarından görüntüler Şekil 20 a, b ve c’de verilmektedir.



Şekil 20. SP-1 ve SP-2 kaynaklarının ıslahı çalışmaları

F.3. Kazı Şevlerinde Çimento Enjeksiyonu ile Kesilemeyen Çok Küçük Çaplı Kaynakların 20mm PVC Borular ile Nihai Kazı Kotundaki Yatay Drenaja Bağlanması

Tüm kazı şevlerinin bazı kısımlarında noktasal veya dağınık halde su girişlerinin olduğu gözlenmiştir. Bu su girişlerinin temel beton dökümüne imkân verecek şekilde ilave tedbirlerle ıslahı gerekmektedir.

Kazı tabanında mevcut müdahalelerle ıslah edilmeyen kaynak suları, küçük kanallar vasıtasıyla kuzey şev dibi boyunca açılan ana kanal yoluyla kuzey batı köşesindeki pompa çukuruna yönlendirilmiştir. Şevlerdeki küçük çaplı kaynaklar matkaplarla genişletilmiş ve delgi çapına uygun PVC borular bağlanmıştır. Yaklaşık 400 adet PVC boru, şev dibi yatay drenaj kanalındaki perfore borulara bağlanmıştır. Yaklaşık 0.40x0.30 m boyutlu yatay drenaj kanalı, uygun gradasyonlu filtre malzeme ve üzerinde jeotekstil ile kaplanmıştır. Çalışmalarla ilgili görseller Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. Şevlerdeki küçük çaplı kaynakların yatay drenaj bağlanması

Pompa çukuruna 2 adet 800 mm çelik boru yerleştirilmiş ve boruların etrafı çakıl ile doldurulmuştur. Çakıl üzeri jeotekstil ile örtülmüştür. 2 adet drenaj pompası çelik boruların içine yerleştirilmiştir. Su pompalarından biri çalışır durumdayken diğer pompa herhangi bir arıza durumuna karşı yedek olarak hazırlanmıştır. Çelik boruların boyu ankraj betonunun yükselmesine paralel olarak uzatılmıştır. Kuzey ankraj beton işleri tamamlandıktan sonrası çelik boruların içi betonla doldurularak körlenmiştir.

IV. BULGULAR ve TARTIŞMA

İnşaat projesinin tasarım, kalite ve maliyetinin belirlenmesinde kritik unsurlardan bir olan zemin etüt çalışmaları ve bu çalışmaya bağlı zemin parametrelerinin yanıltıcı sonuçları, hemen proje aşamasında veya ilerleyen zamanlarda mal ve can kayıplarına neden olmaktadır.

İlave 3 jet grout denemelerinde enjekte edilen karışımın sızan suda yıkandığı gözlenmiştir. Bu nedenle müdahale edilen noktalarda su miktarında bir azalma sağlanamamıştır. Debisi yüksek noktalarda yapılan kimyasal enjeksiyon denemelerinde olumlu sonuç elde edilememiştir. Aynı şekilde, derin kuyu pompaj sisteminde kullanılan pompalar, statik su seviyesini düşürememiştir.

Çimento enjeksiyonu metodu kullanılarak, nihai kazı kotunun 5 m altına kadar uzanan su geçirimsiz perde duvarı oluşturulmuştur. Enjeksiyon parametrelerinin doğrulanması için deneme paneli, yeraltı suyu girişlerinin en yüksek olduğu kuzeydoğu köşesinde seçilmiştir. Karotlu sondaj yöntemiyle elde edilen numuneler üzerinde enjeksiyon etkinliği doğrulanmıştır. Büyük çaplı karstik boşluklar haricinde, kazı çevresinde daha sorunlu noktalarda karışım oranları ve özellikle priz hızlandırıcı oranındaki değişikliklerin kullanılması, daha etkin sonuçlar elde etmeyi sağlamıştır.

Kuzey ankraj kuzey doğu köşesi -7,00 m kotunda karşılaşılan karstik boşluğa beton mikseri oluğu kullanılarak serbest akışla beton dökülmüştür. Nihai kazı kotunda karşılaşılan karstik boşluğa ise mobil beton pompasıyla beton basılarak olumlu sonuç elde edilmiştir. SP-1 ve SP-2 kaynaklarının ıslah edilmesi, SP-3-SP6 kaynaklarından gelen su miktarını kabaca %80 azaltmıştır. Bu kottaki kaynakların birbiriyle bağlantılı olduğunu göstermektedir.

Kuzey ankraj temel betonunun kalitesini olumsuz etkileyecek kazı şevlerinde küçük çaplı kaynaklar, 20 mm PVC borularla nihai kazı kotundaki yatay drenaja bağlanmıştır. Kazı duvarları/şevleri boyunca

birçok noktadan yeraltısuyu gelmesi, noktasal kaynaklara yetersiz müdahale olduğunu ve kazı alanının çevresel geçirimsiz bir perde oluşturulmasının zorunlu olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, çimento enjeksiyon yöntemi etkin bir çözüm olarak öne çıkmıştır.

Kazı çalışmasının derinleştikçe, yeraltısuyu debisinin artması, bazı yöntemlerin yeterli verimi sağlamamasına neden olabilir. Bu nedenle, benzer şartlarda ve jeolojik ortamda yapılacak susuzlaştırma amaçlı geçirimsizlik perdesi çalışmalarının yeraltısuyu statik seviyesinde uygulanması, uygulama maliyetini ve iş süresini azaltabileceği söylenebilir.

Kazı duvarlarındaki süreksizlikler ve eklemlerden gelen sular, mevcut su sorununa ek olarak şev duyarsızlık problemine de neden olmuştur. Şev duyarsızlığına karşı kaya bulonu ve püskürtme betonu uygulanmıştır. Şevlere uygulanan püskürtme betonu uygulamasının kılcal su girişlerinin ıslahında etkili olduğu söylenebilir.

V. SONUÇLAR

İnşaat projelerinde derin kazı ve devamında inşaat çalışmalarının planlanan kalite, güvenlik ve iş programında sürdürülebilmesi için yeraltı suyunun kontrol altına alınma zorunludur. Susuzlaştırma, inşaat alanına gelen suyun ortamdan uzaklaştırılması dolayısıyla uygun çalışma ortamı yaratması yanı sıra, şevlerde olası kayma düzlemi üzerindeki gözenek suyu basıncının düşürülerek kayaç duyarlılığının artırılmasına yönelik uygulamaların başında gelir. Yanlış bir yaklaşım olarak kazı alanlarında yeraltı suyuna ilişkin sorunlar genellikle sorunun ortaya çıkmasından sonra çözülmeye çalışılır. Derin inşaat temel kazılarında olası yeraltı suyu sorunlarının tanımlanması, boyutlandırılması ve olası çok yönlü risklerin kontrol altına alınması çalışmaları eksik ve yetersiz düzeyde kalmaktadır.

Proje tasarımı öncesinde ve tasarım aşamasında, zemin araştırmalarıyla hidrojeolojik ortamın detaylı bir şekilde incelenmesi ve ilgili tasarım parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Özellikle çok kırıklı kaya ortamında, permeabilite testleri (WPT) gibi çalışmalarda zorluklarla karşılaşılabilir. Proje safhasında, sebep olabileceği bedeller hesaba katılarak hassas verilerin gerektirdiği çalışmalar için bu aşamalarında gerçekleştirilmelidir.

Susuzlaştırma tasarımcısı, tasarıma girdi parametrelerinin doğruluğunu bölgenin jeolojik ve hidrojeolojik özellikleriyle uyumunu da kontrol etmelidir. Çalışma alanını yansıtmayan verilerle yapılan hidrojeolojik hesap ve susuzlaştırma yönteminin olumsuz sonuçları projeye maliyeti kestirilemez kayıplar yaşatabilir.

Jet grout uygulaması, yaygın olarak zeminlerde kullanılan bir yöntemdir. Ancak, kaya ortamında geçirimsiz perde oluşturulmasında hedeflenen verimin alınmadığı tespit edilmiştir.

İlave susuzlaştırma çalışmalarına devam ederken, kazıya da devam edildi ve geçici susuzlaştırma işi kazı alanı içinde yüksek kapasiteli dalgıç pompalarla kullanılarak sağlandı. Bu nedenle, kazı kazı çukuru giren su debisi arttı. Bu durumda, kimyasal enjeksiyon ve derin kuyu pompaj yöntemlerinden yeterli verim alınamamış olabilir.

Uygulanan susuzlaştırma yöntemlerine ek olarak, kazı çalışmalarına paralel olarak geçici susuzlaştırmanın kazı çukuru içinde dalgıç pompalar kullanılarak sağlanması, kazı alanı çevresindeki statik su seviyesi eğrisinin kazı çukuru sınırlarından geri çekildiğini ve su probleminin nihai kazı kotuna taşındığını söylemek de yanlış olmaz.

VI. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

VII. KATKI BELİRTME

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında STFA Temel Araştırma ve Sondaj A.Ş., ECAP Mühendislik ve Müşavirlik A.Ş. ve Ayson Geoteknik ve Deniz İnşaat A.Ş. yetkililerine, Ayson tasarımcısı Sn. Saydın Altuğ'a ve IKG Projesi'ndeki STFA Kalite Kontrol, Teknik Ofis ve Şantiye Ekibindeki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

VIII. KAYNAKLAR







- [1] Ş. Abdüsselamoğlu, "Kocaeli Yarımadası'nın Jeolojisi," MTA Ens. Rapor No. 3249, İstanbul, Turkey, 1963.
- [2] İ. E. Altınlı, "İzmit-Hereke-Kurucadağ Alanının Jeoloji İncelemesi," Sayı 71, 1-26 ss. MTA Mecmuası, Ankara, Turkey, 1968.
- [3] DSİ, "Temel Sondaj ve Enjeksiyon Teknik Şartnamesi," DSİ, Ankara, Turkey, 2016.
- [4] DTWRCW, "Detail Design of Temporary Water Retaining Cutoff Walls (DTWRCW) (Jet Grout Columns) for North Anchorage Excavation Works, İzmit Bay Suspension Bridge, DTWRCW, Doküman No. 79.15.E.6408, 2012.
- [5] D. Ford and P. Williams, "Karst Hydrogeology and Geomorphology," John Wiley and Sons Ltd, 2007. (Published in Cave and Karst Science, Vol. 34, No. 1, pp. 40-41, 2007).
- [6] FDRNABMRC, "Field Data Report, North Anchorage Bedrock Mapping and Rock Mass Characterization (FDRNABMRC) for İzmit Bay Bridge, Turkey," FDRNABMRC, Task No. 6, 2010.
- [7] N. Goldscheider and D. Drew, "Methods in Karst Hydrogeology," Taylor & Francis is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007.
- [8] GIR, "Geotechnical Interpretative Report (GIR), İzmit Bay Crossing Bridge," GIR, Doküman No. IZMIT-COW_REP_DD_GEO_0001, 2012.
- [9] G. Lombardi ve D.U. Deere "EYS kuralı ile enjeksiyon projelendirmesi ve kontrolü (Water Power and Dam Construction, June)," SX Bölge Müdürlüğü, Antalya, Turkey, 1993 (Translated by Adil Öktem).
- [10] OGSIFDR, "Onshore Geotechnical Site Investigation Factual Data Report (OGSIFDR), Engineering Studies İzmit Bay Suspension Bridge-EPC Geotechnical Studies İzmit Bay, Turkey," OGSIFDR, Task No. 4, 2011.
- [11] H. Özler, "Gebze ve Dilovası'nın (Kocaeli) Hidrojeolojik İncelemesi," Fiziki Coğrafya Araştırmaları Sistemik ve Bölgesel Dergisi, 2011.
- [12] H. Özkan, "Enjeksiyon Yöntemleri ve Uygulamaları," Ankara, 2006.
- [13] TAR, "Technical Assessment Report (TAR) for Dewatering Design of the Deep Excavation Pit of the North Anchorage. İzmit Bay Suspension Bridge," TAR, Report No.: IZMIT-EC-RPT-TWN-3100, 2013.
- [14] R. Yıldız "Jet Grout Kolon Yöntemi ile Zemin İyileştirmesi Yapılması", İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Semineri, İzmir, 2011.
- [15] J. X. Wang, Linbo Wu, Xiaotian Liu Dewatering of a 32.55 m Deep Foundation Pit in MAMA Under Leakage Risk Conditions, KSCE Journal of Civil Engineering (2018) 22(8):2784-2801.
- [16] P. Nanjundaswamy, Construction Dewatering, S J College of Engineering Mysuru – 570 006, 2015.
- [17] B. M. El-Garhy ve A. F. Youssef, Evaluation of Three Analysis Methods of Dewatering Systems, Soil Mechanics and Foundation Engineering 18(2):1-15, 2007.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Antioxidant Activity and Theoretical Profile of Novel 2,4,6-Triarylpyridine Derivatives Based on Syringaldehyde

 Esra Nur ALBAYRAK ^a,  Samed ŞİMŞEK ^b,  Ahmad Badreddin MUSATAT ^{a,c},  Zeynep AKŞİT ^d,  Hüseyin AKŞİT ^b,  Alparslan ATAHAN ^{a,*}

^a Department of Chemistry, Faculty of Art and Sciences, Düzce University, Düzce, TÜRKİYE

^b Department of Basic Pharmacy Sciences, Faculty of Pharmacy, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, TÜRKİYE

^c Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Sakarya University, Sakarya, TÜRKİYE

^d Vocational School of Tourism and Hotel Management, Department of Hotel, Restaurant and Catering Services, Cookery, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: alparslanatahan@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1320385

ABSTRACT

Eight novel 2,4,6-triarylpyridines derived from syringaldehyde were designed and synthesized via a multicomponent one-step preparation method. Those compounds were evaluated for their antioxidant activities comparing with known reference compounds. In the studied series, toluyl, methoxyphenyl, and pyridinyl-bearing derivatives exhibited considerable antioxidant activities. Meanwhile, using the B3LYP theory and SVP, TZVP basis sets, a comprehensive theoretical quantum computing approach for the synthesized compounds was established and electronic structure descriptive parameters called Fukui indices describing the radical scavenging potential were determined. Finally, the structure-activity relationship was revealed by comparing the theoretical and experimental outputs. As a result, the potential antioxidant activity of the studied compounds was also supported by a theoretical approach.

Keywords: Triarylpyridine, Syringaldehyde, Antioxidant, DFT, Fukui indices,

Siringaldehit Bazlı Yeni 2,4,6-Triarilpiridin Türevlerinin Antioksidan Aktiviteleri ve Teorik Profili

ÖZ

Siringaldehitten türetilen sekiz adet yeni 2,4,6-triarilpiridin tasarlandı ve tek basamaklı multi-komponent yöntemle sentezlendi. Bu bileşiklerin antioksidan aktiviteleri bilinen referans bileşiklerle kıyaslanarak değerlendirildi. Çalışılan seride, toluil, metoksifenil ve piridinil taşıyan türevler dikkate değer antioksidan aktivite sergiledi. Daha sonra, B3LYP teorisi ve SVP, TZVP temel setleri kullanılarak, sentezlenen bileşikler için kapsamlı bir teorik kuantum hesaplama yaklaşımı oluşturuldu ve radikal yakalama potansiyelini tanımlayan Fukui indeksleri adlı elektronik yapı tanımlayıcı parametreler belirlendi. Son olarak, teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak yapı-etkinlik ilişkisi ortaya konuldu. Sonuç olarak, elde edilen bileşiklerin antioksidan aktivite potansiyeli teorik bir yaklaşımla da desteklendi.

Anahtar Kelimeler: Triarilpiridin, Siringaldehit, Antioksidan, DFT, Fukui indeksi

I. INTRODUCTION

Oxidative stress, caused by excessive oxidation, plays a pivotal role in various pathological processes, including neurodegenerative disorders, cardiovascular diseases, and cancer [1,2]. In general, oxidative stress arises when there is a disturbance in the equilibrium between the production of reactive oxygen species (ROS) and the body's antioxidant defense mechanisms' ability to effectively neutralize them. This imbalance leads to the accumulation of ROS, which can result in cellular damage and contribute to various health-related issues [3]. This can lead to cell damage and has been linked to numerous diseases such as cardiovascular disease, cancer, neurodegenerative disorders, and diabetes [4-7]. Therefore, the search for natural and synthetic antioxidants is crucial in maintaining and promoting human health. Among the diverse array of natural and synthetic antioxidants, syringaldehyde and its derivatives have garnered considerable attention owing to their remarkable antioxidant properties [8-10]. Syringaldehyde, a naturally occurring compound found in a wide range of plants, has been extensively studied for its diverse biological activities. Its derivatives have been shown to possess various beneficial properties, including anti-inflammatory, anticancer, and potent antioxidant activities [11-13]. As a result, the search for antioxidant compounds has expanded to various fields of research, including nutrition, pharmacology, and biotechnology. In nutrition, researchers are investigating the antioxidant capacity of different foods and dietary supplements, with the goal of identifying dietary patterns and individual nutrients that can help prevent chronic diseases [14]. In pharmacology, researchers are exploring the potential of antioxidant compounds as therapeutic agents for various diseases. For example, some studies have shown that antioxidants such as vitamin E, vitamin C, and beta-carotene may reduce the risk of developing cardiovascular disease [15]. On the other hand, some phenolic compounds, for example, Trolox, BHA, and BHT, are known as reference antioxidant compounds in laboratory experiments [16,17]. The importance of syringaldehyde comes from its structural similarity to these compounds (Figure 1).

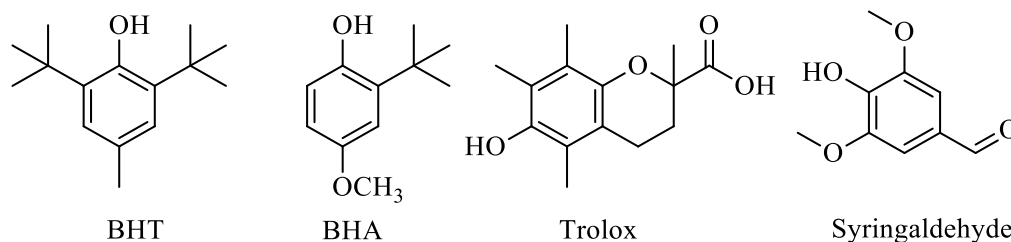


Figure 1. Structural similarity of syringaldehyde to common antioxidants

On the other hand, over the past two decades, density functional theory (DFT) has emerged as a widely embraced reliable tool for predicting molecular properties and providing a qualitative explanation for various findings in the fields of chemistry and biology. The success of DFT lies in its relatively low computational cost and improved accuracy compared to traditional quantum chemical methods. In addition, DFT has the advantage of formulating reactivity parameters, such as Fukui function, chemical hardness, electronegativity, and softness, which provide insights into molecular behavior and reactivity [18,19]. Basically the antioxidant mechanism could be evaluated theoretically by three different well-known mechanisms as HAT, SPLET and SET-PT. Those mechanisms defining O-H dissociation are usually used in various studies to evaluate the antioxidant role [20]. Herein, we singled out FUKUI indexes based on the novelty and the extraordinary role that we approach and keep with new updates in scientific methodologies. Meanwhile, this makes DFT an indispensable tool for the design and development of new molecules with desired properties, including antioxidant activity. In this article, we described the facile synthesis and characterization of novel syringaldehyde derivatives using $^1\text{H-NMR}$, $^{13}\text{C-NMR}$ FT-IR techniques and evaluate their antioxidant potential using various *in vitro* assays, including DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) radical scavenging activity, FRAP (ferric reducing antioxidant power), and ABTS (2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical cation) assays. Additionally, we have conducted theoretical studies using quantum calculations by evolving the density function theory using B3LYP as a base set and 2 different solvent systems to elucidate the structure-activity relationship of the synthesized derivatives and to develop a comprehensive approach

toward those newly synthesized derivatives. In summary, this study aims to contribute to the development of novel antioxidant agents based on novel syringaldehyde derivatives. The findings of this study will not only enhance our understanding about the structure-activity relationship of syringaldehyde derivatives but also provide valuable insights for the future design of new and more potent antioxidants in this field.

II. MATERIALS AND METHODS

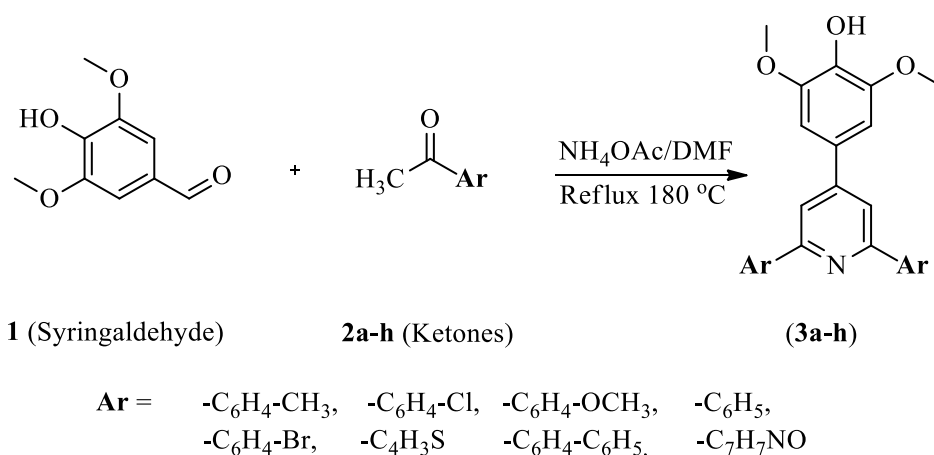
A. MATERIALS

The chemicals utilized in this study were procured commercially from reputable sources, namely Merck, Sigma-Aldrich, and Fluka, ensuring high-grade purity, and employed without any purification processes. The solutions were prepared using ultrapure water. The NMR spectra were meticulously recorded by using a Bruker 400 MHz instrument, utilizing CDCl_3 as the solvent and employing TMS as the standard. FT-IR spectra were obtained using a Shimadzu IR Prestige 21 spectrometer. The melting points of the titled compounds were acquired using a Stuart SMP30.

B. METHODS

B.1. Chemistry

The synthesis of substituted 4-(2,6-diphenylpyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol derivatives was realised according to the literature procedure [21] as in Figure 1. For this, 0.5 mmol of syringaldehyde and 1 mmol of methylketone derivatives were dissolved in 5 mL of DMF. 2 mmol of ammonium acetate was added to the reaction mixture. The resulting mixture was stirred for 72 hours at 180 °C then poured onto 200 mL of ice water, further work up was made with DCM followed by evaporation of the solvent. The crude oily products have been recrystallized from hexane-dichloromethane solvent system.



Scheme 1. Synthesis of 2,4,6-triarylpyridines.

B.2. Antioxidant activity

B.2.1. DPPH Assay

The antioxidant property of the compounds (**3a-h**) was evaluated based on the change in color of the methanolic solution of DPPH, from deep violet to yellow upon adding the compounds. The title compounds' free radical scavenging abilities were assessed by a modified version of the DPPH assay, which was originally described by Blois back in 1958 [22]. In this assay, 3 mL of the compound solution

at various concentrations (5-100 µg/mL) were added to 1 mL of a DPPH solution (0.26 mM solution in methanol). The mixtures were thoroughly vortexed and then incubated at room temperature for 30 minutes in the dark. Following the incubation period, the absorbance of each mixture was measured at a wavelength of 517 nm. The measured absorbance values were subsequently converted to % activity, and the IC₅₀ (µg/mL) concentrations of the studied compounds were calculated. Furthermore, a comparison was made between the obtained results and those of Trolox, a reference compound employed in this study.

B.2.2. ABTS Assay

The cationic radical scavenging activities of studied compounds were determined using a modified version of the method originally outlined by Re et al. in 1999 [23]. For the assay, a 2 mM solution of ABTS (2,2'-Azino-bis 3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) and a 2.45 mM solution of K₂S₂O₈ (potassium persulfate) were diligently prepared in a 0.1 M phosphate buffer with a pH of 7.4. Subsequently, the two solutions were combined in a precise 1:2 ratio, and the resultant mixture was kept in a light-protected environment for a duration of 12 hours. For the experimental procedure, the compounds and standards to be tested were prepared as stock solutions with a concentration of 1 mg/ml. Samples were extracted in different quantities: 20, 40, 80, 120, 160, 240, 320, and 400 µl, and the volumes were subsequently adjusted to 3 ml with phosphate buffer. Afterward, 1 ml of the ABTS⁺ solution was added to each sample. The resulting mixture was vigorously vortexed to ensure proper mixing and then incubated at room temperature for a duration of 60 minutes. After the designated incubation period, the absorbance of each mixture was measured at a wavelength of 734 nm. The acquired absorbance values were subsequently converted into percentage activity. The IC₅₀ values (µg/mL) were determined for each sample correspondingly, and a comparative analysis was conducted with Trolox, which served as the reference substance in this study.

B.2.3. FRAP Assay

To prepare the sample solutions, a 100 µl volume of each solution, with a concentration of 1 mg/mL, was diluted to 1.25 mL using a phosphate buffer (0.2 M, pH 6.6). Following this, 1.25 mL of potassium ferric cyanide [K₃Fe(CN)₆] solution (1%) was added, and the resulting mixture was incubated at 50 °C for a duration of 20 minutes. After the incubation period, 1.25 mL of 10% trichloroacetic acid (TCA) and 0.25 mL of 0.1% FeCl₃ solution were introduced into the reaction medium. The absorbance of the final mixture was measured at 700 nm. The antioxidant capacity of the samples was expressed as milligrams (mg) of Trolox equivalent (TE) per gram (g) of the compound. The findings of this study contribute valuable insights into the antioxidant potential of the compounds under investigation.

B.3. Computational Methodology

Computational chemistry provides an enormous role for better understanding the electronic nature of the titled compounds, for instance, DFT calculations were carried out using ORCA 5.0.2 [24] an open-source DFT code. Entire calculations were performed using B3LYP theory [25-28] with def2-SVP def2-TZVP basis sets [29] and Grimme's dispersion correction D3 [30] along with Becke-Johnson damping [31], RIJCOSX approximation [32] and auxiliary basis set [33]. To gain a deeper understanding of the compound's behavior, the C-PCM (Continuum-PCM) solvation model was utilized, simulating the compound's solvation in water. This step was performed subsequent to completing the calculations in the gas phase [34]. The obtained data was visualized by Avogadro 1.2.0 and IboView graphical user interface programs [35-38]. No imaginary frequencies were observed which declare the true minima of optimization energy. The xyz coordinates of the optimized structure were applied to obtain the energies of each system in anion and cation forms. The obtained data were used to compute the vertical ionization potential (I) and electron affinity (A) from the following formulas, respectively.

$$I = E(N - 1) - E(N) \quad (1)$$

and

$$A = E(N) - E(N + 1) \quad (2)$$

$E(N)$ refers to the energy of a system in its neutral form, while $E(N-1)$ to the energy of its cationic form, and $E(N + 1)$ for the corresponding anionic form. Based on these results, the electron-donating (ω^-) and electron-accepting (ω^+) powers [39] were determined for the studied compounds based on the following formulas:

$$\omega^- = \frac{(3I + A)^2}{16(I - A)} \quad (3)$$

$$\omega^+ = \frac{(I + 3A)^2}{16(I - A)} \quad (4)$$

Donor and acceptor indexes are usually used to normalize the electron donating-accepting powers giving a useful graphic indicator comparing to Na and F atoms respectively. The obtained data was carried out using computational values done at the same level of theory and the same basis sets.

$$R_d = \frac{\omega^-}{\omega^+} \quad (5)$$

$$R_a = \frac{\omega^+}{\omega^-} \quad (6)$$

The indices R_d (electron donation index) and R_a (electron acceptor index) are fundamental in characterizing electron donation and acceptance capabilities of compounds. R_d quantifies the ability of a compound to donate electrons, while R_a represents its capacity to accept electrons. The reference atoms for R_d and R_a are sodium and fluorine, respectively. Compounds exhibiting a donor index (R_d) value of 1 are classified as electron donors akin to the sodium atom. Donor indices below 1 indicate compounds that are effective electron donors, while values above 1 suggest less effectiveness compared to sodium. Similarly, R_a values greater than 1 indicate compounds that are efficient electron acceptors, with a R_a value of 1 representing acceptor efficiency similar to fluorine. Conversely, R_a values below 1 signify compounds that are less effective electron acceptors than fluorine. By evaluating both R_d and R_a values, the electron donor-acceptor properties of molecules can be comprehensively understood, enabling the classification of compounds as good-poor electron donors-acceptors. Moreover, an acceptor-donor map was constructed by utilizing the R_d and R_a values of the synthesized compounds, which were subsequently compared to the well-known antioxidant Trolox [40]. In summary, the R_d and R_a indices provide valuable insights into the electron donation and acceptance capabilities of compounds. The reference atoms, sodium, and fluorine, aid in determining the relative effectiveness of compounds as electron donors or acceptors. The acceptor-donor map, along with the comparison to Trolox, contributes to a deeper understanding of the electron transfer properties of the synthesized molecules.

B.3.1. The Fukui function $f^-(r)$

The Fukui functions are mathematical descriptors that provide information on the electronic density changes of a chemical system in a specific reaction resulting from changes in electron number. These functions can be used to predict the selectivity of regions in the reactions by identifying reactive sites. In this study, the radical Fukui function was used to predict the favorable radical-molecule interaction site in the context of this work [41-45]. Given the nature of the chemical systems studied in this research, the Fukui function was calculated by removal of an electron by using the following formula:

$$f^-(r) = \rho_N(r) - \rho_{N-1}(r) \quad (7)$$

The electron density of the neutral system is denoted as $\rho_N(r)$, whereas $\rho_{N-1}(r)$ represents the electron density of the system after the loss of one electron. The obtained results were visualized using the Avogadro 1.2.0 and IboView graphical user interface programs, enabling a visual representation of the electron density distribution and providing a valuable tool for further analysis and interpretation [35-38].

B.3.2. Molecular descriptors evaluation

Based on previously published research, the studied compounds (3a-h) underwent calculations to determine their HOMO (highest occupied molecular orbital) and LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) energies, with the lowest values being chosen along with various quantum chemical parameters which were determined accordingly using the proper formula and methodology [46-49, 52]. Tables 2 and 3 present some of the obtained results.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. CHEMISTRY

The title compounds were successfully obtained by the reaction of 1:2:4 equimolar amount of syringaldehyde, methylketone derivatives and ammonium acetate, respectively (Scheme 1). The yields of the synthesized compounds were observed between 60-82%. The structures of the synthesized compounds were elucidated using ¹H-NMR, ¹³C-NMR and FT-IR techniques. For instance, in the spectroscopic data of **3a**, the doublets at δ : 8.08 and 7.68 ppm are correlated to 8 protons of bromophenyl moieties at 2- and 6- positions of the pyridine ring. It can be seen that these protons are resonated as AA'BB' system. The coupling constants are shown as 8.8 Hz which are describing *ortho* couplings. In addition, the singlet at δ : 7.81 ppm is related to two protons of the pyridine ring at 3- and 5- positions. This signal has been shifted downfield due to electron withdrawing effect of the nitrogen atom on the pyridine ring. On the other hand, syringaldehyde-related two aromatic protons appear at δ : 6.93 ppm as singlet. This upfield resonance can be attributed to electron donation properties of hydroxyl and methoxy groups. Finally, the methoxy group protons with 6 integration value have been resonated as a singlet at δ : 4.03 ppm as expected. In the ¹³C-NMR spectrum of **3a**, the aromatic region has eleven signals according to the proposed structure. Based on the symmetry of the title compound, most of the signals get longer in length due to the overlap of the related signals. Specifically, methoxy carbons resonated at δ : 56.60 ppm as expected. In the FTIR spectrum of **3a**, aromatic C-H and aliphatic C-H stretches are shown at 3419, 2960, and 2937 cm⁻¹ values. In addition, aromatic C=C are present in 1598 cm⁻¹ region. As a result, the spectroscopic data verified the proposed structure of **3a**. According to the obtained spectroscopic data of the other compounds, all the structures of title compounds are similarly verified as in Figure 2.

A.1. Spectral Data of the Synthesized Compounds

A.1.1. 4-(2,6-bis(4-bromophenyl)pyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (**3a**)

Yield: 60% pale brown solid, m.p.: 200-205 °C, ¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm): δ : 8.08 (d, 4H, *j*: 8.8 Hz); 7.81 (s, 2H); 7.68 (d, 4H, *j*: 8.8 Hz); 6.93 (s, 2H); 5.76 (bs, 1H); 4.03 (s, 6H). ¹³C-NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm): δ : 156.39 (2C), 150.85, 147.63 (2C), 138.22 (2C), 136.04, 131.88 (4C), 130.13, 128.69 (4C), 123.66 (2C), 116.96 (2C), 104.13 (2C), 56.60 (2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3419, 2960, 2937, 1598, 1519, 1211, 1114, 1006, 819.

A.1.2. 4-(2,6-bis(4-chlorophenyl)pyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (**3b**)

Yield: 65%, brown solid, m.p.: 146-149 °C, ¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm): δ : 8.14 (d, *j* = 8.4 Hz, 4H); 7.80 (s, 2H); 7.50 (d, *j*: 8.4 Hz, 4H); 6.93 (s, 2H), 5.75 (bs, 1H), 4.04 (s, 6H). ¹³C-NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm): δ : 156.35 (2C), 150.83, 147.63 (2C), 137.81 (2C), 135.30 (2C), 130.22, 128.92 (4C), 128.39 (5C), 116.93 (2C), 104.13 (2C), 56.61 (2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3419, 2941, 1716, 1653, 1598, 1519, 1456, 1381, 1359, 1213, 1114, 819.

A.1.3. 4-(2,6-di-*p*-tolylpyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3c)

Yield: 79%, brown solid, m.p.: 98-103 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 8.11 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H); 7.78 (s, 2H), 7.34 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H), 6.95 (s, 2H), 5.74 (bs, 1H), 4.03 (s, 6H), 2.46 (s, 6H). ¹³C-NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 157.43 (2C), 150.29, 147.54 (2C), 139.01(2C), 136.93(2C), 130.80, 129.42 (4C), 129.31, 127.03(4C), 116.40(2C), 104.11(2C), 56.56(2C), 21.35(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3419, 2918, 1716, 1653, 1598, 1508, 1456, 1211, 1111, 817, 570.

A.1.4. 4-(2,6-bis(4-methoxyphenyl)pyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3d)

Yield: 69%, brown solid, m.p.: 90-96 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 8.17 (d, *j*: 8.8 Hz, 4H), 7.71 7.71 (s, 2H), 7.06 (d, *j*: 8.8 Hz, 4H), 6.94 (s, 2H), 5.81 (bs, 1H), 4.01 (d, 6H), 3.91 (d, 6H). ¹³C-NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 160.54(2C), 157.01(2C), 150.21, 147.53(2C), 144.69, 132.42 (2C), 130.62, 128.44(4C), 115.55(2C), 114.09(4C), 104.14(2C), 56.55(2C), 55.40(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3354, 2935, 1697, 1653, 1597, 1508, 1456, 1247, 1111, 819, 582.

A.1.5. 4-(2,6-diphenylpyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3e)

Yield: 70%, brown solid, m.p.: 96-100 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 8.22 (d, *j*: 8.8 Hz, 4H), 7.84 (s, 2H), 7.56 (t, *j*: 8.8 Hz, 4H), 7.48 (t, *j*: 8.8 Hz, 2H), 6.97 (s, 2H), 4.03 (s, 6H). ¹³C-NMR (100 MHz CDCl₃, ppm) δ: 157.56(2C), 150.47, 147.57(2C), 139.64(2C), 135.81, 130.60, 129.10(2C), 128.75 (4C), 127.19(4C), 117.02(2C), 104.10(2C), 56.57(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3315, 2935, 1714, 1645, 1595, 1516, 1448, 1396, 1213, 775, 692, 642.

A.1.6. 4-(2,6-di([1,1'-biphenyl]-4-yl)pyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3f)

Yield: 75%, brown solid, m.p.: 97-103 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 8.32 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H), 7.89 (s, 2H), 7.80 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H), 7.72 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H), 7.50 (d, *j*: 7.8 Hz, 4H), 7.42 (t, 8.0 Hz, 2H) 7.00 (s, 2H), 4.05 (s, 6H). ¹³C-NMR (CDCl₃, 100 MHz, ppm) δ: 157.16 (2C), 150.45, 147.67 (2C), 141.86 (2C), 140.69(2C), 138.55(2C), 130.44, 128.88 (4C), 127.59(4C), 127.44(4C), 127.28, 127.23, 127.13(4C), 116.96(2C), 104.30 (2C), 56.62(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3307, 2935, 1647, 1597, 1514, 1448, 1390, 1309, 1112, 1006, 839, 765, 694, 594.

A.1.7. 4-(2,6-di(thiophen-2-yl)pyridin-4-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3g)

Yield: 82%, brown solid, m.p.: 100-106 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 7.74 (dd, *j*: = 3.7, 4.0 Hz, 2H), 7.63 (s, 2H), 7.46 (dd, *j*: 5.0, 4.0 Hz, 2H), 7.17 (dd, *j*: = 5.0, 3.7 Hz, 2H), 6.92 (s, 2H), 4.03 (s, 6H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 152.47(2C), 150.44, 147.56(2C), 144.73(2C), 135.96, 129.94(2C), 127.96(2C), 127.88(2C), 124.84(2C), 114.85(2C), 104.04(2C), 56.56(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3336, 2935, 1714, 1699, 1647, 1595, 1514, 1411, 1390, 1355, 1213, 1111, 1039, 1006, 829, 698.

A.1.8. 4-([2,2':6',2''-terpyridin]-4'-yl)-2,6-dimethoxyphenol (3h)

Yield: 78%, brown solid, m.p.: 89-95 °C, ¹H NMR (400 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 8.82-8.74 (m, 4H), 8.66 (s, 2H), 7.92-7.88 (m, 2H), 7.42-7.36 (m, 2H), 7.11 (s, 2H), 4.01 (s, 6H). ¹³C NMR (100 MHz, CDCl₃, ppm) δ: 155.73(2C), 150.50, 149.01(2C), 148.33(2C), 147.58 (2C), 137.05(2C), 126.54, 123.90(2C), 122.50, 121.58(2C), 118.62(2C) 104.23(2C), 56.50(2C). FTIR (ATR, cm⁻¹): 3307, 2935, 1714, 1695, 1593, 1514, 1456, 1390, 1361, 1328, 1213, 1112, 1041, 831, 767, 696.

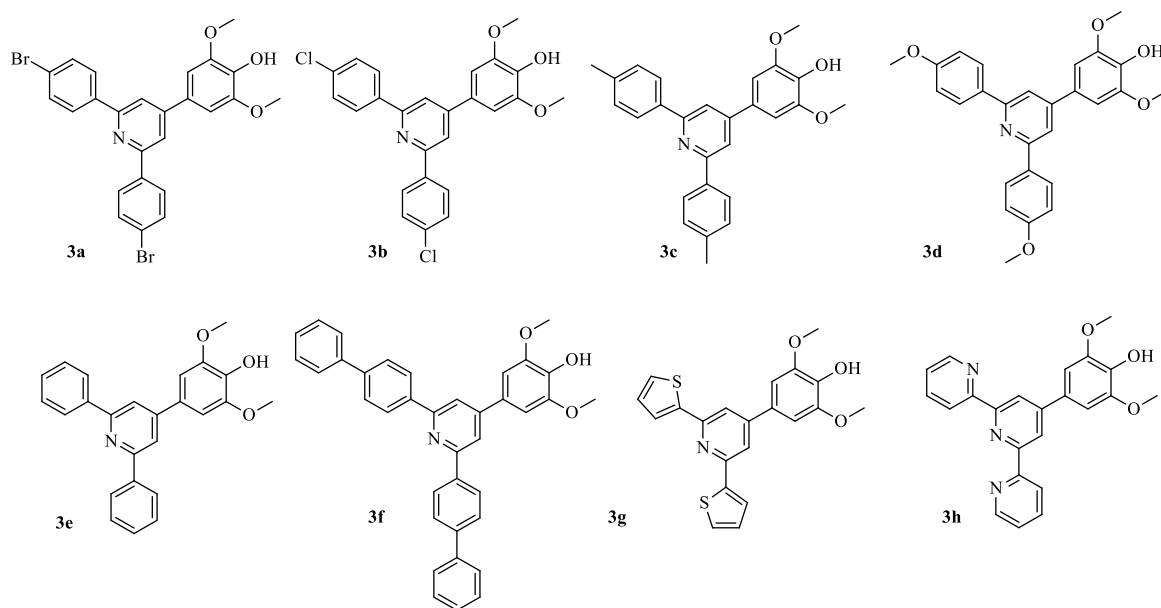


Figure 2. The chemical structures of the studied compounds (3a-h)

B. ANTIOXIDANT ACTIVITY

B.1. Antioxidant activity by ABTS

The ABTS cation radical decolorization assay is a widely used method to assess the antioxidant activity of various compounds. Additionally, Trolox is commonly employed as a reference compound in this assay. Table 1 showed that in general IC_{50} of the studied compounds were between 51.26 and 148.75 $\mu\text{g/mL}$ where Trolox has 7.07 $\mu\text{g/mL}$ IC_{50} value. According to the obtained experimental results, the methyl group containing derivative (3c) has the lowest IC_{50} value. The standard and the studied compounds showed the antioxidant ability in the following order: 3f<3e<3g<3b<3a<3d<3h<3c<Trolox Figure 3 illustrates the activation/concentration dependence of the studied compound.

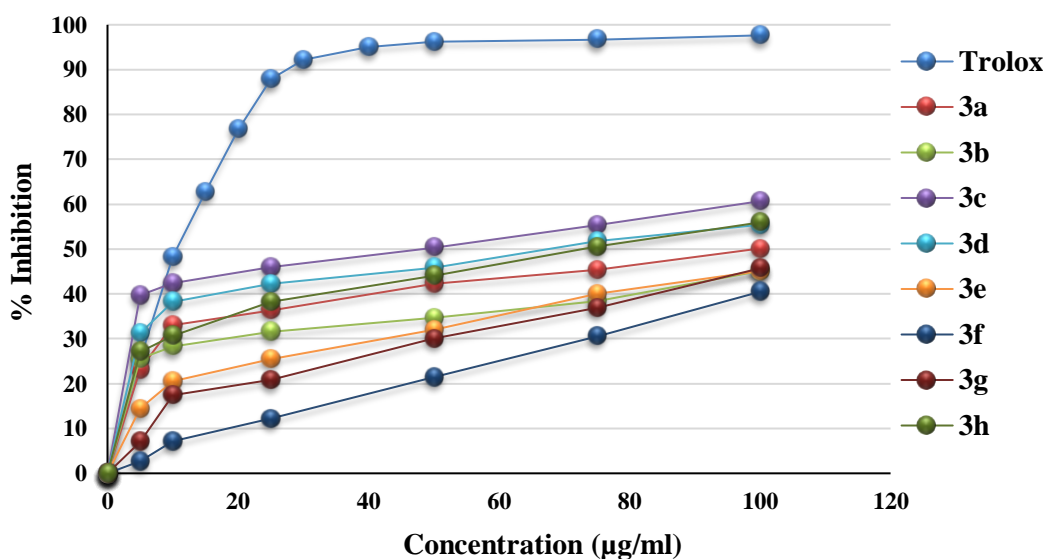


Figure 3. Activation/concentration dependence of the studied compound towards ABTS.

B.2. Antioxidant activity by DPPH

Various methods can be employed to evaluate the radical scavenging capacity of natural and synthetically obtained compounds. Among these, stable DPPH \cdot (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) free radical assays are widely utilized due to their simplicity and relatively short analysis time compared to other evaluation methods. In this study, Trolox was used as radical scavenger reference compound. In the DPPH assay, the IC₅₀ values of the tested compounds ranged from 124.73 to 285.98 $\mu\text{g/mL}$, while Trolox exhibited an IC₅₀ value consisting of 11.95 $\mu\text{g/mL}$. **3d** has the lowest IC₅₀ value. The standard and the studied compounds showed the ability to scavenge DPPH \cdot in the following order: **3b** < **3g** < **3f** < **3e** < **3a** < **3c** < **3h** < **3d** < Trolox. Figure 4 illustrates the activation/concentration dependence of the studied compound.

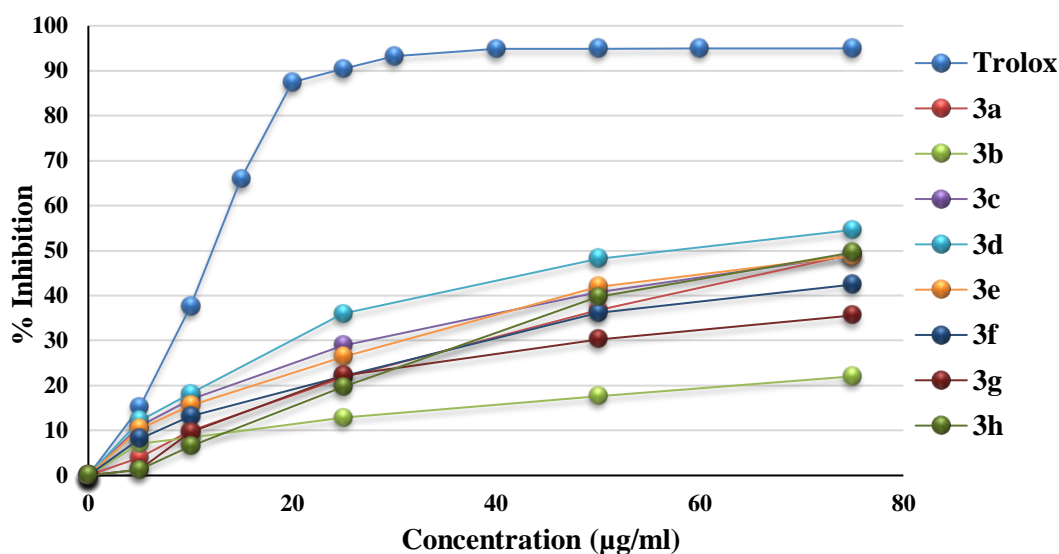


Figure 4. Activation/concentration dependence of the studied compound towards DPPH.

B.3. Antioxidant activity by FRAP

A comparative analysis was performed to assess the ability of the studied compounds to reduce ferric ions, in comparison to the Trolox standard. The chloro derivative (**3b**) had a reducing power of 21.89 ± 0.84 mg Trolox equivalent (TE). The FRP of the bromo derivative (**3a**) was also found 23.32 ± 0.84 $\mu\text{g TE}$. According to other studies [50, 51], our findings were consistent with these studies. Figure 5 illustrates the activation/concentration dependence of the studied compound.

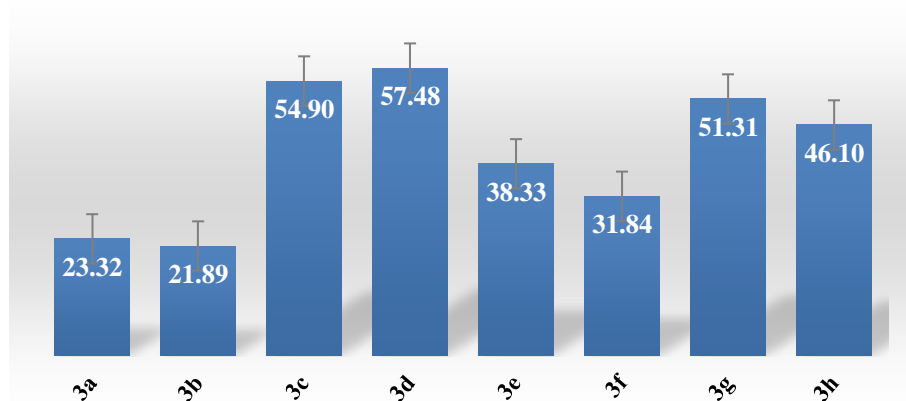


Figure 5. Activation/concentration dependence of the studied compound towards FRAP.

C. THEORETICAL STUDIES

The optimized structures for the ground state were obtained using the B3LYP def2-TZVP level of theory in both the gas phase and water. The initial geometric optimization was carried out in the def2-SVP basis set. Furthermore, the utilization of quantum chemical calculations to estimate molecular parameters is an effective technique for comprehending a molecule's activities. These calculations provide valuable insights into the electronic structure, stability, and reactivity of the molecules, contributing to a better understanding of their properties and potential applications. Quantum chemical parameters, such as E_{HOMO} , E_{LUMO} , ΔE (the energy difference between HOMO and LUMO), hardness, electronegativity, chemical potential, global electrophilicity, nucleophilicity, global softness, dipole moments, ionization energies, and electron affinities, can all be considered when evaluating the biological potential of a molecule [52]. One can observe by looking at the given Table 1 which contains some calculated parameters for the studied compounds along with the data of Figure 6 that **3a-h** compounds have similar or near energy band gap energy difference (ΔE) in gas phase. It can be seen also from Table 1 that the studied compounds showed a slightly small changed in ΔE using B3LYP theory under gas phase. Chemical hardness values seem to be considerably good among the studied theory and it could contribute to the antioxidant mechanism. Moreover, the outputs which been observed in Table 2 as water CPCM system with dielectric constant value of 80.4 clearly declare that the (ΔE) of studied compounds were between 3.961 and 4.273 eV, also the obtained ionization potential (I) and electron affinity values as 5.74 - 5.751 and 1.446 - 1.779 respectively which plays a crucial role in understanding the antioxidant properties and the nature of the studied compounds and their ability to scavenge free radicals. In general, the antioxidant capacity of a molecule can be defined by taking into account both ionization potential and electron affinity. Compounds with favorable ionization potentials and electron affinities have high antioxidative characteristics ability, allowing them to efficiently counteract oxidative stress and the damage it causes. The related HOMO-LUMO band gap map (Frontier Molecular Orbitals) can be seen in Figure 7.

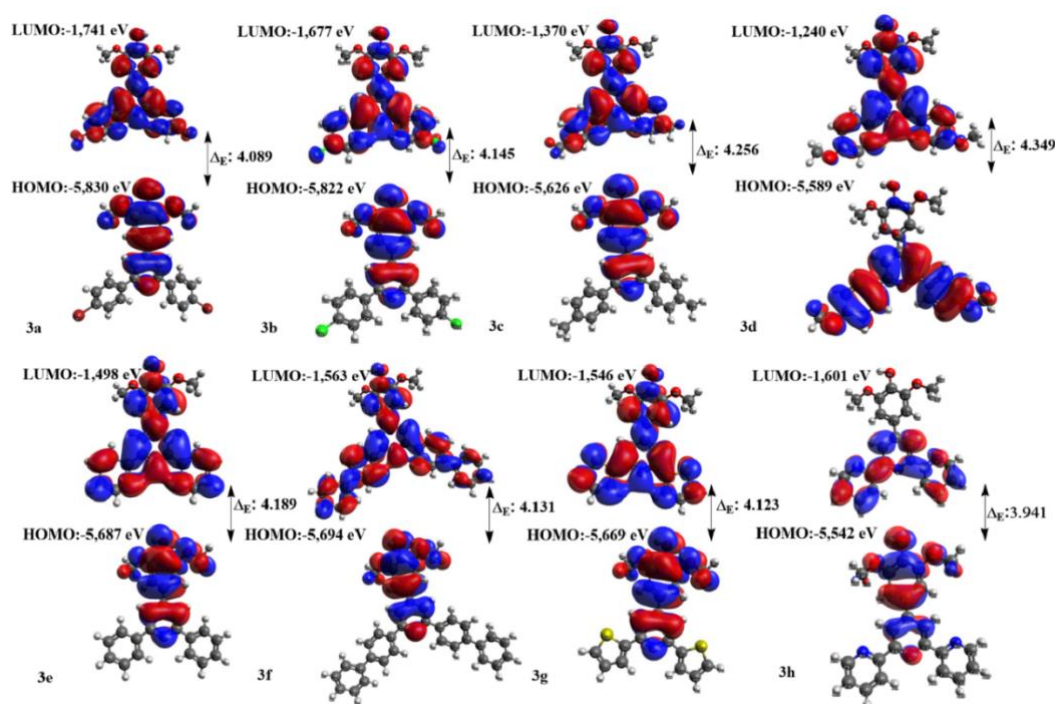


Figure 6. Calculated HOMO-LUMO band gap map (Frontier Molecular Orbitals) of the studied compounds under gas phase.

Table 1. Calculated parameters of the studied compounds (3a-h) under gas phase

Sample	E_{HOMO}	E_{LUMO}	ΔE	ω^-	ω^+	I	A	Ra	Rd
3a	-5.83	-1.741	4.089	9.829	5.649	5.830	1.71	0.119	1.071
3b	-5.822	-1.677	4.145	9.918	5.623	5.822	1.677	0.118	1.081
3c	-5.626	-1.370	4.256	9.707	5.179	5.626	1.37	0.109	1.058
3d	-5.589	-1.240	4.349	9.789	5.060	5.589	1.24	0.106	1.067
3e	-5.687	-1.498	4.189	9.717	5.331	5.687	1.498	0.112	1.059
3f	-5.694	-1.563	4.131	9.627	5.361	5.694	1.563	0.113	1.049
3g	-5.669	-1.546	4.123	9.561	5.311	5.669	1.546	0.112	1.042
3h	-5.542	-1.601	3.941	8.979	5.096	5.542	1.601	0.107	0.979
Trolox	-5.336	-0.107	5.229	10.533	3.697	5.336	0.107	0.078	1.148

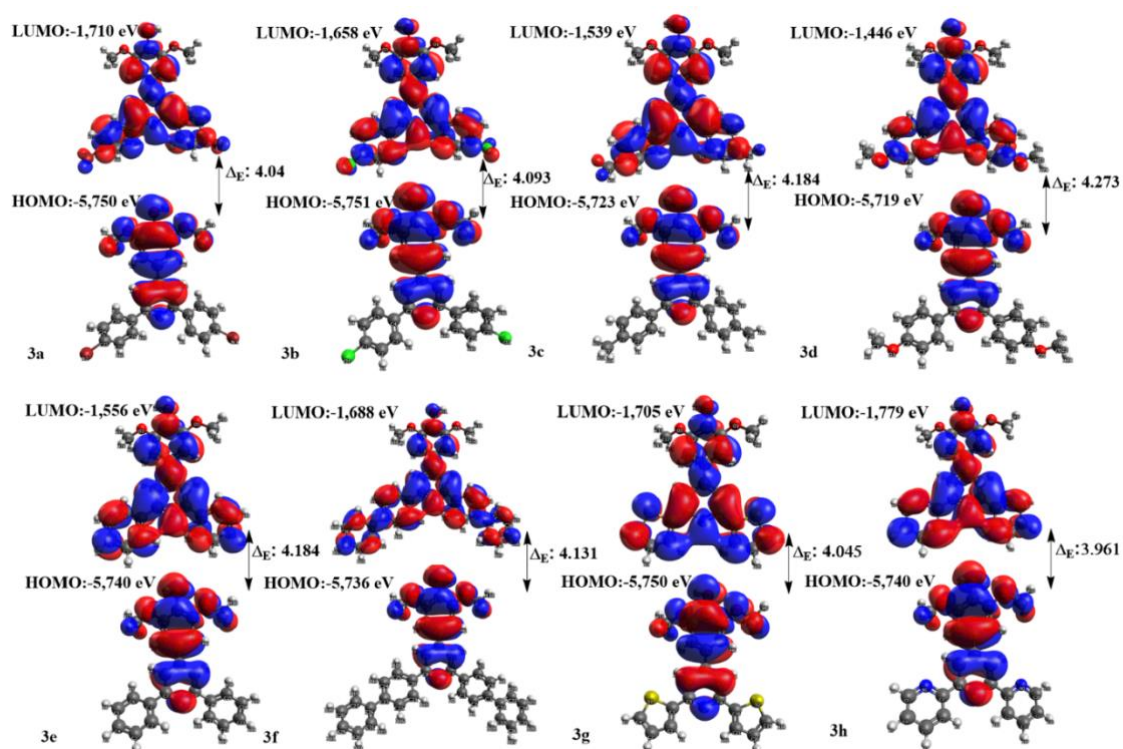


Figure 7. Calculated HOMO-LUMO band gap map (Frontier Molecular Orbitals) of the studied compounds using water.

Table 2. Calculated parameters of the studied compounds (3a-h) using water.

Sample	E_{HOMO}	E_{LUMO}	ΔE	ω^-	ω^+	I	A	Ra	Rd
3a	-5.750	-1.710	4.040	9.574	5.494	5.750	1.71	0.115	1.044
3b	-5.751	-1.658	4.093	9.675	5.487	5.751	1.658	0.115	1.055
3c	-5.723	-1.539	4.184	9.784	5.407	5.723	1.539	0.114	1.066
3d	-5.719	-1.446	4.273	9.936	5.371	5.719	1.446	0.113	1.083
3e	-5.74	-1.556	4.184	9.819	5.443	5.740	1.556	0.114	1.070
3f	-5.736	-1.688	4.131	9.561	5.464	5.736	1.688	0.115	1.042
3g	-5.750	-1.705	4.045	9.584	5.493	5.75	1.705	0.115	1.045
3h	-5.740	-1.779	3.961	9.406	5.484	5.74	1.779	0.115	1.025
Trolox	-5.424	-0.147	5.277	10.830	3.868	5.424	1.71	0.081	1.181

On the other hand, electron affinity plays an important role in antioxidants, which is relevant because antioxidants function by donating electrons to free radicals or reactive oxygen species (ROS), thereby neutralizing their damaging effects. Free radicals are highly reactive species that contain unpaired electrons. They are generated as byproducts of various physiological processes or through external factors such as exposure to pollutants or radiation. These free radicals can cause oxidative stress by initiating chain reactions that damage cellular components, leading to various diseases and aging. By looking at the obtained data from Tables 1 and 2, it can be said that the electron affinity of the studied compounds was between 1.779-1.24 in gas phase compared to (Trolox 0.147) and between 1.779-1.446 in water. Furthermore, ionization energy plays a significant role in the context of antioxidant agents as it influences the stability and reactivity of the antioxidant compounds. Typically, higher ionization energy indicates a greater difficulty in removing an electron from the molecule. By examining the ionization energy, one can gain insights into the potential electron transfer processes and the overall antioxidant activity of the compounds. This means that the antioxidant molecule is less likely to donate electrons to free radicals or reactive oxygen species (ROS). Again by looking at the obtained data from Tables 1 and 2, it can be seen that the ionization values of the studied compounds were between 5.83-5.542 and 5.750-5.719 in gas phase and water, respectively.

C.1. Donor-Acceptor Maps and Fukui function

Donor and acceptor map (DAM) is a widely used helpful tool to predict the free radical stabilizing ability of a compound. This is achieved by either donating electrons (known as an antioxidant), accepting electrons (known as an anti-reductant), or sometimes both (Figure 8). The mentioned mechanisms play a crucial role in stabilizing free radicals, which prevents them from reacting with various bioactive molecules. The significance of scavenging free radicals in the medical field stems from its capacity to mitigate oxidative stress, a known contributor to cell damage and neurodegenerative disorders. [53, 54] The obtained DAM values (Ra and Rd) are shown in Table 1 and 2. Based on these data in gas phase, one can observe that **3h** was a good antiradical compound among the series while other compounds were defined as a less effective electron acceptor than F atom and less effective electron donor than Na atom relatively following the good antioxidant power rate **3h**>**3g**>**3f**>**3e**>**3c**>**3d**>**3a**>**3b** respectively.

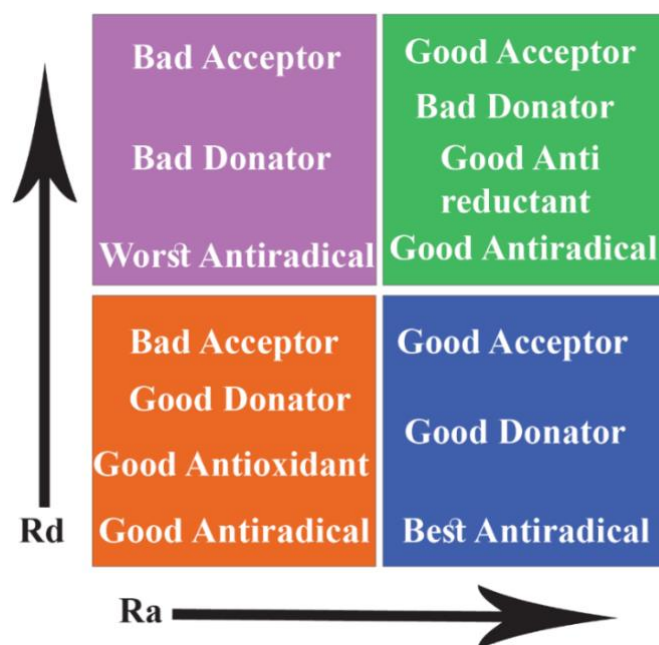


Figure 8. Distinct areas in Electron Donor-Acceptor Map

Through the application of Fukui functions, it becomes feasible to predict the local reactivity of distinct regions within molecules, providing relevant insights into the reactive sites and the types of biochemical

reactions in which the studied compounds may participate; in another way, the f^+ Fukui function, which pertains to the LUMO orbital, serves as an indicator of the molecule's nucleophilic susceptibility. Conversely, the f^- Fukui function, associated with the HOMO orbital, serves as an indicator of its electrophilic susceptibility. The combined average of the f^+ and f^- Fukui functions approximates the susceptibility to radical electron transfer in a studied system. The Fukui theory presents a pragmatic and straightforward approach for calculating chemical information, particularly in the context of early transition states. It provides a realistic framework to analyze and understand the behavior of molecules during chemical reactions, shedding light on their reactivity and the factors influencing their susceptibility to nucleophilic and electrophilic attacks. At the end the utilization of the Fukui function projection onto the van der Waals surface has demonstrated its efficacy in facilitating effective communication and information exchange with different disciplines. This approach serves as a valuable tool to bridge, enabling a clearer understanding and meaningful discussions regarding chemical phenomena and interactions in a studied system. In this manner, Table 3 shows the Fukui indices evaluated using Hirshfeld population analysis obtained using B3LYP theory and def-2 TZVP base set in gas phase. As it is observed that high f^0 values which are associated mostly with the first highest values of oxygen atoms associated with OH groups, for some derivatives it was observed based on the radical Fukui function that the atoms with high F^0 values following associate oxygen atom with OH group were nearly same in value in both water and gas phase and based on the studied theory and basis sets limitations, it can be relatively accepted which clearly contribute to the antioxidant radically attacking position. For instance, by looking at Table 3 under gas phase it can be observed that in **3a** compound, O22 atom was associated with the highest F^0 values which is underlined with bold **0.322782** which indicates the higher ability for a possible radical attack to occur at this position. The same trends were observed for the other studied compounds as well.

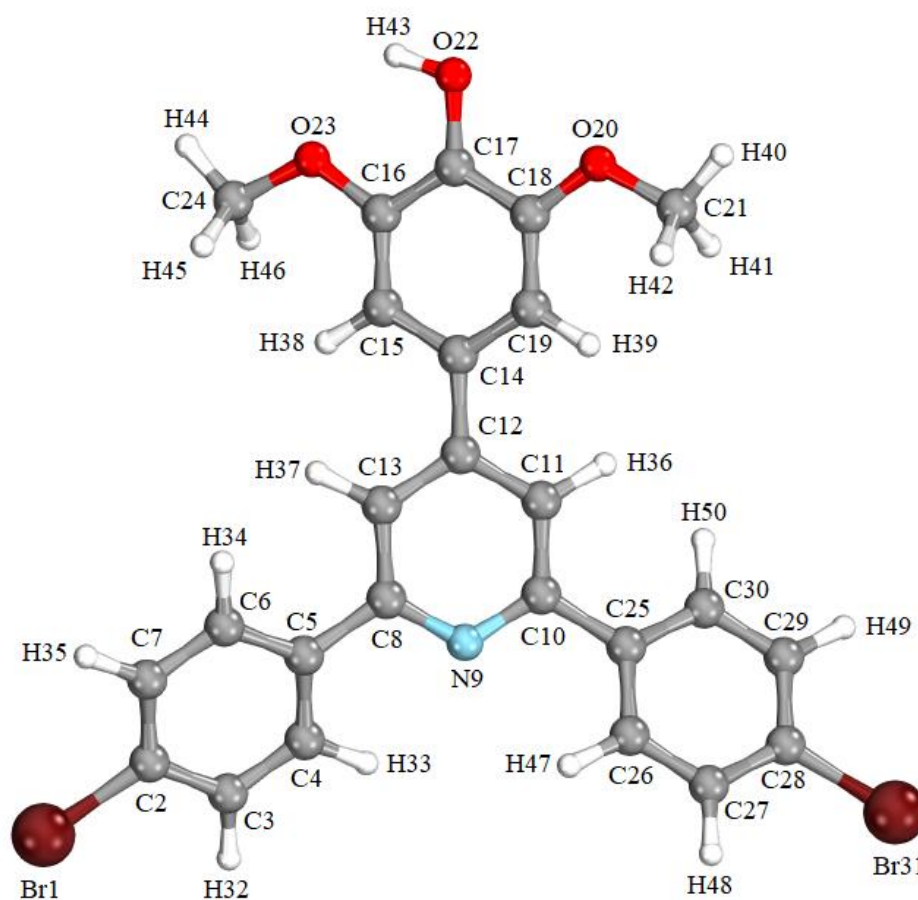


Figure 9. Atom numbering of 3a

Table 3. Fukui functional results for 3a.

Atom	Fukui Indices		
	(f ⁻)	(f ⁺)	(f ⁰)
Br-1	-0.13679	0.00615	0.279724
C-2	-0.00346	0.042246	0.04916
C-3	-0.05134	-0.016436	0.086236
C-4	-0.0423	-0.009302	0.075302
C-5	-0.0043	0.006664	0.015254
C-6	-0.04214	-0.019601	0.064677
C-7	-0.05977	-0.022576	0.096972
C-8	0.025754	0.083969	0.032461
N-9	-0.23645	-0.152105	0.320785
C-10	0.02645	0.083512	0.030612
C-11	-0.06858	-0.035968	0.101198
C-12	-0.03541	0.024757	0.095577
C-13	-0.06827	0.002244	0.13879
C-14	-0.02116	0.027887	0.070201
C-15	-0.09104	-0.047457	0.134619
C-16	0.044277	0.085636	-0.002918
C-17	0.024585	0.114863	0.065693
C-18	0.054461	0.103246	-0.005676
C-19	-0.08933	-0.052339	0.126313
O-20	-0.15214	-0.101422	0.20286
C-21	0.017395	0.039143	0.004353
O-22	-0.22459	-0.126406	0.322782
O-23	-0.15202	-0.117518	0.186528
C-24	0.019095	0.038497	0.000307
C-25	-0.00361	0.009016	0.016226
C-26	-0.04181	-0.008498	0.07512
C-27	-0.05117	-0.017894	0.084438
C-28	-0.00267	0.042836	0.048176
C-29	-0.05907	-0.020759	0.097381
C-30	-0.04121	-0.018138	0.064278
Br-31	-0.13588	0.008303	0.280071
H-32	0.028904	0.055527	-0.002281
H-33	0.025099	0.04579	-0.004408
H-34	0.027046	0.040952	-0.01314
H-35	0.025793	0.052925	0.001339
H-36	0.015422	0.04023	0.009386
H-37	0.014826	0.045478	0.015826
H-38	0.01969	0.044366	0.004986
H-39	0.019548	0.043455	0.004359
H-40	0.032393	0.06297	-0.001816
H-41	0.026591	0.04502	-0.008162
H-42	0.025435	0.04265	-0.00822
H-43	0.141838	0.181928	-0.101748
H-44	0.029941	0.045522	-0.01436
H-45	0.028736	0.042922	-0.01455
H-46	0.032458	0.061659	-0.003257
H-47	0.025251	0.045649	-0.004853
H-48	0.029005	0.055136	-0.002874
H-49	0.026327	0.05335	0.000696
H-50	0.027874	0.042209	-0.013539

IV. CONCLUSION

Eight novel 2,4,6-triarylpyridines derived from syringaldehyde were designed and successfully synthesized via a multicomponent one-step preparation method. The structures of all the title compounds (**3a-h**) have been illuminated by FTIR and NMR spectroscopic techniques. Those compounds were evaluated for their antioxidant activities comparing with a known reference compound, Trolox. The studied compounds exhibited considerable antioxidant effects in all the studied assays. In particular, three title derivatives (**3c**, **3d**, **3h**) exhibited the highest antioxidant activities among the studied series. In addition, by using the B3LYP theory and SVP, TZVP basis sets in DFT studies, a comprehensive theoretical quantum computing approach for the synthesized compounds was established and electronic structure descriptive parameters called Fukui indices associated with the radical scavenging potential were determined. Finally, the structure-activity relationship was revealed by comparing the theoretical and experimental results. The proposed antioxidant activity mechanism of the obtained compounds was supported by Fukui function results. According to the obtained radicalic Fukui indice value (f^0), the highest value associated with the OH functional group in **3a** could explain the antioxidant mechanism of **3a** occurring on this oxygen atom. This approach can serve as a good explaining way for the antioxidant mechanism of similar compounds.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the Departments of Chemistry at Düzce, Sakarya, and Erzincan Binali Yıldırım Universities for providing access to laboratory facilities, which greatly contributed to the successful completion of this research.

V. REFERENCES

- [1] J. D. Hayes, A.T. Dinkova-Kostova, K. D. Tew, "Oxidative stress in cancer", *Cancer Cells*, vol. 38, pp. 167-197, 2020.
- [2] A. M. Pisoschi, A. Pop, F. Iordache, L. Stanca, G. Predoi, A. I. Serban, "Oxidative stress mitigation by antioxidants-an overview on their chemistry and influences on health status", *European Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 209, 112891, 2021
- [3] M. V. Irazabal, V. E. Torres, "Reactive oxygen species and redox signaling in chronic kidney disease", *Cells*, vol. 9, 1342, 2020
- [4] H. Sies, D. P. Jones, "Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents", *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 21, pp. 363-383, 2020
- [5] N. Zhang, P. Hu, Y. Wang, Q. Tang, Q. Zheng, Z. Wang, Y. He, "A reactive oxygen species (ROS) activated hydrogen sulfide (H₂S) donor with self-reporting fluorescence", *ACS Sensors*, vol. 5, pp. 319-326, 2020
- [6] Singh A, Kukreti R, Saso L, Kukreti S. Oxidative Stress: A Key Modulator in Neurodegenerative Diseases. *Molecules*; vol. 24(8), pp. 1583, 2019.
- [7] Bartosz, G. Reactive oxygen species: Destroyers or messengers?, *Biochemical Pharmacology*, Vol77,(8), pp.1303-1315, 2009.
- [8] Xu, D., Hu, M.J., Wang, Y.Q., Cui, Y.L. Antioxidant Activities of Quercetin and Its Complexes for Medicinal Application. *Molecules* vol.24, pp.1123, 2019.
- [9] Gulcin, I. Antioxidants and antioxidant methods: An updated overview. *Arch Toxicol.*, Vol.94, pp. 651-715, 2020.

- [10] D. Yancheva, E. Velcheva, Z. Glavcheva, B. Stamboliyska, A. Smelcerovic, Insights in the radical scavenging mechanism of syringaldehyde and generation of its anion, *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1108, pp. 552-559, 2016.
- [11] Chmiel M, Stompor-Gorący M. The Spectrum of Pharmacological Actions of Syringetin and Its Natural Derivatives-A Summary Review. *Nutrients*. Vol.14(23), pp. 5157, 2022. <https://doi.org/10.3390/nu14235157>.
- [12] Zhou, W.; Yang, L.; Deng, K.; Xu, G.; Wang, Y.; Ni, Q.; Zhang, Y. Investigation of isoflavone constituents from tuber of *Apiosamericana* Medik and its protective effect against oxidative damage on RIN-m5F cells. *Food Chem*. Vol. 405, pp.134655, 2023.
- [13] Bozkurt, A., Mustafa, G., Tarık, A., Adile, O., Murat, S., Mesut, K., Yıldırım, K., Coskun, S., & Murat, C. Syringaldehyde exerts neuroprotective effect on cerebral ischemia injury in rats through anti-oxidative and anti-apoptotic properties. *Neural Regeneration Research*. 9(21), pp 1884-1890, 2014. doi: 10.4103/1673-5374.145353
- [14] Meshcheryakova, S.A., Kayumova, A.F., Kang, Y., Shumadalova, A., Vinogradova, Y.E., Khuzin, D.A., Ziyakaeva, K.R., Kiseleva, O.D., Gabdulhakova, I., Beylerli, O., Gareev, I.F., Sufianov, A.A., Sufianova, G.Z., Ahmad, A., Yang, G., & Guo, Z. The Effect Of Whole Blood And Bone Marrow With The Addition Of Pyrimidine-2,4(1h,3h)-Dione Thietanyl Derivatives On Free Radical Oxidation. *Curr Med Chem*. Vol.30(17), pp.1993-2004, 2023 doi: 10.2174/0929867329666220805125638.
- [15] Lee DH, Folsom AR, Harnack L, Halliwell B, Jacobs DR Jr. Does supplemental vitamin C increase cardiovascular disease risk in women with diabetes? *Am J Clin Nutr*. Vol.80(5), pp.1194-200, 2004. doi: 10.1093/ajcn/80.5.1194. PMID: 15531665.
- [16] Akman, T.C, Simsek, S., Kayir, Ö., Zeynep, A., Aksit H., Genc, N. LC-ESI-MS/MS Chemical Characterization, Antioxidant and Antidiabetic Properties of Propolis Extracted with Organic Solvents from Eastern Anatolia Region. *Chem. Biodiversity*. Vol.20, e202201189, 2023.
- [17] Nikolaos Nenadis, Olga Lazaridou, and Maria Z. Tsimidou *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol.55 (14), pp.5452-5460, 2007. doi: 10.1021/jf070473q
- [18] Grimme S, Antony J, Schwabe T, Mück-Lichtenfeld C. Density functional theory with dispersion corrections for supramolecular structures, aggregates, and complexes of (bio)organic molecules. *Org Biomol Chem*. Vol. 5(5), pp.741-58, 2007. doi: 10.1039/b615319b. Epub 2007 Jan 26. PMID: 17315059.
- [19] Mendoza Huizar, L. H., Rios-Reyes, C. H., Maturano, O., Robles, J., Rodriguez, J. A. "Chemical reactivity of quinclorac employing the HSAB local principle - Fukui function" *Open Chemistry*, vol. 13, no. 1, pp. 000010151520150008. 2015. <https://doi.org/10.1515/chem-2015-0008>
- [20] Tasheh, N.S., Fouegue, A.D.T., Ghogomu, J.N., Investigation of the Antioxidant and UV Absorption Properties of 2-(2'-hydroxy-5'-methylphenyl)-benzotriazole and Its Ortho-Substituted Derivatives via DFT/TD-DFT, *Comput. Chem.* 09 (2021) 161–196. <https://doi.org/10.4236/cc.2021.93010>.
- [21] Kenchappa, Yadav D. Bodke, A. Chandrashekar, Sandeep Telkar, K.S. Manjunatha, M. Aruna Sindhe, Synthesis of some 2, 6-bis (1-coumarin-2-yl)-4-(4-substituted phenyl) pyridine derivatives as potent biological agents, *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 10, pp. S1336-S1344, 2017.
- [22] Marsden S. Blois, Antioxidant Determinations by the Use of a Stable Free Radical, *Nature*, Vol. 181, pp 1199-1200, 1958.

- [23] R Re, N Pellegrini, A Proteggente, A Pannala, M Yang, C Rice-Evans. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay, *Free Radic Biol Med.* Vol. 9-10 pp1231-1237, 1999.
- [24] Neese, F. Software update: The ORCA program system-Version 5.0, *WIREs Comput. Mol. Sci.* Vol.12, pp. 1–15, 2022. <https://doi.org/10.1002/wcms.1606>
- [25] Becke, A.D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange, *J. Chem. Phys.* 98. 5648–5652, 1993. <https://doi.org/10.1063/1.464913>.
- [26] Lee, C., Yang, W., Parr, R.G. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density, *Phys. Rev. B.* 37.785–789, 1988. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.785>.
- [27] Stephens, P.J., Devlin, F.J., Chabalowski, C.F., Frisch, M.J. Ab Initio Calculation of Vibrational Absorption and Circular Dichroism Spectra Using Density Functional Force Fields, *J. Phys. Chem.* 98. 11623–11627, 1994 <https://doi.org/10.1021/j100096a001>.
- [28] Vosko, S.H., Wilk, L., Nusair, M. Accurate spin-dependent electron liquid correlation energies for local spin density calculations: a critical analysis, *Can. J. Phys.* 58. 1200–1211, 1980. <https://doi.org/10.1139/p80-159>.
- [29] Weigend, F., Ahlrichs, R. Balanced basis sets of split valence, triple zeta valence and quadruple zeta valence quality for H to Rn: Design and assessment of accuracy, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 7. pp.3297, 2005. <https://doi.org/10.1039/b508541a>.
- [30] Grimme, S., Antony, J., Ehrlich, S., Krieg, H. A consistent and accurate ab initio parametrization of density functional dispersion correction (DFT-D) for the 94 elements H-Pu, *J. Chem. Phys.* Vol.132, 154104.2010. <https://doi.org/10.1063/1.3382344>
- [31] Grimme, S., Ehrlich, S., Goerigk, L. Effect of the damping function in dispersion corrected density functional theory, *J. Comput. Chem.* 32. 1456–1465. 2011. <https://doi.org/10.1002/jcc.21759>.
- [32] Neese, F., Wennmohs, F., Hansen, A., Becker, U. Efficient, approximate and parallel Hartree–Fock and hybrid DFT calculations. A ‘chain-of-spheres’ algorithm for the Hartree–Fock exchange, *Chem. Phys.* 356. 98–109. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2008.10.036>.
- [33] Weigend, F. Accurate Coulomb-fitting basis sets for H to Rn, *Phys. Chem. Chem. Phys.* Vol. 8, pp.1057, 2006. <https://doi.org/10.1039/b515623h>.
- [34] Barone, V., Cossi, M. Quantum Calculation of Molecular Energies and Energy Gradients in Solution by a Conductor Solvent Model, *J. Phys. Chem. A.* Vol. 102, pp.1995–2001, 1998. <https://doi.org/10.1021/jp9716997>.
- [35] Cornell T, Hutchison GR. Version 1.2.0. Avogadro Chemistry; Last modified July 24, 2018. Accessed January 1, 2023. <http://avogadro.cc>
- [36] Hanwell, M.D., Curtis, D.E., Lonie, D.C., Vandermeersch, T., Zurek, E., Hutchison, G.R. Avogadro: an advanced semantic chemical editor, visualization, and analysis platform. *J Cheminform* 4, 17 (2012). <https://doi.org/10.1186/1758-2946-4-17>
- [37] Knizia, G. Intrinsic Atomic Orbitals: An Unbiased Bridge between Quantum Theory and Chemical Concepts. *J. Chem. Theory Comput.* 9, 4834–4843. 2013.
- [38] Knizia, G. & Klein, J. E. M. N. Electron Flow in Reaction Mechanisms—Revealed from First Principles. *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 5518–5522. 2015.

- [39] Gázquez, J.L., Cedillo, A., Vela, A. Electrodonating and Electroaccepting Powers, *J. Phys. Chem. A.* 111, 1966–1970, 2007. <https://doi.org/10.1021/jp065459f>.
- [40] Zhong, Y., Shahidi, F. 12 - Methods for the assessment of antioxidant activity in foods. This chapter is reproduced to a large extent from an article in press by the authors in the *Journal of Functional Foods.*, in: F.B.T.-H. of A. for F.P. Shahidi (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Food Sci. Technol. Nutr., Woodhead Publishing, 2015: pp. 287–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-089-7.00012-9>.
- [41] Li, Y., Evans, J.N.S. The Fukui Function: A Key Concept Linking Frontier Molecular Orbital Theory and the Hard-Soft-Acid-Base Principle, *J. Am. Chem. Soc.* 117, 7756–7759, 1995. <https://doi.org/10.1021/ja00134a021>.
- [42] Chattaraj, P.K., Cedillo, A., Parr, R.G. Variational method for determining the Fukui function and chemical hardness of an electronic system, *J. Chem. Phys.* 103, 7645–7646, 1995. <https://doi.org/10.1063/1.470284>.
- [43] Vela, A., Gázquez, J.L. A relationship between the static dipole polarizability, the global softness, and the fukui function, *J. Am. Chem. Soc.* 112, 1490–1492, 1990. <https://doi.org/10.1021/ja00160a029>.
- [44] Flores-Moreno, R., Melin, J., Ortiz, J. V., Merino, G. Efficient evaluation of analytic Fukui functions, *J. Chem. Phys.* Vol. 129, 224105, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.3036926>.
- [45] Flores-Moreno, R. Symmetry Conservation in Fukui Functions, *J. Chem. Theory Comput.* Vol.6, 48–54, 2010. <https://doi.org/10.1021/ct9002527>
- [46] Brus, L.E. A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites, *J. Chem. Phys.* 79, pp.5566–5571, 1983. <https://doi.org/10.1063/1.445676>.
- [47] Cederbaum, L.S., Domcke, W., Schirmer, J., Von Niessen, W., Diercksen, G.H.F., Kraemer, W.P. Correlation effects in the ionization of hydrocarbons, *J. Chem. Phys.* Vol.69, pp.1591–1603, 1978. <https://doi.org/10.1063/1.436733>
- [48] Szabo A., Ostlund, N. S. *Modern Quantum Chemistry Introduction to Advanced Electronic Structure Theory*, Dover Publications, New York, 1996.
- [49] Parr, R.G., Weitao, Y. *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules*, Oxford University Press, 1995. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195092769.001.0001>.
- [50] Cindrić M, Sović I, Mioč M, Hok L, Boček I, Roškarić P, Butković K, Martin-Kleiner I, Starčević K, Vianello R, Kralj, M., Hranjec, M. Experimental and Computational Study of the Antioxidative Potential of Novel Nitro and Amino Substituted Benzimidazole/Benzothiazole-2-Carboxamides with Antiproliferative Activity. *Antioxidants.* Vol.8(10), pp. 477, 2019, <https://doi.org/10.3390/antiox8100477>
- [51] Soobrattee, M.A., Neergheen, V.S., Luximon-Ramma A., Aruoma O.I., Bahorun T. Phenolics as potential antioxidant therapeutic agents: mechanism and actions. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis.* Vol.579, pp. 579:200–213, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2005.03.023>
- [52] Musatat, AB, Atahan, A, Ergün, A, Çıkrıkçı, K, Gençer, N, Arslan, O, et al. Synthesis, enzyme inhibition, and molecular docking studies of a novel chalcone series bearing benzothiazole scaffold. *Biotechnol Appl Biochem.* Vol.70, pp.1357– 1370, 2023. <https://doi.org/10.1002/bab.2445>

[53] P.M. Becker, Antireduction: an ancient strategy fit for future, *Biosci. Rep.* 36 (2016). <https://doi.org/10.1042/BSR2016008>

[54] Macías-Hernández, E.C., Romero-Chávez, M. M., Mojica-Sánchez, J.P., Pineda-Urbina, K., Martínez, S.T.M., Jimenez-Ruiz, E. I., Via, L. D., Ramos-Organillo, Á. Synthesis and characterization of new monothiooxalamides containing pyridine nuclei with promising antiproliferative and antioxidant activity, *Journal of Molecular Structure*, Vol.1265, pp.133360, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133360>.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

A Novel Ensemble Feature Selection Technique for Cancer Classification Using Logarithmic Rank Aggregation Method

 Hüseyin Güney^{a*},  Hüseyin Öztoprak^{b,c}

^a Department of Computer Engineering, Bahçeşehir Cyprus University, Nicosia, Northern Cyprus, Turkey.

^b Department of Electrical and Electronics Engineering, Cyprus International University, Nicosia, Northern Cyprus, Turkey.

^c Signal and Technology Research Lab, Cyprus International University, Nicosia, Northern Cyprus, Turkey.

* Corresponding Author, Email: huseyin.guney@baucyprus.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1225446

ABSTRACT

Recent studies have shown that ensemble feature selection (EFS) has achieved outstanding performance in microarray data classification. However, some issues remain partially resolved, such as suboptimal aggregation methods and non-optimised underlying FS techniques. This study proposed the logarithmic rank aggregate (LRA) method to improve feature aggregation in EFS. Additionally, a hybrid aggregation framework was presented to improve the performance of the proposed method by combining it with several methods. Furthermore, the proposed method was applied to the feature rank lists obtained from the optimised FS technique to investigate the impact of FS technique optimisation. The experimental setup was performed on five binary microarray datasets. The experimental results showed that LRA provides a comparable classification performance to mean rank aggregation (MRA) and outperforms MRA in terms of gene selection stability. In addition, hybrid techniques provided the same or better classification accuracy as MRA and significantly improved stability. Moreover, some proposed configurations had better accuracy, sensitivity, and specificity performance than MRA. Furthermore, the optimised LRA drastically improved the FS stability compared to the unoptimised LRA and MRA. Finally, When the results were compared with other studies, it was shown that optimised LRA provided a remarkable stability performance, which can help domain experts diagnose cancer diseases with a relatively smaller subset of genes.

Keywords: *Microarray Data, Ensemble Learning, Aggregation Methods, Support Vector Machine Recursive Feature Elimination (SVM-RFE)*

Kanser Sınıflandırma için Logaritmik Sıra Birleştirme Yöntemini Kullanan Yeni Topluluk Öznitelik Seçim Tekniği

ÖZET

Son araştırmalar, topluluk öznitelik seçiminin (TÖS) mikrodizi veri sınıflandırmasında olağanüstü bir başarı elde ettiğini göstermiştir. Bununla birlikte, yetersiz birleştirme yöntemleri ve optimize edilmemiş ÖS teknikleri gibi konuların kısmen çözülmüş olarak kaldığı görülmektedir. Bu çalışma, TÖS yöntemlerinde özellik birleştirmeyi geliştirmek için logaritmik sıralama birleştirme (LRA) yöntemini önerdi. Ek olarak, önerilen yöntemin performansını geliştirmek için birkaç yöntemle birlikte kullanan

hibrit yöntemler sunulmuştur. Ayrıca, öznitelik seçiminin optimizasyonunun etkisini ölçmek için optimize edilmiş öznitelik seçim tekniğinden elde edilen öznitelik sıralamalarına da önerilen yöntem uygulanmıştır. Hazırlanan deney, beş ikili mikrodizi veri seti üzerinde gerçekleştirilmiş olup, deney sonuçları, LRA'nın ortalama sıra birleştirme yöntemine (MRA) kıyaslanabilir bir sınıflandırma performansı sağladığını ve gen seçim istikrarı açısından MRA'dan daha iyi performans elde ettiğini göstermiştir. Ek olarak, hibrit teknikler, MRA ile aynı veya daha iyi sınıflandırma doğruluğu sağladı ve gen seçim istikrarını önemli ölçüde artırdı. Ayrıca önerilen bazı konfigürasyonlar, MRA'dan daha iyi doğruluk, hassasiyet ve özgüllük performansına ulaştı. Ayrıca, optimize edilmiş LRA, optimize edilmemiş LRA ve MRA'ya kıyasla gen seçim istikrarını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Son olarak, sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, optimize edilmiş LRA'nın dikkate değer bir gen seçim istikrarı sağladığı görülmüştür ve bu çalışmanın bu alanda çalışan uzmanların kanser teşhisinde nispeten daha küçük bir gen kümesi kullanarak daha isabetli teşhis koymalarına yardımcı olabileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrodizi Veri Kümesi, Topluluk Öğrenme, Birleştirme Yöntemleri, Destek Vektör Makineleri, Tekrarlayan Öznitelik Seçimi (SVM-RFE)

I. INTRODUCTION

With new technologies, many tools, such as microarray technology and medical imaging, are available for obtaining biological data. Since DNA microarray gene expressions are representations of human genes, they are promising for detecting genetic modifications [1]. The analysis of microarray data is a critical task. Therefore, DNA microarrays have been extensively studied to develop diagnosis systems using computational intelligence and power. However, developing an intelligent system for microarray-based cancer diagnosis is challenging due to its characteristics, such as high dimensionality and low sample size.

Microarray-based cancer diagnosis task is a classification problem in the machine learning (ML) domain; therefore, a diagnosis system can be developed using supervised ML algorithms to select the most relevant genes and classify patient data as healthy or cancer with the selected genes. In addition, multivariate feature selection (FS) techniques can help with accurate gene selection since correlation among genes is needed to be considered during the gene selection process.

Feature selection techniques are broadly classified into filter, embedded, and wrapper techniques [2]. Furthermore, ensemble feature selection (EFS) has been widely used for microarray-based cancer diagnosis due to its significant performance for selection stability [3-6]. EFS has partially resolved the instability problem of conventional FS techniques by using resampling techniques to create diversity among the resampled datasets. However, while EFS improves the accuracy and stability of the underlying model, it has a more complex structure than conventional approaches in terms of computational and time complexity. Furthermore, the complexity of the EFS increases in parallel to its ensemble size.

There are two fundamental performance criteria for FS techniques in the context of biomarker gene selection using microarray datasets. Like all other classification problems, one is accuracy to measure how accurately the classification is performed. The accuracy can be further detailed by sensitivity, specificity, and precision measures, all exploited in this study. The second is the stability of the selected features while input data is slightly changed [4]. The stability of gene selection is important mainly for two reasons. First, if the selected features vary greatly, there will be a lack of clarity in designing the final classifier with the minimum number of features to test new samples. Second, domain experts will have difficulty obtaining more information on the nature of the disease due to uncertainty in the relevant genes. Therefore, an accurate and robust model can help domain experts make more confident decisions about cancer diagnosis with less effort, time, and resources.

When considering all FS techniques, embedded FS techniques seem to be the most appropriate for a study that uses EFS. Therefore, this study proposes novel EFS methods to overcome partially resolved issues for this problem domain, such as limited research on aggregation methods and the lack of optimisation of the classifier hyperparameters for classifier-dependent feature selection. In this paper, there are three main contributions. The first contribution is the Logarithmic Rank Aggregation (LRA), which replaces the commonly employed Mean Rank Aggregation (MRA). Second, the First Iteration Framework exploits the initial SVM-RFE ranks and suggests Hybrid Methods. The third and last contribution of this paper is the optimisation of the cost parameter of the SVM in the ranking algorithm of SVM-RFE that is used in EFS.

The remainder of this paper is organised as follows. Section 2 examines related works in the current literature. Section 3 introduces SVM, SVM-RFE, and EFS to provide background information for the proposed methods. Section 4 explains logarithmic, initial SVM-RFE output-based methods, and cost parameter optimisation of SVM-RFE. The results of the experimental procedure are presented in Section 5. The discussion and comparison with conventional methods are mentioned in Section 6. Finally, the conclusion of this study is presented in Section 7.

II. RELATED WORK

This section examines the related works published in the current literature to investigate the studies related to microarray data. Since the proposed method is a machine learning algorithm for microarray-based cancer diagnosis, this section mentions EFS-based ML methods proposed in the literature. The summary of the related works listed in this section are given in Table 1 with their strengths and limitations.

In the article [7], Barbara Pes has conducted extensive experiments to investigate the impact of EFS on the accuracy and robustness of machine learning algorithms for wide datasets. Several FS techniques were implemented in the study, and ensemble methods of these techniques have been evaluated along with the single methods. In [8], feature selectors' reliability assessment was used for developing an EFS method. This study used a classification algorithm to evaluate the selected features by the ensemble method. In [9], filter FS techniques and classifiers-based EFS was proposed for microarray data. In the first step, five filter FS methods were applied for selecting features, and classifiers were used to evaluate the selected features. In the last step, an ensemble of the classifier was developed using simple voting to combine the predictions of each classifier to deliver the final prediction. Ten microarray datasets were used for model evaluation. In the study [10], the authors proposed ensemble SVM-RFE (ESVM-RFE) for classifying microarray data using bootstrap aggregation. It was stated that ensemble learning improved classification performance. The study [11] proposed the multi-filter enhanced genetic ensemble (MF-GE) system as a hybrid gene selection method. It was stated that the proposed method improved classification performance while reducing the selected feature set size. In the article [12], the authors used homogeneous and heterogeneous approaches for developing EFS methods. Therefore, they proposed EFS methods that used one or many FS techniques. For the evaluation of the proposed methods, an SVM classifier was deployed. It was concluded that both approaches achieved comparable performance with other ensemble learning-based FS methods and outperformed non-ensemble FS methods. The article [13] proposed a two-stage algorithm that combined FS and prediction by extending a type of hetero-associative neural network. In the first stage of the design, associative memory was generated, and gene selection was done in the next step. The conclusion was drawn that the proposed method performed similarly to others with reduced computational complexity.

An ensemble method for gene selection from breast cancer microarray data was proposed in [14]. The proposed method was an ensemble filter selection method based on Entropy and SNR evaluation function (EnSNR). The entropy method was used for measuring the uncertainty of a random experiment outcome, and feature discriminative power was measured by SNR. It was shown that EnSNR obtained high accuracy with fewer genes when it was compared to other methods. In [15], a hybrid of filter and

wrapper FS techniques was proposed as an EFS method. In the first step, various FS techniques were used to obtain feature rank links, including Relief, Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR), and Feature Correlation (FC). In the next step, feature aggregation was done using Fuzzy Gaussian membership. In the final step, the wrapper FS technique, Improved Binary Particle Swarm Optimisation (IBPSO), was applied to select features. After feature selection, an SVM classifier with a non-linear radial basis function was employed for feature subset evaluation. It was mentioned that the proposed method achieved better performance than other FS methods. The research [16] conducted an empirical study to compare the proposed method with the literature. In the study, to develop an EFS method Fast Correlation FS technique was employed. Finally, two stability metrics were used to measure the model's robustness.

Momenzadeh et al. proposed a novel feature selection method using a hidden Markov model (HMM) approach that integrates several FS techniques [17]. The proposed method incorporates five feature selection ranking methods: Bhattacharyya distance, entropy, receiver operating characteristic curve, t-test, and Wilcoxon. Diffuse large B-cell lymphoma, leukaemia and prostate cancer datasets were used for model evaluation, and it was stated that the HMM-based method outperformed Markov chain rank aggregation-based method and single FS techniques. The article [18] proposed the novel FS method, IG-MBKH, which is a combination of Information Gain (IG) and improved binary krill herd (MBKH) algorithms, where IG was used for gathering feature rankings, and MBKH was used for finding the most relevant subset of features. The study showed that IG-MBKH performs better than BKH, MBKH, and several other algorithms regarding the accuracy and the number of selected features.

In [19], a hybrid gene selection technique was developed using filter FS technique robust Minimum Redundancy Maximum Relevancy (rMRMR) and wrapper FS technique Modified Gray Wolf Optimizer (MGWO). In the setup, first, rMRMR was employed to select the most relevant genes, and the Modified Gray Wolf Optimizer (MGWO) algorithm was applied for further gene elimination to finding to smaller gene sets. While MGWO was applied, the TRIZ-inventive solution inspired a new approach to increase the population's diversity to enhance the gene selection process. Nine benchmarking datasets and SVM classifier were used to evaluate the developed method. The results obtained showed the effectiveness of the proposed method. The article [20] presents adaptive hypergraph embedded dictionary learning (AHEDL) model for microarray data classification. In the study, a dictionary was used to learn from the feature space, and then it was reconstructed. After that, l_2, l_1 -norm regularisation was used for gene selection. A hypergraph was created and injected to the model to capture the geometrical structure of the data. On the other hand, to solve the optimisation problem, an iterative updating algorithm was designed. The authors state that their method outperformed state-of-the-art methods.

Table 1. Related Works with Their Strengths and Limitations

	Method	Strength(s)	Limitation(s)
1	Feature selectors' reliability assessment-based EFS [8]	- Homogeneous and Heterogeneous Filter-based EFS method - Reliability assessment-based aggregation technique	- High computational complexity as an EFS method - Computationally complex classifier-based aggregation method - 10-Fold CV used for model validation
2	Filter-based EFS [9]	- Ensemble of Filters and Classifiers - Cost-effective FS techniques and classifiers	- Gene selection using filter methods - Simple voting aggregation - 10-Fold CV used for model validation
3	ESVM-RFE [10]	- Embedded FS-based Feature Selection - Enhanced version of SVM-RFE	- No optimisation of the FS technique - Weight Sum aggregation
4	MF-GE [11]	- Hybrid Ensemble Method (Filter + Wrapper) - Small gene subset selection	- Computationally Complex due to wrapper and hybrid - Mean and Majority voting aggregation
5	Hybrid EFS Methods [12]	- Hybrid Ensemble Method using Homogeneous and Heterogeneous approaches - Wide range of ensemble aggregation methods	- Computationally Complex due to hybrid approach and embedded FS techniques - No optimisation of Embedded FS techniques - 10-Fold CV used for model validation
6	HAM [13]	- Using an associative memory-based approach and Neural Networks for gene selection	- 5-Fold CV used for model validation - Large set of selected genes
7	EnSNR [14]	- Cost-effective FS Technique - Optimisation is used for gene selection	- Computationally complexity due to wrapper FS - 10-Fold CV used for model validation

8	Hybrid FS (Filter+Wrapper) [15]	- Hybrid Ensemble Method (Filter + Wrapper) - Improved Binary Particle Swarm Optimisation is used for gene selection - Fuzzy Gaussian rank aggregation	- High computational complexity due to wrapper FS technique and SVM-RFE - 10-Fold CV used for model validation
9	Fast Correlation-based EFS [16]	- Cost-effective FS Technique - Several aggregation methods for gene selection	- Classifier-independent FS Techniques - Simple aggregation method - 10-Fold CV used for model validation
10	HMM-based EFS [17]	- Markov chain rank aggregation - Cost-effective FS Techniques	- Classifier-independent FS Techniques - Complex aggregation method
11	IG-MBKH [18]	- Cost-effective FS Technique - Optimisation is used for gene selection	- Computationally complexity technique - 10-Fold CV used for model validation
12	Hybrid FS (rMRMR + MGWO) [19]	- Hybrid FS Method - Optimisation is used for gene selection	- Computationally complexity due to wrapper FS and SVM - 10-Fold CV used for model validation

In the literature, many studies proposed ensemble feature selection techniques for improving microarray data classification performance and gene selection stability. For this reason, this study focuses on the aggregation function of EFS since a more precise feature aggregation method can lead to a better ranking of the features in the ensemble feature list. For this purpose, a logarithmic scaling-based aggregation method was proposed to achieve a more accurate positioning of features in the ensemble feature list. Additionally, some hybrid frameworks were proposed to improve the performance of aggregation method using strengths of two different approaches. On the other hand, the impact of the optimisation algorithm was measured to investigate its effect on the performance of the proposed method. The following section explains background information, and Section 4 provides detailed information about the proposed methods.

III. BACKGROUND

In this section, background information is provided to facilitate understanding of the proposed methods, as the underlying classifier and FS techniques of this work, SVM, SVM-RFE, and RCV-based ensemble feature selection, are explained, respectively.

A. SUPPORT VECTOR MACHINE

Due to its outstanding performance as a supervised machine learning algorithm, SVM has been frequently used for classification. Hyperplane construction, margin maximisation, and kernel functions are the powerful characteristics of SVM. Briefly, SVM constructs a hyperspace using features and then finds and draws the hyperplane that separates the instances of classes using margin maximisation, finding maximum distances from each class for the hyperplane. [21,22]. An essential characteristic of SVM is its kernel functions, which allow access to higher space dimensions without explicitly defining the mapping function. The kernel functions of SVM can be divided into two groups, linear and non-linear, where any can be used for classification tasks.

Linear SVM can be optimised in two extreme configurations, hard-margin and soft-margin linear SVM. Hard-margin linear SVM linearly separates both classes, and no instance of any class is left in the region of the opposite class, if possible. On the other hand, in the soft-margin Linear SVM, some instances of any class can be left on the opposite side of the margin. This neglects some outlier instances to find the best hyperplane for class separation, which would help to increase classification accuracy. As a result, it depends on the cost parameter to identify a linear SVM as hard, soft, or in-between [21]. Increasing the cost parameter value narrows the hyperplane and brings the classifier closer to the hard margin and vice versa.

B. SUPPORT VECTOR MACHINE – RECURSIVE FEATURE ELIMINATION

Support Vector Machine Recursive Feature Elimination (SVM-RFE) [23] uses the backward elimination approach, which iteratively eliminates features to find the most relevant (informative) ones. It starts with

the entire feature set and drops the worst feature at each run until all features are ranked, and the surviving feature set becomes empty. SVM-RFE uses the SVM training process to obtain feature weights for feature ranking. After the weight vector is generated, the features are ordered according to their weights, where the feature with the highest weight is considered the best [5]. In the study [6], the elimination process was modified to speed up the FS process, and the elimination percentage parameter, E , and the StopValue parameters were introduced [6]. The elimination percentage parameter, E , eliminates the E percentage of features at each run, and this process continues until StopValue is reached. Once the StopValue is reached, the features are removed one by one, not as a group of features [6].

SVM-RFE [23] is a multivariate embedded FS technique that keeps the original value of the features. That is, it does not transform the features into a new space. It is also faster than wrapper FS techniques [2]. Therefore, as an embedded FS technique, SVM-RFE is suitable for gene selection using microarray datasets. Furthermore, it was observed that, regarding classification performance, SVM-RFE is competitive for the biomarker identification of microarray datasets but suffers from instability of gene selection [5,6].

C. ENSEMBLE FEATURE SELECTION

Ensemble feature selection (EFS) aims to improve the feature selection process by integrating ensemble learning into conventional FS techniques. EFS creates diversity in the feature selection process using data variation, FS technique variation, or both. As a result, EFS leads to better classification performance and stability of feature selection [4,6].

The EFS comprise three main stages. The first stage is to generate several resampled datasets from the original dataset using resampling techniques such as cross-validation or bootstrapping. The second stage includes feature ranking using a minimum one feature selection technique to generate all ranked feature lists. The final stage involves using an aggregation function to aggregate all generated lists into the final list (ensemble) [7]. In the literature, bootstrapping and cross-validation variations were used for the EFS data variation step, e.g., bootstrap-based EFS [3] and repeated cross-validation-based EFS [24]. The mean aggregation method is the most widely used method, which uses the arithmetic mean function to obtain the average of feature ranks in all ranked feature lists [24]. Mean aggregation is simple and can be implemented quickly. However, since it is prone to be affected by outliers, it may not be robust enough for high-dimensional datasets. The lowest aggregation method finds the lowest rank across all lists and assigns it to the ensemble list. In contrast, the highest aggregation method selects the highest rank to construct the ensemble feature list. The lowest and highest aggregation methods also have the same drawback as the mean aggregation, which is prone to be affected by outlier ranks. Several feature selection techniques for microarray datasets based on optimisation techniques have recently been proposed.

IV. PROPOSED METHOD

This section explains the proposed logarithmic rank aggregation method (LRA). Besides, SVM-RFE's first iteration and cost parameter optimisation frameworks are described. A case study is also provided to show the significance of LRA for ensemble feature selection.

A. LOGARITHMIC RANK AGGREGATIONS

The mean aggregate method has a significant weakness, particularly for small datasets (low sample size datasets). It is prone to be affected by outlier feature ranks. In other words, a poorly positioned outlier in a single-ranked feature list can eliminate an elsewhere successful feature from the final list. Stability selection-based methods limit the impact of a single rank on the final list since they assign one and zero to the presence of a feature. However, this approach introduces another problem; a slight change to the

feature subset threshold can change the score of a feature, and thus, this method is also prone to be affected by outliers or high variation in feature ranks.

To overcome the mentioned drawbacks of mean aggregation and stability selection-based methods, Logarithmic Rank Aggregation (LRA) is proposed, which first calculates the log values of feature ranks and then employs mean aggregation to construct the ensemble list. The formulation of LRA is illustrated in Equation 1. The proposed aggregation method is illustrated in Figure 1. We performed a case study that illustrated how different aggregation methods are affected by the outliers and how aggregation methods affect the final positions of the features in an ensemble feature list.

This example was based on the aggregation process within the internal RCV-EFS, i.e., RCV-10-2 twenty folds, training process. The Leukemia dataset was selected for this case study because it was the largest dataset used. The rankings of six features, which held the first position on at least one of the ranked feature lists, are presented in Table 2. The best and worst positions obtained for the selected features across all folds are shown in the table. At the bottom of the table, the final ranks obtained by the MRA and LRA aggregation methods are presented.

It was seen that the selection of the aggregation method dramatically affects the position of the features, which is caused by a few outlier positions. For example, feature 5765, which is out of the top 1% with MRA, is in the top 0.5% with LRA. Similarly, feature 6405, out of the top 2% with MRA, is in the top 0.75% with logarithmic aggregation. Feature Nos. 5765 and 6405, which vary greatly in the ranked feature lists, were selected, and the effects of aggregation methods on each fold of the external RCV were also investigated by recording the ensemble list feature ranks. Figure 2 represents the arithmetic mean and standard deviation values of the obtained feature ranks for both. Feature 5765 and Feature 6405 achieved a lower arithmetic mean value when LRA was used instead of MRA, where the standard deviation was also lower. Smaller arithmetic means indicate that these features are less affected by outlier positions in some of the folds, and smaller standard deviations imply that the feature sets of LRA might be more stable than those selected by MRA.

Formula:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \left(\frac{\sum_{i=1}^S \ln(Fr_i^1)}{S} \right), \dots, \left(\frac{\sum_{i=1}^S \ln(Fr_i^N)}{S} \right) \quad (1)$$

N = feature size,

S = Ensemble size,

Fr_i = feature k's rank in *i*th Feature Rank List

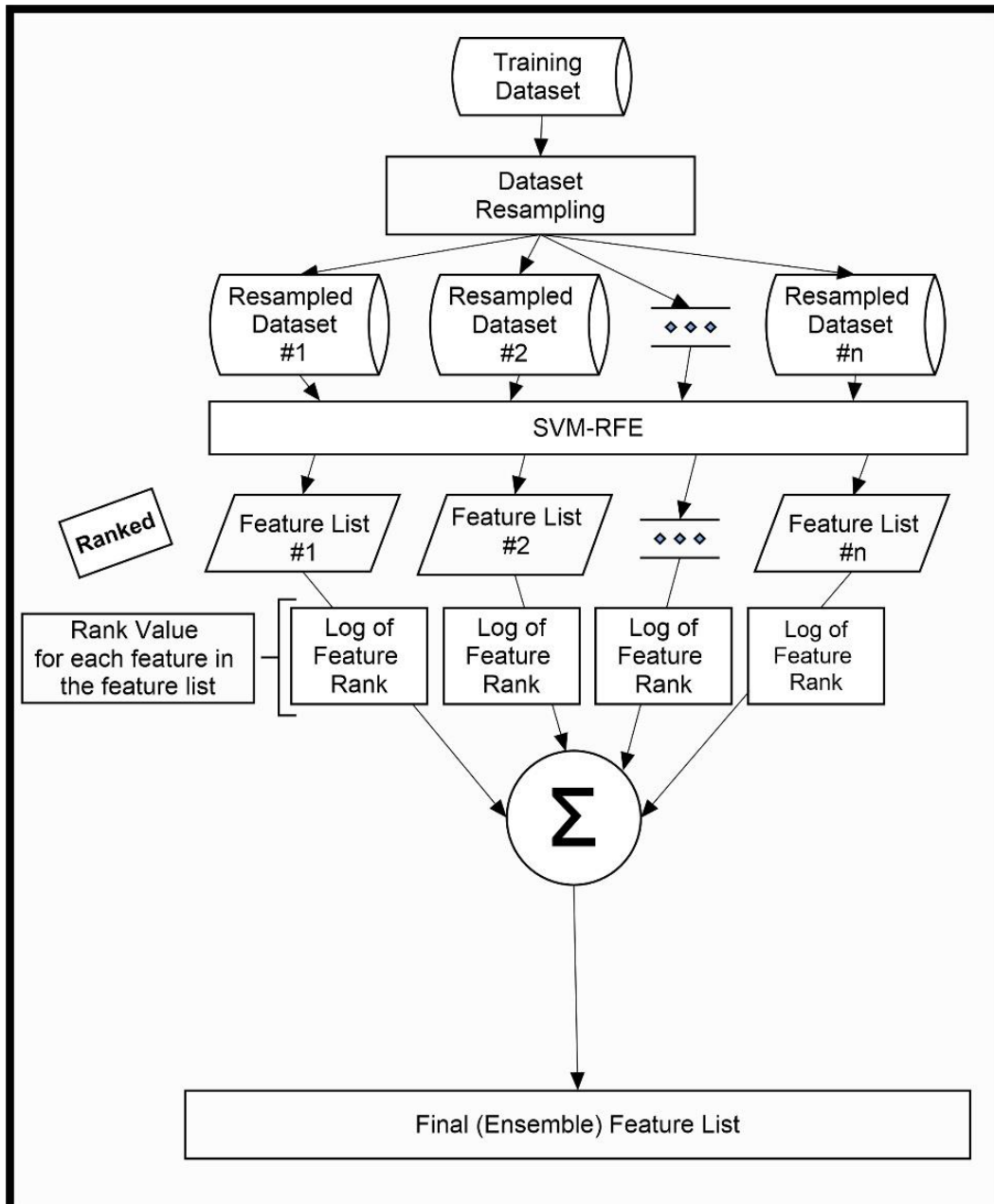


Figure 1. Log-Based Aggregation Method

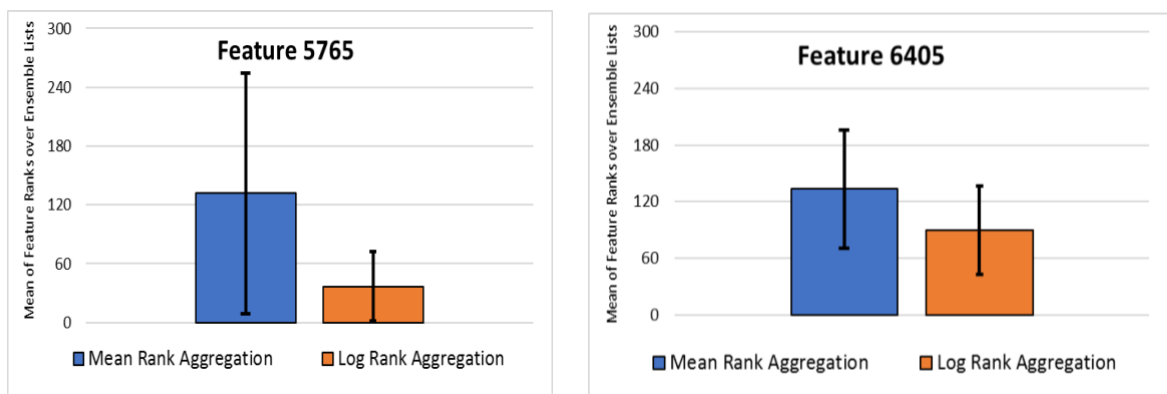


Figure 2. Calculation of mean and standard deviation values of ranked ensemble lists for two features to measure the effect of aggregation methods on the ensemble lists of EFS.

One possible shortcoming of the proposed LRA method is its sensitivity to changes in the ranking when the feature performs best in the fold. This can be especially problematic when the signature size is in the medium range since a slight change in the feature performing very well in a single fold should not be decisive. Consequently, a hybrid aggregation method has been developed between the mean aggregation and logarithmic methods. Specifically, a parameter named h is injected into the formulation of LRA to calculate the final rank of the feature. This parameter enables the aggregation function to behave as ‘semi-logarithmic’. The formulation of the hybrid model is illustrated in Equation 2.

Table 2. Feature rankings obtained from the Leukemia dataset

Internal Fold #	Feature 1779	Feature 1882	Feature 2128	Feature 1699	Feature 5765	Feature 6405
1.	6	36	2	37	85	17
2.	9	1	8	396	64	395
3.	9	1	8	258	42	1628
4.	9	1	32	56	65	4
5.	2	14	258	23	24	17
6.	30	32	4	97	169	3511
7.	5	19	31	66	1	119
8.	1	6	54	8	695	46
9.	9	39	24	1	65	2326
10.	6	2	14	214	48	5
11.	9	1	24	82	2	824
12.	14	1	106	237	185	44
13.	5	17	213	296	3	10
14.	6	18	1	24	1868	2194
15.	4	13	78	82	1	47
16.	1	3	18	47	3316	31
17.	3	1	7	34	78	1473
18.	2	3	10	313	60	1
19.	1	3	32	73	2	28
20.	8	1	5	3	1986	83
<i>MRA</i>	1	3	10	23	116	195
<i>LRA</i>	2	1	6	26	22	38

* The bold values represent the best and worst ranks of each feature.

B. FIRST ITERATION SVM-RFE FRAMEWORK

It has been established that SVM-RFE is a highly effective feature selection technique in terms of accuracy. However, filter methods perform better than SVM-RFE in terms of stability in many classification setups [25]. That can be linked to the simplicity of the filter methods, where within each training fold, features are ranked only in one iteration. Although SVM-RFE starts with the same feature set in each training fold, the algorithm may progress differently, and the final iterations in each training fold can be performed with very diverse feature sets. It is also known that single-run SVM-RFE achieves

better feature selection stability than multi-run SVM-RFE; however, its classification performance is worse [5].

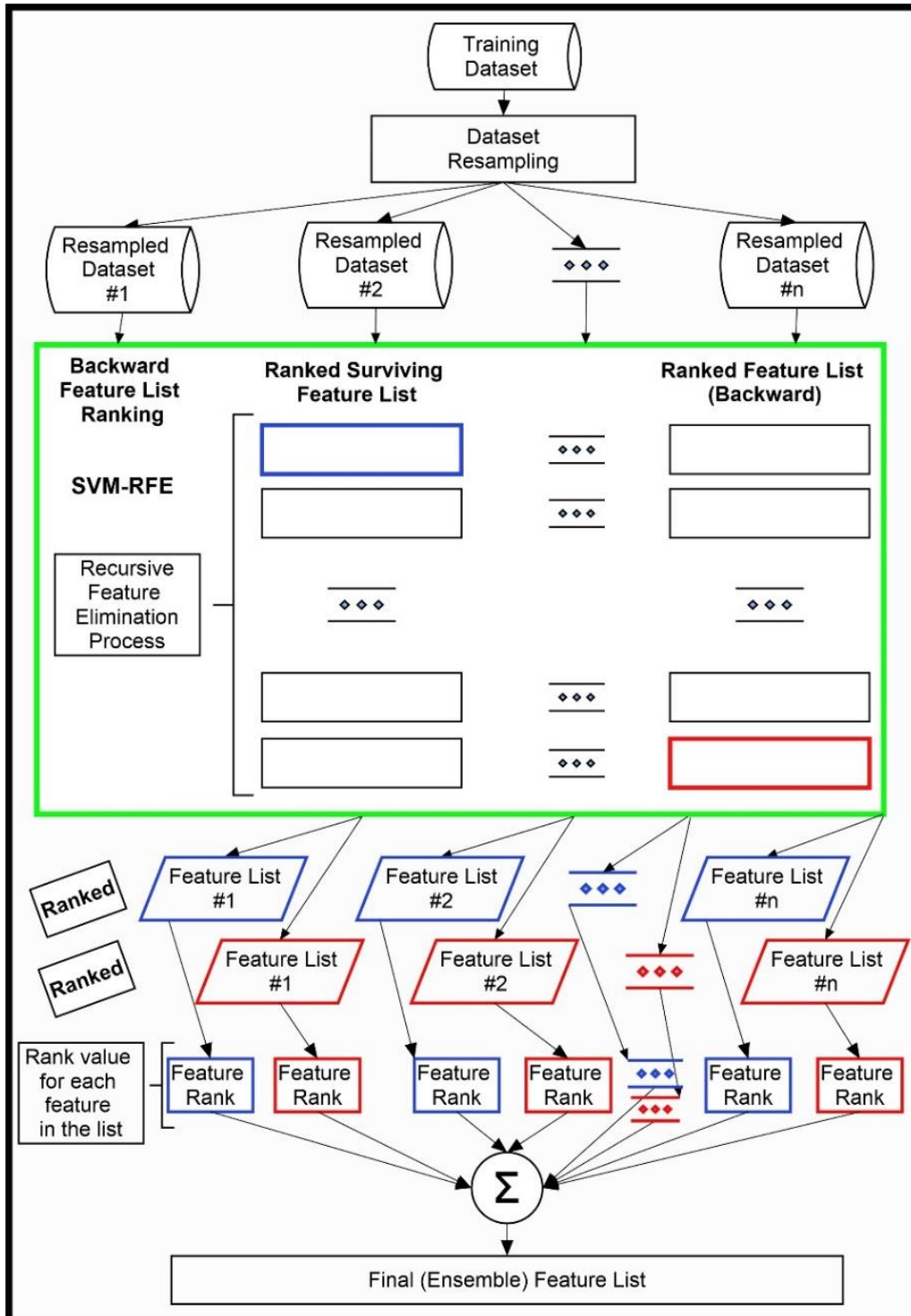


Figure 3. Hybrid Aggregation Method

Formula:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \left(\frac{\sum_{i=1}^S Fr_i^1 + (h * FL * Fr_i^1)}{S} \right), \dots, \left(\frac{\sum_{i=1}^S Fr_i^N + (h * FL * Fr_i^N)}{S} \right) \quad (2)$$

N = Feature size,

S = Ensemble size,

Fr_i = Feature k's rank in *i*th Feature Rank List

FI_Fr_i = Feature k 's rank in i^{th} Feature Rank List of 1st SVM-RFE based method

h = constant-value parameter to define the ratio of a particular feature rank for the hybrid method (to balance the weight of the rank value of FI_SVM-RFE method for the hybrid aggregation method).

We hypothesise that the feature ranks obtained in the first iteration of SVM-RFE can be unified by the conventional iterative SVM-RFE so that the advantages of both methods can be utilised. This is achieved using two different methods. The first method aggregates the final and first iteration rankings of RCV-20 SVM-RFE in an equally balanced way (Figure 3). The second method uses the final rankings and log values of the first iteration rankings with varying degrees of balance between them using the h parameter (Equation 2) described in Section 2.

C. SVM-RFE COST OPTIMISATION

SVM optimisation, specifically cost parameter (C) optimisation, has been extensively studied in various classification domains. However, the cost-parameter optimisation of the SVM algorithm employed in SVM-RFE and the SVM-RFE ensemble has been less studied. It has been well established that the C parameter affects the trade-off between training and generalisation accuracy of a linear SVM classifier. Choosing the C value in the higher range results in higher training accuracy but leads to a higher risk of overfitting. Choosing a low C might minimise the risk of overfitting. However, this might also lead to underusing the training data's potential, also known as the underfitting problem.

It is plausible that in the FS phase, this parameter has an important impact on the final selected feature set, and thus, on the performance of the classifier. More specifically, since C is effectively a regularisation parameter, it can affect the adaptation to the training data, and therefore, the trade-off between training and generalisation errors of the classifier. This, in turn, may not only determine the accuracy of the testing but also has an important impact on the stability of the feature selection. Therefore, it is sensible to experimentally study the cost parameter's effect on the feature selection performance.

Choosing an appropriate optimisation algorithm is the first concern of optimising SVM-RFE. Avoiding both overfitting and underfitting being caused by optimisation is another concern. The third concern about optimisation is preserving the separation of the training/testing dataset, which is critical for classification tasks to avoid classification bias.

One commonly used approach in optimisation is to perform optimisation outside the feature selection and classification processes on a small partition of the training dataset into two sections. In this approach, the whole process is repeated for each cost value to find the best one. We did not utilise this approach for two main reasons. Firstly, this method requires the already computationally complex EFS process to be repeated as many times as the number of experimental values of the parameter. Second, some training data should be kept only to validate the experimented value of the optimised parameters. That is, the classification algorithm and feature selection cannot use this section of the training dataset. Therefore, we injected an optimisation within a two-stage approach to perform an ensemble feature selection process, first optimising the FS technique and then using it for EFS. The first stage involves searching for FS's most fitted cost parameter using all training samples. The second stage will be the same as the ensemble learning described in Section 2 with the predetermined cost parameter.

For the optimisation process within each training fold, the selection of the features of the ensemble is mimicked by downgrading the entire 10×2 RCV ensemble feature selection process to a 5-fold CV. The 5-fold CV is appropriate for the search for cost parameters since it provides an acceptable trade-off

between generating a sufficient number of data sets to find the best cost value for the target model and the computational complexity of the optimisation algorithm. After data resampling is performed, the next step is to employ SVM-RFE to test the performance of each of the predefined cost parameter values in classification performance and gene selection stability. The stability obtained by the tested cost parameter can be calculated directly by the five training folds without testing the classifier. On the other hand, accuracy can only be measured by testing the classifier. Therefore, accuracy is obtained by averaging the results of all training and testing pairs. This process is depicted in Figure 4. The formulation for finding the best cost value is given in Equation 3.

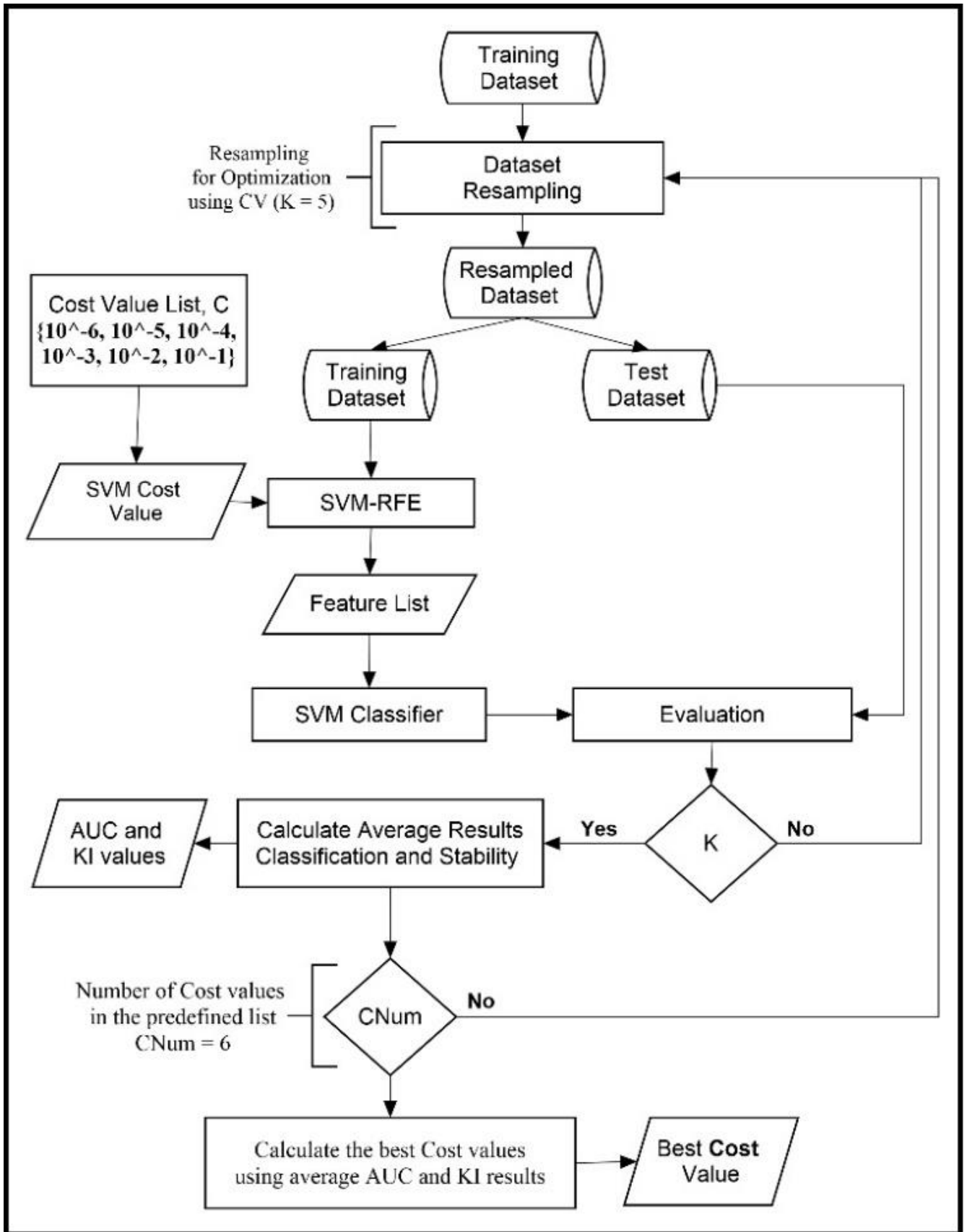


Figure 4. Flowchart of Cost Parameter Optimisation for EFS.

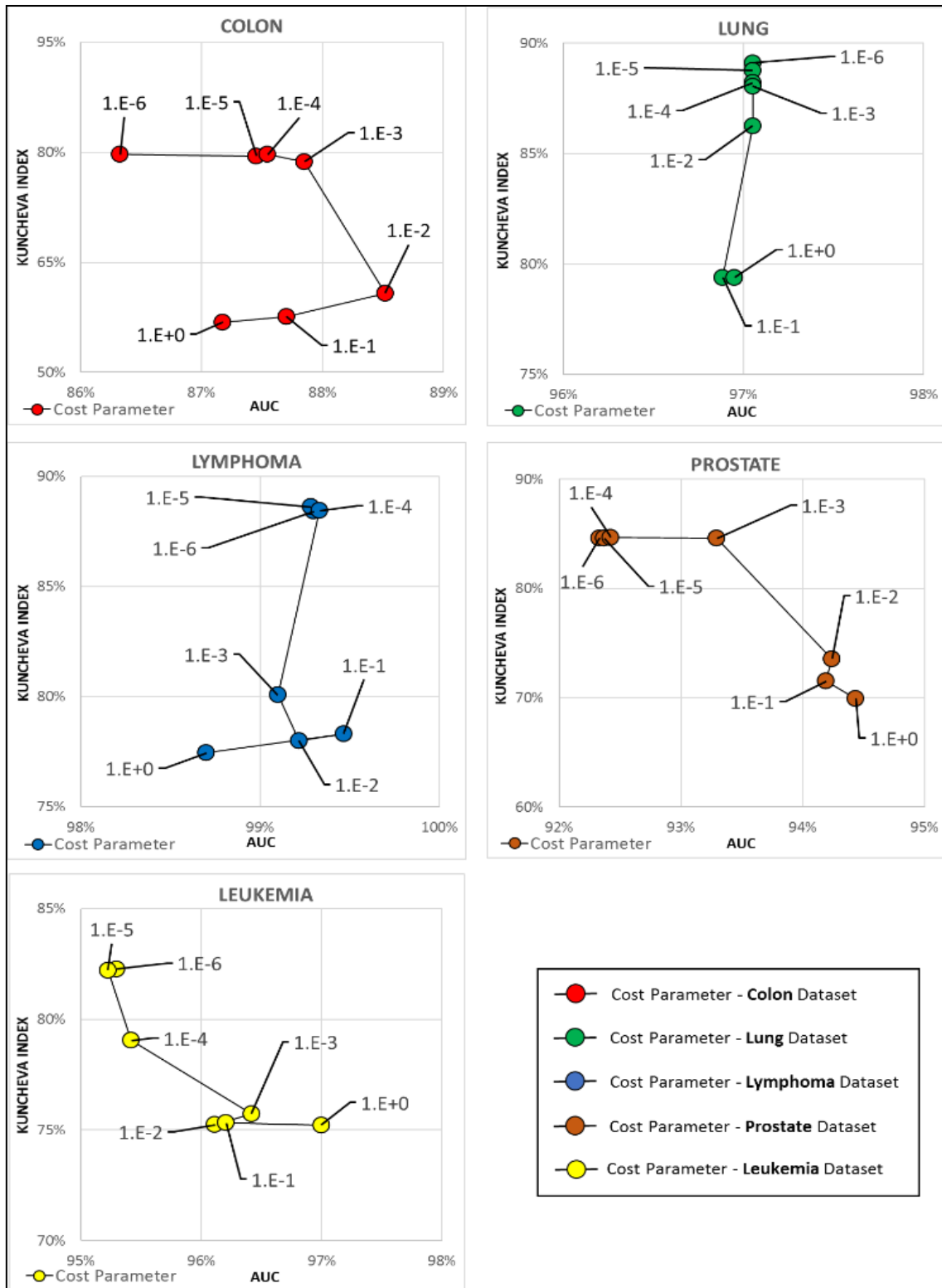


Figure 5. Measurement of the impact of the cost parameter on the performance of RCV-EFS with ensemble size 20.

The formula for Finding the Best Cost Value, C_{Best} :

$$C_{Best} = \text{Max}(AVG_{Cost}), \text{ where}$$

(3)

$$AVG_{Cost} = ((\alpha * AVG_{AUC}) + ((1 - \alpha) * AVG_{KI})) / 2$$

AVG_{AUC} = Average of all AUC values for all folds of CV

AVG_{KI} = Average of all KI values for all folds of CV

α = constant value for balancing the impact of ACC or KI for selecting the best cost parameter.

Figure 5 shows the average accuracy, and the KI results obtained using a range of cost values for all data sets. For all datasets, the cost value affects the KI monotonically. That is, decreasing the C value almost invariably results in higher stability. However, the cost parameter affects the trade-off between accuracy and KI in a dataset-dependent manner. For the lung data set, the C parameter does not significantly affect the accuracy. For the Colon dataset, the accuracy is affected. Lower performance was achieved when high and low C values were selected. Decreasing the cost parameter has a worse impact on the internal accuracy performance for the prostate dataset. A similar trend is seen within the Leukemia dataset. The impact of the cost parameter on the KI is much more pronounced than its effect on precision.

Additionally, the accuracy is measured within the training fold. Therefore, it should be interpreted cautiously, as the testing error might differ. We have implemented a function that determines the final cost value based on a weighted average of accuracy and KI scores where the total weights of the criteria are fixed as 1. Equation 3 represents the function implemented.

V. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

This section presents the testing setup, the used microarray datasets, and the obtained results. The results are also discussed, and the proposed method is compared with the conventional method.

A. MICROARRAY DATASETS

In this study, several publicly available microarray gene expression datasets are used to evaluate the proposed methods to measure performance and compare performance with the conventional method. The Feature (gene) size, sample size, and class distribution of the datasets used are available in Table 3.

Table 3. List of microarray datasets

Dataset	Feature Size	Sample Size	Class +	Class -
Colon [26]	2000	62	40	22
Prostate [27]	6033	102	52	50
Leukemia [28]	7129	72	45	27
Lung [29]	3312	156	139	17
Lymphoma [30]	4026	62	42	20

B. TESTING SETUP

To evaluate the performance of the proposed aggregation methods and compare them with the conventional method, the experimental setup of an external RCV was applied. In this setup, to avoid feature selection and classification bias in the results regarding classification performance and gene selection stability, the test dataset has never been seen by either the optimisation, the feature selection

or the training processes. The general outline of the experimental setup is illustrated in Figure 6. As explained in the Introduction, the contributions of this paper are in the cost parameter optimisation and aggregation phases, which are coloured orange and blue in the figure. In the conventional setup, because of its simplicity and lesser tendency to overfit compared to its alternatives, Linear Kernel has been selected as the choice of kernel, and the cost value is set to 1 in a fixed fashion.

Since the sample size of microarray data sets is quite limited, applying multiple training/testing splits for reliable results is necessary. This study used external RCV with ten folds and 25 repetitions (RCV-25-10) [5]. In total, this corresponds to 250 training/testing splits. In addition, internal RCV (RCV-10-2, equivalent to 20 ensembles) is applied wherever EFS is used. For SVM-RFE, E was set at 20%, StopValue was set at 5%, and the SVM-train cost parameter was set to 1.

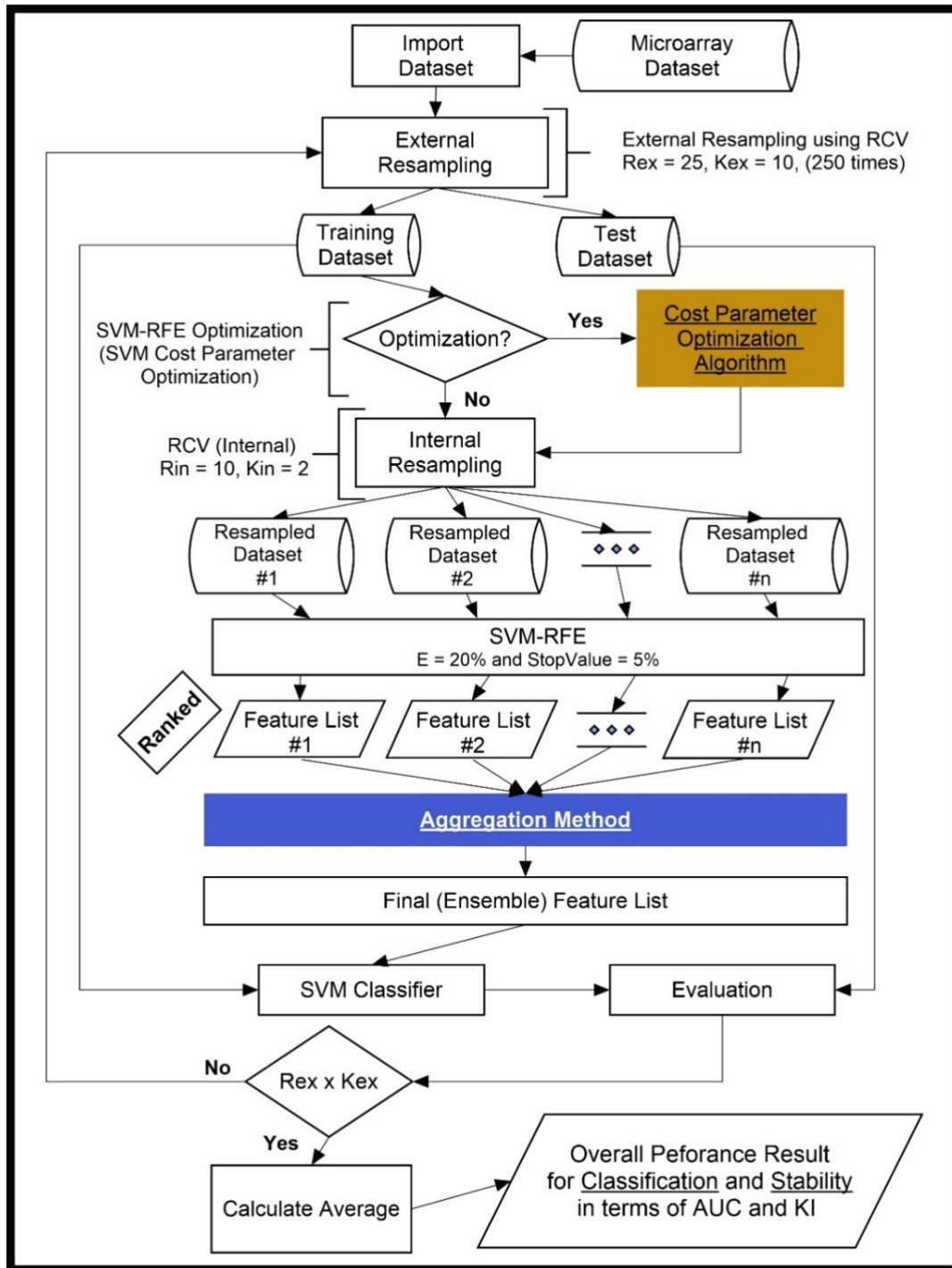


Figure 6. Experimental Setup.

Five metrics, area under roc (AUC) [31], accuracy, sensitivity, specificity, precision, and the Kuncheva's index (KI) [32], were used to measure classification performance and gene selection stability, respectively, with the selected percentage of features; 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1%, 2%, 5%, 10%, and 25%. The definitions and formulas are given below.

Accuracy: The accuracy of a test is its ability to correctly differentiate the patient and healthy cases. To estimate the accuracy of a test, we should calculate the proportion of true positives and true negatives in all evaluated cases. Mathematically, this can be stated as follows:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

Here, TP, FP, TN, and FN are as follows;

- True positive (TP): the number of cases correctly identified as patient.
- False positive (FP): the number of cases incorrectly identified as patient.
- True negative (TN): the number of cases correctly identified as healthy.
- False negative (FN): the number of cases incorrectly identified as healthy.

Sensitivity: The sensitivity of a test is its ability to determine patient cases correctly. To estimate it, we should calculate the proportion of true positives in patient cases. Mathematically, this can be stated as follows:

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP+FN} \quad (5)$$

Specificity: The specificity of a test is its ability to determine healthy cases correctly. We should find the proportion of true negatives in healthy cases to estimate it. Mathematically, this can be stated as follows:

$$Specificity = \frac{TN}{TN+FP} \quad (6)$$

Precision is a measure that tells how frequently a patient labelled as positive is actually positive.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (7)$$

We are using KI as the stability measure, which is mathematically stated as

$$KI = \frac{2}{K(K-1)} \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K I_C(S_i(k), S_j(k)) \quad (8)$$

Here, I_C is the similarity between the i^{th} and j^{th} feature sets $S_i(k)$ and $S_j(k)$.

C. RANK AGGREGATION METHODS

All rank aggregation methods were built using RCV-EFS [5], with the underlying FS technique, SVM-RFE. The methods presented in this section are *MRA*, *LRA*, *Ist_LRA*, and *Ist_LRA+MRA* when h is set to 0.01 and 0.1. In addition, *MRA+Ist_LMRA* is also presented. The obtained AUC and KI values for the mentioned methods are illustrated in Figures 7 and 8, respectively. In addition, Accuracy, Specificity, Sensitivity, and Precision values obtained for the listed methods are presented in the Appendix section.

For the classification performance of Lung, Lymphoma, and Prostate datasets, all techniques achieve similar performances for a wide range of features in terms of accuracy. For Leukaemia and Colon, logarithmic methods perform worse than the *MRA*. *LRA* generally outperforms *MRA* when the feature size is less than 2%. This advantage disappears when the feature size is larger. Furthermore, the hybrid method *MRA+Ist_LRA* performs closer to *MRA* or *Ist_LRA* depending on the value of the parameter h . However, the other hybrid model *Ist_MRA+MRA* performs similarly to the *MRA*, indicating that the performance loss in *MRA+Ist_LRA* is due to the logarithmic approach rather than using the first iteration ranks. For the colon, *Ist_LRA* clearly performs worse than other techniques. *LRA* performs well in the very low range but is worse in the later larger feature sizes. The other techniques perform similarly,

where $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ slightly performs worse, and $MRA + I^{st_MRA}$ performs slightly better than other techniques. The picture for leukaemia is similar to the colon, except that $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ performs well in the low feature range. For lung, all methods perform similarly except for small feature sizes where I^{st_LRA} and $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ perform considerably worse than the others. LRA is the highest for lymphoma, performing from 0.1 to 0.5, where all methods perform virtually 100% afterwards. The prostate is not similar to other datasets in terms of accuracy since I^{st_LRA} and $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ perform well for a wide range of features.

Regarding average stability, LRA generally outperforms MRA when the feature size is less than 2%. This advantage disappears when the feature set is higher. However, when only the non-hybrid methods are considered, I^{st_LRA} clearly outperforms the other methods with a clear margin where the difference is more pronounced for smaller feature sets. This fact seems to be a result of the synergy between the use of the logarithmic approach and the initial ranks together since the LRA did not result in such a difference from conventional MRA. In terms of accuracy, I^{st_LRA} performs less well than $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ in a range of small feature sizes.

It is seen that the hybrid method, $MRA + I^{st_LRA}$, outperforms MRA by a considerable margin, suggesting that aggregation of the first and final ranking is an effective method in terms of stability. However, I^{st_LRA} clearly outperforms both LRA and $MRA + I^{st_LRA}$, suggesting a synergy between the logarithmic approach and first-iteration ranks. Hybrid methods ($I^{st_LRA} + MRA$) perform between the two extremes, depending on the parameter h .

In terms of average sensitivity, MRA-based methods generally perform better. However, I^{st_LRA} performs worse than other techniques for the colon. LRA performs in the very low feature range but performs slightly worse than the others in larger feature sizes. For leukaemia, in the minimal feature ranges, I^{st_LRA} and LRA perform worse than the others. In the higher range, all other methods perform similarly. The picture for the lung and prostate is similar to that for leukaemia. For lymphoma, I^{st_LRA} performs well in the very small feature size but degrades later. LRA performs in the middle range, and in the high feature range, all methods perform virtually the same.

Regarding average specificity, LRA performs better than other methods in very small feature sizes; however, it performs worse among all other methods. Other methods, except for I^{st_LRA} , perform similarly. For the prostate, I^{st_LRA} and $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ are the top-performing methods. For lung and leukaemia, the picture is similar to the average specificity. For Lymphoma, LRA and I^{st_LRA} perform well. In terms of average precision, hybrid methods perform well in a low feature range, except for the LRA and I^{st_LRA} methods. For leukaemia and lung, the picture is similar in accuracy. For Lymphoma, LRA virtually performs 100%. For prostate, I^{st_LRA} and LRA perform well. For the colon, except for I^{st_LRA} , which performs worse than the others, all methods perform similarly.

Regarding average stability, LRA generally outperforms MRA when the feature size is less than 2%. This advantage disappears when the feature set is higher. However, when only the non-hybrid methods are considered, I^{st_LRA} clearly outperforms the other methods with a clear margin where the difference is more pronounced for smaller feature sets. This fact seems to be a result of the synergy between the use of the logarithmic approach and the initial ranks together since the LRA did not result in such a difference from conventional MRA. In terms of accuracy, I^{st_LRA} performs less well than $I^{st_LRA} + 0.01_MRA$ in a range of small feature sizes. It is seen that the hybrid method, $MRA + I^{st_LRA}$, outperforms MRA by a considerable margin, suggesting that aggregation of the first and final ranking is an effective method in terms of stability. However, I^{st_LRA} clearly outperforms both LRA and

MRA+1st_LRA, suggesting a synergy between the logarithmic approach and first-iteration ranks. Hybrid methods (1st_LRA+ MRA) perform between the two extremes, depending on the parameter h .

In terms of average sensitivity, MRA-based methods generally perform better. However, 1^{st} _LRA performs worse than other techniques for the colon. LRA performs in the very low feature range but performs slightly worse than the others in larger feature sizes.

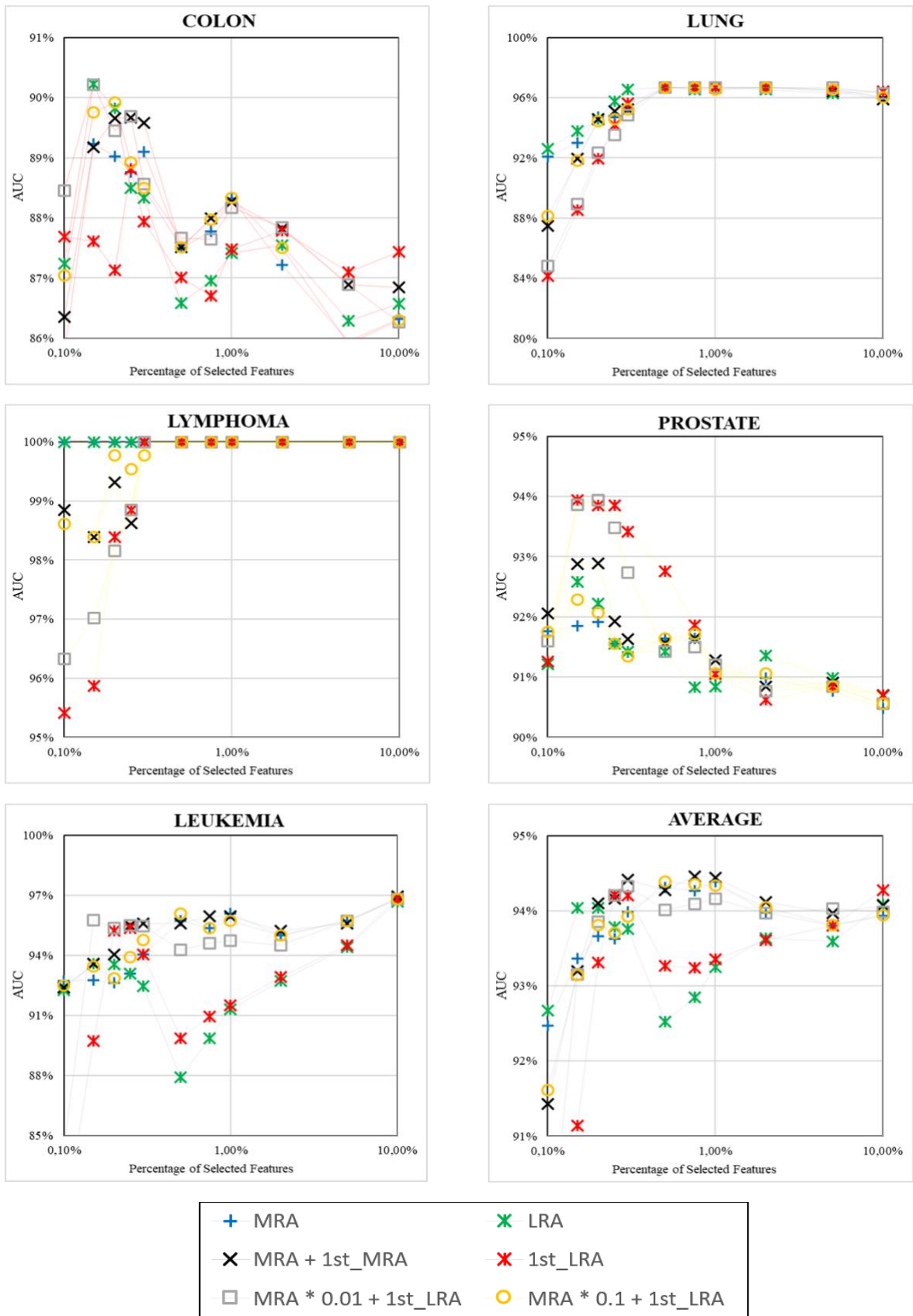


Figure 7. Classification Performance of the Rank Aggregation Methods in terms of AUC

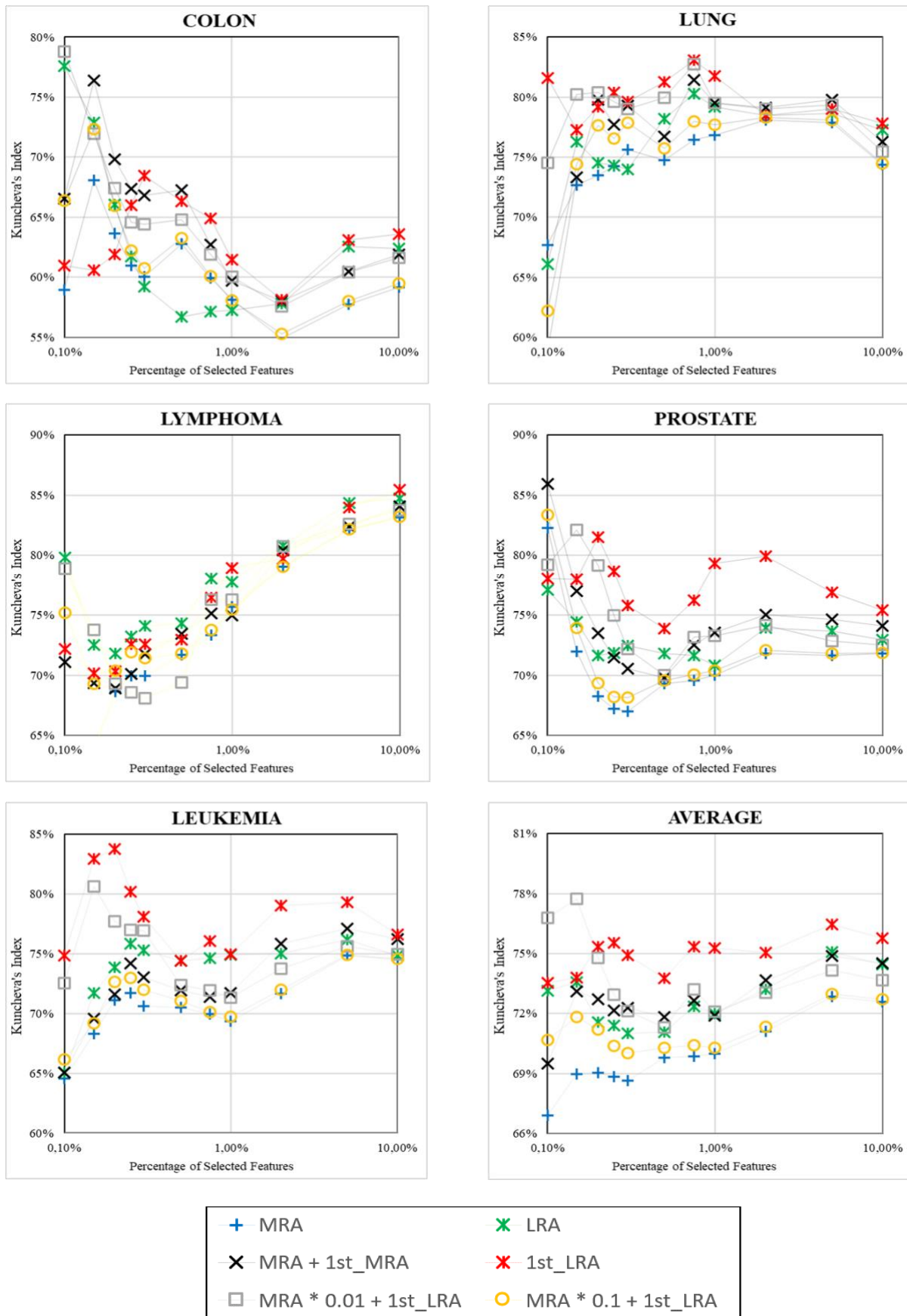


Figure 8. Gene Selection Stability of the Rank Aggregation Methods in terms of KI

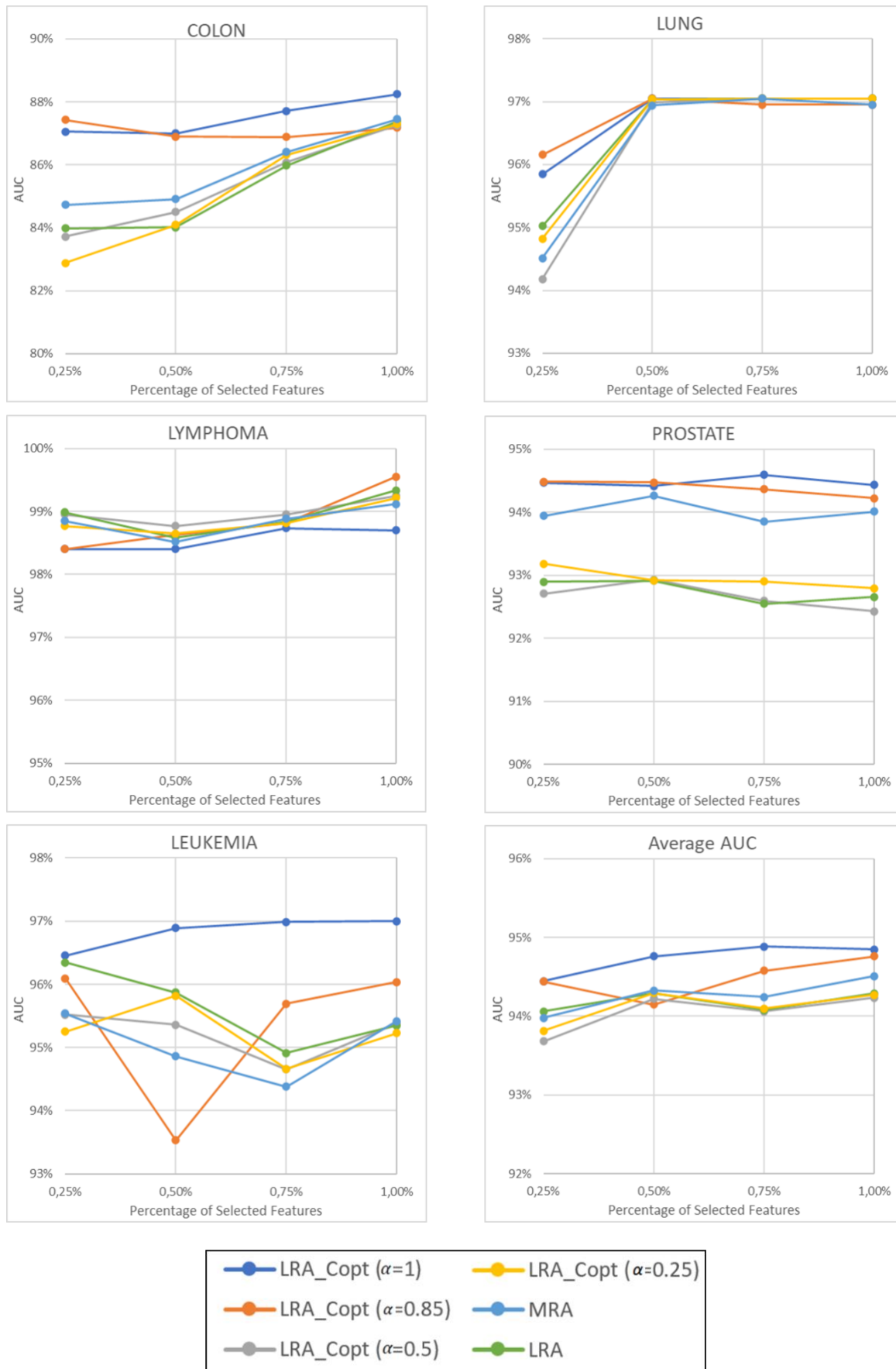


Figure 9. Classification Performance of the Optimised Log Rank Aggregation Methods in terms of AUC

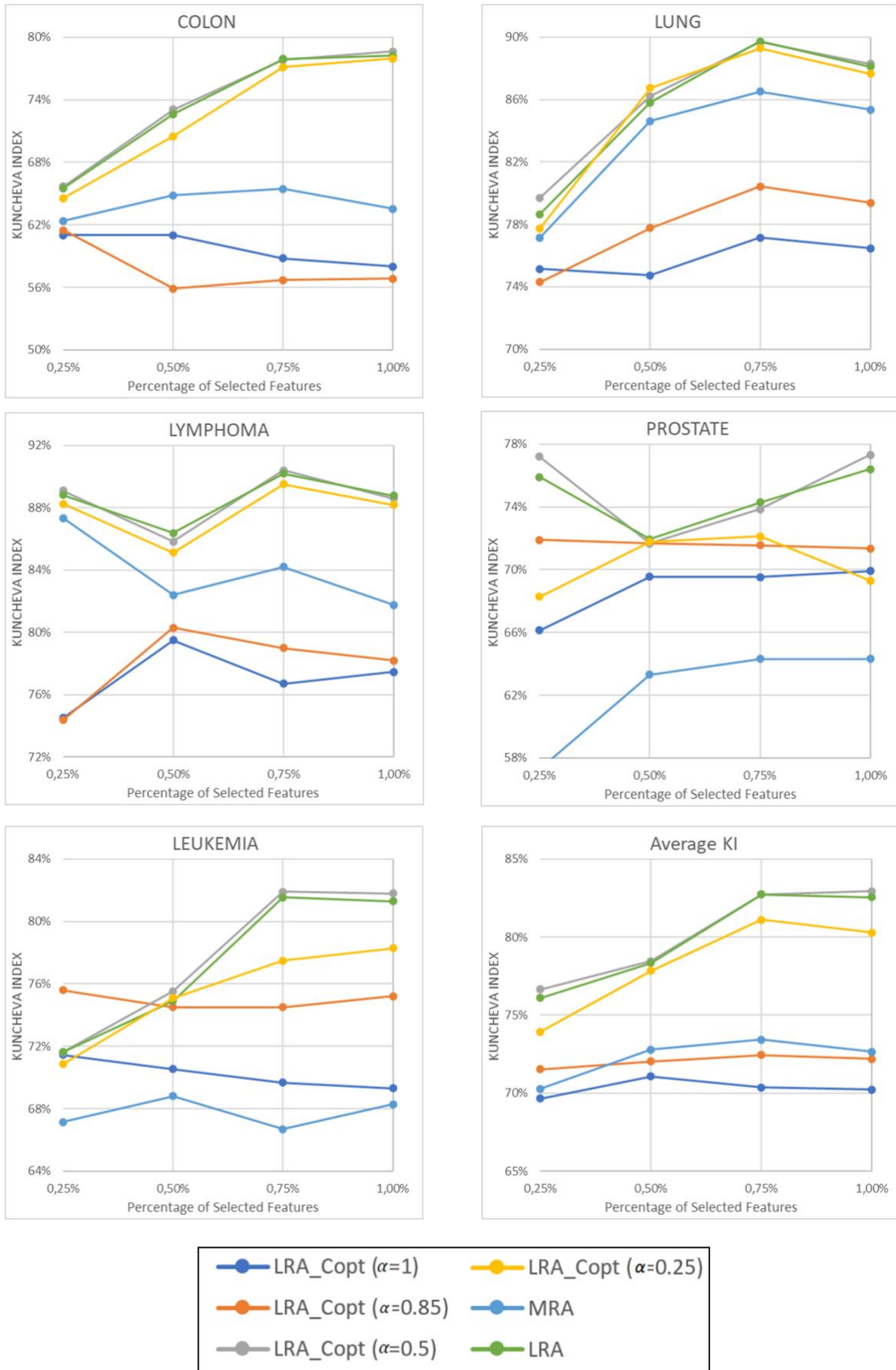


Figure 9. Gene Selection Stability of Optimised Log Rank Aggregation Methods in terms of KI

For leukaemia, in the very low feature range, I^{st_LRA} and LRA perform worse than the others. In the higher range, all other methods perform similarly. The picture for the lung and prostate is similar to that for leukaemia. For lymphoma, I^{st_LRA} performs well in the very small feature size but degrades later. LRA performs in the middle range, and in the high feature range, all methods perform virtually the same. In terms of average specificity, LRA performs better than other methods in very small feature sizes; however, it performs worse among all other methods. Other methods, except for I^{st_LRA} , perform similarly. For the prostate, I^{st_LRA} and $I^{st_LRA}+0.01_MRA$ are the top-performing methods. For lung and leukaemia, the picture is similar to the average specificity. For Lymphoma, LRA and I^{st_LRA} perform well. In terms of average precision, hybrid methods perform well in a low feature range, except for the LRA and I^{st_LRA} methods. For leukaemia and lung, the picture is similar in accuracy. For Lymphoma, LRA virtually performs 100%. For prostate, I^{st_LRA} and LRA perform well. For the colon, except for I^{st_LRA} , which performs worse than the others, all methods perform similarly.

D. OPTIMISATION ALGORITHM FOR LRA-EFS

In this subsection, the experimental results of four different settings of optimised LRA, along with non-optimised MRA and LRA, are presented and discussed. The explained optimisation framework is proposed to evaluate and set the best cost value for each fold of the external RCV. The best cost value is selected by obtaining the weighted average of the best accuracy and KI values. Four different α values are selected to measure the impact of the weight on the performance of the proposed algorithm. These AUC and KI values are illustrated in Figures 9 and 10, respectively.

For all datasets, in terms of stability, $LRA_{C_{opt}}$ variations outperform MRA with a clear margin. On average, the difference is around 5% when the feature size is 0.25% and 0.5% and jumps to 10% when the feature size is 0.75% and 1%. It is seen that the stability only partially degrades as more weight is given to accuracy. However, as expected, stability decreases to similar levels of LRA when $\alpha=1$. Optimisation with respect to $\alpha=1$ performs worse than MRA in terms of precision. This is possibly linked to two factors: one is the possible overfitting since the cost parameter is optimised within the training data, and the other plausible reason is the downgrading of the actual process to a modest CV process. However, a substantial gain in stability is observed. In terms of sensitivity, specificity, and precision, non-optimised MRA and LRA generally perform better than the optimised schemes except for specific datasets.

VI. DISCUSSION

This section discusses the strength and limitations of this study and compares the proposed method with the current literature. In this paper, we proposed novel aggregation and cost optimisation methods for ensemble feature selection that are proposed to improve classification and gene selection stability for microarray-based cancer diagnosis. To the best of our knowledge, this is the first paper that uses a transformation function for feature aggregation. Another main contribution of this paper is a hybrid model, which uses the initial and final feature ranks. Lastly, a cost-parameter optimisation framework is proposed for microarray datasets. To evaluate the proposed methods and compare the performance of the proposed methods with the conventional method, the experimental evaluation procedure is performed on five publicly available microarray datasets.

MRA has some drawbacks, especially when the signature size is limited; a poorly positioned outlier in a single SVM-RFE fold can eliminate an elsewhere successful feature from the final list. To overcome the mentioned drawbacks of MRA , the LRA is proposed, which calculates the logarithmic values of feature ranks for a particular feature in the list before taking the overall average. Intuitively, this approach is more sensitive to changes in the top-performing range; a slight fall in rank is penalised dramatically. The feature is further

penalised if it is at the end of the range rather than being in the middle of the range; however, only with a limit. This approach might have three critical practical advantages. The first is that obtaining logarithmic values of feature ranks can eliminate the major limitation of mean aggregation by eliminating the impact of bad outliers on a feature. The second is that, unlike stability selection methods, the feature score is not dramatically affected by a slight change if it is close to the decision boundary. Third, modifying the formula of mean aggregation aims to keep its simplicity and computational cost as low as possible while improving the performance. A case study is performed to illustrate how aggregation methods affect the final positions of the features in aggregation. The choice of aggregation method has been proven to impact significantly the position of generally good-performing features associated with a limited number of poor outlier positions. It is seen that the ranks obtained by *LRA* have a lower standard deviation, and *LRA* is more robust against the presence of outliers. The test results show that *LRA* has a comparable but slightly worse performance than conventional *MRA* in terms of precision and significantly improves gene selection stability. Furthermore, this functional modification has no cost in terms of computational complexity.

Methods that exploit the ranks obtained in the first iteration also provide better stability than *MRA*. In particular, the method that utilises both logarithmic aggregation and the first iteration frame at the same time, *1st_LRA*, provides outstanding performance in terms of stability with a generally tolerable decrease in accuracy. Hybrid methods that use the weights obtained in the first and last iterations of SVM-RFE (*MRA+1st_MRA* and *MRA+1st_LRA*) provide good trade-off points between accuracy and stability. *1st_MRA + MRA* provides a net increase in stability without virtually compromising accuracy. SVM-RFE operates on a fixed set of samples in a single subsampled fold. However, the ranks obtained in the first and final iterations are produced via different conditions due to different feature sets being used. Consequently, obtaining ranks with different feature subpopulations creates diversity analogous to using different sample subpopulations. Therefore, *1st_MRA + MRA* effectively uses an ensemble size practically more than the number of training subsamples, that is, twenty in this study. This is achieved with virtually no increase in computational complexity.

Optimisation within the training folds shows that this parameter has an important impact on the ensemble feature selection phase, like the SVM classifier. In other words, a smaller cost parameter increases the stability of SVM-RFE because this set includes more samples as support vectors. The testing results show that the proposed cost optimisation technique provides remarkable gains in terms of stability with relatively less fall in accuracy. Assigning a higher weight to internal accuracy has a limited positive impact on testing accuracy that can be linked to two factors: one is the possible overfitting since the cost parameter is optimised within the training data, and the other plausible reason is the downgrading of the actual process to a modest CV process. However, a substantial gain in stability is observed.

In summary, the cost parameter has a remarkable impact on the performance of RCV-EFS. It is seen that when the weight of the stability in the algorithm increases, the stability of the features increases as well. The algorithm achieves this usually by reducing the value of the cost parameter, which is equivalent to increasing the impact of regularisation in SVM. It can also be seen that, among the different datasets, the impact of optimisation does not affect the performance in terms of accuracy in a drastic manner. This lack of general effect can be linked to the trade-off between regularisation and generalisation errors in classification problems. Each dataset has a different optimal point in terms of regularisation vs generalisation trade-off; therefore, increasing the regularisation via stability has an individual effect for each dataset.

This subsection discusses the performance of the proposed method in comparison to the studies in the literature that evaluated on the common datasets. The comparisons show that the proposed method have comparable or better classification performance and gene selection stability. It is crucial to note that these comparisons should be interpreted with caution due to the differences in the experimental settings.

Barbara Pes conducted extensive experiments to measure the impact of EFS on classification performance and gene selection stability on various datasets from many problem domains in the study [18]. The present and referred studies have evaluated the performance of the proposed methods on several datasets, including lymphoma. In [18], the classification performance of 0.964 and 0.971 for the mentioned dataset was achieved by SVM and Random Forest classifiers, respectively, where the top 80 genes were selected using SVM-RFE. The proposed method, optimised LRA, achieved 99% AUC with ten features. In addition, the proposed method showed that it is robust since it obtained 90% KI for the top 10 selected features.

In the study, [33] the authors proposed an efficient implementation of linear SVM, improved the recursive feature elimination strategy, and combined them to select informative genes. Experiments were conducted on six frequently used microarray datasets in this field. The results show that the proposed methods have significantly reduced time consumption and obtained comparable classification performance. The common datasets used in the study are Leukemia, Prostate, and Colon. The study's reported results are generally better; however, this could result from the different experimental setups since 5-Fold CV, as the validation method can generate biased results due to insufficient training and test splits. For instance, In the study [5], the classification performance for the Colon dataset with the Repeated CV validation method was around 85% which used SVM-RFE FS and Linear SVM classifier. However, the study [33] achieved 98.75 AUC for the same dataset with the same FS technique and classifier.

Chen et al. [34] proposed a wrapper gene selection approach, WERFE, within a recursive feature elimination (RFE) framework to make the classification more accurate. WERFE employs an ensemble strategy and assembles the top-selected genes in each approach as the final gene subset. By integrating multiple gene selection algorithms, the optimal gene subset is determined by prioritising the more relevant genes selected by each gene selection method. The authors reported 98% classification performance for the prostate dataset with two features, which is better than the results reported in this study. MRMR-HFS [35] is a CFS-inspired filter-based feature selection algorithm that selects features by an ensemble of ranking algorithms by maximising class accuracy and minimising feature-to-feature similarity. The obtained MRMR-HFS is useful for feature subset selection in high-dimensional datasets in terms of various measures. The results reported in [21] were slightly better for the colon dataset than our study and slightly worse for the prostate dataset.

Brahim et al. [8] proposed an EFS approach based on the reliability assessment of feature selectors. It aims to provide a unique and stable feature selection without ignoring the predictive accuracy aspect. A classification algorithm is used as an evaluator to assign confidence to features selected by ensemble members based on their associated classification performance. The common datasets used in the study are Lymphoma, Prostate, and Lung. The proposed method's performance was measured in terms of accuracy using F-measure and stability using Kuncheva's index (KI). The present study reported results in terms of AUC and KI. When the stability of both methods was compared, the results revealed that optimised LRA outperformed the reliability assessment (RAA)-based method, where RAA and LRA achieved stability (KI) 15.66% and 88.80% for lymphoma, 81.94% and 77.30% for prostate, and 85.39% and 88.30% for the lung, with top 1% features, respectively. According to the results, optimised LRA showed less stability than RAA only for the prostate dataset, where default 1st_LRA obtained 80.3% stability.

Venkatesh and Anuradha proposed a hybrid ensemble technique using filter and wrapper FS techniques, and the Fuzzy Gaussian membership function was used for feature aggregation. Then, SVM-RBF was used for model evaluation of several microarray datasets, including Colon, Prostate and Lymphoma datasets. For the Lymphoma dataset, the default LRA setting achieved 99.2% with the top 30 features, and the proposed method in [15] achieved 93.33%. In addition, their method obtained 95.89% accuracy with 53 for the prostate dataset, whereas our method had an accuracy of 94.8% with 15 features. On the other hand, 86.5% accuracy was achieved for the

Colon dataset using 20 features by LRA and 94.57% accuracy was reported in the study [15]. It should be noted that data normalisation implementation or model validation can cause such differences in the results. Therefore, the differences in experimental settings can cause differences in the results.

The study [16] proposes an ensemble fast correlation-based (FCBF) FS method. The proposed method selected the most informative genes from the microarray datasets for cancer classification. According to the reported results, FCBF with the Quarter Scheme aggregation method achieved the best performance. For the common dataset colon, it obtained an accuracy of 83.87% with selected features of an average of 7.6 with a 2.1 standard deviation. LRA achieved 85.50% accuracy for the same dataset with five features. On the other hand, for the Leukemia dataset, one of our hybrid methods ($MRA * 0.01 + 1^{st_LRA}$) achieved 97.6% with 12 features, where FCBF with the Quarter Scheme aggregation method achieved 98.61% accuracy with selected features of an average of 83.2 with a 4.7 standard deviation.

The study [17] proposed the HMM-based gene selection method using a hidden Markov chain model. The method was evaluated on several datasets, including DLBCL, leukaemia, and prostate datasets. The present study reported 97.6% AUC and 80.6 KI for Leukemia dataset, 94.9 AUC and 78.0 KI for the prostate dataset by the LRA method. The obtained results are better for the prostate and worse for leukaemia. It should be noted that the studies used very different validation methods.

The authors proposed PSO-ENSVM using swarm optimisation, elastic net and SVM classifier [36]. For model evaluation, a 10-fold CV was used. However, our study used repeated CV (RCV, where $r = 25$ and $k = 10$) for the same purpose. For the common datasets, Colon, Leukemia, Prostate and Lung, classification performance, 0.85, 0.97, 0.94 and 0.97 were achieved in the study [36], and the present study exhibited similar results with fewer features.

In the study [37], another wrapper feature selection-based method was proposed using cuckoo search with evolutionary operators. This study also used CV-10 for model evaluation. The study reported that their method achieved an accuracy of 98.60% and 95.20% for Leukemia and Prostate, respectively. In the present study, a hybrid method ($MRA * 0.01 + 1^{st_LRA}$) achieved 97.6% accuracy for leukaemia with 12 features and the same model and 1^{st_LRA} achieved 94.9% accuracy for the Prostate dataset.

In [38], a method was developed to detect Microarray-based Leukemia disease using the ant lion optimisation-based wrapper FS technique. The study reported the accuracy as 90.91% by the ALO attribute selection method. The reported accuracy is lower than the accuracy reported in this study, where a proposed hybrid model achieved 97.6% accuracy for leukaemia with 12 features and default LRA achieved 95.9% accuracy with eight features. As shown, this study outperformed the ALO-based EFS technique. The study [39] employed an artificial neural networks method optimised using Genetic Algorithms. The proposed method was evaluated on the colon dataset, and the reported results suggest that the best performance was 0.832 AUC, which this study achieved higher performance than (default LRA: 90.2% AUC with three genes) ALO-based EFS technique.

In [40], the proposed modified AHP (MAHP) was evaluated using the leave-one-out cross-validation (LOOCV) validation technique, and K was set to 20 for creating training and testing splits. The top five features were selected after feature selection and evaluated with several classifiers, including the SVM classifier, in terms of AUC. MAHP achieved 0.828 AUC when evaluated using the SVM classifier. Our method, LRA, achieved 90.2% AUC with three features when evaluated with the same classifier. Our method achieved 72.9% KI for the same gene set. For the other common dataset Leukemia, MAHP achieved 0.971 classification performance with five features, and a slightly worse performance was achieved (95.7%) by a hybrid method ($MRA * 0.01 + 1^{st_LRA}$) with 11 features and 80.6% KI.

VII. CONCLUSION

In conclusion, this paper presents contributions in various steps of SVM-RFE-based EFS, particularly for feature aggregation and cost parameter optimisation. The proposed methods resulted in important gains in terms of stability. While some of the proposed techniques showed little compromise in terms of accuracy, others improved stability with virtually no compromise in accuracy. It should be stressed that the gain in stability is cumulative among the different techniques used. Compared to conventional aggregation method MRA, the combined use of the proposed techniques provides approximately a 10% gain in stability with a compromise between 0.5 and 1% accuracy. Accurate and stable artificial intelligence systems help domain experts make more confident decisions for microarray-based cancer diagnosis and provide reliable insight into the disease due to the competitive stability of the selected genes.

Conflict of interest

The authors declare that there are no potential conflicts of interest.

Funding

This research did not receive a specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

VIII. REFERENCES

- [1] N. Mahendran, P. M. Durai Raj Vincent, K. Srinivasan, and C.-Y. Chang, "Machine learning based Computational Gene Selection Models: A survey, performance evaluation, open issues, and future research directions," *Frontiers in Genetics*, vol. 11, 2020. doi:10.3389/fgene.2020.603808.
- [2] V. K. Chauhan, K. Dahiya, and A. Sharma, "Problem formulations and solvers in Linear SVM: A Review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, no. 2, pp. 803–855, 2018. doi:10.1007/s10462-018-9614-6.
- [3] V. Bolón-Canedo, N. Sánchez-Marroño, A. Alonso-Betanzos, J. M. Benítez, and F. Herrera, "A review of microarray datasets and Applied Feature Selection Methods," *Information Sciences*, vol. 282, pp. 111–135, 2014. doi:10.1016/j.ins.2014.05.042.
- [4] T. Abeel, T. Helleputte, Y. Van de Peer, P. Dupont, and Y. Saeys, "Robust biomarker identification for cancer diagnosis with Ensemble Feature Selection Methods," *Bioinformatics*, vol. 26, no. 3, pp. 392–398, 2009. doi:10.1093/bioinformatics/btp630.
- [5] H. Güney and H. Öztoprak, "Microarray-based cancer diagnosis: Repeated cross-validation-based ensemble feature selection," *Electronics Letters*, vol. 54, no. 5, pp. 272–274, 2018. doi:10.1049/el.2017.4550.
- [6] D. Guan, W. Yuan, Y.-K. Lee, K. Najeebullah, and M. K. Rasel, "A review of Ensemble Learning Based Feature Selection," *IETE Technical Review*, vol. 31, no. 3, pp. 190–198, 2014. doi:10.1080/02564602.2014.906859.

- [7] B. Pes, “Ensemble feature selection for high-dimensional data: A stability analysis across multiple domains,” *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 10, pp. 5951–5973, 2019. doi:10.1007/s00521-019-04082-3.
- [8] A. Ben Brahim and M. Limam, “Ensemble feature selection for High Dimensional Data: A new method and a comparative study,” *Advances in Data Analysis and Classification*, vol. 12, no. 4, pp. 937–952, 2017. doi:10.1007/s11634-017-0285-y.
- [9] V. Bolón-Canedo, N. Sánchez-Marroño, and A. Alonso-Betanzos, “An ensemble of filters and classifiers for Microarray Data Classification,” *Pattern Recognition*, vol. 45, no. 1, pp. 531–539, 2012. doi:10.1016/j.patcog.2011.06.006.
- [10] A. Anaissi, M. Goyal, D. R. Catchpoole, A. Braytee, and P. J. Kennedy, “Ensemble feature learning of genomic data using support Vector Machine,” *PLOS ONE*, vol. 11, no. 6, 2016. doi:10.1371/journal.pone.0157330.
- [11] P. Yang, B. B. Zhou, Z. Zhang, and A. Y. Zomaya, “A multi-filter enhanced genetic ensemble system for gene selection and sample classification of Microarray Data,” *BMC Bioinformatics*, vol. 11, no. S1, 2010. doi:10.1186/1471-2105-11-s1-s5.
- [12] B. Seijo-Pardo, I. Porto-Díaz, V. Bolón-Canedo, and A. Alonso-Betanzos, “Ensemble feature selection: Homogeneous and heterogeneous approaches,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 118, pp. 124–139, 2017. doi:10.1016/j.knosys.2016.11.017.
- [13] L. Cleofas-Sánchez, J. S. Sánchez, and V. García, “Gene selection and disease prediction from gene expression data using a two-stage hetero-associative memory,” *Progress in Artificial Intelligence*, vol. 8, no. 1, pp. 63–71, 2018. doi:10.1007/s13748-018-0148-6.
- [14] S. Hengpraprom and S. Jungjit, “Ensemble feature selection for breast cancer classification using Microarray Data,” *Inteligencia Artificial*, vol. 23, no. 65, pp. 100–114, 2020. doi:10.4114/intartif.vol23iss65pp100-114.
- [15] B. Venkatesh and J. Anuradha, “A fuzzy gaussian rank aggregation ensemble feature selection method for Microarray Data,” *International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 289–301, 2021. doi:10.3233/kes-190134.
- [16] A. Wang et al., “Stable and accurate feature selection from microarray data with ensembled fast correlation based filter,” 2020 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), 2020. doi:10.1109/bibm49941.2020.9313533.
- [17] M. Momenzadeh, M. Sehhati, and H. Rabbani, “A novel feature selection method for microarray data classification based on Hidden Markov Model,” *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 95, p. 103213, 2019. doi:10.1016/j.jbi.2019.103213.
- [18] G. Zhang, J. Hou, J. Wang, C. Yan, and J. Luo, “Feature selection for microarray data classification using hybrid information gain and a modified binary krill herd algorithm,” *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 288–301, 2020. doi:10.1007/s12539-020-00372-w.

- [19] O. A. Alomari et al., “Gene selection for microarray data classification based on Gray Wolf optimiser enhanced with TRIZ-inspired operators,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 223, p. 107034, 2021. doi:10.1016/j.knosys.2021.107034.
- [20] X. Zheng, W. Zhu, C. Tang, and M. Wang, “Gene selection for microarray data classification via Adaptive Hypergraph Embedded Dictionary Learning,” *Gene*, vol. 706, pp. 188–200, 2019. doi:10.1016/j.gene.2019.04.060.
- [21] S. Raghavendra. N and P. C. Deka, “Support Vector Machine applications in the field of Hydrology: A Review,” *Applied Soft Computing*, vol. 19, pp. 372–386, 2014. doi:10.1016/j.asoc.2014.02.002.
- [22] X. Zhang, D. Qiu, and F. Chen, “Support vector machine with parameter optimisation by a novel hybrid method and its application to fault diagnosis,” *Neurocomputing*, vol. 149, pp. 641–651, 2015. doi:10.1016/j.neucom.2014.08.010.
- [23] I. Guyon, J. Weston, S. Barnhill, and V. Vapnik, “Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector Machines,” *Machine Learning*, vol. 46(1), pp. 389–442, 2002.
- [24] R. Wald, T. M. Khoshgoftaar, and D. Dittman, “Mean aggregation versus robust rank aggregation for ensemble Gene Selection,” 2012 11th International Conference on Machine Learning and Applications, 2012. doi:10.1109/icmla.2012.20.
- [25] A.-C. Haury, P. Gestraud, and J.-P. Vert, “The influence of feature selection methods on accuracy, stability and interpretability of molecular signatures,” *PLoS ONE*, vol. 6, no. 12, 2011. doi:10.1371/journal.pone.0028210.
- [26] U. Alon et al., “Broad patterns of gene expression revealed by clustering analysis of tumor and normal colon tissues probed by oligonucleotide arrays,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, no. 12, pp. 6745–6750, 1999. doi:10.1073/pnas.96.12.6745.
- [27] D. Singh et al., “Gene expression correlates of clinical prostate cancer behaviour,” *Cancer cell*, vol. 1, pp. 203–209, 2002.
- [28] T. R. Golub et al., “Molecular classification of cancer: Class Discovery and class prediction by Gene Expression Monitoring,” *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 531–537, 1999. doi:10.1126/science.286.5439.531.
- [29] G. J. Gordon et al., “Translation of microarray data into clinically relevant cancer diagnostic tests using gene expression ratios in lung cancer and mesothelioma,” *Cancer Res*, vol. 62, pp. 4963–4967, 2002. doi:10.1126/science.286.5439.531.
- [30] A. Alizadeh et al., “Distinct types of diffuse large B-cell lymphoma identified by gene expression profiling,” *Nature*, vol. 403, pp. 503–511, 2000.
- [31] T. Fawcett, “An introduction to ROC analysis,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006. doi:10.1016/j.patrec.2005.10.010

- [32] L. I. Kuncheva, "A stability index for feature selection," In *Artificial intelligence and applications*, pp. 421–427, 2007.
- [33] Z. Li, W. Xie, and T. Liu, "Efficient feature selection and classification for Microarray Data," *PLOS ONE*, vol. 13, no. 8, 2018. doi:10.1371/journal.pone.0202167.
- [34] Q. Chen, Z. Meng, and R. Su, "Werfe: A gene selection algorithm based on recursive feature elimination and ensemble strategy," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, 2020. doi:10.3389/fbioe.2020.00496.
- [35] M. K. Ebrahimpour and M. Eftekhari, "Ensemble of Feature Selection Methods: A hesitant fuzzy sets approach," *Applied Soft Computing*, vol. 50, pp. 300–312, 2017. doi:10.1016/j.asoc.2016.11.021.
- [36] M. Qaraad, S. Amjad, P. El-Kafrawy, H. Fathi, and I. I. M. Manhrawy, "Parameters optimisation of elastic net for high dimensional data using PSO algorithm," *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, 2020. doi:10.1109/iscv49265.2020.9204218.
- [37] M. S. Othman, S. R. Kumaran, and L. M. Yusuf, "Gene selection using hybrid multi-objective cuckoo search algorithm with evolutionary operators for cancer microarray data," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 186348–186361, 2020. doi:10.1109/access.2020.3029890.
- [38] D. Santhakumar and S. Logeswari, "Efficient attribute selection technique for leukaemia prediction using microarray gene data," *Soft Computing*, vol. 24, no. 18, pp. 14265–14274, 2020. doi:10.1007/s00500-020-04793-z.
- [39] [1] K. Cahyaningrum, Adiwijaya, and W. Astuti, "Microarray gene expression classification for cancer detection using artificial neural networks and genetic algorithm hybrid intelligence," *2020 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)*, 2020. doi:10.1109/icodsa50139.2020.9213051.
- [40] T. Nguyen, A. Khosravi, D. Creighton, and S. Nahavandi, "A novel aggregate gene selection method for microarray data classification," *Pattern Recognition Letters*, vol. 60, pp. 16–23, 2015. doi:10.1016/j.patrec.2015.03.018.

IX. APPENDIX

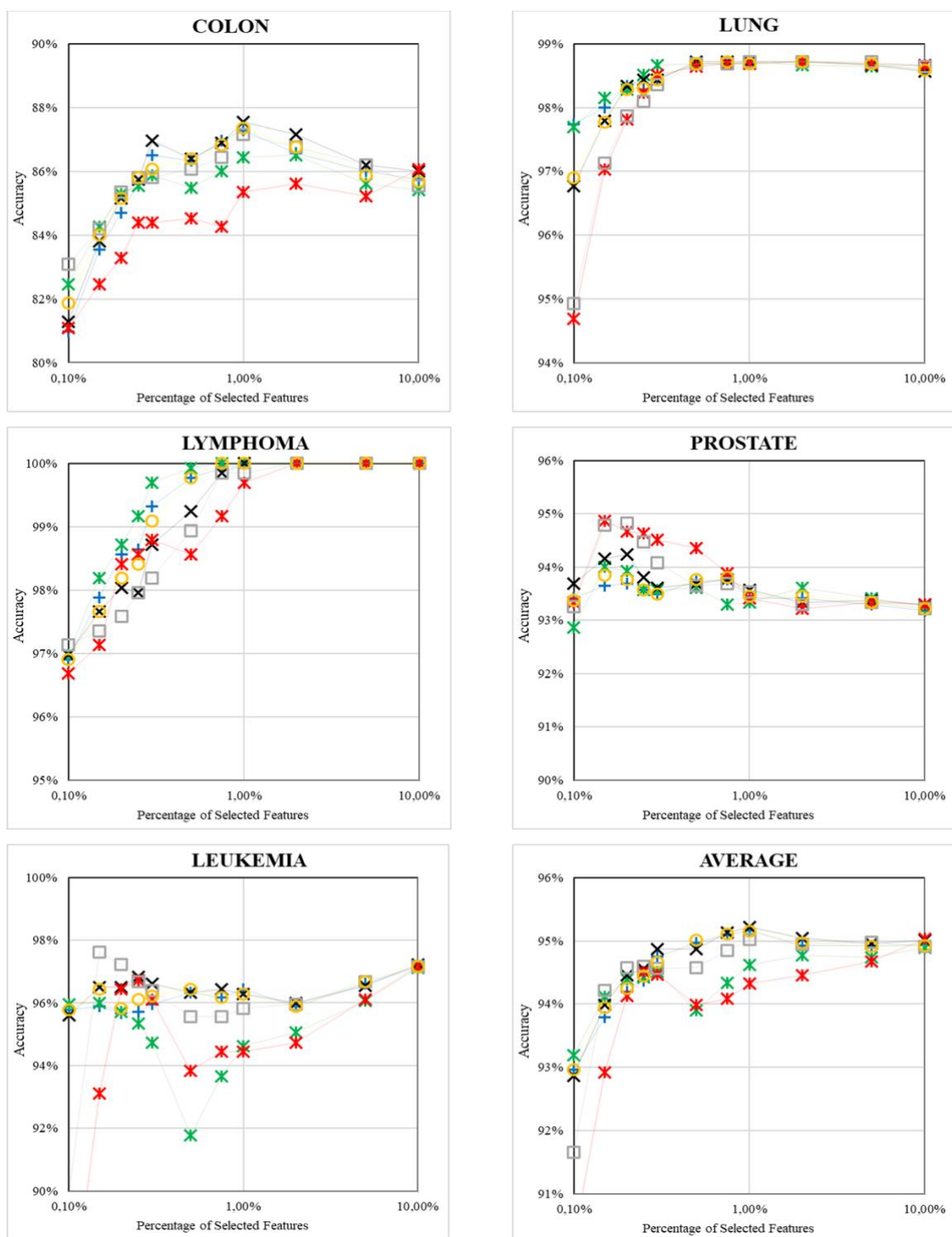


Figure A1. Classification Performance of the Rank Aggregation Methods in terms of Accuracy

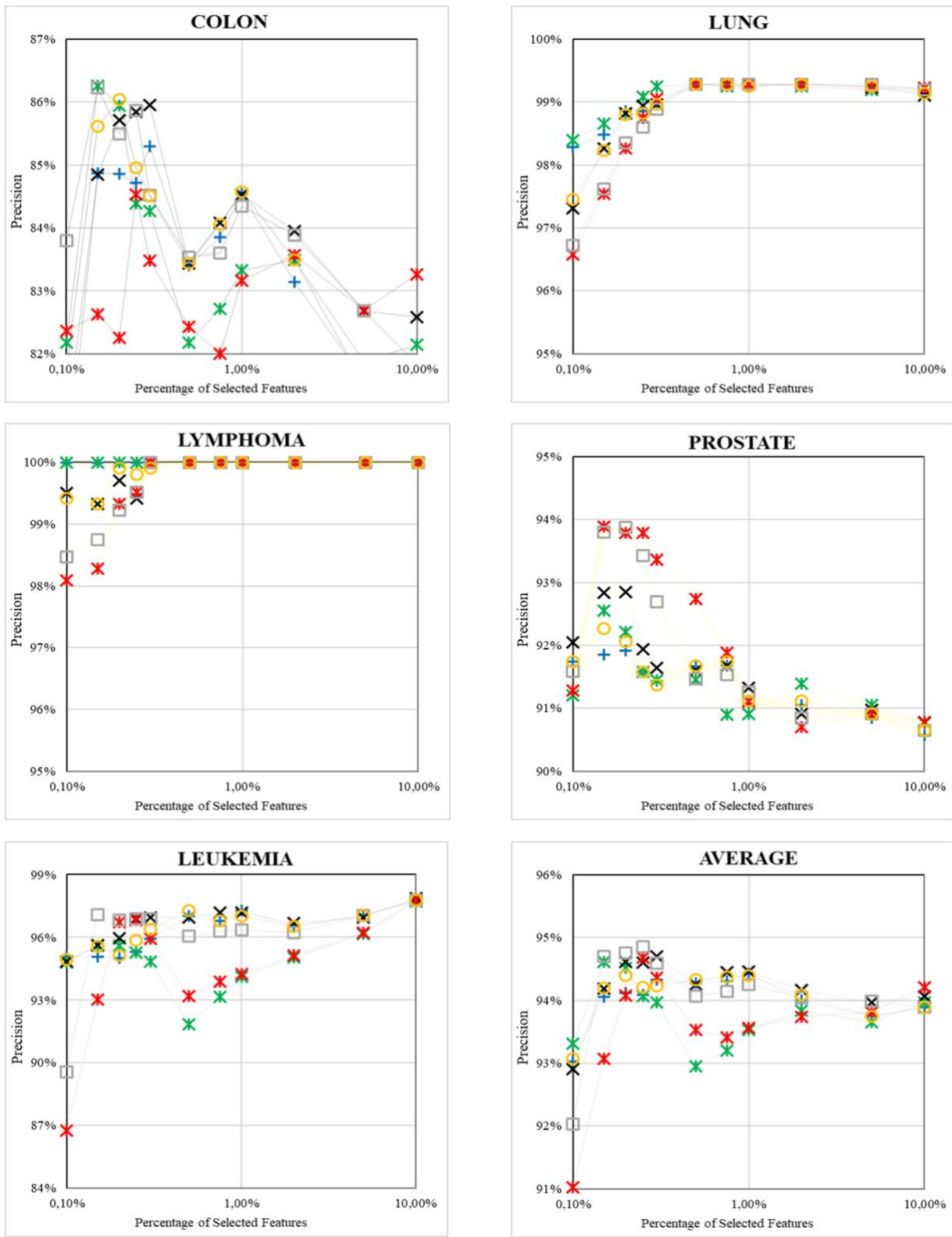


Figure A2. Classification Performance of the Rank Aggregation Methods in terms of Precision

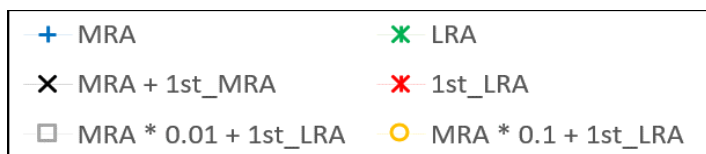
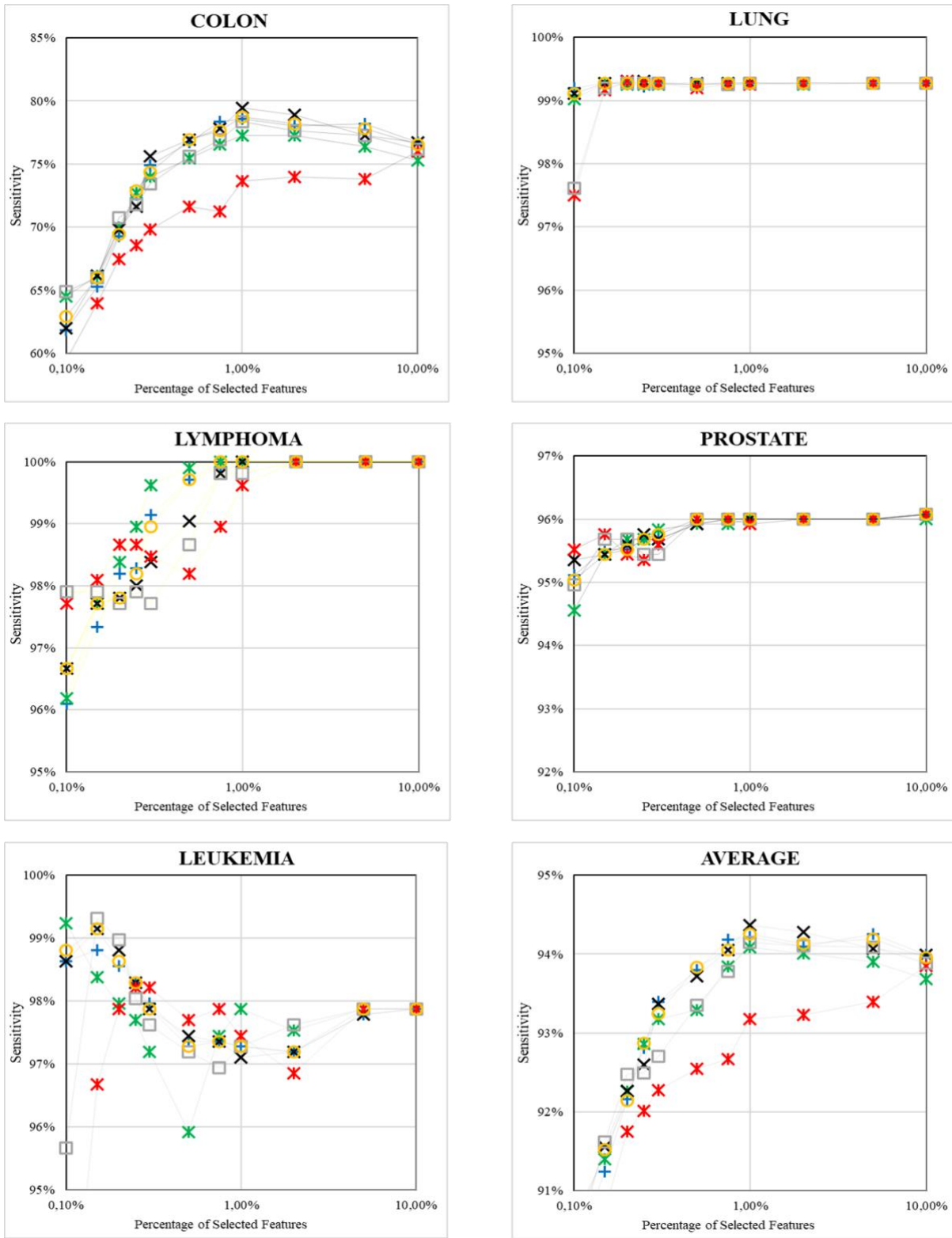


Figure A3. Classification Performance of the Rank Aggregation Methods in terms of Sensitivity

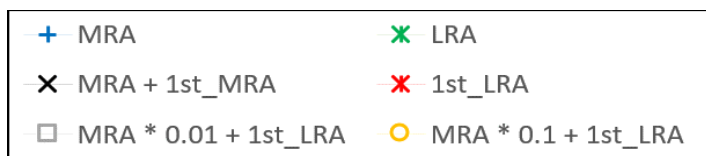
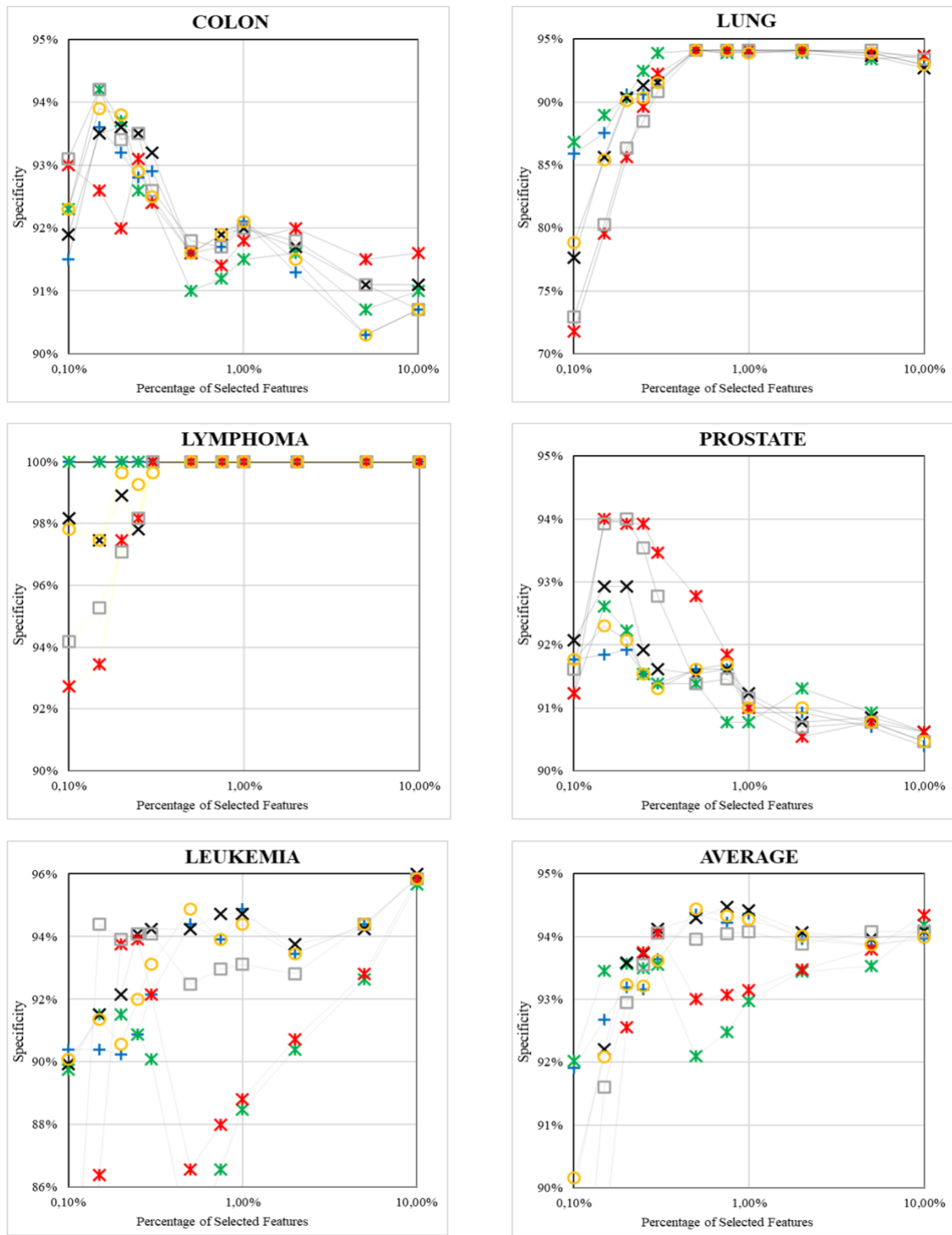


Figure A4. Classification Performance of the Rank Aggregation Methods in terms of Specificity



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Etil Alkol Yakıtlı HCCI Motorun Performans, NO ve İS Emisyon Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

 Adem TÜYLÜ^{a,*},  Ahmet KOLİP^a,  Hasan Ali ÇELİK^a

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ademtuylu@subu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1184716

Öz

Rezervlerinin sınırlı ve hızla tükeniyor olması fosil yakıtların kullanım maliyetlerini artırmaktadır. Bununla birlikte, yasal emisyon standartlarının fosil yakıt kaynakları ile karşılanmasında güçlükler yaşanmaktadır. Araştırmacılar yenilenebilir, daha temiz ve ısıl değerleri petrol kökenli yakıtlara yakın olan yakıtları test motorlarında kullanarak incelemektedirler. Etanol içten yanmalı motorlarda yaygın bir biçimde kullanılan, yenilenebilir yakıtlardandır. Etanol yakıtının belirli oranlara kadar dizel motorlarında kullanılması sonucu motor performansında iyileşmeler gerçekleşmektedir. Diğer yandan, NO emisyonlarında artışlar, is emisyonlarında ise azalmalar gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, tek silindirli, doğal emişli bir dizel motorunda etanol fumigasyonu ve EGR uygulanmıştır. Homojen dolgulu sıkıştırma ateşleme (HCCI) motor, emme portuna etanol yakıtı enjekte edilerek elde edilmiştir. İlk olarak motor tam yük şartları altında dizel yakıt ile çalıştırılarak standart (STD) motorun emisyon ve performans değerleri çıkartılmıştır. Etanol fumigasyonu aşamalarında, dizel yakıtı kısılarak motorun güç değerleri standart durumda elde edilen güç değerlerine getirilmiştir. Motor özgül yakıt sarfıyatı (ÖYS) ve efektif verimindeki (n_e) değişimler gözlemlenmiştir. EGR uygulamaları üç farklı oranda uygulanmıştır. Motor performans ve emisyon parametreleri bakımından, optimum dizel-etanol yakıtın, kütlece %88 dizel, %12 etanol (E12), optimum EGR oranının %15 (EGR15) olduğu saptanmıştır. Motor tam yük şartlarında E12 ile çalıştırılırken EGR15 uygulanarak E12EGR15'e ait motor performans ve emisyon parametreleri tespit edilmiştir. Etanol fumigasyonu ile artış gösteren NO emisyonlarının E12EGR15 kombinasyonu ile belirgin bir miktarda indirildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dizel Motor, HCCI, Etanol Fumigasyonu, Motor Performansı, NO ve İS Emisyonları

Experimental Investigation of Performance, NO and Soot Emission Properties of Ethyl Alcohol Fueled HCCI Engine

ABSTRACT

Limited and rapidly depleting reserves increase the cost of using fossil fuels. However, meeting legal emissions standards with fossil fuel sources is experiencing difficulties. Researchers study the use of propellants with renewables, cleaner and thermals closer to petroleum-based fuels in test engines. Ethanol is one of the renewable fuels widely used in internal combustion engines. The use of ethanol fuel in diesel engines up to a certain percentage points improves motor performance. On the other hand, there have been increases in NO emissions and reductions in soot emissions. In this study, ethanol fumigation and EGR were applied to a single cylinder, naturally absorbed diesel engine. A homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine is achieved by injecting

ethanol fuel into the intake port. Initially, the engine was operated by diesel fuel under full load conditions and standard engine performance and emission data (STD) have been extracted. In the ethanol fumigation stages, the diesel fuel was throttled and the power values of the engine were brought to the power values obtained in the standard condition. Changes in engine brake specific fuel consumption (BSFC) and brake thermal efficiency (BTE) were observed. EGR applications have been implemented at three different rates. In terms of motor performance and emission parameters, optimal diesel-ethanol fuel, 88% diesel, 12% ethanol by mass (E12), optimal EGR ratio of 15% (EGR15) was found. Engine performance and emission parameters of E12EGR15 were determined by applying EGR15 while the engine was running with E12 under full load conditions. It was observed that NO emissions, which increased with ethanol fumigation, were significantly reduced with the combination of E12EGR15.

Keywords: Diesel Engine, HCCI, Ethanol Fumigation, Engine Performance, NO and Soot Emissions

I. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda faydalı iş elde etmek için enerji kaynağı olarak kullanılan petrol kökenli yakıtların rezervlerinin tükeniyor olması, insan ve çevre sağlığı için daha temiz yakıtlara olan ihtiyaç, araştırmacıları motor yanma verimliliğini artırma çalışmalarına yönlendirmektedir [1]. Dizel motorların termal verimliliğini artırmak ve çevreye salmış olduğu zararlı emisyonları azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Farklı yenilenebilir yakıtların dizel motorlarında kullanılması ile yanma verimliliğinde artışlar sağlanmaktadır. Verimli yanma neticesinde motor performansında artışların yaşanmasının yanında motordan salınan egzoz emisyonları da indirgenmektedir. İçten yanmalı motorlarda yaygın bir biçimde kullanılan yenilenebilir, alternatif yakıtlar arasında alkoller yer almaktadır [2], [3].

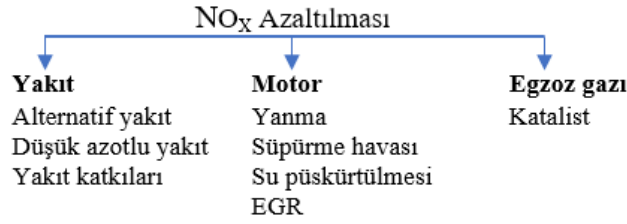
Alkoller dizel motorlarında dört farklı yöntem ile kullanılmaktadır. Bunlar: Alkol-dizel karışımı, alkol-dizel emülsiyonu, alkol fumigasyonu ve çift püskürtme sistemidir. Bu yöntemlerin ilk ikisinde katkı maddeleri kullanarak faz ayrışmalarının önüne geçilir iken diğer iki yöntemde sırasıyla emme portu ve yanma odasına püskürtme yapacak ikinci bir enjektör kullanılmaktadır [4]-[6].

HCCI motor çalışması bakımından otto ve dizel motorların kombinasyonudur. Yanma ve emisyonlar açısından her iki motorun üstün özelliklerini barındırmaktadır. Diğer bir ifadeyle HCCI motor kısmi yük koşullarında düşük yakıt tüketimi, tam yük koşulları altında ise yakıt hava karışımı homojenliğinin yüksek olması ile otto ve dizel motorların sentezi bir motordur. Konvansiyonel dizel motorları farklı uygulamalar veya çeşitli modifikasyonlar ile HCCI motorlara dönüştürülebilmektedir [7]-[11].

HCCI motor genellikle ana enjeksiyon öncesi pilot enjeksiyonların yapılması veya emme zamanı emme hattına yakıt enjeksiyonu yapılarak gerçekleştirilmektedir. Emme ve sıkıştırma zamanlarında homojen bir şekilde karışmış olan yakıt hava karışımı içinde sıkıştırma zamanı sonuna doğru birçok noktada kendiliğinden tutuşmalar başlamakta ve yaymış oldukları ısılar ile yakın noktalardaki karışımın alev almasını tetiklemektedir. Sonuç olarak HCCI motorda yanma, otto motorlardaki gibi alev cephesinin ilerlemesi veya dizel motorlardaki gibi difüzyon alevinin ilerlemesi ile gerçekleşmemekte, silindir içinde yanma rejimine ulaşmış olan noktalarda eş zamanlı ve homojen bir şekilde gerçekleşmektedir. Araştırmacılar HCCI motorların performans ve emisyonlar bakımından geleneksel dizel motorlarından üstün olduğunu ileri sürmektedirler [12]-[17].

Etanol ve metanol alkollerini ekonomik olarak çeşitli hammaddelerden üretilmelerini, içten yanmalı motorlarda herhangi bir modifikasyon gerektirmeden kullanabilmeleri ve çevre dostu yakıtlar olmaları bakımından araştırmacılar için gelecek vaat etmektedir. Dizel-etanol yakıt karışımlarındaki etanol miktarı motor sıkıştırma oranının artırılması veya yakıt karışımı setan sayısının katkı maddeleri ilavesi ile iyileştirilmesi sonucunda %95 oranına kadar artırılabilir [18], [19].

Emisyonlar açısından NO_x ve is emisyonları dizel motorlarında temel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. NO_x emisyonlarının indirgenmesinde, yanma öncesi, yanma esnası ve yanma sonrasında çeşitli müdahale yöntemleri uygulanmaktadır. EGR ile NO_x emisyonlarında önemli oranlarda indirgemeler gerçekleşirken motor performansı olumsuz etkilenmektedir.



Şekil 1. NO_x Emisyonları Kontrol Yöntemleri [20]

Ezer [21], direkt enjeksiyonlu ve tek silindirli dizel motorunu 1500 d/dk sabit motor hızında, farklı yük koşulları altında, yakıt olarak dizel yakıtı, kütlece %85 dizel ve %15 etanol, dizel yakıtını dietil eter ilavesi miktarınca azaltarak, kütlece %15 etanol ihtiva eden dizel-etanol yakıt karışımına kütlece %2 ve %4 dietil eter katkılarıyla oluşturduğu yakıtları kullanmıştır. Dizel yakıtı alkollerin ilave edilmesi sonucunda motorun aynı çalışma koşulları altında hava fazlalık katsayısının yaklaşık %10 oranında arttığını ve egzoz gazı sıcaklıklarının ortalama %5 azaldığını tespit etmiştir. Dizel-etanol-dietil eter yakıt karışımlarının kullanımı sonucu yalnız dizel yakıt ile elde edilen güce yakın bir güç değeri sağlanırken, ÖYS'de %8,5 azalma ve efektif verimde %16 artış gözlemlenmiştir. NO_x emisyonlarının motor yüklenme koşullarına bağlı olarak %6,8 ile 18,2 oranları aralığında indirgenmiş olduğunu öne sürmüştür.

Aydın ve ark. [22], su soğutmalı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu dizel motorunda yakıt olarak dizel-biyodizel-etanol, üçlü yakıt karışımını kullanmışlardır. Yalnız dizel yakıtın kullanıma kıyasla üçlü yakıt karışımının kullanılması sonucu emisyonların indirgenmesini tespit etmişlerdir. Emisyonlarda meydana gelen azalışın nedenini üçlü yakıt karışımının setan sayısının dizel yakıtın setan sayısından büyük olması ile açıklamışlardır.

Wu ve ark. [23], common rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip, aşırı doldurmalı, 6 silindirli bir dizel motorunda dizel-etanol-tetrahidrofur, üçlü yakıt karışımını kullanımının motorun emisyon ve performansı üzerine etkilerini deneysel bir şekilde araştırmışlardır. Tetrahidrofur (THF) yakıtını, hacimce farklı oranlarda hazırlanan dizel-etanol yakıt karışımlarının homejenizasyonu, diğer bir ifade ile karışım içinde yakıt ayrışmasının önüne geçmek amacıyla kullanmışlardır. Dizel-etanol-THF yakıt karışımının kullanımı ile kısmi ve tam yük koşulları altında, dizel yakıt kullanımına kıyasla is emisyonlarında düşüşler, NO_x emisyonlarında ise artışlar gözlemlenmiştir. Motor performansı bakımından en yüksek efektif verimleri yalnız dizel yakıtının kullanılması sonucunda elde ettiklerini açıklamışlardır.

Rakopoulos ve ark. [24], direkt enjeksiyonlu, aşırı doldurmalı, 6 silindirli, Mercedes-Benz marka bir dizel motorunda dizel-n-bütanol ve dizel-etanol yakıt karışımlarının motorun emisyon ve performansı üzerine etkilerini deneysel bir şekilde araştırmışlardır. Dizel motor emisyonlarından is emisyonunu indirgemede kullanmış oldukları iki yakıt karışımı içinde dizel-etanol yakıt karışımının, NO_x emisyonlarını indirgemede ise dizel-n-bütanol yakıt karışımının daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Yılmaz [25], doğal emişli, direkt enjeksiyonlu, 2 silindirli bir dizel motorunda dizel-biyodizel-etanol ve dizel-biyodizel-metanol yakıt karışımlarını test etmiştir. Her iki yakıt karışımı için motoru aynı koşullar altında işletmiştir. Yakıt karışımlarının alkol miktarı arttıkça motorun HC ve CO emisyonlarında artışlar, NO emisyonlarında ise azalmalar tespit etmiştir. Yakıt karışımları içerisinde aynı oranda bulunmaları durumunda, NO emisyonlarının indirgenmesinde etanolün metanolden daha etkili olduğunu gözlemlenmiştir.

Pedrozo ve ark. [26], common rail yakıt enjeksiyonlu, tek silindirli bir dizel motorunda etanol fumigasyonu uygulamalarını EGR'siz ve %25 EGR'li olarak tatbik etmişlerdir. Deneysel çalışmalarını

motor hızını sabit 1200 d/dk hızda ve 0,9, 1,2 ve 1,5 MPa ortalama efektif gücü veren, üç yük koşulu altında gerçekleştirmişlerdir. Egzoz hattı üzerine bağlamış oldukları ısı değiştiricisi sayesinde EGR uygulamasını görece soğuk uygulamışlardır. Etanol yakıtının dizel yakıtı oranı her iki yakıtın kütleli debisi ve alt ısı değerlerinden hareketle hesaplanan yakıt enerjileri oranları ile hesaplanmıştır. Toplam yakıt enerjisi içinde etanol kesri 0,0'dan 0,8'e kadar değiştirilmiştir. Etanol miktarı artması sonucu silindir içi basınç artış oranındaki dramatik yükselişler yakıt enjeksiyon sistemi ile uygulanan, ana enjeksiyon öncesi ön enjeksiyonlar ile indirgenmiştir. Ön yakıt enjeksiyonu sayesinde 0,8 etanol kesrine kadar motorun vuruntulu bir yanma gerçekleştirmeden kararlı bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Etanol fumigasyonu sonucu NO_x emisyonlarında maksimum %68 indirgeme, EGR uygulamalı etanol fumigasyonu ile ise maksimum %80 azalma gözlemlenmiştir.

Pandey ve ark. [27], doğal emişli, tek silindirli bir dizel motorunda emme havası sıcaklığını 40°C sıcaklıkta sabit tutarak emme hattına etanol enjeksiyonu gerçekleştirmişlerdir. Uygulamanın emisyonlar üzerine etkisini araştırmışlardır. Emme hattına etanol püskürtülmesi ile düşük yük koşulları altında CO ve HC emisyonlarında artışlar, NO_x ve is emisyonlarında ise azalmalar tespit etmişlerdir. Emisyonlardaki değişimi etanol yakıtının gizli buharlaşma ısısının yüksek olup düşük motor yüklerinde silindir içi maksimum basınç ve ısı salınım oranlarını azaltıyor olması ile açıklamışlardır.

Bu çalışmada, tek silindirli doğal emişli bir dizel motorun, tam yük koşulları altında, motor hızının 1200 d/dk'den 2400 d/dk'ye 200'er devir aralıklarla değiştirildiği durumlarda etanol fumigasyonu ile HCCI motor elde edilmiştir. HCCI motor yanması ve EGR uygulamaları ile elde edilen veriler STD veriler ile mukayese edilmiştir. Motor performans ve emisyon değerlerindeki değişimler sunulmuş, nedenleri açıklanmaya çalışılmıştır.

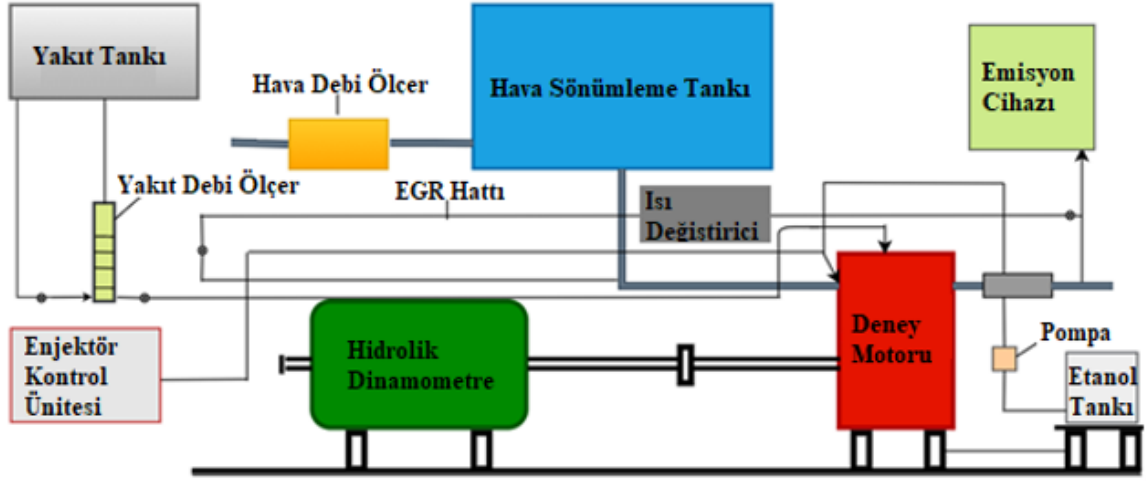
II. MATERYAL ve METOT

Deneyel çalışmada aşağıdaki Tablo 1' de özellikleri verilen Super Star marka dizel motoru kullanılmıştır. Deney motorundan farklı yük koşulları, çeşitli dizel-etanol yakıt karışımları kullanılması ve EGR uygulamaları sonucu elde edilen güç ve tork parametrelerinin saptanabilmesi için, motor gerekli shaft bağlantıları ile hidrolik dinamometreye bağlanmıştır. Test düzeneği şematik olarak Şekil 2' de resmedilmiştir.

Tablo 1. Test Motoru Özellikleri

Motor Tipi	Super Star
Piston Çapı	108 mm
Strok	100 mm
Silindir Sayısı	1
Strok Hacmi	0,92 dm ³
Güç, 2400 d/dk,	12 kW
Püskürtme avansı	32 °KMA
Enjektör Açma Basıncı	225 bar
Maksimum Devir	2800 d/dk
Soğutma Tipi	Su
Püskürtme Tipi	Direkt Enjeksiyon

Dinamometre koluna bağlanan load cell S tipi ve hassasiyeti 0,1 kg' dır. Motor yakıt sarfiyatı ölçümü hacimsel olarak ölçülmüştür. 25 cm³ ve 50 cm³ hacimlere taksimat edilmiş cam tüp içindeki dizel yakıtının tüketiminin süresi tutularak yakıt sarfiyatı elde edilmiştir. Dizel yakıtın yoğunluğu ve tespit edilen hacimsel yakıt tüketiminden hareketle kütleli yakıt debisi saptanmıştır. Deney çalışmada kullanılan yakıtların bazı özellikleri Tablo 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel Düzeneği Şeması

Etanol fumisasyonu, yakıt pompası, selenoid enjektör, yakıt tankı, basınç sınırlayıcı, manometre, mikrodenetleyici, üst ölü nokta sensörü ve abselit encoderden ve oluşan bir elektronik kontrollü püskürtme sistemi ile uygulanmıştır. Etanol yakıt hattı üzerinde bulunan regülatör aracılığıyla enjektör sabit 3 bar basınçlı etanol ile beslenmiştir.

Deneysel adımlarında uygulanan etanol yakıt miktarının tespit edilebilmesi amacıyla, deneylere başlanılmadan etanol yakıtı enjektörünün karakteristik özellikleri belirlenmiştir. Elektronik kontrol ünitesi vasıtasıyla enjektör açık kalma süreleri ve enjektöre gönderilen elektrik voltaj değerleri ayarlanmış ve 500 tekrarlı püskürtme, pals, neticesinde püskürtülen yakıt miktarı 0,0001 g hassasiyetindeki hassas terazi ile ölçülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda enjektörün yakıt püskürtme karakteristiği yüksek bir doğrulukla tayin edilmiştir.

EGR uygulamalarında uygulanan EGR oranları, emme havası içeriğindeki yüzde CO₂ konsantrasyonları dikkate alınarak belirlenmiştir [28]. Emme havası emisyon ölçüm cihazına gönderilerek % CO₂' ler saptanmıştır. EGR hattı üzerinde kurulan ısı değiştiricisi, sıcak egzoz gazlarının soğutulmasını emme havasına gönderilmesine imkân sağlamıştır.

$$EGR(\%) = \frac{[(CO_2)_{emme\ manifoldu} - (CO_2)_{cevre}]}{[(CO_2)_{egzoz\ manifoldu}]} \times 100 \quad (1)$$

Emisyonların ölçümünde, NO emisyonları ölçümü için 5 ppm hassasiyetinde ölçüm yapabilen Bosh BEA 550 marka egzoz gazı analiz cihazı, is emisyonları ölçümü için 0,01 hassasiyetinde ölçüm yapabilen Bilsa Mode 5000 marka opacimeter kullanılmıştır.

Tablo 2. Yakıtlara Ait Bazı Özellikler [27]

Yakıt özellikleri	Dizel	Etanol
Özgül ağırlık (20 °C' de kg/m ³)	840	786
Viskozite (40 °C' de mm ² /s)	2.4	1.2
Setan sayısı	50	8
Alt ısı değer (kJ/kg)	43200	26900
Gizli buharlaşma ısısı (kJ/kg)	270	840
Oksijen (% ağırlık)	–	34.8
Alevlenme noktası (°C)	78	15

Deney öncesinde düzenekteki belirli ekipmanların kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Motor rejim sıcaklığına ulaşana denk boşta çalıştırılmıştır.

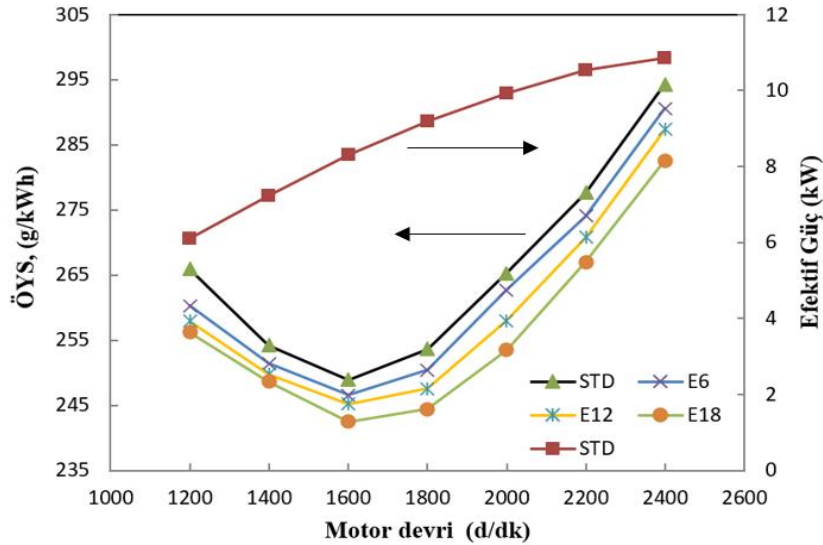
Deney adımları ilk olarak yalnız dizel yakıtı kullanımı ile tam yük şartları altında, motor devrinin 1200' den 2400' e kadar 200' er aralıkla belirlendiği koşullarda gerçekleştirilmiştir. Motor performans ve emisyonlarının motor hızına göre değişimlerinin resmedilmesi için belirlenen 7 motor hızından 1600 d/dk'de maksimum moment, 2400 d/dk'de ise maksimum güç elde edilmektedir. Belirli oranlardaki etanol fumigasyonu ile motor gücünde yaşanan artışlar, belirli miktarda dizel yakıtı kesilerek, yalnız dizel yakıtı ile elde edilen güç büyüklüklerine çekilmiştir. Aynı büyüklükte güç elde edilirken motor özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verimindeki değişiklikler belirlenmiştir.

III. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

A. ETANOL FUMİGASYONUNUN MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİ

A. 1. Özgül Yakıt Sarfiyatı

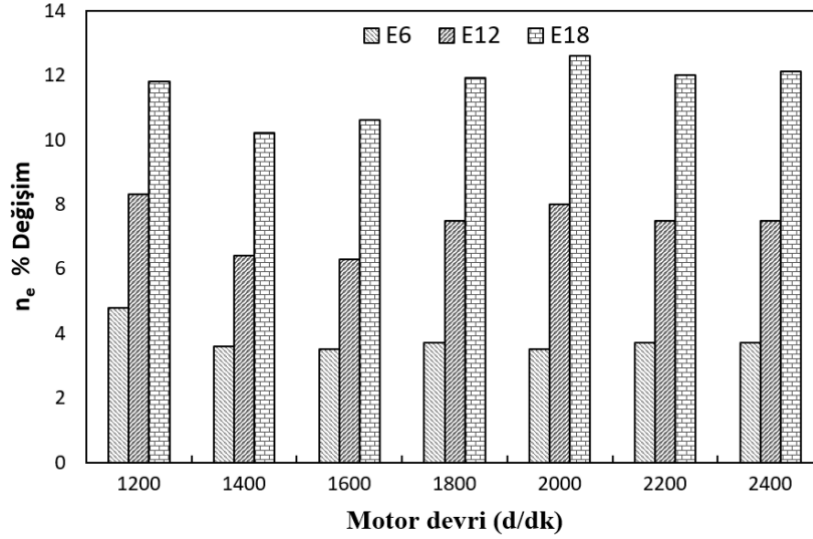
Tam yük koşulları altında, yalnız dizel yakıtı ile elde edilen motor güç değerleri, E6, E12 ve E18 etanol fumigasyonu uygulamalarında, dizel yakıtı kısılarak elde edilmiştir. Dizel ve dizel-etanol yakıt karışımlarının kullanımı ile elde edilen özgül yakıt sarfiyatındaki değişimler Şekil 3' de verilmiştir. Tüm motor devirlerinde ÖYS' nin karışımdaki etanol miktarının artması sonucu, azaldığı görülmektedir. Yakıt sarfiyatındaki iyileşmelerin özellikle 1800-2200 motor devirlerinde kayda değer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Deney yakıtlarından elde edilen güç ve özgül yakıt sarfiyatı

A. 2. Efektif Verim

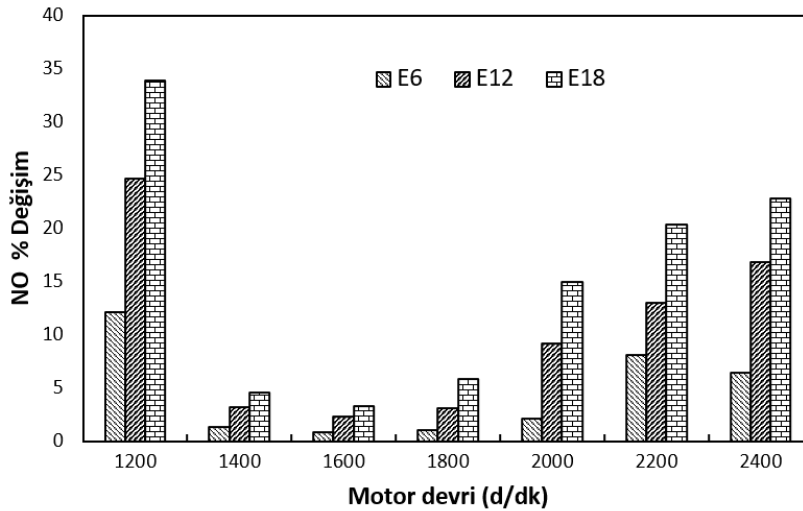
Eşit büyüklüklerde güç elde edilirken daha az yakıt tüketilmesi, doğal olarak, motor efektif veriminde artışlara sebep olmaktadır. Etanol fumigasyonu sonucu standart duruma kıyasla motor efektif verimindeki artışlar Şekil 4' te verilmektedir. Maksimum artış 2000 d/dk' de, E18 ile %12,6 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 4. Farklı oranlarda gerçekleştirilen etanol fumigasyonu ile efektif verimdeki değişimler

B. Etanol Fumigasyonunun NO ve İS Emisyonlarına Etkisi

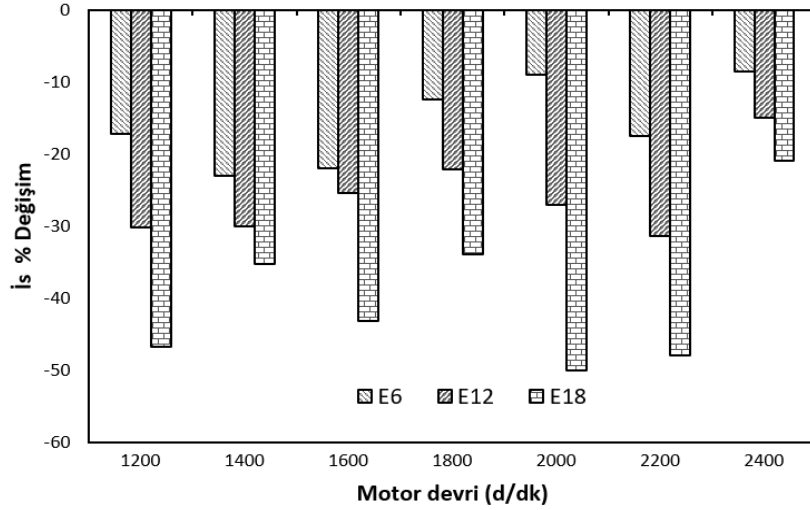
NO ve İS emisyonları farklı uygulamalar neticesinde birbirine zıt davranış göstermektedir, yani, NO emisyonlarında artış yaşanırken, İS emisyonlarında azalmaların gerçekleşmesi gibi. NO emisyonlarında silindir içi sıcaklıkların artması ve oksijen konsantrasyonunun artması sonucu artışlar gerçekleşmektedir. Etanol yakıtının oksijen içeriği bakımından zengin bir yakıt oluşu ve yüksek gizli buharlaşma ısısı neticesinde emme zamanında daha fazla havanın silindir içerisine alınmasını sağlaması, silindir içi oksijen konsantrasyonlarında belirgin bir artışa sebep olmaktadır. Bununla birlikte etanol yakıtının setan sayısının düşük olması tutuşma gecikmesini artırmaktadır. Bu yakıt hava karışımının daha yüksek basınç ve sıcaklıklarda yanmasına ve dolayısıyla NO emisyonlarında artışa yol açmaktadır. Şekil 5’ te üç farklı oranda uygulanan etanol fumigasyonunun, STD duruma kıyasla NO emisyonlarında meydana getirdiği değişimler sunulmuştur.



Şekil 5. Etanol fumigasyonu ile standart motor verilerine kıyasla NO emisyonlarındaki değişimler

İS emisyonları, yanmamış karbon partikülleri, oluşumundaki artışlar daha ziyade silindir içi oksijen konsantrasyonunun azalması veya uygun hava-yakıt karışımının gerçekleşemediği durumlarda gözlemlenmektedir. Etanol fumigasyonu ile silindir içi oksijen miktarı arttığı için yakıt yanma veriminde iyileşmeler yaşanmakta ve İS emisyonlarında azalmalar gerçekleşmektedir. Şekil 6’ da farklı oranlarda uygulanan etanol fumigasyonu sonucu STD duruma göre İS emisyonlarındaki değişimler

verilmiştir. Standart is emisyonu verilerine kıyasla belirgin bir şekilde azalmaların gerçekleştiği görülmektedir. 2000 d/d' da E18 ile is emisyonlarında yaklaşık %50' lik bir azalma tespit edilmiştir.

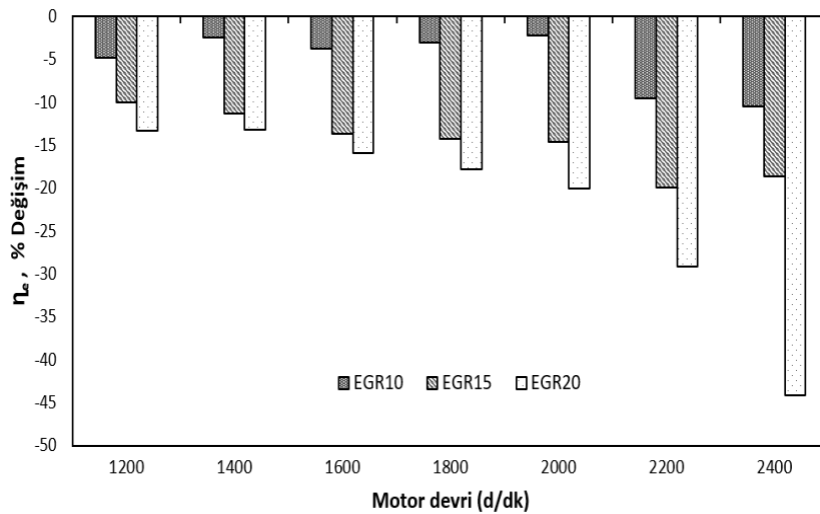


Şekil 6. Etanol fumigasyonu ile standart motor verilerine kıyasla is emisyonlarındaki değişimler

Farklı oranlarda gerçekleştirilen etanol fumigasyonları içerisinde E18' in motor performans ve emisyon parametreleri dikkate alındığında optimum olduğu belirlenmiştir. E18 ile motor performansında ve is emisyonlarında önemli iyileşmeler gerçekleşirken, NO emisyonlarında belirgin miktarda artışlar yaşanmıştır. Artan NO emisyonlarını indirmek amacıyla E18 ile çalışan motora EGR uygulaması yapılmıştır.

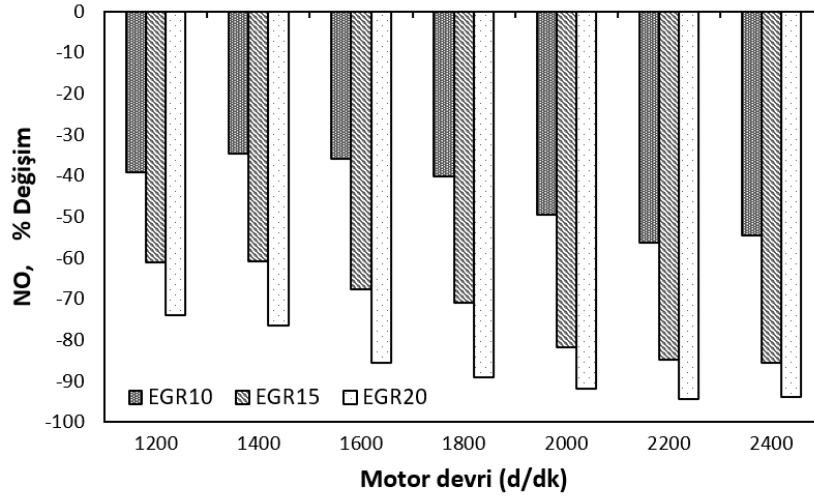
C. EGR' nin Motor Efektif Verimi, NO ve İs Emisyonlarına Etkisi

Farklı oranlarda gerçekleştirilen EGR uygulamalarının standart duruma kıyasla motor efektif veriminde meydana getirdiği değişimler Şekil 7' de verilmiştir. EGR uygulamaları neticesinde, silindir içi oksijen konsantrasyonlarında azalmalar yaşanmaktadır. Yanma odasında uygun hava-yakıt karışımı oluşmadığından yanma veriminde düşüşler gerçekleşmekte ve silindir içi maksimum sıcaklıklarda belirgin azalmalar kaydedilmektedir.



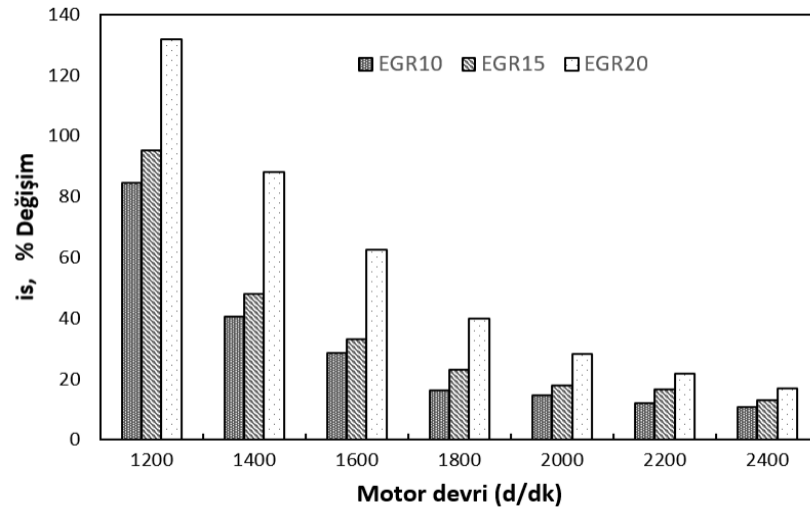
Şekil 7. EGR' nin efektif verime etkisi

EGR uygulamaları ile silindir içi zirve sıcaklıkların ve oksijen miktarlarının düşmesi NO emisyonlarının indirgenmesini sağlamaktadır. Şekil 8' de EGR uygulamaları ile NO emisyonlarındaki azalmalar görülmektedir. EGR oranı arttıkça NO emisyonlarında daha fazla indirgemeler gerçekleşmiştir.



Şekil 8. EGR uygulaması ile NO emisyonlarındaki değişimler

EGR uygulamaları neticesinde yanma verimindeki kötüşmeler is emisyonlarında artışlara neden olmuştur. Şekil 9’da EGR uygulamaları sonucu is emisyonlarındaki değişimler görülmektedir. Tüm motor devirlerinde artan EGR oranı ile birlikte is emisyonlarında da artışlar yaşanmıştır. EGR20 diğer iki oranda gerçekleştirilen EGR’ lere kıyasla is emisyonlarında belirgin artışlara neden olmuştur.

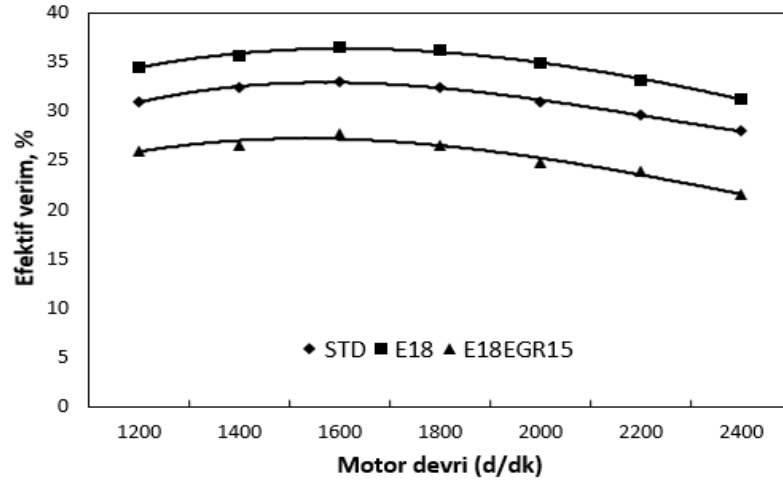
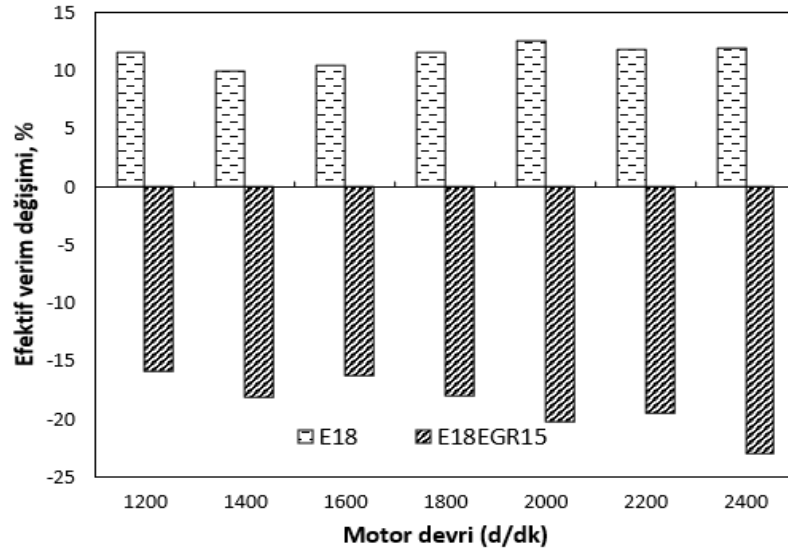


Şekil 9. EGR uygulaması sonucu is emisyonlarında gerçekleşen değişimler

EGR uygulamaları içinde motor performans ve emisyon parametreleri dikkate alındığında optimum EGR oranının EGR15 olduğu tespit edilmiştir. E18 ile NO emisyonlarında gerçekleşen artışların EGR15 ile indirgenmesi araştırılmıştır.

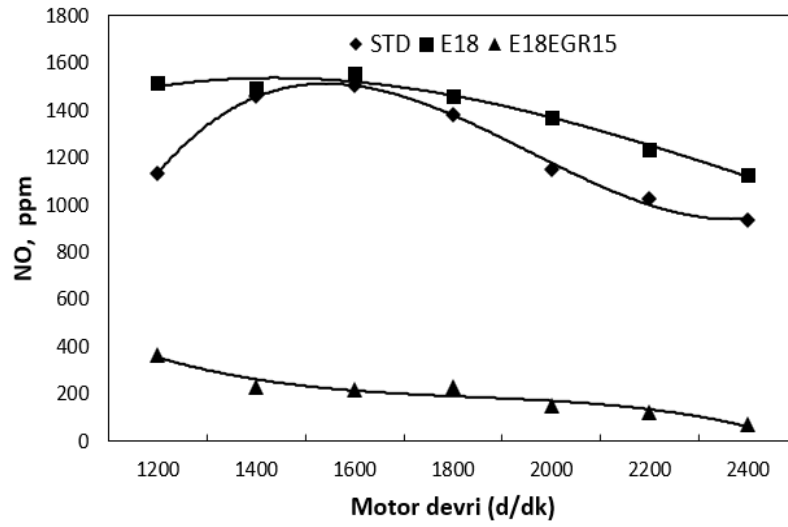
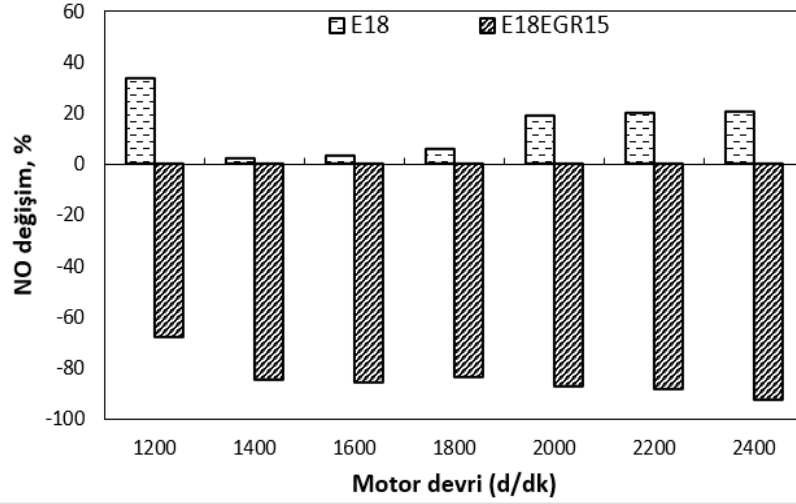
D. Etanol Fumigasyonu ve EGR Uygulamalarının Motor Performans ve Emisyonlara Etkisi

Etanol fumigasyonu ve EGR uygulamaları içerisinde optimum seçilmiş olan E18 ve EGR15’ in birlikte uygulanması neticesinde motor performans ve NO, is emisyonlarında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 10’ da E18 ile motor efektif verimindeki iyileşmelerin E18EGR15 ile kaybedildiği görülmektedir. Etanol fumigasyonu ile elde edilen motor volumetrik verimindeki artışların ve yanma verimindeki iyileşmelerin EGR uygulaması ile belirgin bir şekilde azaldığı ve motor efektif veriminde kayıplara neden olduğu düşünülmektedir.



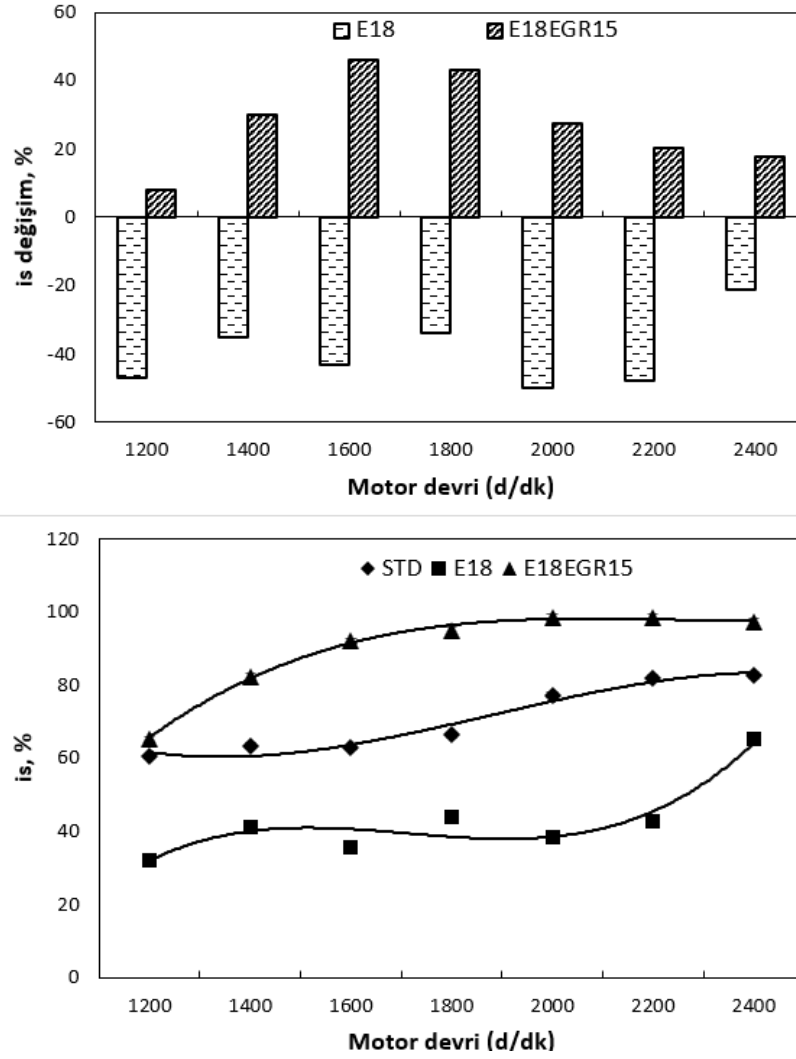
Şekil 10. STD, E18 ve E18EGR15 efektif verimler

Etanol fumigasyonu ile NO emisyonlarında yaşanan artışlar E18EGR15 ile radikal olarak indirgenmiştir. Zirve silindir içi sıcaklıkların düşmesinin ve silindir içi oksijen konsantrasyonlarının azalmasının NO emisyonları üzerinde indirgeyici bir davranış sergilediği literatürde yaygın bir biçimde kabul görmektedir. Şekil 11' de üç farklı çalışma koşulu için NO emisyonlarındaki dağılımlar verilmiştir.



Şekil 11. STD, E18 ve E18EGR15 NO emisyonları değişimi

Zirve is emisyonlarının E18EGR15 ile gerçekleştiği Şekil 12’ de gösterilmektedir. STD duruma kıyasla etanol fumigasyonu sonucu indirgenmiş olan is emisyonları EGR uygulaması ile yeniden artmıştır. 2000 ve 2200 motor devirlerinde is yüzdesi yaklaşık %98 olmuştur.



şekil 12. STD, E18 ve E18EGR15 is emisyonları değişimi

IV. SONUÇ

Doğal emişli, direkt enjeksiyonlu, tek silindirli bir dizel motorunda etanol fumigasyonu ile HCCI motor yanması sağlanmıştır. HCCI yanması sonucu elde edilen motor performans ve emisyon verileri ile STD verileri mukayese edilmiştir. Etanol fumigasyonu sonucu artan NO emisyonlarının indirgenmesi için EGR uygulanmıştır. Deneysel çalışmamızdan elde ettiğimiz veriler ve literatürde yer alan benzer çalışmalar ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üç farklı oranda gerçekleştirilen etanol uygulamalarının tümünde motor efektif veriminde artışların yaşandığı tespit edilmiştir. Etanolün emme havası sıcaklığını dışürerek motor volumetrik verimini artırması ve etanol yakıtının oksijen zengin oluşu motor performansında iyileşmelere neden olan başlıca etmendirdir.
- Tüm motor devirlerinde etanol fumigasyonu ile NO emisyonlarında artışlar, is emisyonlarında ise azalmalar kaydedilmiştir. Alkol fumigasyonu sonucu silindir içi oksijen konsantrasyonlarında artışların yaşanması ve yanma veriminin iyileşmesi emisyonlardaki değişimlerin temel sebebidir.

- Etanol fumigasyonu ile NO emisyonlarında gerçekleşen artışlar EGR ile ciddi oranda azaltılmıştır. EGR uygulamaları motor yanma verimini kötüleştirdiği için is emisyonlarında artışlar yaşanırken motor efektif veriminde düşmeler tespit edilmiştir.
- Etanol fumigasyonu ile elde edilen HCCI motorda motor performans ve emisyonları için optimum dizel yakıt enjeksiyon avansı deneysel çalışmalar ile belirlenebilir.
- Emme havasının ön ısıtılması veya turbo şarj uygulamaları ile etanol yakıtın hava içerisinde daha homojen bir dağılım göstermesi sağlanabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Z.H. Zhang, C. S. Cheung and C. D. Yao, "Influence of fumigation methanol on the combustion and particulate emissions of a diesel engine," Fuel, vol. 111, pp. 442-448, 2013.
- [2] Q. Wang, L. Wei, W. Pan and C. Yao, "Investigation of operating range in a methanol fumigated diesel engine," Fuel, vol. 140, pp. 164-170, 2015.
- [3] Z. Şahin, O. Durgun ve M. Kurt, "Turboşarjlı Ön Yanma Odalı Bir Dizel Motorunda Etanol Fumigasyonunun Deneysel İncelenmesi," TÜBAV Bilim Dergisi, c. 2, s. 4, ss. 446-461, 2009.
- [4] Ö. Can, İ. Çelikten and N. Usta, "Effects of ethanol addition on performance and emissions of a turbocharged indirect injection Diesel engine running at different injection pressures," Energy Conversion and Management, vol. 45, no. 5, pp. 2429-2440, 2004.
- [5] H. B. Yaylamış, "Bir dizel motoruna metanol fumigasyonu ve egr uygulamasının etkilerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2019.
- [6] M. Özdemir, "Bir dizel motorda biyodizel ve etanol kullanımının motor performansına ve emisyonlara etkisinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye 2011.
- [7] H. Yücesu, Ö. Can, C. Çınar, H. Yavuzcan ve M. Önder, "Bir dizel motorunda kısmi ve tam HCCI uygulaması," 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Ankara, Türkiye 2011.
- [8] M. Gowtham, C.G. Mohan and R. Prakash, "Effect of n-butanol fumigation on the regulated and unregulated emission characteristics of a diesel engine," Fuel, vol. 242, pp. 84-95, 2019.
- [9] S. K. Verma, S. Gaur, T. Akram, Samsher, and A. Kumar "Performance characteristic of HCCI engine for different fuels" Materials Today, vol. 47, pp. 6030-6034, 2021.
- [10] A. Calam, S. Halis, B. Aydoğan, and C. Haşimoğlu, "Combustion characteristics of naphtha and n-heptane fuels in an auto-ignited HCCI engine at different lambda values and engine loads," Fuel, vol. 327, no. April, 2022
- [11] S. Çelebi, B. Düzcan, U. Demir, A. Uyumaz, and C. Haşimoğlu, "Effects of light naphtha utilization on engine performance in an homogeneous charged compression ignition engine," Fuel, vol. 306, no. July, 2021.
- [12] Ö. Can, "Bir DI dizel motorda etanol ön karışımli kısmi-HCCI uygulamasının yanma ve emisyon üzerine etkilerinin incelenmesi," Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.

- [13] A. Türkcan, "Direkt püskürtmeli HCCI bir motorda püskürtme parametrelerinin yanma ve emisyon karakteristiklerine etkisinin incelenmesi," Doktora tezi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye 2013.
- [14] G. R. Gawale and G. N. Srinivasulu, "Experimental investigation of ethanol/diesel and ethanol/biodiesel on dual fuel mode HCCI engine for different engine load conditions," *Fuel*, vol. 263, 2020.
- [15] J. A. ENG, "Characterization of pressure waves in HCCI combustion," SAE Technical Paper, 2002.
- [16] C. Baumgarten, "Mixture formation in internal combustion engines," Springer, Heat and Mass transfer series, Berlin, 253-278, 2006.
- [17] A. Tüylü, Kısmi homojen dolgulu direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunun deneysel ve numerik olarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2021.
- [18] Y. Çelebi and H. Aydın, "An overview on the light alcohol fuels in diesel engines," *Fuel*, vol. 236, pp. 890–911, 2019.
- [19] A. Calam, B. Aydoğan, and S. Halis, "The comparison of combustion, engine performance and emission characteristics of ethanol, methanol, fusel oil, butanol, isopropanol and naphtha with n-heptane blends on HCCI engine," *Fuel*, vol. 266, no. January, 2020.
- [20] C. Haşimoğlu, Y. İçingür ve H. Öğüt "Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi," *Turkish J. Eng. Environ. Sci.*, cilt 26, no. 2, ss. 127-135, 2002.
- [21] İ. SEZER, "Dizel Yakıtına Etanol ve Dietil Eter Katılmasının Motor Performansı ve Emisyonlara Etkilerinin Deneysel İncelenmesi," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 37, no. 1, ss. 61-68, 2017.
- [22] F. Aydın, H. Öğüt, "Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions," *Renew. Energy*, vol. 103, pp. 688–694, 2017.
- [23] H. Liu, X. Wang, Y. Wu, X. Zhang, C. Jin and Z. Zheng "Effect of diesel/PODE/ethanol blends on combustion and emissions of a heavy duty diesel engine," *Fuel*, vol. 257, 2019.
- [24] C. D. Rakopoulos, D. C. Rakopoulos, G. M. Kosmadakis and R. G. Papagiannakis "Experimental comparative assessment of butanol or ethanol diesel-fuel extenders impact on combustion features, cyclic irregularity, and regulated emissions balance in heavy-duty diesel engine," *Energy*, vol. 174, pp. 1145–1157, 2019.
- [25] N. Yılmaz, "Comparative analysis of biodiesel-ethanol-diesel and biodiesel-methanol-diesel blends in a diesel engine," *Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 210-213, 2012.
- [26] V. B. Pedrozo, L. May and H. Zhao "Exploring the mid-load potential of ethanol-diesel dual-fuel combustion with and without EGR," *Appl. Energy*, vol. 193, pp. 263–275, 2017.
- [27] S. Pandey, S. Bhurat and V. Chintala "Combustion and emissions behaviour assessment of a partially premixed charge compression ignition (PCCI) engine with diesel and fumigated ethanol," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 590–596, 2019.
- [28] Ç. Çangal, "Farklı yakıt karışımları ve emisyon azaltma teknikleri uygulanan bir dizel motorda optimum parametrelerin taguchi yöntemi ile belirlenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2019.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Düşük Güçlü, Kayıplı Ağlarda RPL Yönlendirme ve Kenar İşleme Destekli, Merkezi Yönetime Sahip İzleme Sistemi

Arif CEYLAN ^{a,*}, Ali ÇALHAN ^b Murtaza CİCİOĞLU ^c

^a MEB, İstanbul, TÜRKİYE

^b Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^c Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: arifceylan@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1246722

ÖZ

Son yıllarda, nesnelerin internetindeki cihaz sayısının devasa artışı sebebiyle, cihazların IPv6 destekli olması önem kazanmaktadır. Düşük güçlü cihazlarda IPv6'ya uyumlu olması amacıyla kullanılan 6LoWPAN teknolojisi ve bu teknolojiyi kullanan ağlara özgü izleme mekanizmalarının önemi her geçen gün artmaktadır. Çalışmamızda 6LoWPAN ağlarında sensör verilerini yönetmek, izlemek, gerektiğinde kritik verileri buluta göndermek için bir mimari önerilmiş ve benzetimi ile uygulaması yapılmıştır. Uygulamada kullanılan teknolojiler kenar işleme, CoAP (kısıtlı uygulama protokolü), 6LoWPAN, düşük güçlü ve kayıplı ağlar için yeni nesil işletim sistemi Contiki-NG, Cooja benzetim programı, RPL yönlendirme protokolü, MQTT mesajlaşma protokolü ve Python uygulamalarıdır. Cooja benzetim programında yerleştirdiğimiz düğümler çok atlamalı bir şekilde yönlendiriciye veri gönderebilmekte, yönlendirici üzerinden düğümlerden veri istenebilmektedir. Yönlendiriciye bağlı bir kenar işleme uygulaması verileri istenen zaman aralıklarıyla alabilmekte, kritik durumlarda bunu buluta gönderebilmektedir. Uygulamamızda çok atlamalı iletişim için RPL yönlendirme protokolü, düğümler ile uygulamamız arasındaki veri iletişimi için CoAP protokolü, veri toplama ve kenar işleme işlemleri için Python programlama dili, veri tabanı olarak SQLite kullanılmaktadır. Kenar ile bulutun iletişimi için abone ol/yayımla mekanizmasına sahip olan MQTT iletişim protokolü kullanılmaktadır.

Literatürde kenar işleme amaçlı grafik ara yüzüne sahip bir uygulamaya rastlanılmamış olup, geliştirdiğimiz uygulamanın merkezi bir şekilde yönetim işlevi olmasının da literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Uygulamamızın benzetim üzerinde sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüş olup, grafik ara yüzü kolay kullanımı sayesinde askeri, sağlık, tarım, hayvancılık, endüstri gibi birçok alanda kullanılabileceğini düşünmekteyiz.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin İnterneti (IoT), 6LoWPAN, Cooja, Contiki-NG.

Edge Computing Supported Centrally Managed Monitoring System In Low Power and Lossy Networks with RPL Routing

ABSTRACT

In recent years, the massive increase in the number of Internet of Things devices has made it increasingly important for devices to be IPv6-enabled. The use of 6LoWPAN technology, which is used to make low-power devices compatible with IPv6, and the importance of networks specific monitoring mechanisms that use this technology are increasing day by day. In our study, we proposed an architecture for managing, monitoring, and sending critical data to the cloud when necessary in 6LoWPAN networks, with implementation and simulation. The technologies used in the application are edge computing, CoAP (constrained application protocol), 6LoWPAN, the next-generation operating system for low-power and lossy networks as Contiki-NG, the Cooja simulation program, the

RPL routing protocol, the MQTT messaging protocol, and Python applications. In the Cooja simulation program, the nodes that we placed can send data to the router in a multi-hop manner, and data can be requested from the nodes via the router. An edge computing application connected to the router can collect data at the desired intervals, and send it to the cloud in critical situations. In our application, we used the RPL routing protocol for multi-hop communication, the CoAP protocol for data communication between the nodes and the application, the Python programming language for data collection and edge computing operations, and SQLite as the database. We used the MQTT communication protocol for communication between the edge and the cloud, which has a subscribe/publish mechanism.

In the literature, an application with a graphical interface for edge processing could not be found, and it is thought that the central management function of the developed application will also contribute to the literature. It was seen that our application worked seamlessly on the simulation and with its graphic user interface, we think it can be used in many fields such as military, health, agriculture, livestock, and industry.

Keywords: Internet of Things (IoT), 6LoWPAN, Cooja, Contiki-NG

I. GİRİŞ

Nesnelerin interneti (IoT) ağlarında algılayıcı bilgilerinin elde edilmesi ve çeşitli hizmetler sağlamak için çok sayıda cihaz internete bağlanmaktadır [1]. IoT cihazları akıllı ev, akıllı fabrika, endüstri, ulaşım, eğitim, sağlık hizmetleri, doğal afet yardımı, gözetim, eğlence gibi birçok alanda verileri izleme ve yönetme amaçlı kullanılmaktadır [1]-[2]-[3]-[4].

IoT paradigmasında milyarlarca cihazın birbirleriyle ve internet üzerinden haberleşmesi öngörülmektedir. IoT'nin temel amacı; insanların ve nesnelerin herhangi bir zamanda, herhangi bir yerde, herhangi bir nesneyle ve herkesle bağlantı kurmasını sağlamaktır [5]. Bu cihaz ve algılayıcılar arasındaki iletişim RFID, IEEE 802.15.4, Wi-Fi, Bluetooth düşük enerji (BLE) gibi farklı teknolojiler aracılığıyla yapılabilmektedir [5].

Kablosuz algılayıcı ağları, IoT'nin ortaya çıkmasında ve büyümesinde kilit bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji sınırlı kaynaklara sahip düşük seviye cihazların internete bağlanmasına ve potansiyel olarak yaşamı değiştiren hizmetler sağlamasına izin vermektedir. Düşük güç ve kayıplı ağları (Low-power and Lossy Networks, LLNs) destekleyen ana standartlardan biri, IoT'nin bir parçası olarak kablosuz algılayıcı ağlarının omurgasını oluşturan IEEE 802.15.4 standardıdır. Bu standart, ağın fiziksel ve veri bağı katmanlarını tanımlamakta ve düşük maliyetlerle bir çalışma çerçevesi sağlamaktadır [6].

Bu düşük seviye cihazları internetin bir parçası yapmak için IETF, algılayıcı düğümlerinin İnternet Protokolü (IP) yığınına uygulamasına ve erişilebilir hale gelmesine izin veren bir uyarlama katmanı olarak kullanılan IPv6 düşük güçlü kablosuz kişisel alan ağlarını (6LoWPAN) geliştirmiştir [3]. 6LoWPAN sayesinde bu düşük güçlü cihazlar IPv6 özelliğine sahip olmakta ve IPv6 üzerinden birbirleri ile haberleşebilmektedirler [6]. 6LoWPAN üzerinde yönlendirme protokolü olarak RPL (Düşük güçlü ve kayıplı cihazlar için yönlendirme protokolü) çalışmaktadır [1]. Tablo 1 6LoWPAN yığınının yapısını ve kullanılan protokolleri göstermektedir [7].

Tablo 1: 6LoWPAN yapısı ve protokolleri

Uygulama Katmanı CoAP, MQTT
Taşıma Katmanı UDP/TCP
Ağ Katmanı IPV6/ICMP6/RPL
6LoWPAN Adaptasyon Katmanı 6LoWPAN
Veri Bağı Katmanı IEEE 802.15.4 MAC
Fiziksel Katman IEEE 802.15.4 PHY

II. IoT PROTOKOLLERİ

İkinci bölümde 6LoWPAN IoT ağlarında kullanılan protokoller detaylı olarak anlatılmıştır. İlk olarak IoT ilişkisi ile RPL yönlendirme algoritması verilmiştir. İkinci olarak, iletişim için MQTT protokolü açıklanmıştır. Son olarak, CoAP protokolü ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

A. RPL YÖNLENDİRME PROTOKOLÜ

RPL, IPv6 düşük güçlü cihazlar için tasarlanmış uzaklık vektör tabanlı bit yönlendirme protokolüdür ve 6LoWPAN adaptasyon katmanı desteği ile IEEE 802.15.4 standardında çalışmaktadır [3]. RPL'nin birincil amacı çok sekmeli yönlendirmeyi etkinleştirmek olup çok çeşitli uygulamaları kapsayacak şekilde tasarlanmıştır [8]. Düğümler için çok atlamalı hiyerarşik ağaç yapısında bir topoloji oluşturur. Burada her bir düğüm, gelen veriyi kök düğüme ulaşana kadar üstteki düğümlere iletir. RPL, kısıtlı kaynaklara sahip düğümler için veri yönlendirmesini başarılı ve verimli bir şekilde yönetir ve çift yönlü bağlantı, sağlamlık, güvenilirlik, esneklik ve ölçeklenebilirlik sağlayan bir çerçeve sağlar [3]. Düşük güçlü kablosuz kişisel alan ağı (6LoWPAN) üzerinden IPv6, kaynak kısıtlı algılayıcı/eyleyici cihazları ve istemci uygulamaları açısından birçok avantajı olduğu için IoT'nin önemli bir parçası haline gelmiştir. 6LoWPAN, uzun IPv6 başlığını IEEE 802.15.4 formatında küçük farklı uzunluktaki çerçevelere kapsülleme yeteneğine sahiptir [9].

RPL Depolanmış (Stored) ve Depolanmamış (none-stored) mod olmak üzere iki çalışma modu bulunmaktadır. Depolanmış modda düğümler yerel olarak yönlendirme tablolarını kendi hafızalarında tutarlar. Depolanmamış modda ise düğümler yönlendirme tablosu tutmaz, bunun yerine tüm yönlendirme tablosu kök düğümde tutulur [8]. RPL'nin temel görevi bir veya daha fazla RPL kenar yönlendiricisine dayanan, hedef odaklı yönlendirilmiş çevrimsiz çizge (DODAG) olarak adlandırılan ve ağ cihazları arasında çift yönlü IPv6 iletişimini destekleyen yarı-orman yönlendirme topolojisi oluşturmaktır [10]. RPL topolojisi oluşturulurken ilk olarak sınır yönlendirici aracılığıyla çok noktaya DIO (DODAG bilgi nesnesi) adlı kontrol mesajı yayınlanır [11][8].

Bir düğüm komşu düğümlerden DIO mesajı aldığı anda OF0, MRHOF gibi bir amaç fonksiyonu ile düğüm sırasını hesaplar ve ana düğüm olarak en düşük sıraya sahip komşu düğümleri seçerek DODAG'a katılır [11]. Bir damlama zamanlayıcısı kullanılarak çok noktaya yayın olarak DIO mesajlarının dinamik bir periyotta gönderimi yapılır. Ağa yeni katılan veya bir ağa katılamamış katılma istekli bir düğüm,

komşularından DIO mesajlarını istemek için tipik olarak DIS mesajı gönderir. DIS mesajları, düğümler için bir (grup) komşudan yönlendirme bilgisi istemek için kullanılır. Üst düğümünü seçen düğüm bir DAO mesajı yayımlayarak bunu üst düğümlerine ve kök düğüme iletir. Kök düğüm bir DAO-ACK mesajı ile bunu onayladığını belirtebilir ve bu mesajı alan düğüm artık ulaşılabilir olduğunu bilir. Daha sonra, kök düğüme olan mantıksal mesafenin bir temsili olan Rank'ı içeren çok noktaya yayın DIO'ları ile DODAG'ın reklamını yapmaya başlayabilir. DIO'yu duyan diğer düğümler komşu tablosunu güncelleyecek, buna göre bir ebeveyn seçecek ve böylece çok sekmeli topoloji oluşumuna katılacaktır. Ağ işlemi sırasında, düğümler komşularıyla bağlantı kalitesini izlemeye devam eder ve topolojiyi verimli tutmak için üst öğelerini günceller. [8]

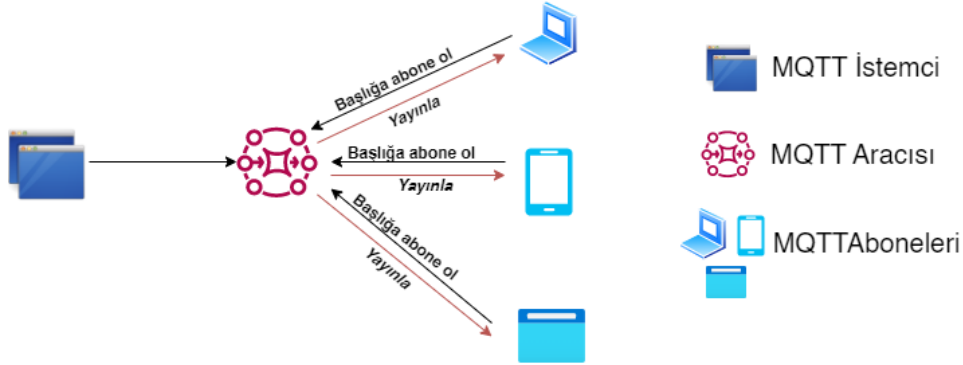
Oturum katmanında yapılan iletişim amaçlı, enerji ve bant genişliği tüketimi açısından verimli olan birkaç protokol vardır. Bu protokollerden bazıları MQTT, XMPP, AMQP ve CoAP'tır [12]

B. MQTT

MQTT, küçük boyut, düşük güç kullanımı ve birçok alıcıya verimli bilgi dağıtımını yapan, abone ol/bildir paradigmasına dayanan hafif bir taşıma protokolüdür. MQTT TCP protokolüne dayanmaktadır. Böylece paket kaybı kontrolü yapılmaktadır [12]. Bir abone ol/bildir mesajlaşma hizmetinde "mesaj" hizmet üzerinde aktarılan veriyi ifade eder. Konu bir mesaj beslemesini ifade eden bir varlıktır ve abonelik bir konu üzerine abone olup mesaj alınımını ifade eder. "Yayıncı veya yapımcı", mesajlar oluşturan ve bunları belirli bir konuda mesajlaşma servisine yayınlayan bir cihaz veya programı ifade eder ve "abone veya tüketicisi", belirli bir abonelikte mesajları alan bir cihaz veya programı ifade eder [13].

MQTT'nin Şekil 1 'de görüldüğü üzere üç bileşeni vardır:

- 1- Yayıncı veya Yapımcı (MQTT İstemcisi)
- 2- Bir komisyoncu (MQTT Aracısı)
- 3- Tüketicisi/Abone (MQTT İstemcisi)



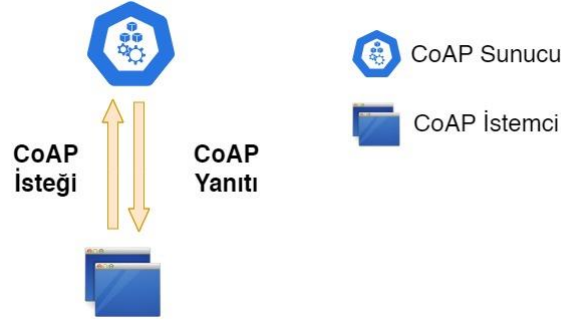
Şekil 1. MQTT Mimarisi

MQTT istemcisi MQTT protokolünü kullanan bir program veya cihazdır. İstemci, sunucuya ağ bağlantısı açmaktan, yayınlanacak mesajları oluşturmaktan, sunucuya uygulama mesajlarını yayınlamaktan, almak istediği uygulama mesajlarına abone olmaktan, uygulama mesajları talebini kaldırmak için abonelikten çıkmaktan ve ağ bağlantısını kapatmaktan sorumludur. MQTT aracısı, yayıncılar ve aboneler arasında postane görevi gören MQTT'ye dayalı bir program veya cihazdır [13].

B. CoAP

CoAP kısıtlı kaynaklara sahip düğümler için geliştirilmiş bir uygulama protokolüdür. HTTP protokolüne benzemekte olup uç noktalar arasında bir istek ve yanıt paradigmasına dayanmaktadır. CoAP çok noktaya yayın desteği, düşük ek yük ve kısıtlı ortamlardaki karmaşıklık gibi özel gereksinimleri karşılarken Web ile entegrasyonu sağlayabilecek kolaylıkta tasarlanmıştır. CoAP paket

kaybının tolere edilip edilmemesine bağı olarak güvenilir olmayan ve güvenilir çalışma modları sunmaktadır [12]. CoAP mimarisi şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. CoAP Mimarisi

MQTT ve CoAP kısıtlı cihazlar için IoT protokolü olarak kullanılabilir. Bu iki protokolün karşılaştırılmasında ağ koşullarının önemi bulunmaktadır. Örneğin ağın kayıp oranı düşükse CoAP MQTT’den daha az ek yük getirir. Fakat MQTT TCP üzerinden çalıştığı için CoAP’a göre daha güvenilir bir protokoldür [14]. Çalışmamızda bu bölümde anlatılan yöntemler kullanılmakta olup, merkezi bir yönetim sistemi tasarlanmış ve görsel ara yüzle desteklenmiştir.

III. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Tomasic ve arkadaşları uzaktan sağlık izleme işlemleri için Contiki-NG işletim sistemi kurulu Openmote gömülü cihazların üzerinde CoAP protokolünü kullanmıştır. Verileri görebilmek için Firefox web tarayıcısı eklentisi ve Node-RED uygulamasını kullanmışlardır. Verilere istenildiği takdirde sadece bu uygulamalar üzerinden erişilebilmektedir [2].

Esquiagol ve arkadaşları IoT teknolojisini kullanarak iç mekan hava kalitesini ölçme amaçlı bir ağ kurmuşlardır. CoAP protokolünü kullanarak verilerin alındığı bu platformda görsel bir arayüz bulunmamakta olup son kullanıcıya hitap eden bir arayüz görülemez [15].

Khlaifi ve arkadaşları verimli ağ kapsamı ve bağlanabilirlik gerektiren bir kablosuz algılayıcı ağı kullanan askeri sınır izleme uygulaması için yönlendirme protokolleri hakkında bir araştırma sunmuşlardır. Uygulamaları için yönlendirme protokollerindeki gelişmeler sırasında, önemli protokollerden AODV (Ad hoc on Demand Distance Vector) ve RPL örneğini göz önünde bulundurarak, enerji tüketimini ve ağ içinde dolaşan bilgi akışını optimize etmeyi amaçlamışlardır. Ardından, RPL ve AODV protokollerinin performansını karşılaştırmışlardır. Sonuçların, enerji tüketimi açısından RPL protokolünün WSN/IoT uygulamaları için daha uygun olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir [16].

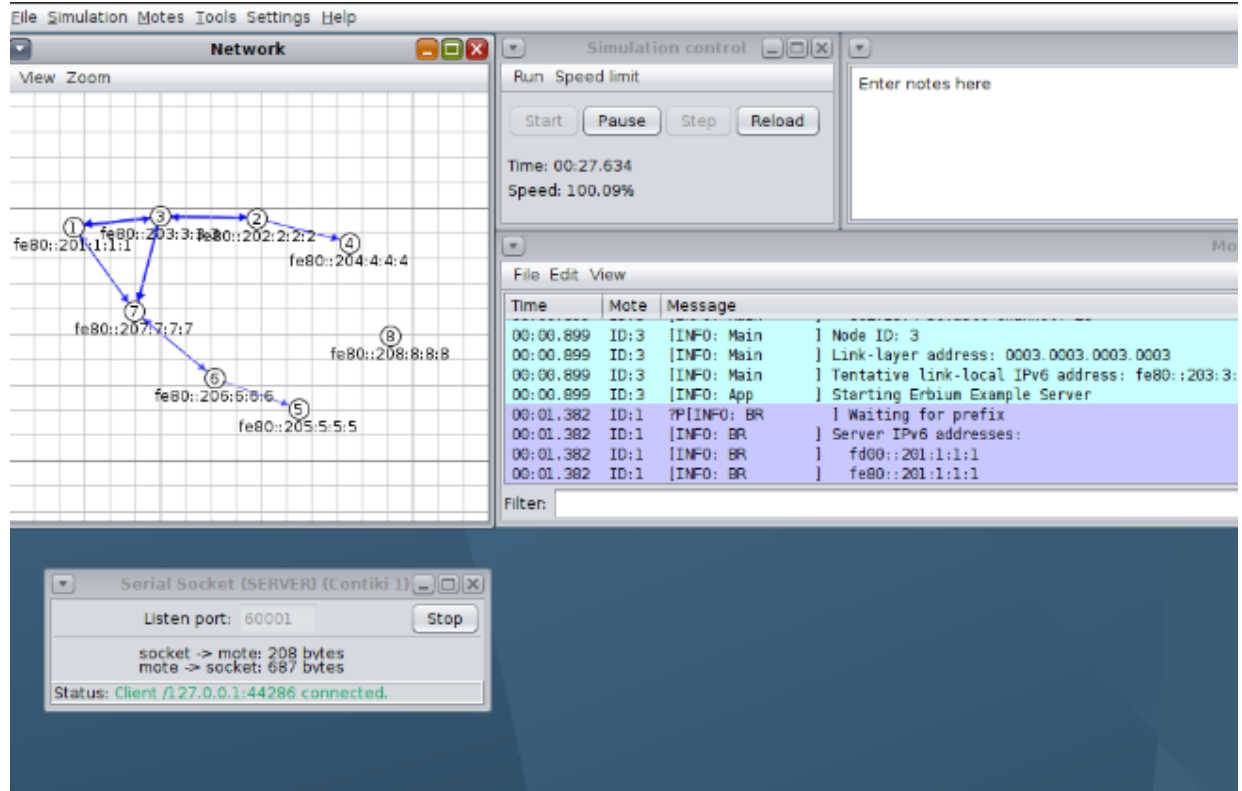
Plageras ve arkadaşları IoT tabanlı, Contiki işletim sistemli cihazlarla akıllı binalarda veri toplama ve işlemeyi ele almışlardır. Tasarladıkları sistemin benzetimini Cooja benzetim programıyla yapmışlar, algılayıcı verilerine Firefox tarayıcısı üzerinden erişebileceklerini belirtmişlerdir [17].

III. YÖNTEM VE TEKNİK

Önerilen IoT sisteminde, Contiki-NG işletim sistemine sahip, düşük güçlü, gömülü cihazlar için RPL yönlendirme algoritmasını kullanan, çok atlamalı bir veri toplama ve kontrol mekanizması sağlanmıştır. Uygulama birçok alanda kullanılabilir nitelikte olup merkezi kontrol sistemiyle uzaktan izlenebilmekte, tetikleyiciler oluşturulabilmektedir. Yerel ağ içerisinde alt katmanda RPL yönlendirme

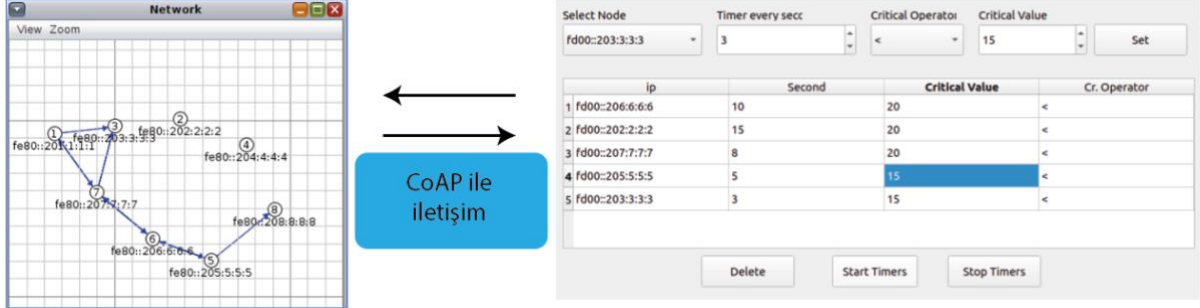
protokolü kullanılırken, taşıma katmanında CoAP ve MQTT protokolü kullanılmaktadır. Merkezi kontrol uygulaması ile istenildiği zaman herhangi bir düğümdeki algılayıcı verisi CoAP istekleri ve yanıtlarıyla alınabilmekte, hatta belirli aralıklarla veri toplaması da sağlanabilmektedir. Geliştirdiğimiz uygulama Contiki-NG işletim sistemi yüklü kenar yönlendirme cihazının seri portu üzerinden düğümlere çok atlamalı bir şekilde ulaşabilmektedir. Uygulamanın görsel arayüzünde zamanlayıcılar oluşturulabilmekte, bu zamanlayıcılar sayesinde düğümlerden istenilen aralıklarla veriler toplanabilmektedir. Hatta yine kullanıcı tarafından oluşturulan bir eşik değeri kontrolüyle verilerin istenilen aralıklarda olmaması halinde uyarı amaçlı uzak sunucuya gönderilebileceği bir ortam da sağlanmış bulunmaktadır. Yerel ağ üzerinde CoAP ile haberleşme sağlanırken, uzak sunucuya gönderim amaçlı MQTT protokolü kullanılmaktadır. Genel işlemler yerel ağda gerçekleştirilirken, kenar işleme sayesinde elenen kritik veya uzak sunucuya gönderilmesi istenilen veriler uzak sunucuya gönderilmektedir.

Uygulama benzetimi yapılırken Contiki-NG içerisindeki araçlardan Cooja benzetim programı kullanılmış olup, Şekil 3'te Cooja benzetim programı ekranı görülebilmektedir. Cooja benzetim programı ile düğümler istenilen bölgelere eklenebilmekte, düğümler içerisinde C programlama dili ile geliştirilmiş programlar çalıştırılabilmektedir.



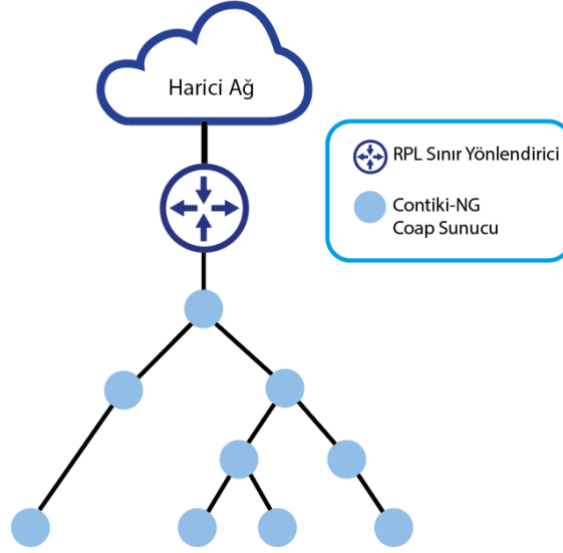
Şekil 3. Cooja Benzetim Programı

Şekil 4'teki görselde görüleceği üzere benzetim programındaki düğümlerle iletişim kurulabilmesi amaçlı bir görsel arayüz geliştirilmiştir. Görsel ara yüzü oluştururken Qt Arayüz Uygulaması kullanılmış olup arka planda Python ile kodlama yapılmıştır.



Şekil 4. Görsel Arayüzlü Uygulama ve Cooja Benzetim Programı

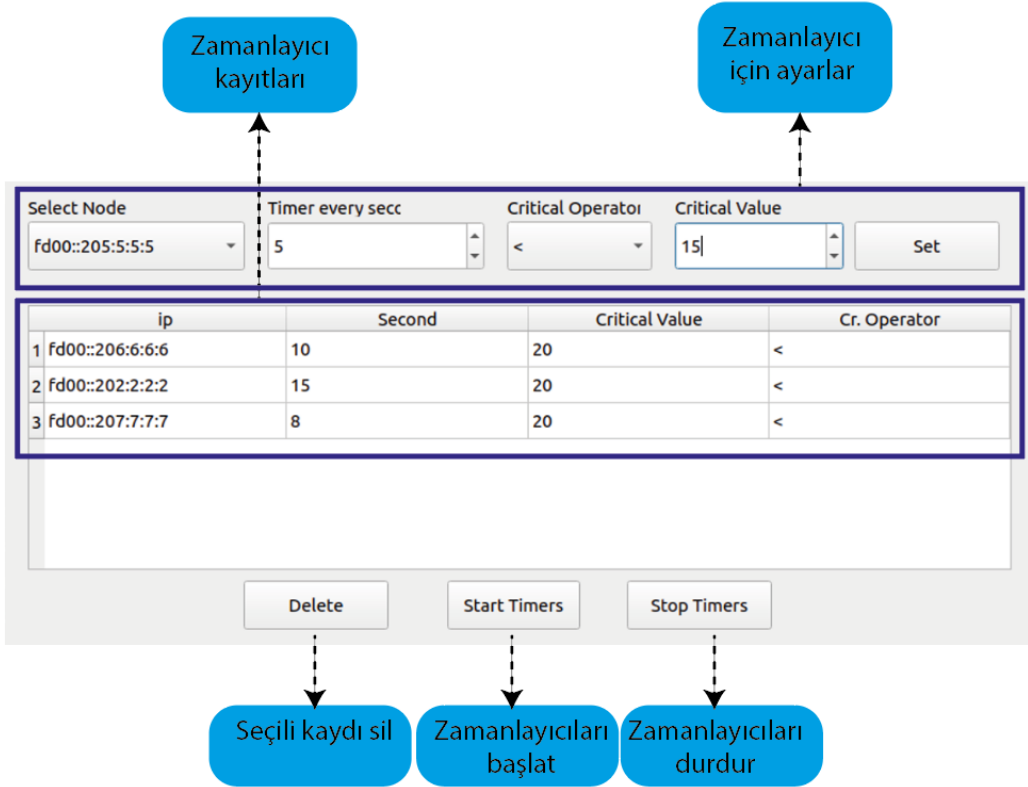
Görsel uygulamamız benzetim programındaki RPL kenar yönlendiricinin seri portu üzerinden iletişim sağlamaktadır. Bütün düğümlere gönderilen mesajlar bu düğüm üzerinden geçmektedir. Algılayıcı düğümleri üzerinde de CoAP Server uygulaması çalışmaktadır. Şekil 5'te ağın genel yapısı görülmektedir.



Şekil 5. RPL ağı ve düğümler

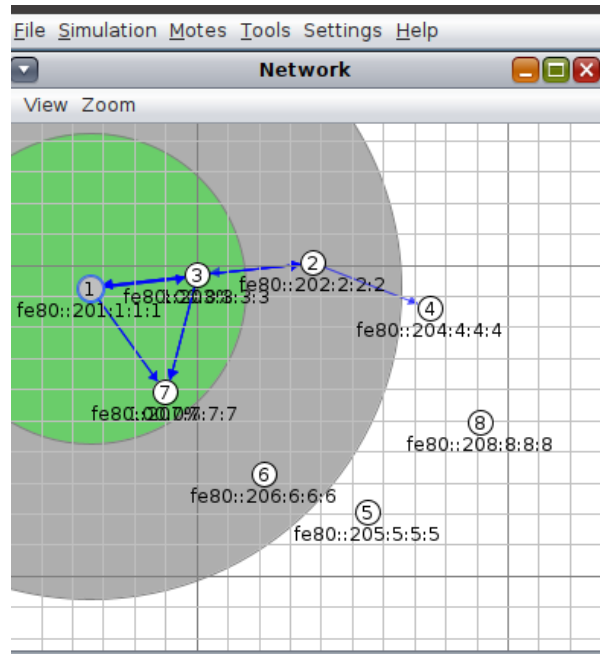
Uygulamamızda benzetim programına eklenen düğümlerin IPv6 numaraları görülmektedir. Düğümler üzerinde CoAP sunucu uygulaması çalışmakta olup uygulama üzerinden istek yapılması halinde düğüm algılayıcı verisini göndermektedir. Alınan veriler alındığı zaman bilgisi ile birlikte SQLite veritabanına kaydedilmekte, ızgara görünümü içerisinde veriler gösterilmektedir.

Uygulamamızda çeşitli senaryolarda kullanılacak bir zamanlayıcı sistemi geliştirilmiştir. İstenilen düğüme, istenilen zaman aralıklarıyla istek gönderilebilmekte, algılayıcı verisi alınabilmektedir. Algılayıcılardaki programda herhangi bir değişiklik yapmaya gerek kalmadan merkezi kontrollü uygulamamızla kolay bir şekilde bu sağlanabilmektedir. Bu özellik bizim geliştirdiğimiz uygulamamızı özgün kılmaktadır. İncelediğimiz kadarıyla literatürde buna benzer bir örneğe rastlanmamıştır. Zamanlayıcı ekranı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Zamanlayıcı Ekranı

Zamanlayıcı ekranında verisi istenilen düğüm, kaç saniye aralıklarla veri alınacağı, varsa kritik durum operatörü ve değeri bilgisi girilmektedir. Şekil 6'daki örnekte gelen verinin 15'in altında olması durumunda uzak sunucuya bilgi mesajı gönderilmektedir. Zamanlanmış işlemler zamanlayıcı ekranındaki alt bölümde gözükmekte, istenildiği takdirde zamanlayıcının başlatılması, durdurulması, silinmesi işlemleri de düğmeler yardımıyla yapılabilmektedir.



Şekil 7. Cooja RPL İletişimi Görünümü

RPL yönlendirme protokolü sayesinde bir düğüme gidecek mesaj, sadece ilgili düğüme giden yol üzerindeki düğümler üzerinden gitmektedir. Diğer düğümlere gereksiz mesaj gönderimi yapılmamaktadır. Örneğin Şekil 7’de görüldüğü üzere 2 nolu düğüme veri iletilirken 6, 5, 8 nolu düğümlere mesaj uğramamaktadır.

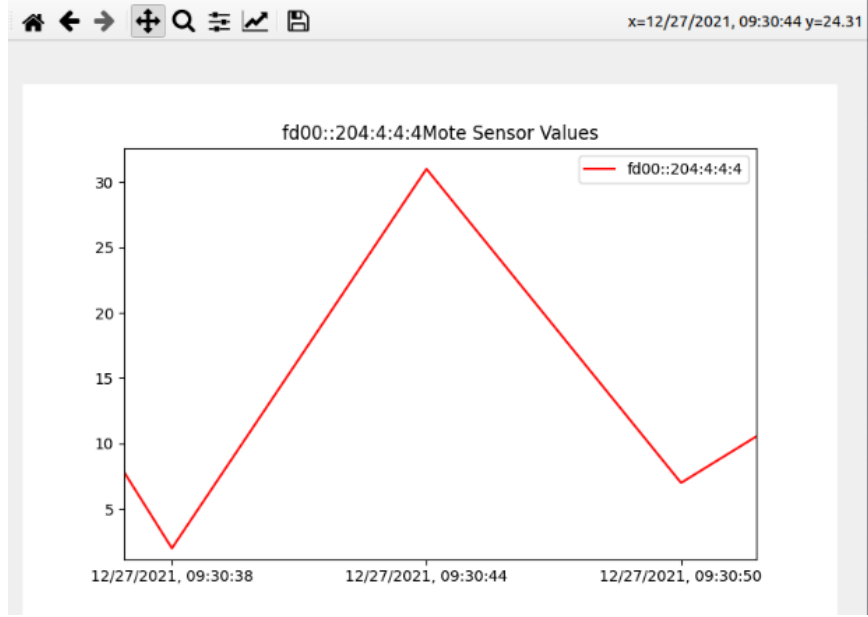
Tüm algılayıcı verileri yerel veritabanında saklanır ve uygulamamızın ana formunda görülebilir. Şekil 8’de örnek bir ekran verilmiştir.

The screenshot displays a web application interface. At the top, there is a section titled "Notes" containing a list of IPv6 addresses: fd00::202:2:2:2, fd00::203:3:3:3, fd00::204:4:4:4, fd00::205:5:5:5 (highlighted in blue), fd00::206:6:6:6, and fd00::207:7:7:7. To the right of this list are three buttons: "Get Temperature", "Set Timer", and "Graph of Mote". Below the "Notes" section is a table titled "Sensor Values" with three columns: "ip", "value", and "time". The table contains eight rows of data, with the first row highlighted in blue.

	ip	value	time
1	fd00::205:5:5:5	32	12/27/2021, 08:40:57
2	fd00::206:6:6:6	16	12/20/2021, 02:18:50
3	fd00::202:2:2:2	9	12/20/2021, 02:18:50
4	fd00::207:7:7:7	13	12/20/2021, 02:18:44
5	fd00::206:6:6:6	18	12/20/2021, 02:18:40
6	fd00::207:7:7:7	0	12/20/2021, 02:18:36
7	fd00::202:2:2:2	20	12/20/2021, 02:18:35
8	fd00::206:6:6:6	25	12/20/2021, 02:18:29

Şekil 8. Uygulama Ana Ekranı Algılayıcı Verileri

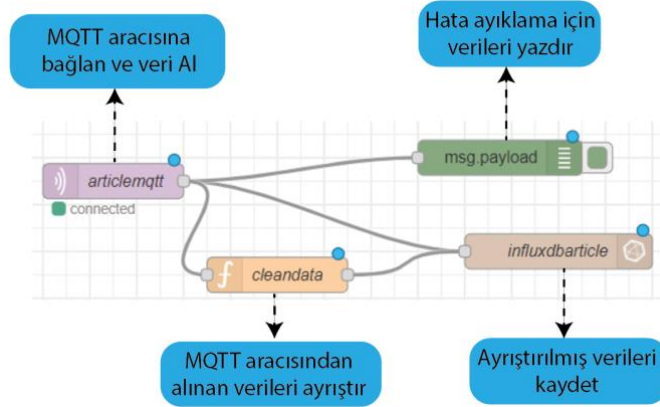
Geliştirilen uygulamada bu verileri grafik üzerinde görsel olarak da görmek mümkündür. Görselleştirme için Matplotlib eklentisi kullanılmış ve Şekil 9'da bir örnek verilmiştir.



Şekil 9. Zamana göre düğüm algılayıcı verileri

Kritik verilerin uzak sunucuya gönderilmesi amaçlı Digital Ocean [18] üzerinden Hollanda merkezli sanal özel sunucu kiralanmış olup üzerinde kullanılan teknolojiler IoT'nin yeni teknolojilerinden olan Node-RED, Mosquitto MQTT broker, InfluxDB ve Grafana'dır. Sanal özel sunucu üzerinde bu uygulamalar çalıştırılmıştır.

Node-RED ile algoritma adımları oluşturulurken, Mosquitto, MQTT mesajlarını alıp gönderme işlevine sahip bir sağlayıcıdır.



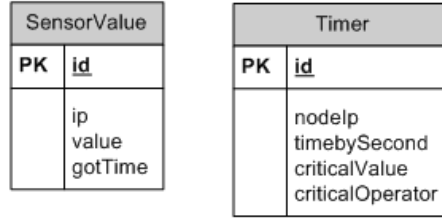
Şekil 10. Uygulamamızın Node-RED Akış Şeması

Şekil 10'da görüleceği üzere Node-RED üzerinde gelen MQTT mesajlarının temizlenerek InfluxDB veritabanına kaydedilmesi sağlanmıştır. InfluxDB veritabanındaki verilerin gösterilmesi amaçlı da Grafana grafik görselleştirme uygulaması kullanılmaktadır. Benzetim üzerindeki düğümlerdeki kritik değerler, kritik operatöre göre uzak sunucuya gönderilmiş ve görselleştirmesi sağlanmıştır. Şekil 11'de bulut tarafında çalışan Grafana uygulamasına ait görsel gözükmemektedir. Kritik veriler burada anlık olarak takip edilebilmektedir.



Şekil 11. Grafana üzerinde kritik verilerin gösterilmesi

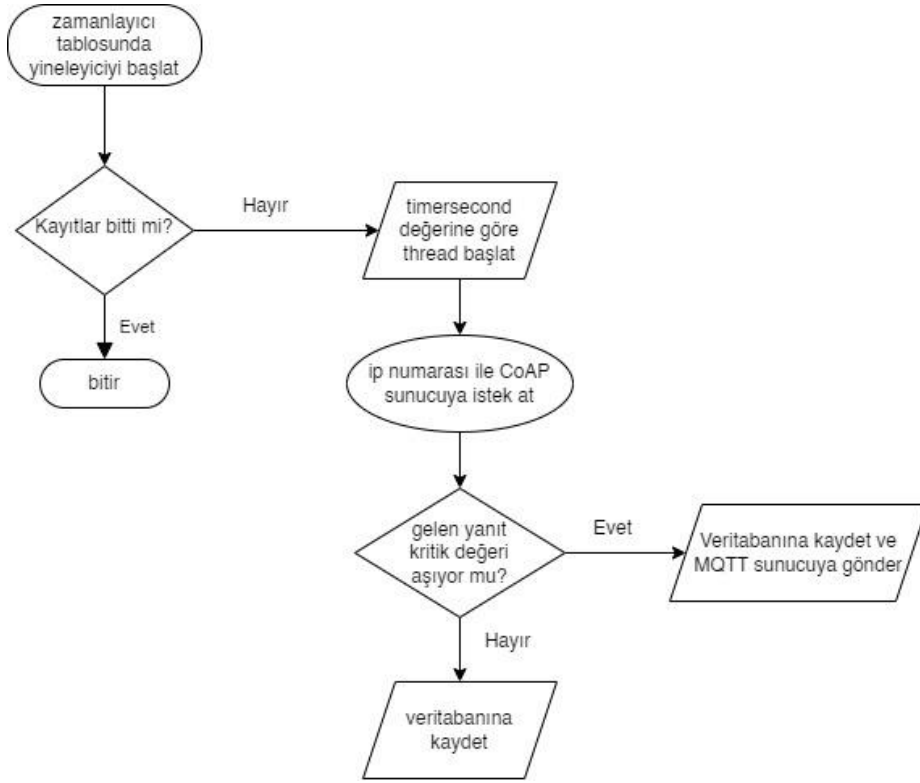
Şekil 11'de görüldüğü gibi, sarı düğüm 3'te (Node3) belirli bir eşik değerinin üzerindeki veriler kritik olarak kabul edilirken, diğer düğümlerde eşik değerinin altındaki veriler kritik olarak kabul edilir. Daha önce de belirttiğimiz gibi bu değerler görsel arayüzden kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Uygulamamızın yerel veritabanı diyagramı Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 12. Veritabanı-Tablolar Diyagramı

“SensorValue” tablosunda düğüm IP numarası, değeri ve zamanı, “Timer” tablosunda da tetikleyici bilgileri yer almaktadır. Tetikleyiciler başlatıldığı zaman istenilen aralıklarda düğümlerden veriler alınmakta ve işletilmektedir.

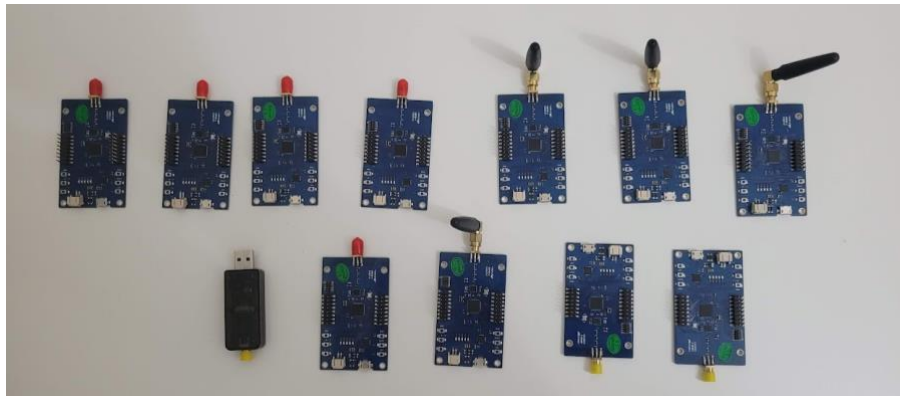
“SensorValue” tablosu düğüm IP numarasını, veri değerini ve alınan zamanı içerirken, “Timer” tablosu tetikleme bilgilerini içermektedir. Tetikleyiciler başlatıldığında düğümlerden istenilen aralıklarla veri alınır ve çalıştırılır. Zamanlayıcıların çalışmasının akış şeması Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Zamanlayıcı algoritması akış şeması

Zamanlayıcı bilgileri veri tabanındaki tablodan satır satır alınır ve her bir satır verisi için bir iş parçacığı oluşturulur. İş parçacığı programda tıkanıklık olmaması amaçlı kullanılmıştır. Oluşturulan iş parçacığı üzerinde belirlenen zaman aralıklarında düğümlere CoAP isteği gönderilir. CoAP sunucusu görevi gören düğümler istek geldiğinde algılayıcı verisini gönderir. Gelen veri eğer kritik düzeydeyse buluttaki MQTT sunucusuna gönderilir.

Contiki-NG işletim sisteminde çalışan düğüm yazılımlarını test etmek için CC2538 geliştirme kitleri kullanılmıştır ve Şekil 14’de görülmektedir.



Şekil 14. CC2538 Geliştirme Kitleri

IV. SONUC

Bu çalışmada, esnek yapısı sayesinde geliştirilen uygulamanın sağlık, tarım, hayvancılık, hava kirliliği gibi birçok alanda kullanılabileceği gösterilmiştir. Görsel arayüz sayesinde son kullanıcı kolayca programda ayarlamaları yapabilmektedir. Ayrıca merkezi kontrollü sistem sayesinde program üzerinde sürelerin istenildiği gibi ayarlanabilmesi ile birlikte, gömülü cihazlara sürekli yazılım geliştirilmesinin de gerekliliğini ortadan kaldırmış olmaktadır.

Uygulamamız görsel arayüze sahip olması ve esnek yapısı sebebiyle birçok alana uygulanabilecek nitelikte bulunmaktadır. Benzetim üzerinde sorunsuz çalışması, verilerin düzgün bir şekilde iletilmesi de uygulamamızın kullanılabilirliğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2022.06.01.1307).

V. KAYNAKLAR

- [1] Y. Kim and J. Paek, “NG-RPL for efficient P2P routing in low-power multihop wireless networks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182591–182599, 2020.
- [2] I. Tomasic, K. Khosraviani, P. Rosengren, M. Jornten-Karlsson, and M. Linden, “Enabling IoT based monitoring of patients’ environmental parameters: Experiences from using OpenMote with OpenWSN and Contiki-NG,” *2018 41st Int. Conv. Inf. Commun. Technol. Electron. Microelectron. MIPRO 2018 - Proc.*, pp. 330–334, 2018.
- [3] H. Kharrufa, H. A. A. Al-Kashoash, and A. H. Kemp, “RPL-Based Routing Protocols in IoT Applications: A Review,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 15, pp. 5952–5967, 2019.
- [4] B. R. Al-Kaseem, Y. Al-Dunainawi, and H. S. Al-Raweshidy, “End-to-end delay enhancement in 6LoWPAN testbed using programmable network concepts,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3070–3086, 2019.
- [5] M. Silva, D. Cerdeira, S. Pinto, and T. Gomes, “Operating Systems for Internet of Things Low-End Devices: Analysis and Benchmarking,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 6, pp. 10375–10383, 2019.
- [6] M. N. Napiyah, M. Y. I. Bin Idris, R. Ramli, and I. Ahmady, “Compression Header Analyzer Intrusion Detection System (CHA - IDS) for 6LoWPAN Communication Protocol,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 16623–16638, 2018.
- [7] A. H. Farea and K. Küçük, “Detections of IoT Attacks via Machine Learning-Based Approaches with Cooja,” *EAI Endorsed Trans. Internet Things*, vol. 7, no. 28, pp. 1–12, 2022.
- [8] X. Vilajosana, T. Watteyne, T. Chang, M. Vucinic, S. Duquennoy, and P. Thubert, “IETF 6TiSCH: A Tutorial,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 595–615, 2020.
- [9] R. K. Das, N. Ahmed, F. H. Pohrmen, A. K. Maji, and G. Saha, “6LE-SDN: An Edge-Based Software-Defined Network for Internet of Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 8, pp. 7725–7733, 2020.

- [10] H. S. Kim, J. Ko, D. E. Culler, and J. Paek, "Challenging the IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL): A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2502–2525, 2017.
- [11] H. Fujita, Y. Tanaka, K. Mori, and F. Teraoka, "Efficient RPL Tree Construction Using Passive Link Quality Estimation," *Proc. - 2021 9th Int. Symp. Comput. Netw. Work. CANDARW 2021*, pp. 8–14, 2021.
- [12] R. Herrero, "Dynamic CoAP Mode Control in Real Time Wireless IoT Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 1, pp. 801–807, 2019.
- [13] B. Mishra and A. Kertesz, "The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020.
- [14] S. Sinche *et al.*, "A Survey of IoT Management Protocols and Frameworks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 1168–1190, 2020.
- [15] J. Esquiagola, M. Manini, A. Aikawa, L. Yoshioka, and M. Zuffo, "Monitoring Indoor Air Quality by using IoT Technology," *Proc. 2018 IEEE 25th Int. Conf. Electron. Electr. Eng. Comput. INTERCON 2018*, pp. 18–21, 2018.
- [16] H. Khlaifi, A. Zrelli, and T. Ezzedine, "Routing Protocols for A Border Monitoring Application," *2019 Int. Conf. Internet Things, Embed. Syst. Commun. IINTEC 2019 - Proc.*, pp. 1–6, 2019.
- [17] A. P. Plageras, K. E. Psannis, C. Stergiou, H. Wang, and B. B. Gupta, "Efficient IoT-based sensor BIG Data collection–processing and analysis in smart buildings," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 82, pp. 349–357, 2018.
- [18] "Digital Ocean Website." <https://www.digitalocean.com/>. (18.01.2023)



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Nevşehir İgnimbiritlerinde Kapiler Su Emme Özelliğinin İncelenmesi

 Ogün Ozan VAROL ^{a,*}

^a Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Van, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ogunozanvarol@yyu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1267036

ÖZ

Su, doğal yapı taşlarında meydana gelen bozunmalarda en önemli etkenlerden biridir. Doğal taşlar suyu bünyesine çeşitli yollarla alabilmektedir. Kapiler su emme potansiyeli ile doğal yapı taşlarının bozunması arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Doğal yapı taşlarının kapiler su emme potansiyeli arttıkça bünyesine suyu alma eğilimi artmakta ve neticede donma-çözülme, tuz kristalizasyonu gibi etmenlere maruz kalmaktadır. Tüm bu etmenler neticesinde doğal yapı taşlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimler meydana gelmektedir. Bunun neticesinde doğal yapı taşlarının servis ömrü azalmaktadır. Çalışma kapsamında Nevşehir bölgesinde yoğun olarak bulunan üç farklı tip ignimbirit üzerinde araştırma yapılmıştır. Çalışma neticesinde sarı renkli ignimbiritin (SR) saf suda kılcal su emme potansiyeli 114.03 g/m²s^{0.5}, güllü renkli ignimbiritin (GK) saf suda kılcal su emme potansiyeli 87.39 g/m²s^{0.5}, bej renkli ignimbiritin (BJ) saf suda kılcal su emme potansiyeli 115.71 g/m²s^{0.5} olarak belirlenmiştir. Kapiler su emme değerinin en düşük olduğu GK ignimbiriti en yüksek tek eksenli sıkışma dayanımı değerine sahiptir. Bu bulgular, ignimbirit numunelerini fiziksel ve mekanik özellikleri ile kapiler su emme özellikleri arasında anlamlı ilişkilerin olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: İgnimbirit, Kılcal su emme, Nevşehir

Investigation of Capillary Water Absorption in Nevşehir Ignimbrites

ABSTRACT

Water is one of the most important factors in the decay of natural building stones. Natural stones can absorb water through various ways. There is a direct relationship between the capillary water absorption potential of natural building stones and their decay. As the capillary water absorption potential of natural building stones increases, they tend to absorb more water, which ultimately exposes them to factors such as freeze-thaw cycles and salt crystallization. As a result of all these factors, changes occur in the physical and mechanical properties of natural building stones, leading to a decrease in their service life. In this study, research was conducted on three different types of ignimbrite, which are abundantly found in the Nevşehir region. As a result of the study, the capillary water absorption potential of the yellow-colored ignimbrite (SR) in water was determined to be 114.03 g/m²s^{0.5}, the capillary water absorption potential of the rose-colored ignimbrite (GK) in water was determined to be 87.39 g/m²s^{0.5}, and the capillary water absorption potential of the beige-colored ignimbrite (BJ) in water was determined to be 115.71 g/m²s^{0.5}. The GK ignimbrite, which has the lowest capillary water absorption value, also has the highest uniaxial compressive strength value. These findings show that significant relationships between the physical and mechanical properties of the ignimbrite samples and their capillary water absorption characteristics.

Keywords: Ignimbrite, Capillary water absorption, Nevşehir

I. GİRİŞ

Doğal taşlar geçmişten günümüze çok geniş bir alanda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapılarda kullanılan doğal taşların bozunma mekanizmalarında su önemli bir role sahiptir [1]. Suyun doğal yapı taşları içerisindeki hareketinin bilinmesi, doğal taşlarda meydana gelebilecek olan bozunma yapısını anlayabilmek için büyük önem taşımaktadır. Çünkü su tek başına veya çevresel etmenlerle birleşerek doğal yapı taşlarının fiziko – mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır [2]. Gözeneklilik oranı yüksek olan doğal taşlar su ile temas ettiğinde suyu gözeneklerinde tutma eğilimi gösterirler. Benzer şekilde yapı taşı olarak kullanılan doğal taşlar da yağmur suyu ve yüzey suyu gibi etmenlerle karşılaştıklarında kapilarite etkisiyle suyu bünyelerine alırlar. Kapiler su emme kinematığı üzerinde gözeneklerin geometrisi, gözeneklerin birbirleri ile bağlantısının olup olmaması gibi birçok faktör etkilidir [3]–[5]. Literatürde de araştırmacıların kapiler su emme hakkında yaptığı çalışmalar incelendiğinde, kapiler su emmenin doğal taşların petrografik özellikleri ve içerdiği gözenek yapısıyla sıkı bir ilişkisi olduğu ortaya konulmuştur [6]–[11]. Gözeneklilik oranı fazla olan doğal taşlarda oluşan kapiler su emme durumu doğal taşlar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Özellikle kapiler su emmeye bağlı olarak emilen sular doğal taşın bünyesinde tutulmakta ve soğuk iklimlerde yer alan bölgelerde kış mevsimlerinde donarak buza dönüşmektedir. Buz kristallerinin artan hacmi nedeniyle boşluklarda basınç gerilmeleri meydana gelmekte ve doğal taşın dayanımı azalmaktadır. Benzer durum su ile beraber doğal taşların bünyesine giren tuzlar içinde geçerlidir [12].

Özellikle şehirlerin sanayileşmeye başlaması ile birlikte endüstriyel kirleticilerin, yağmur, nem, güneş ışığı, sıcaklık gibi atmosferik kirleticilerle beraber yapılarda kullanılan doğal yapı taşlarını farklı biçimlerde bozunmaya uğratmaya başlamıştır. Doğal yapı taşlarında meydana gelen bozunmalar; çevresel etmenler, atropojenik etmenler ve bitkisel organizmaların etkilerine göre farklılık göstermektedir. Çevresel koşullar bu bozunma etkileri arasında ilk sırada yer almaktadır. Doğal yapı taşlarında meydana gelen bozunmaların en önemli sebebi sudur. Su, özellikle yüksek gözeneklilik oranına sahip doğal yapı taşlarında kapiler etkiyle bünyeye girerek bozunmalara yol açmaktadır [12].

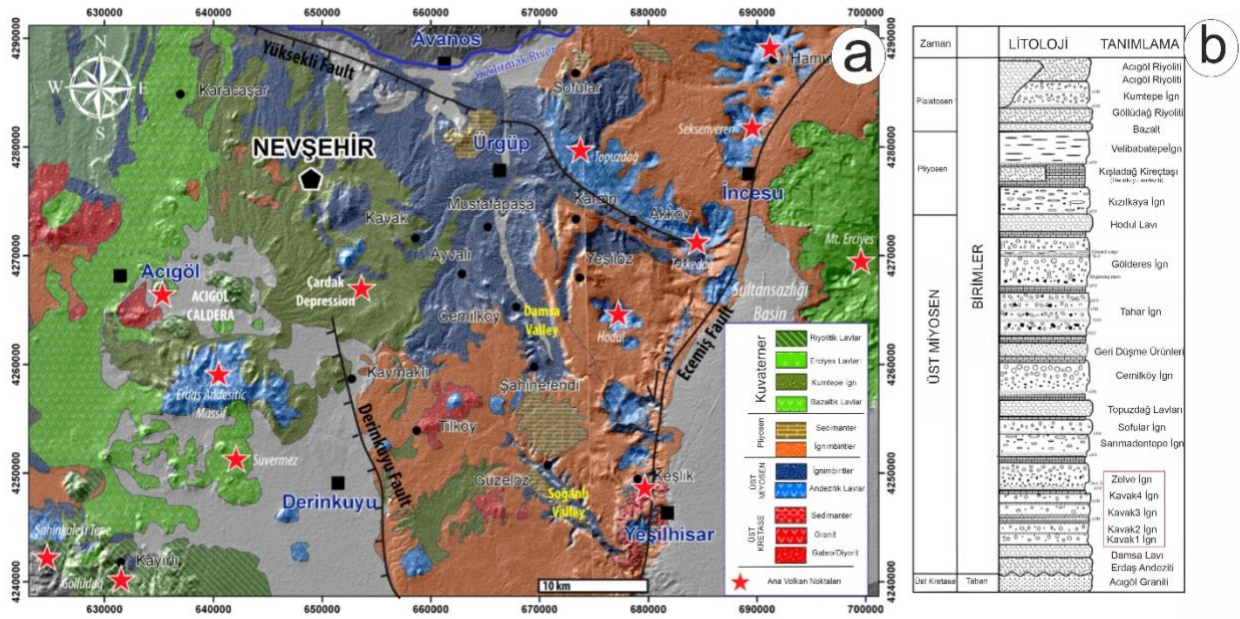
Gece ile gündüz arasında sıcaklık farklılıklarının çok olduğu bölgelerde mevsimsel farklılıklardan kaynaklanan döngülerden dolayı doğal taşın bünyesine giren tuz kristalleri büyüme eğilimi gösterebilmektedirler. Gözeneklerde büyüyen tuz kristalleri doğal taşlarda mikro çatlaklar oluşturabilmektedirler. Doğal taşlarda tuz kaynaklı meydana gelebilecek olan bozunmalar, tuz kristallerinin gözenekleri doldurma derecesine ve tuz kristallerinin yapmış olduğu basıncın derecesine bağlıdır [13], [14]. Özellikle tarihi ve sanat değeri yüksek yapılarda kullanılan doğal taşların kapilarite etkisiyle su ve nemden dolayı yüzeylerinin bozunduğu yapılan çalışmalar neticesinde ortaya konulmuştur [2], [15], [16].

Geçmişten günümüze kadar kullanılan doğal yapı taşları gerek atmosferik şartlar gerekse de çevresel etmenlere bağlı olarak bozunmalara uğramaktadırlar. Özellikle tarihi yapılarda kullanılan doğal taşların su emme özelliğini azaltmak yapıda meydana gelebilecek bozunmaların önüne geçebilmek adına önemli bir durumdur.

Bu çalışma kapsamında Nevşehir bölgesinde kullanılan üç farklı ignimbiritin fiziksel-mekanik özellikleri ve kapiler su emme özellikleri ortaya konulmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Orta Anadolu Volkanik Bölgesi (OAVB), Miyosen-Pliyosen dönemlerine ait geniş çapta yayılan ignimbiritlerin yaygın bir şekilde bulunduğu bir bölgedir. Le Pennec vd. (1994) yapılan çalışmada bu alanın yaklaşık 20.000 km²'lik bir alanı kapsadığı belirtilmiştir [17]. Kısmen erozyona uğramış olan bu ignimbiritlerin bazı bölgelerde derin bir şekilde oyulmuş kalıntılarının varlığını da içermektedir [18]. OAVB, güneyde Toros Dağları sınırları içinde yer alırken, kuzeyde Kırşehir masifi ile çevrelenmiştir. Batı ve doğuda ise Hasan Dağı ve Erciyes Dağı adlı iki büyük Kuaterner stratovolkanın varlığı bölgenin sınırlarını daha da belirginleştirmektedir. Yapısal olarak, plato batıda Tuz Gölü ve doğuda Ecemis fayları tarafından sınırlanmaktadır [19]. Orta Anadolu Volkanik Bölgesi'nde bulunan Kapadokya bölgesi, piroklastik birikintiler, karasal tortullar ve yerel lav akıntılarından oluşan benzersiz bir yapıya sahiptir [18]. Bölge genellikle Pre-Nöjen temel kayalar (Kretase granitik ve gabroik kayalar), Nöjen sedimenter kayalar (kırmızı çamurtaşları, kumtaşları ve konglomeralar), Nöjen volkano-sedimenter birimler (tüf ve ignimbiritler) ve Kuaterner döneme ait volkanik kayalardan (ignimbiritler, andezitler ve bazaltlar) oluşmaktadır. Aydar ve ark. (2012), jeokronolojik verilere dayanarak OAVB'deki Miyosen-Holosen yaşındaki ignimbiritlerin stratigrafisini belirlemiştir [18]. Le Pennec ve ark. (1994) tarafından yapılan çalışmada [17], on ignimbirit üyesi tespit edilmiştir. İgnimbiritler, yaşça en eski olandan en genç olana doğru, Kavak, Zelve, Sarımadentepe, Sofular, Cemilköy, Tahar, Gördeles, Kızılkaya, Valibabatepe ve Kumtepe olarak sıralanmıştır (Şekil 1). Kavak ignimbiritleri, Şekil 1b'de gösterildiği gibi, Kapadokya Volkanik Bölgesi'ndeki en erken piroklastik birikintilerdir ve akarsu-göl tortulları ile birbirine geçmiş durumdadır, bu da çoklu patlayıcı olayları işaret etmektedir. İgnimbirit dört ayrı alt birime ayrılmıştır: Kavak-1, Kavak-2, Kavak-3 ve Kavak-4, ayrıca Şekil 1b'de gösterilmektedir. Kavak-1 alt birimi, ters düzenli, pomza açısından zengin akışlarıyla dikkat çeker ve üzerindeki Kavak-2 biriminden ayrılır, bu birim kül açısından zengin akış birikintileri ve litik parçacıklar içerir. Kavak-3 alt birimi, kül matrisi içinde konsolide edilmiş birkaç pomza açısından zengin tabakayı içerirken, onun üzerinde Kavak-4 birimi yer alır. İgnimbirit soluk pembe bir renge sahiptir ve kül açısından zengin bir matris içinde litik ve pomza taneleri içerir, bu da piroklastik akış birikintilerini gösterir [19]. Zelve ignimbiriti, Türkiye'nin Kapadokya bölgesinin belirgin jeolojik bir özelliğidir ve beyaz piroklastik yağışın taban tabakası ve pembe ignimbirit tabakasıyla karakterizedir. Bu oluşum genellikle Kavak ignimbiritle ilişkilidir ve bölgedeki doğal miras alanlarının önemli bir bileşenidir. Zelve biriminin yaklaşık alan genişliği 4200 km², toplam hacmi ise 120 km³ olup, Ürgüp, Avanos ve Nevşehir ilçelerini kapsamaktadır. Kompozisyonu ve yapısı benzersiz özelliklere sahip olması ve bölgesel jeoloji açısından önemli olması nedeniyle jeologlar ve volkanologlar tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Zelve ignimbiriti, erozyon ve hava etkisi gibi jeolojik süreçler yoluyla Kapadokya peyzajının şekillenmesinde kritik bir rol oynamış ve zaman içinde bölgenin sakinlerinin kültürel ve sanatsal ifadelerini etkilemiştir. Bilimsel önemi ve kültürel değeri, araştırmacılar ve turistler için büyük ilgi alanı oluşturmaktadır [17]. Kapiler su emme deneylerinde Nevşehir bölgesinde üretilen ve yapılarda kullanılan üç farklı renge sahip Nevşehir ignimbiriti kullanılmıştır (Şekil 2). Ocaklarda bloklar halinde üretilen ignimbiritlerden deneylerde kullanılmak üzere 5x5x5 cm boyutlu küp numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 2. Kapiler su emme özellikleri belirlenen ignimbirit numuneleri.

İgnimbirit ocağında üretilen üç farklı renge sahip ignimbiritlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler ve kullanılan standartlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. İğnimbirit numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerde kullanılan standartlar.

Deneyleler	Kullanılan Standart
Yoğunluk (kg/m ³)	TS EN 1936 [20]
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	TS EN 1926 [21]
Ultrasonik dalga hızı (m/sn)	TS EN 14579 [22]
Ağırlıkça su emme (%)	TS EN 13755[23]
Gözeneklilik (%)	TS EN 1936 [20]
Kılcal su emme (kg/m ² s ^{0.5})	TS EN 1925 [24]

Su ile temas eden ortamlarda kullanılacak olan yapı taşlarının kapiler su emme özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla ülkemizde TS EN 1925 [24] standardı kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada da TS EN 1925 [24] standardında önerildiği üzere kenar uzunlukları 50±5 mm olan küp numuneler kullanılmıştır. Kapiler su emme deneyleri her bir kayaç ve her bir çözelti için 6 adet numune üzerinde yürütülmüştür. Etüv kurusu ağırlıkları tartılan iğnimbirit numunelerinin taban alanları ölçülmüş ve 3±1 mm derinliğinde suya temas edecek şekilde deney kabı içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3). İğnimbirit örnekleri 1, 3,5, 10, 15, 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 ve 4320 dakika boyunca su içerisinde bekletilmiştir. Belirlenen sürenin sonunda sudan çıkarılan numunenin yüzeyi kurulanmış ve 0.01 g hassasiyete sahip tartı ile tartılmıştır ve su emme miktarı belirlenmiştir. Deney neticesinde kılcal su emme katsayısı “C” Eşitlik 1’de verilen formül ile belirlenmiştir.

$$C = \frac{m_i - m_d}{A \cdot \sqrt{t_i}} \quad (1)$$

Burada; m_i ; su emen numunenin ağırlığı (g), m_d ; kuru numune ağırlığı (g), A ; suya temas eden numunenin yüzey alanı (m²), t_i ; numunenin deney çözeltisi içerisinde kaldığı süre (s)



Şekil 3. Kapiler su emme deneyine tabi tutulan iğnimbirit numuneleri.

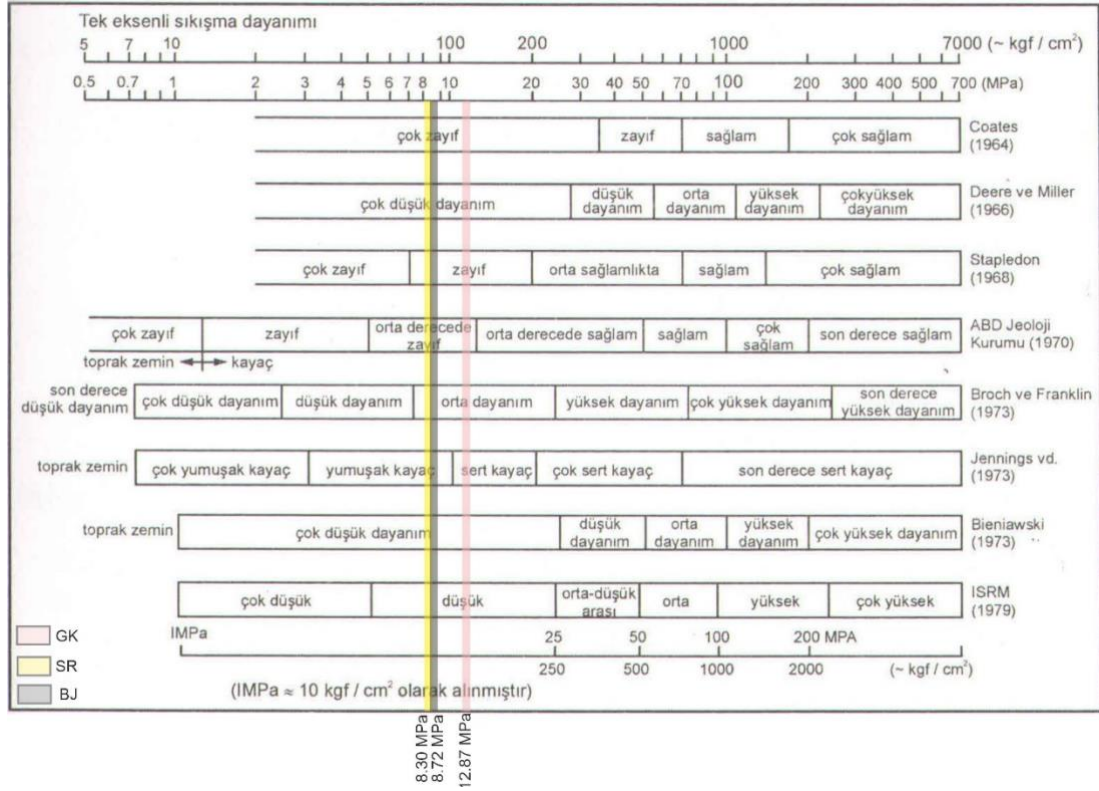
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneylerde kullanılan iğnimbiritlerin fiziko-mekanik özellikleri Türk Standartları Enstitüsünün önerdiği şekillerde belirlenmiştir. Deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre; tek eksenli sıkışma dayanımı en yüksek olan iğnimbirit GK numune kodlu iğnimbirit olurken tek eksenli sıkışma dayanımı en düşük olan iğnimbirit SR numune kodlu iğnimbirit olmuştur. 3 farklı iğnimbirit içerisinde gözeneklilik oranı en yüksek iğnimbirit BJ numune kodlu

İgnimbirit, en düşük gözeneklilik oranına sahip İgnimbirit ise SR numune kodlu İgnimbirit olarak tespit edilmiştir. Laboratuvarında elde edilen tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri göz önüne alındığında, İgnimbirit numunelerinin tek eksenli basınç değerleri SR İgnimbiriti için 8.30 MPa, GK İgnimbiriti için 12.87 MPa, BJ İgnimbiriti için İgnimbiriti için 8.72 MPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, inceleme sahasındaki İgnimbiritlerin farklı araştırmacılara göre “düşük” dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmaktadır (Şekil 4).

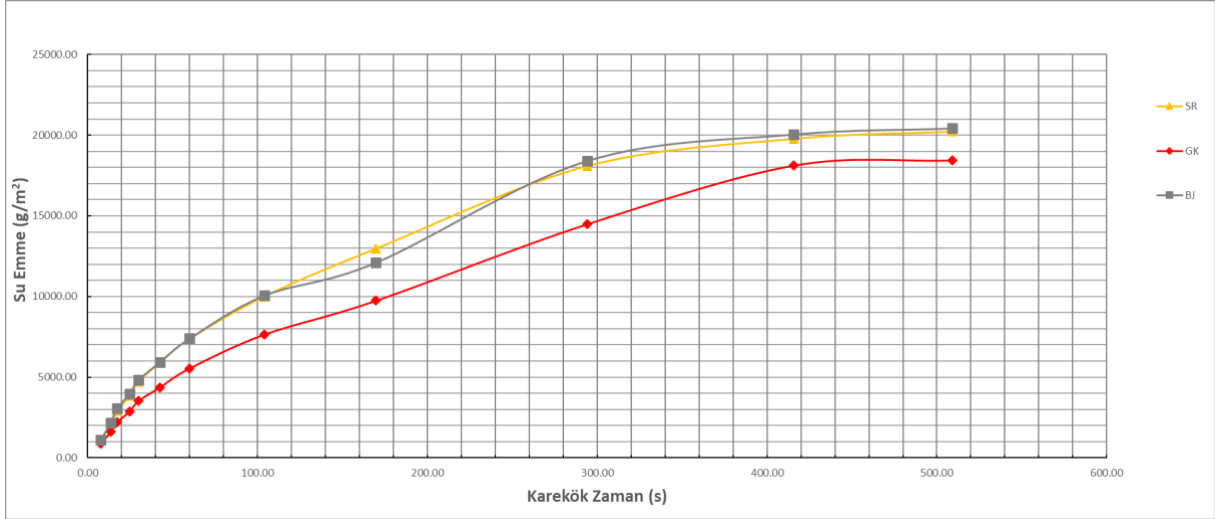
Tablo 2. İgnimbirit numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Deneyler	SR			GK			BJ		
	En Düşük	En Yüksek	Ortalama	En Düşük	En Yüksek	Ortalama	En Düşük	En Yüksek	Ortalama
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	14.34	15.12	14.68	15.95	16.02	15.98	15.10	15.38	15.26
Doymun birim hacim ağırlık (kN/m ³)	16.55	17.62	17.08	18.62	18.71	18.67	17.73	18.08	17.92
Gözeneklilik (%)	22.52	25.48	24.45	27.23	27.85	27.45	24.77	30.36	27.14
Kütlece su emme (%)	15.40	17.05	16.32	22.52	25.48	24.45	15.88	19.72	17.45
Ultra ses dalga hızı (m/s)	2115	2208	2154	2108	2365	2229	1913	2251	2126
Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	7.43	9.98	8.30	12.19	13.67	12.87	7.55	9.32	8.72

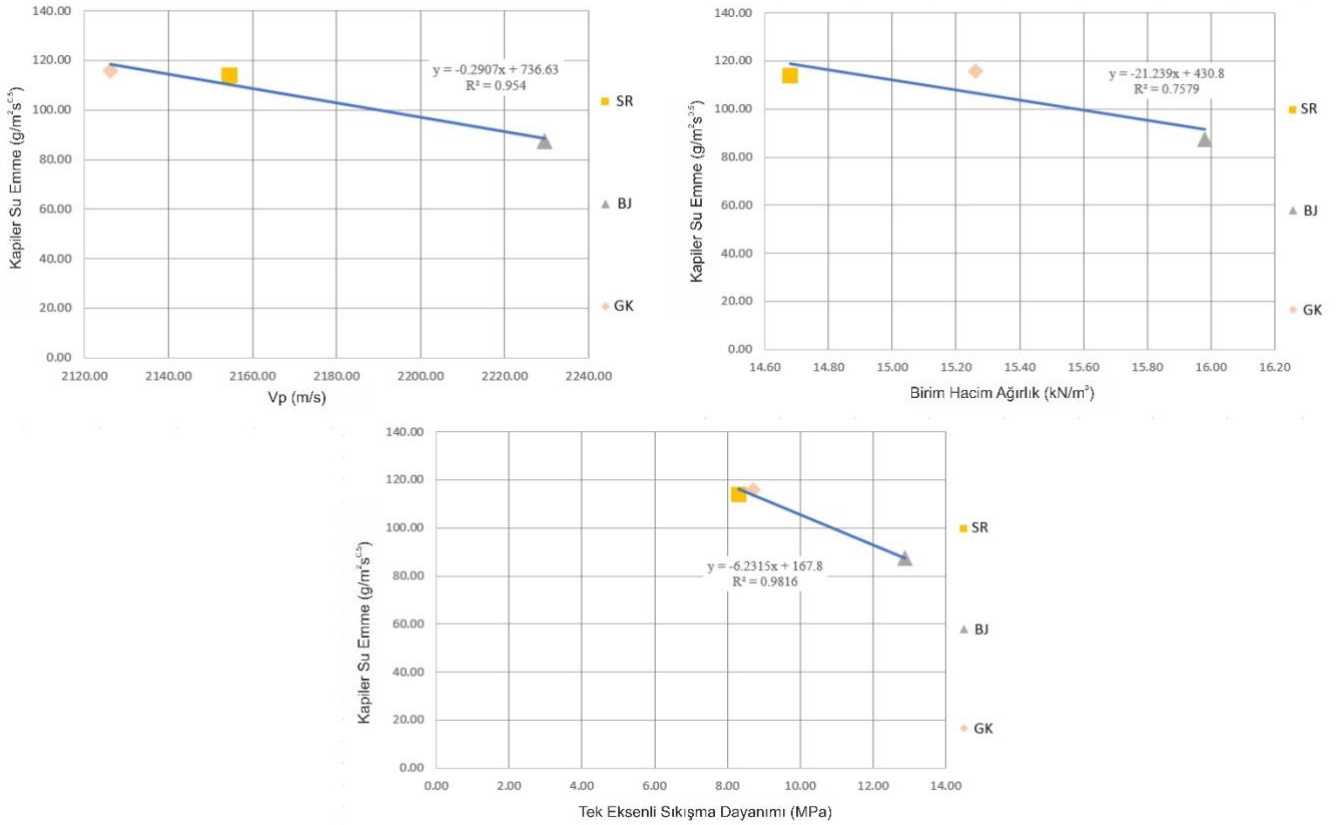


Şekil 4. İgnimbiritlerin sağlam kaya dayanımı açısından farklı araştırmacılara göre değerlendirilmesi [25].

Doğal yapı taşlarının kılcal su emme kapasiteleri ile gözenek boyutu ve gözenek geometrisi doğrudan ilişkilidir. Kapiler su emme katsayısı, yüzey alanı belirli olan bir malzemenin su emme oranının zamanın karekökü ile doğru orantılıdır [26], [27]. Graue vd. (2011) yaptıkları çalışmada doğal taşları kılcal su emme katsayılarına göre sınıflamışlardır [28]. Bu sınıflandırmaya göre kılcal su emme kapasitesi $<0.5 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ olan doğal taşlar düşük, kılcal su emme kapasitesi $0.5-3 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ arasında olan doğal taşlar orta, kılcal su emme kapasitesi $>3 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ olan doğal taşlar ise yüksek su emme kapasitesine sahip doğal taşlar olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen ignimbirit örneklerinin ortalama kapiler su emme potansiyelleri Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 4'te de görüldüğü gibi grafik iki ayrı eğime sahiptir. Birinci bölüm daha dik bir eğim sunarken ikinci bölüm daha düşük bir eğime sahiptir. Kapiler su emme deneyi sonuçlarına göre SR kodlu ignimbirit için $9.09 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$, GK kodlu ignimbirit için $7.45 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$, BJ kodlu ignimbirit için $9.12 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ kapiler su emme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler literatürde benzer özelliklerdeki doğal yapı taşlarının kapiler su emme değerleriyle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar gösterdiği görülmüştür [2], [16], [19], [29]. Öte yandan Graue vd. (2011) yapılan sınıflandırmaya göre incelemeye konu olan Nevşehir ignimbiritlerinin yüksek kapiler su emme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma kapsamında ignimbiritlerin kapiler su emme değerleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler karşılaştırılmıştır (Şekil 6). İncelemeye konu olan ignimbiritlerin kapiler su emme özelliği ile tek eksenli basınç dayanımı arasında belirleme katsayısı 0.98 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. İgnimbiritlerin kapiler su emme – karekök zaman arasındaki ilişki.



Şekil 6. İgnimbiritlerin kapiler su emme özellikleri ile mühendislik parametreleri arasındaki ilişki.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, Nevşehir bölgesinde geçmişten günümüze kadar kullanılan, üç farklı renge sahip ignimbirit numunelerinin kapiler su emme özellikleri belirlenmiştir. Ulusay ve Aydan (2018), yapılan çalışmada Kapadokya ignimbiritlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin detaylı bir karşılaştırmasını sunarak, kısa ve uzun vadeli malzeme karakteristiklerine ilişkin tanımlamalar yapmışlardır [30]. Bu çalışmada da Zelve ve Kavak ignimbiritlerinin fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışmada

incelenen ignimbiritlerin kuru birim ağırlığı 14.34 kN/m³ ile 16.02 kN/m³ arasında değişmektedir. Benzer değişimler ignimbiritler üzerinde yapılan çoğu çalışmada da bildirilmiştir [19], [31], [32] NBS'ye (1985) göre [33], tüm ignimbirit örnekleri yüksek - çok yüksek gözenekli kaya olarak sınıflandırılabilir. P-dalga hızı 1913 m/s ile 2365 m/s arasında değişirken, tek eksenli basınç dayanım değerleri 7.43 MPa ile 13.67 MPa arasında değişmektedir. Deere ve Miller'a (1966) göre [25], ignimbiritler düşük dayanıklılığa sahip olarak kabul edilmektedir. ISRM (1981) [34] tarafından geliştirilen sınıflandırma sistemine göre, incelenen ignimbirit örnekleri "az bozunmuş" olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, örneklerde gözlenen bozunmalara bağlı olarak yapılanmakta ve kaya malzemelerinin fiziksel özelliklerini ve davranışını değerlendirmede önemli bir faktördür. Bozunma derecesi, mineralojiyi, gözenekliliği ve diğer fiziksel özellikleri değiştirebilir ve bu nedenle dayanıklılık, dayanım ve diğer mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. İgnimbiritlerin kapiler su emme katsayısı (C) SR kodlu ignimbirit için 114.03 g/m²s^{0.5}, BJ kodlu ignimbirit için 115.71 g/m²s^{0.5}, GK kodlu ignimbirit için 87.39 g/m²s^{0.5} olarak hesaplanmıştır. Graue vd. (2011) [28] tarafından ortaya konulan sınıflandırmaya göre çalışma kapsamında kullanılan tüm ignimbirit numuneleri yüksek emici kaya grubunda yer almaktadır. Nevşehir bölgesindeki yapılarda sıklıkla kullanılan ignimbirit numuneleri yüksek su emme potansiyeline sahiptir. Yüksek gözeneklilik oranına sahip ignimbirit numunelerinin bünyesine suyu çok kolay bir şekilde almaktadır. Su ile ignimbirit bünyesine giren sular buharlaştıktan sonra ignimbiritlerin bünyesinde tuz bırakmakta ve bu tuzlar zamanla ignimbirit numunelerinin bozunmasına neden olmaktadır. Öte yandan ignimbiritlerin bünyesine giren su mevsimler sıcaklık farklılıklarından dolayı donma-çözölmeye maruz kalmakta ve bu donma-çözölmeye döngüsü ignimbiritlerin bünyesinde bulunan mikro çatlakların zamanla makro boyutlara ulaşmasına ve bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan ignimbirit numunelerinin kapiler su emme özellikleri ile fiziksel ve mekanik özellikleri arasında anlamlı ilişkiler olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje no: FHD-2022-10257).

V. KAYNAKLAR

- [1] M. J. Mosquera, T. Rivas, B. Prieto, ve B. Silva, "Capillary Rise in Granitic Rocks: Interpretation of Kinetics on the Basis of Pore Structure", *J. Colloid Interface Sci.*, c. 222, sy 1, ss. 41-45, Şub. 2000, doi: 10.1006/jcis.1999.6612.
- [2] İ. Dinçer, A. Özvan, M. Akin, M. Tapan, ve V. Oyan, "İgnimbiritlerin Kapiler Su Emme Potansiyellerinin Değerlendirilmesi: Ahlat Taşı Örneği", *Üzöncü İl Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, c. 17, sy 2, Art. sy 2, Ara. 2012.
- [3] D. Benavente, P. Lock, M. Ángeles García Del Cura, ve S. Ordóñez, "Predicting the Capillary Imbibition of Porous Rocks from Microstructure", *Transp. Porous Media*, c. 49, sy 1, ss. 59-76, Eki. 2002, doi: 10.1023/A:1016047122877.
- [4] C. David, M. Darot, ve D. Jeannette, "Pore structures and transport properties of sandstone", *Transp. Porous Media*, c. 11, sy 2, ss. 161-177, May. 1993, doi: 10.1007/BF01059632.
- [5] A. Leventis, D. A. Verganelakis, M. R. Halse, J. B. Webber, ve J. H. Strange, "Capillary Imbibition and Pore Characterisation in Cement Pastes", *Transp. Porous Media*, c. 39, sy 2, ss. 143-157, May. 2000, doi: 10.1023/A:1006687114424.

- [6] N. Cueto, D. Benavente, J. Martínez-Martínez, ve M. A. García-del-Cura, “Rock fabric, pore geometry and mineralogy effects on water transport in fractured dolostones”, *Eng. Geol.*, c. 107, sy 1, ss. 1-15, Tem. 2009, doi: 10.1016/j.enggeo.2009.03.009.
- [7] M. Y. Çelik ve A. U. Kaçmaz, “The investigation of static and dynamic capillary by water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions”, *Environ. Earth Sci.*, c. 75, sy 4, s. 307, Şub. 2016, doi: 10.1007/s12665-015-5132-x.
- [8] M. Y. Çelik ve S. Yılmaz, “Statik, tuzlu ve asidik sulu ortamların poroziteli yapıtaşlarının kapiler su emme potansiyeline etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendis.-Mimar. Fakültesi Derg.*, c. 2018, sy 2018, Nis. 2018, doi: 10.17341/gazimmfd.416369.
- [9] N. Karagiannis, M. Karoglou, A. Bakolas, ve A. Moropoulou, “Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials”, *Build. Environ.*, c. 106, ss. 402-408, Eyl. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.07.008.
- [10] D. T. Nicholson, “Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones”, *Earth Surf. Process. Landf.*, c. 26, sy 8, ss. 819-838, 2001, doi: 10.1002/esp.228.
- [11] P. Vázquez, F. J. Alonso, R. M. Esbert, ve J. Ordaz, “Ornamental granites: Relationships between p-waves velocity, water capillary absorption and the crack network”, *Constr. Build. Mater.*, c. 24, sy 12, ss. 2536-2541, Ara. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.002.
- [12] M. Y. Çelik, M. Sert, ve Z. Arsoy, “Yüzey Koruyucu Reçinenin Döğer Tüfü ve İscehisar Andezitinin Kılcal Su Emme Potansiyeli Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendis. Fakültesi Derg.*, c. 24, sy 3, Art. sy 3, Ara. 2019, doi: 10.17482/uumfd.476527.
- [13] H. Derluyn, P. Moonen, ve J. Carmeliet, “Deformation and damage due to drying-induced salt crystallization in porous limestone”, *J. Mech. Phys. Solids*, c. 63, ss. 242-255, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.jmps.2013.09.005.
- [14] N. Thaulow ve S. Sahu, “Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization”, *Mater. Charact.*, c. 53, sy 2, ss. 123-127, Kas. 2004, doi: 10.1016/j.matchar.2004.08.013.
- [15] Z. A. Erguler, “Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs”, *Eng. Geol.*, c. 105, sy 3-4, ss. 186-199, 2009.
- [16] A. Özdemir, “Capillary water absorption potential of some building materials”, *Geol. Eng.*, c. 26, sy 1, ss. 19-32, 2002.
- [17] J.-L. Le Pennec, J.-L. Bourdier, J.-L. Froger, A. Temel, G. Camus, ve A. Gourgaud, “Neogene ignimbrites of the Nevşehir plateau (Central Turkey): stratigraphy, distribution and source constraints”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, c. 63, sy 1-2, ss. 59-87, 1994.
- [18] E. Aydar vd., “Correlation of ignimbrites in the central Anatolian volcanic province using zircon and plagioclase ages and zircon compositions”, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, c. 213, ss. 83-97, 2012.
- [19] İ. Dinçer ve M. Bostancı, “Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration”, *Environ. Earth Sci.*, c. 78, sy 1, s. 7, Ara. 2018, doi: 10.1007/s12665-018-7993-2.
- [20] TS EN 1936, “Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Porozitelilik Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, 2010.

- [21] TS EN 1926, “Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, 2013.
- [22] TS EN 14579, “Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Ses Hızı İlerlemesinin Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, 2006.
- [23] TS EN 13755, “Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, 2014.
- [24] TS EN 1925, “Doğal Taşlar- Deney metotları-Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısının Tayini”. Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [25] D. U. Deere ve R. P. Miller, “Engineering classification and index properties for intact rock”, Illinois Univ At Urbana Dept Of Civil Engineering, 1966.
- [26] J.-D. Mertz, *Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès*, c. 90, sy 1. Persée-Portail des revues scientifiques en SHS, 1991.
- [27] S. Siegesmund ve H. Dürrast, “Physical and mechanical properties of rocks”, içinde *Stone in architecture*, Springer, 2011, ss. 97-225.
- [28] B. Graue, S. Siegesmund, ve B. Middendorf, “Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements”, *Environ. Earth Sci.*, c. 63, sy 7, ss. 1799-1822, 2011.
- [29] O. Şimşek, “Nevşehir (Kavak) Yöresi Vişne Renkli İgnimbiritin Duvar Kaplamasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Politek. Derg.*, c. 25, sy 1, ss. 281-289, 2022.
- [30] R. Ulusay ve Ö. Aydan, “The 2016 Hans Cloos Lecture: geo-engineering aspects on the structural stability and protection of historical man-made rock structures: an overview of Cappadocia Region (Turkey) in the UNESCO’s World Heritage List”, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, c. 77, ss. 457-488, 2018.
- [31] Ö. Aydan ve R. Ulusay, “Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoenvironment”, *Rock Mech. Rock Eng.*, c. 46, ss. 731-754, 2013.
- [32] O. Kasmer ve R. Ulusay, “Effects of Geo-Engineering Characteristics of the Soft Tuffs and Environmental Conditions on the Rock-Hewn Historical Structures at Zelve Open Air Museum, Cappadocia, Turkey”, *Environ. Eng. Geosci.*, c. 19, sy 2, ss. 149-171, May. 2013, doi: 10.2113/gseegeosci.19.2.149.
- [33] NGB, *Norwegian rock mechanics group: handbook in engineering geology—rock (in Norwegian)*. Tapir, Trondheim, 1985.
- [34] E. ISRM, “Rock characterization, testing and monitoring—ISRM suggested methods”, *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Pergamon Oxford, ss. 3-52, 1981.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

İkili Bal Porsuğu Algoritmasının Küme Birleşimli Sırt Çantası Problemine Uygulanması

 Gülşen ORUCOVA BÜYÜKÖZ^{a*},  Hüseyin HAKLI^b

^a *Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Fen Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE*

^b *Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: gorucova@erbakan.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1205144

ÖZET

NP-zor problem sınıfından olan küme birleşimli sırt çantası (KBSC) problemi, 0-1 sırt çantası probleminin (0-1 KP) genelleştirilmiş halidir. Literatürde bu probleme çeşitli sezgisel yaklaşımlar uygulanmasına rağmen, çözüm kalitesinin iyileştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Son zamanlarda önerilmiş olan Bal Porsuğu Algoritması (Honey Badger Algorithm (HBA)) sürekli problemleri çözmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada ikili yapıya sahip olan küme birleşimli sırt çantası problemine, transfer fonksiyonları yardımıyla ikili yapıya uyarlanan BPA algoritması uygulanmıştır. Transfer fonksiyonları olarak S-şekilli, V-şekilli, U-şekilli, Taper-şekilli fonksiyonlar kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çözümlerin iyileştirilmesi için onarım algoritması ve onarım algoritması ile birlikte iyileştirme algoritması kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Küme birleşimli sırt çantası problemi, Bal porsuğu algoritması, Transfer fonksiyonları, İkili optimizasyon*

Implementation of Binary Honey Badger Algorithm to Set Union Knapsack Problem

ABSTRACT

Set Union Knapsack Problem (SUKP), which is one of the NP-hard problem class, is the generalization of the 0-1 Knapsack Problem (0-1 KP). Although various heuristic approaches have been applied to this problem in the literature, the improvement of the solution quality continues. The recently proposed Honey Badger Algorithm (HBA) is designed to solve continuous problems. In this study, HBA algorithm, which is adapted to the binary structure with the help of transfer functions, is applied to the SUKP problem, which has a binary structure. S-shaped, V-shaped, U-shaped, Taper-shaped functions were used as transfer functions and the results obtained were compared. In order to improve the solutions, the repair algorithm and the improvement algorithm together with the repair algorithm were used.

Keywords: *Set union knapsack problem, Honey badger algorithm, Transfer functions, Binary optimization*

I. GİRİŞ

Sırt çantası problemi sınırlı kapasiteye sahip bir sırt çantasını, elimizde bulunan n nesnenin alt kümesi ile doldurma problemidir. Burada amaç çantanın kapasitesini aşmadan maksimum fayda sağlanacak şekilde nesnelere seçmektir. Sırt çantası probleminin 0-1 KP, bir boyutlu KP (tek kısıt olduğunda), çok boyutlu KP (birden çok kısıt olduğunda) gibi farklı versiyonları bulunmaktadır [1].

Küme Birleşimli Sırt Çantası (KBSC) problemi [2,3] standart 0-1 sırt çantası probleminin [4] genişletilmiş versiyonudur ve NP-zor sınıfındadır. KBSC problemleri veri tabanı bölümlenme [5], finansal karar verme [1-3], esnek üretim makineleri [2,6], geniş siber sistemlerde [7], veri akışı sıkıştırma [7,8] gibi birçok gerçek dünya probleminde kullanılmaktadır.

Son zamanlarda bazı meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, KBSC problemlerini çözmek için kullanılmıştır. Sürekli problemler için sunulan optimizasyon algoritmalarının, ikili yapıya sahip olan KBSC problemine uygulanması için öncelikle algoritmanın ikili uzaya adapte edilmesi gerekmektedir. Bu adaptasyon süreci transfer fonksiyonları [9], açılı modülasyonu [10], kuantum ilhamlı bitler [11] vb. yollar ile yapılabilmektedir. Transfer fonksiyonları ile algoritmanın genel işleyişine hiç müdahale edilmeden, algoritma ikili arama uzayında kullanılabilir. Yapay arı kolonisi algoritmasının ikili versiyonu (BABC) [12] çalışmada sunulmuş ve KBSC problemlerine uygulanmıştır. Sürekli problemler için geliştirilmiş olan yapay arı kolonisi algoritmasının ikili versiyonu için görüntüsü 0 veya 1 olacak şekilde örten bir fonksiyon tanımlanmıştır. Arama uzayının dışında kalan mümkün olmayan çözümleri ortadan kaldırmak için açgözlü stratejiye sahip onarım algoritması (S-GROA) kullanılmıştır. Ayrık güve arama algoritması, sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanan güve arama (MS) algoritmasının transfer fonksiyonları ile düzenlenmesiyle elde edilmiştir [9]. Çözüm kalitesini iyileştirmek için onarım algoritmasından faydalanılmıştır. 15 KBSC problemi ayrık MS algoritması ile S-şekilli, V-şekilli, O-şekilli 12 transfer fonksiyonu yardımıyla çözüldükten sonra sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan O4 transfer fonksiyonunun en iyi olduğu kanısına varılmıştır. Sürü zekasına dayalı optimizasyon algoritmaları, problem çözmede dikkate değer fırsatlar sunmaktadır. Genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonuna dayalı basit ama etkili bir ikili sürü zekası tekniği olan gPSO algoritması transfer fonksiyonlarına ihtiyaç duyulmayacak şekilde tasarlanmıştır [13]. Onarım algoritması kullanımı sayesinde mümkün olmayan çözümlerden kaçınılmıştır. KBSC problemleri üzerinde test edilen algoritmanın daha önce elde edilen çözümlerden daha etkili olduğu görülmüştür. Hibrit ikili parçacık sürü optimizasyon algoritması tabu arama algoritması ile (HBPSO/TS) geliştirildikten sonra KBSC problemi için test edilmiştir [14]. Arama süreci boyunca çözümlerin kalitesini değerlendirmek için ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece uygun çözüm uzayının sınırları keşfedilmeye çalışılmıştır. Algoritmada tabu tabanlı mutasyon prosedürü ile aç gözlü arama yapılmaktadır. Sömürü yeteneğini geliştirmek için tabu arama prosedürü tasarlanmıştır. HBPSO/TS, 30 kıyaslama örneğinden oluşan üç sette test edilmiştir. Yinelenen iki fazlı yerel arama algoritması (Iterated two-phase local search) NP-zor problemleri çözmek için sunulmuştur [15]. Algoritmanın birbirini tamamlayan arama ve sömürü aşamaları arama boyunca yinelenmektedir. Bu durum son zamanlarda tanıtılan algoritmalara kıyasla algoritmanın rekabet gücünü artırmaktadır. KBSC problemini çözmek için geliştirilmiş güve arama algoritması (EMS), diferansiyel mutasyonu global harmoni aramasına entegre ederek gelişmiş bir etkileşim operatörü (EIO) sunmaktadır [16]. Keşif yeteneğini geliştirmek için diferansiyel evrim algoritması ile jaya algoritmasının birleştirilmesi ile hibrit jaya algoritması (DHJaya) elde edilmiştir [17]. Sömürü yeteneğini geliştirmek için Cauchy mutasyonu bazı bireylerde gerçekleştirilmiştir. Uygun olmayan çözümleri onarmak ve uygun çözümleri optimize etmek için geliştirilmiş bir onarım ve iyileştirme algoritması (MSGROA) önerilmiştir. Tabu arama algoritmasına dayanan çok başlangıçlı çözüm tabanlı algoritma, aday çözümlerin etkili bir şekilde incelenmesi için çoklu başlangıç arama stratejisine sahiptir [18]. Grup teorisine dayalı bir optimizasyon algoritması (GTOA), evrim sürecine cebirsel grup işlemlerini dahil etmektedir [19]. GTOA genetik algoritma, ikili parçacık sürü optimizasyonu, ikili yapay arı kolonisi algoritması ile karşılaştırılmıştır. Orijinal çekirdek tabanlı arama özellikleri ile etkili lokal arama

sürecinin birleştirildiği çekirdek tabanlı tabu arama algoritması KBSÇ problemlerine uygulanmıştır [20].

KBSÇ problemlerinin yapısı 0-1 KP problemlerinden daha karmaşık olduğundan literatürde çok fazla çalışılmadığı görülmüştür. Bu problemlerin çözümünde bazı meta-sezgisel optimizasyon yöntemi kullanılmış olmasına rağmen, son zamanlarda önerilmiş olan bal porsuğu algoritması (BPA) henüz bu probleme uygulanmamıştır. BPA, sürekli optimizasyon problemleri için başarılı bir performans sunar, ancak literatürde BPA'nın dikkate değer ikili versiyonu görülmemektedir [21]. Bu sebeple bu çalışmada sürekli problemler için önerilen BPA'nın transfer fonksiyonu yardımıyla ikili versiyonu önerilmiştir. Çalışmada 16 transfer fonksiyonu kullanılarak hangi fonksiyonun daha etkili çözümler verdiği incelenmiştir. Arama uzayında bulunan mümkün olmayan çözümleri ortadan kaldırmak için onarım algoritması ve onarım algoritması ile birlikte iyileştirme algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritma KBSÇ problemleri ile test edilmiştir. Bu makalenin geri kalanı şu şekilde oluşturulmuştur: Bölüm 2'de KBSÇ ve orijinal BPA tanıtılmıştır. Bölüm 3'te onarım ve iyileştirme algoritmaları, Bölüm 4'te önerilen algoritmanın uygulanması, deney sonuçları ve transfer fonksiyonlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Son bölüm, çalışmanın sonucunu ve gelecekte yapılabilir önerilerden oluşmaktadır.

II. MATERYAL VE METOTLAR

A. KÜME BİRLEŞİMLİ SIRT ÇANTASI PROBLEMİ (SET-UNION KNAPSACK PROBLEM (SUKP))

Küme birleşimli sırt çantası (KBSÇ) problemi 0-1 sırt çantası probleminin genelleştirilmiş halidir. Bu problemde nesnelere ilişkili olan elemanlar kümesi dikkate alınmaktadır.

$U = \{1, 2, \dots, n\}$ elemanlar kümesi, $S = \{1, 2, \dots, m\}$ nesnelere kümesi olmak üzere her $i \in S$ ($i = 1, 2, \dots, m$) nesnesi $p_i > 0$ faydasına sahip $U_i \subseteq U$ alt kümesi karşılık gelmektedir. Her bir $j \in U$ ($j = 1, 2, \dots, n$) elemanının $w_j > 0$ ağırlığı vardır. Boş olmayan keyfi bir $A \subseteq S$ kümesi için A 'nın faydası (profit):

$$P(A) = \sum_{i \in A} p_i \quad (1)$$

A 'nın ağırlığı

$$W(A) = \sum_{j \in \bigcup_{i \in A} U_i} w_j \quad (2)$$

denklemleri ile tanımlanır. KBSÇ problemlerinde ilişki matrisleri nesnelere elemanların ilişkisini göstermektedir. Nesnedeki eleman kullanıldıysa matriste değeri 1, kullanılmadıysa 0 olarak verilmektedir.

KBSÇ probleminin amaç fonksiyonu $P(S^*)$ maksimum olacak şekilde $S^* \subseteq S$ alt kümesini aramaktadır. Burada kısıt K sırt çantasının kapasitesi olmak üzere $W(S^*) \leq K$ dir [1,2].

B. BAL PORSUĞU ALGORİTMASI (HONEY BADGER ALGORITHM)

Bal Porsuğu Algoritması (BPA), bal porsuğunun yiyecek arama davranışından esinlenerek matematiksel olarak geliştirilen, sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan arama stratejisine sahip bir algoritmadır [21]. BPA bal porsuğunun yiyecek arama davranışını taklit eder. Besin kaynağını bulmak için, bal porsuğu ya kokuyu takip eder ve kazar ya da bal kılavuzu kuşunu

takip eder. İlk duruma kazma durumu, ikinci duruma bal durumu denmektedir. Kazma durumunda, avın konumunu tahmin etmek için koku alma yeteneğini kullanır; ulaştığında avı yakalamak için avın etrafında hareket eder. Bal durumunda bal porsuğu, arı kovanını doğrudan bulmak için bal kılavuzu kuşunun rehberini alır.

Bal Porsuğu Algoritması aşamaları aşağıdaki gibidir [21].

$$x_i = lb_i + r_1(ub_i - lb_i) \quad (3)$$

eşitliği ile rassal olarak popülasyonun oluşturulmasıyla algoritma başlar. Burada x_i bal porsuğunun i . konumunu, lb_i ve ub_i arama uzayının sırasıyla alt ve üst sınırlarını göstermektedir. r_1 0 ve 1 arasında rassal olarak üretilen sayıdır. Algoritmadaki önemli notasyonlardan biri I yoğunluk yani avın konsantrasyon gücüdür ve av ile arasındaki mesafe ile ilişkilidir. I_i avın koku yoğunluğudur; koku yüksekse, bal porsuğunun hareketi hızlı olacaktır ve bunun tersi de geçerlidir. Bu koku yoğunluğu ise bal porsuğunun ava olan uzaklığı ile ters orantılıdır. Burada S kaynak gücü veya konsantrasyon gücüdür, d_i av ile bal porsuğu arasındaki uzaklık, r_2 0, 1 arasında rasgele sayıdır.

$$I_i = r_2 \frac{S}{4\pi d_i^2} \quad (4)$$

$$S = (x_i - x_{i+1})^2 \quad (5)$$

$$d_i = x_{prey} - x_i \quad (6)$$

Yoğunluk faktörü α , aramadan sömürüye geçişin pürüzsüz olmasını sağlamak için zaman değişim rassallığını kontrol eder. Azalan α faktörü, rassal zamanda azalan iterasyonlarla Eşt. 7'de olduğu gibi güncellenir. Burada $C \geq 1$ sabittir (varsayılan değeri 2'dir).

$$\alpha = C \cdot \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right) \quad (7)$$

Lokal optimumdan kaçınmak için aramanın yönünü değiştiren F bayrağı kullanır. Eşt. 9'da F bayrağının özelliği verilmiştir.

Algoritmanın temel aşamaları kazı ve bal aşamasıdır. Kazı aşamasında bal porsuğu Cardioid şeklinde yol çizer bu aşamanın matematiksel gösterimi Eşt. 8'de verilmiştir.

$$x_{new} = x_{prey} + F \cdot \beta \cdot I \cdot x_{prey} + F \cdot r_3 \cdot \alpha \cdot d_i \cdot |\cos(2\pi r_4) \cdot [1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (8)$$

Burada x_{prey} avın pozisyonu, x_{new} bal porsuğunun yeni pozisyonu, $\beta \geq 1$ (varsayılan 6) bal porsuğunun bala ulaşma becerisi, d_i bal ile arasındaki uzaklık, r_3, r_4, r_5 ise 0,1 arasında birbirinden farklı rassal sayılardır.

$$F = \begin{cases} 1, & r_6 \leq 0.5 \\ -1, & \text{diğer} \end{cases} \quad (9)$$

Burada r_6 0,1 arasında rassal sayıdır.

Bal aşamasında bal porsuğu kılavuz kuşunun takip ederek bala ulaşır. Bu olay aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir.

$$x_{new} = x_{prey} + F \cdot r_7 \cdot \alpha \cdot d_i \quad (10)$$

Burada r_7 0,1 arasında rassal sayıdır. Algoritma hakkında daha detaylı bilgi için [21] çalışması incelenebilir.

III. BAL PORSUĞU ALGORİTMASININ KBSC PROBLEMİNE UYGULANMASI

Bal porsuğu algoritması sürekli problemlere uygulanmak üzere modellenmiştir. Literatürde bu algoritmanın kayda değer ikili versiyonuna rastlanmamıştır. Bu sebeple ikili yapıya sahip olan KBSC problemini çözmek için transfer fonksiyonları yardımıyla BPA'nın ikili versiyonu önerilmiştir. Çalışmada farklı dönüşümlere sahip S-şekilli [22], V-şekilli [22], U-şekilli [23], Taper-şekilli [24] transfer fonksiyonları kullanılmıştır.

A. ONARIM ALGORİTMASI (REPAIR ALGORITHM)

KBSC problemi kısıtlı optimizasyon problemi olduğu için bu probleme BPA'nın ikili versiyonu uygulandığında kullanılması mümkün olmayan (infeasible) çözümler de elde edilmektedir. Bu çözümleri onarmak, arama uzayına dahil etmek için onarım algoritması kullanılmıştır. Açgözlü stratejiye [3] göre d_j ($j = 1, 2, \dots, n$), U_1, U_2, \dots, U_m alt kümelerindeki $j \in U$ elemanının frekansı olsun. $R_i = \sum_{j \in U_i} \frac{w_j}{d_j}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) olmak üzere $\frac{p_i}{R_i}$, i . nesnenin yoğunluk değeri olarak gösterilsin. S kümesindeki bütün nesnelere için yoğunluk değerine göre azalan olarak sıralandığında nesnelere indisleri $H[1, 2, \dots, m]$ dizisinde tutulsun. m boyutlu 0-1'lerden oluşan bir $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \in \{0, 1\}^m$ aday çözümü için nesnelere indis numaralarından oluşan $A_Y = \{i | y_i \in Y \text{ ve } y_i = 1, \leq i \leq m\}$ gösterimi kullanılsın. Açgözlü stratejiye dayanarak onarım algoritmasında yoğunluk değeri en büyük olandan küçük olan nesneye kadar boş sırt çantasına nesnelere kapasiteyi aşmayacak şekilde eklenmektedir. Böylece yoğunluğu daha düşük olan nesnelere çantadan çıkarılmıştır. Algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir [12]:

Girdi: KBSC problemi aday çözümü $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \in \{0, 1\}^m$ ve $H[1, 2, \dots, m]$ dizisi
Çıktı: Mümkün çözüm $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \in \{0, 1\}^m$ ve mümkün çözümün $f(Y)$ uygunluk değeri

if ($W(A_Y) > C$)

$Z \leftarrow [0, 0, \dots, 0] \% Z \ m - \text{boyutlu}$

for $i \leftarrow 1$ to m do

 If ($Y_{H[i]} = 1$ and $W(A_Z \cup \{H[i]\}) \leq C$) then $Z_{H[i]} \leftarrow 1$ and $A_Z \leftarrow A_Z \cup \{H[i]\}$.

end for

$Y \leftarrow Z$

return ($Y, f(Y)$).

Algoritma 1. Onarım algoritmasının kaba kodu

B. İYİLEŞTİRME ALGORİTMASI (IMPROVEMENT ALGORITHM)

Aday çözümdeki seçili nesnelere çantaya eklendiğinde kapasite aşılmıyorsa, çantaya daha fazla fayda sağlanacak şekilde nesne eklenebilme stratejisi iyileştirme algoritması olarak adlandırılır. Eklenen nesnedeki elemanlar daha önce eklenmiş nesnenin içinde var ise bu elemanların ağırlıkları dikkate alınmadığı için iyileştirme algoritması ile ağırlık artırılmadan fayda artırılabilir [17]. Onarım algoritmasında kapasiteyi aşma durumunda çantadan bazı nesnelere çıkarılarak maksimum verimlilik sağlanmaya çalışıldı. Bu çalışmada onarım algoritmasından gelen aday çözüme de iyileştirme algoritması uygulandı. İyileştirme algoritmasının kaba kodu aşağıdaki gibidir [17]:

Girdi: KBSÇ problemi aday çözümü $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \in \{0, 1\}^m$ ve $H[1, 2, \dots, m]$ dizisi
Çıktı: Mümkün çözüm $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \in \{0, 1\}^m$ ve mümkün çözümün $f(Y)$ uygunluk değeri

```

1 if ( $W(A_Y) < C$ ) then go to 7
2  $Z \leftarrow [0, 0, \dots, 0]$  %  $Z$   $m$  – boyutlu
3 for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do % onarım aşaması
4   If ( $Y_{H[i]} = 1$  and  $W(A_Z \cup \{H[i]\}) \leq C$ ) then  $Z_{H[i]} \leftarrow 1$  and  $A_Z \leftarrow A_Z \cup \{H[i]\}$ .
5 end for
6  $Y \leftarrow Z$ 
7 for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do % iyileştirme aşaması
8   If ( $Y_{H[i]} = 0$  and  $W(A_Z \cup \{H[i]\}) \leq C$ ) then  $Z_{H[i]} \leftarrow 1$  and  $A_Z \leftarrow A_Z \cup \{H[i]\}$ .
9 end for
return ( $Y, f(Y)$ ).

```

Algoritma 2. Onarım ve iyileştirme algoritmasının kaba kodu

Çalışmada kullanılan problemlerden biri üzerinde onarım ve iyileştirme aşamaları Şekil 1’de gösterilmiştir. SUKP_85_100_0.10_0.75 problemi dikkate alınırsa, bu problemin ismindeki ilk sayı problemdeki nesnelere toplam sayısını, ikinci sayı ise her bir nesnenin içindeki toplam eleman sayısını göstermektedir. Dolayısıyla bu problemde 85 nesne, kapasitesi 12180 olan bir çantaya yerleştirilecektir. Eşit. 3 ile rasgele oluşturulan bir aday çözüm reel değerlerden oluşan 1×85 boyutunda bir vektördür. Bu reel değerler transfer fonksiyonu yardımıyla ikili yapıya dönüştürüldükten sonra bazı bileşenleri Şekil 1 (a)’da verilmiştir. Burada 1. satır aday çözümün bileşenlerinin indis numaralarını göstermektedir. 2. satır ise aday çözümdeki nesnelere seçilip seçilmediği gösterilmektedir. Bu aday çözümün ağırlıkları toplamı hesaplandığında 15970 olduğu görülür bu ise 12180 çanta kapasitesini aşmaktadır, bu sebeple çözüm onarım işlemine uğrar. Onarım işlemi sonrası yeni aday çözüm Şekil 1 (b)’de verilmiştir. Kapasite aşıldığı için çantadan bazı nesnelere çıkarılmıştır. Elde edilen aday çözümün ağırlığı 12179’dur ve çanta kapasitesini aşmamaktadır. Kapasiteyi aşmadığı için bu çözüm iyileştirilebilir, o yüzden iyileştirme işlemine uğrar. İyileştirme işlemi sonrası elde edilen çözüm Şekil 1 (c)’deki gibidir. Bu çözümün ağırlığı 12179’dur kapasiteyi aşmamaktadır. Ancak dikkat edilirse 41, 64, 82 ve 84. nesne çantaya eklenmiştir. Dolayısıyla iyileştirme algoritması sayesinde kapasite aşmadan daha fazla fayda sağlanmıştır.

1	...	12	...	14	...	19	...	32	...	41	42	43	...	64	...	70	...	79	...	82	83	84	85
0	...	1	...	1	...	1	...	1	...	0	0	1	...	0	...	1	...	1	...	0	1	0	0

(a)

↓ Onarım işlemi

1	...	12	...	14	...	19	...	32	...	41	42	43	...	64	...	70	...	79	...	82	83	84	85
0	...	0	...	0	...	0	...	0	...	0	0	0	...	0	...	0	...	0	...	0	1	0	0

(b)

↓ İyileştirme işlemi

1	...	12	...	14	...	19	...	32	...	41	42	43	...	64	...	70	...	79	...	82	83	84	85
0	...	0	...	0	...	0	...	0	...	1	0	0	...	1	...	0	...	0	...	1	1	1	0

(c)

Şekil 1. (a) ikili aday çözüm, (b) onarım algoritması sonrası aday çözüm, (c) iyileştirme algoritması sonrası aday çözüm.

IV. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada KBSÇ problemini çözmek için S-şekilli, V-şekilli, U-şekilli, Taper-şekilli transfer fonksiyonları yardımıyla BPA ikili yapıya uyarlanmıştır. KBSÇ problemindeki nesne sayısı boyutunda N adet reel değerli aday çözüm oluşturulduktan sonra transfer fonksiyonları yardımıyla ikili değere dönüştürülmüştür. Daha sonra uygunluk değerleri hesaplanarak onarım veya iyileştirme algoritmaları yardımıyla çözümler iyileştirilmiştir. Bu işlemler Tablo 1’de verilen 6 adet KBSÇ problemine uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatürde KBSÇ problemleri 100 tekrar, popülasyon boyutu 20, iterasyon sayısı ise KBSÇ probleminin içeriğinde bulunan nesne sayı m , eleman sayısı n olmak üzere $\max(m, n)$ şeklinde belirlenmiştir.

KBSÇ probleminin verileri http://www.info.uni-v-angers.fr/pub/hao/SUKP_KBTS.html adresinden alınmıştır.

Çalışmada kullanılan KBSÇ problemlerinin listesi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan problem isimleri

PROBLEM NO	PROBLEM ADI
P1	SUKP_85_100_0.10_0.75
P2	SUKP_85_100_0.15_0.85
P3	SUKP_100_85_0.10_0.75
P4	SUKP_100_85_0.15_0.85
P5	SUKP_100_100_0.10_0.75
P6	SUKP_100_100_0.15_0.85

BPA ile elde edilen çözümler içinde çanta kapasitesini aşan mümkün olmayan çözümler, onarım algoritmasına gönderilerek mümkün çözümler haline getirildi. Bu işlemler 100 tekrarlı olarak her bir transfer fonksiyonu için hesaplandıktan sonra minimum, maksimum, ortalama değer ve standart sapmalarından oluşan Tablo 2 elde edildi. Tablo 2’den kullanılan transfer fonksiyonları içinde Taper-şekilli transfer fonksiyonu kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

BPA ile elde edilen çözümler içinde çanta kapasitesini aşan mümkün olmayan çözümler, onarım algoritmasına gönderilerek mümkün çözümler haline getirildikten sonra iyileştirme algoritması ile çantaya daha fazla nesne eklenmeye çalışıldı. Çünkü problemin yapısı gereği çantanın içerdiği nesnelerin içindeki elemanlar birden fazla kez çantada bulunuyorsa bu elemanların ağırlıkları sadece bir kez dikkate alınmaktadır. Bunun yanı sıra eğer aday çözümdeki nesnelere çanta kapasitesini aşmıyorsa yine iyileştirme algoritması ile fayda artırılmaya çalışıldı. Bu işlemler 100 tekrarlı olarak her bir transfer fonksiyonu için hesaplandıktan sonra minimum, maksimum, ortalama değer ve standart sapmalarından oluşan Tablo 3 elde edildi. Tablo 3’ten 6 problemin 4’ünde kullanılan transfer fonksiyonları içinde Taper-şekilli transfer fonksiyonu kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer 2 problem için ise en iyi çözüm S-şekilli transfer fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Çözülen 6 problemin sonuçlarından U-şekilli transfer fonksiyonunun V-şekilli transfer fonksiyonundan daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

P3	En iyi	12459	13044	13044	13167	13044	13020	13167
	Ort	12459	12956.4	12818.5	12649.12	12779.27	12551.35	12559.71
	En kötü				12296	12296	12253	12296
	StD	0.00	130.66	153.06	2.72E+02	2.49E+02	2.18E+02	1.97E+02
P4	En iyi	11119	12066	12238	12348	12479	12238	12235
	Ort	11119	11546	12049.3	11873.47	11919.71	11503.03	11491.14
	En kötü				11119	11024	11041	10797
	StD	0.00	214.94	96.11	3.64E+02	2.67E+02	4.08E+02	3.93E+02
P5	En iyi	13634	14044	13860	14044	13860	14044	14044
	Ort	13634	13806	13547.2	13570.47	13604.24	13515.84	13564.6
	En kötü				13018	12877	12827	12874
	StD	0.00	144.91	119.11	1.82E+02	1.47E+02	2.26E+02	2.17E+02
P6	En iyi	11325	13145	13498	13508	13508	13508	13508
	Ort	11325	12234.8	13103.1	12854.94	13027.41	12761.25	12767.44
	En kötü				11970	11814	11552	11271
	StD	0.00	388.66	343.46	3.89E+02	3.89E+02	4.52E+02	4.92E+02
Friedman değeri		6.17E+00	3.67E+00	3.50E+00	2.83E+00	2.67E+00	4.33E+00	4.83E+00
Son sıralama		7	4	3	2	1	5	6

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, BPA algoritması transfer fonksiyonları yardımıyla ikili bir optimizasyon problemi olan KBSC problemine uygulandı. Bu çözümlerin ortalaması, minimum, maksimum ve standart sapması hesaplanarak değerler tablollaştırıldı. Elde edilen sonuçlara göre Tablo 2’den BPA ve onarım algoritması birlikte kullanıldığında 4 tip transfer fonksiyonu kümesi içinde T2-şekilli transfer fonksiyon yardımıyla bulunan değerlerin daha iyi olduğu görüldü. Tablo 2 ve Tablo 3 karşılaştırılırsa hem onarım hem iyileştirme algoritmasının BPA ile kullanılması sonuçları önemli ölçüde iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca Tablo 3’den 6 problemin 4’ünde yine Taper-şekilli transfer fonksiyonların en iyi çözümleri verdiği söylenebilir. Tablo 4’ den daha önce KBSC problemini çözmeye kullanılan A-SUKP, ABC-Bin, GA algoritmaları ile BPA’nın karşılaştırılmasında BPA’nın dikkate değer ölçüde sıralamada ilk sıralarda bulunduğu ve karşılaştırılabilir seviyede olduğu gözlemlendi.

BPA’nın arama stratejisindeki başarısı ile onarım algoritmasının mümkün olmayan çözümleri mümkün çözüme dönüştürmesi, iyileştirme algoritmasının var olan çözümün kalitesini artırması özellikleri birleştirildiğinde karmaşık olan KBSC problemlerini çözen kayda değer ikili algoritma elde edilmiş oldu.

Farklı transfer fonksiyonları kullanılarak BPA algoritması KBSC problemi için test edilebilir ve Taper-şekilli transfer fonksiyonundan daha iyi transfer fonksiyonunun olup olmadığı araştırılabilir. Ayrıca farklı optimizasyon algoritmaları BPA ile birleştirilerek BPA’dan daha etkili yeni hibrit yapılar elde edilebilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] H. Kellerer, U. Pferschy, and D. Pisinger, “Multidimensional knapsack problems,” *Knapsack Problems*, pp. 235–283, 2004.
- [2] O. Goldschmidt, D. Nehme, and G. Yu, “Note: on the set-union knapsack problem,” *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 41, no. 6, pp. 833–842, 1994.
- [3] A. Arulselvan, “A note on the set union knapsack problem,” *Discrete Appl Math*, vol. 169, pp. 214–218, 2014.
- [4] J. C. Bansal and K. Deep, “A modified binary particle swarm optimization for knapsack problems,” *Appl Math Comput*, vol. 218, no. 22, pp. 11042–11061, Jul. 2012.

- [5] S. Navathe, S. Ceri, G. Wiederhold, and J. Dou, Vertical Partitioning Algorithms for Database Design, pp. 680–710, 1984.
- [6] C. S. Tang and E. v. Denardo, “Models arising from a flexible manufacturing machine, part II: minimization of the number of switching instants,” *Operations Research*, vol. 36, no. 5, pp. 778–784, Oct. 1988.
- [7] M. Tu and L. Xiao, “System resilience enhancement through modularization for large scale cyber systems,” in *2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, 2016, pp. 1-6.
- [8] X. Yang, A. Vernitski, and L. Carrea, “An approximate dynamic programming approach for improving accuracy of lossy data compression by bloom filters,” *Eur J Oper Res*, vol. 252, no. 3, pp. 985–994, 2016.
- [9] Y. Feng, H. An, and X. Gao, “The importance of transfer function in solving set-union knapsack problem based on discrete moth search algorithm,” *Mathematics*, vol. 7, no. 1, 2018.
- [10] G. Pampara, N. Franken, and A. P. Engelbrecht, “Combining particle swarm optimisation with angle modulation to solve binary problems,” in *2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE CEC, 2005*, vol. 1, pp. 89–96.
- [11] H. Nezamabadi-Pour, “A quantum-inspired gravitational search algorithm for binary encoded optimization problems,” *Eng Appl Artif Intell*, vol. 40, pp. 62–75, Apr. 2015.
- [12] Y. He, H. Xie, T. L. Wong, and X. Wang, “A novel binary artificial bee colony algorithm for the set-union knapsack problem,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 78, pp. 77–86, Jan. 2018.
- [13] F. B. Ozsoydan and A. Baykasoglu, “A swarm intelligence-based algorithm for the set-union knapsack problem,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp. 560–569, Apr. 2019.
- [14] G. Lin, J. Guan, Z. Li, and H. Feng, “A hybrid binary particle swarm optimization with tabu search for the set-union knapsack problem,” *Expert Syst Appl*, vol. 135, pp. 201–211, Nov. 2019.
- [15] Z. Wei and J. K. Hao, “Iterated two-phase local search for the set-union knapsack problem,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 101, pp. 1005–1017, Dec. 2019.
- [16] Y. Feng, J. H. Yi, and G. G. Wang, “Enhanced moth search algorithm for the set-union knapsack problems,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 173774–173785, 2019.
- [17] C. Wu and Y. He, “Solving the set-union knapsack problem by a novel hybrid jaya algorithm,” *Soft comput*, vol. 24, no. 3, pp. 1883–1902, Feb. 2020.
- [18] Z. Wei and J. K. Hao, “Multistart solution-based tabu search for the set-union knapsack problem,” *Appl Soft Comput*, vol. 105, Jul. 2021.
- [19] Y. He and X. Wang, “Group theory-based optimization algorithm for solving knapsack problems,” *Knowl Based Syst*, vol. 219, May 2021.
- [20] Z. Wei and J. K. Hao, “Kernel based tabu search for the set-union knapsack problem,” *Expert Syst Appl*, vol. 165, Mar. 2021.
- [21] F. A. Hashim, E. H. Houssein, K. Hussain, M. S. Mabrouk, and W. Al-Atabany, “Honey badger algorithm: new metaheuristic algorithm for solving optimization problems,” *Math Comput Simul*, vol. 192, pp. 84–110, Feb. 2022.

- [22] S. Mirjalili and A. Lewis, "S-shaped versus v-shaped transfer functions for binary particle swarm optimization," *Swarm Evol Comput*, vol. 9, pp. 1–14, Apr. 2013.
- [23] S. Mirjalili, H. Zhang, S. Mirjalili, S. Chalup, and N. Noman, "A novel u-shaped transfer function for binary particle swarm optimisation," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1138, pp. 241–259, 2020.
- [24] Y. He, F. Zhang, S. Mirjalili, and T. Zhang, "Novel binary differential evolution algorithm based on taper-shaped transfer functions for binary optimization problems," *Swarm Evol Comput*, vol. 69, Mar. 2022.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Why Sentiment Analysis-Based Metrics are Essential for Measuring Channel Performance on YouTube: An Experimental Study

Hakan Elbaş^a, Alparslan Mesri^{b,*}

^a Department of Intelligent Systems Engineering, Graduate School, Bursa Technical University, Bursa, TURKEY

^b Department of Industrial Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Ankara, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: alpmesri@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1190860

ABSTRACT

YouTube is a global social and economic platform that enables users to share videos. While many studies have conducted sentiment analyses on YouTube comments, none of these studies have focused on the necessity and potential significance of sentiment analysis-based metrics as essential or complementary tools that could serve as a "gold standard" for measuring the performance of both videos and channels. In this study, an experimental metric named the Sentiment Index (SI) was created to perform an experiment aimed at examining the robustness of sentiment analysis-based metrics against time parameter. To assess the degree to which this metric is affected by time parameter, a sentiment analysis experiment was conducted using VADER. The results of the experiment indicate that the Sentiment Index (SI) is influenced by time parameter to a marginal extent of 0.8%.

Keywords: Natural language processing, Sentiment analysis, Data science, Youtube, Valence Aware Dictionary and sEntiment Reasoner (VADER), Social media

YouTube'da Kanal Performansını Ölçmek İçin Neden Duygu Analizi Temelli Metrikler Gereklidir: Deneysel Bir Çalışma

ÖZ

YouTube, kullanıcıların videoları paylaşmasına olanak tanıyan küresel bir sosyal ve ekonomik platformdur. Birçok çalışma, YouTube yorumları üzerinde duygu analizi yapmış olsa da, bu çalışmaların hiçbiri duygu analizi tabanlı metriklerin videoların ve kanalların performansını ölçmede "altın standart" olarak hizmet edebilecek temel veya tamamlayıcı araçlar olarak ne kadar gerekli ve önemli olduğuna odaklanmamıştır. Bu çalışmada, duygu analizi tabanlı metriklerin zaman parametresine karşı dayanıklılığını incelemek amacıyla deneysel bir metrik olan Sentiment Index (SI) oluşturuldu. Bu metriğin zaman parametresinden ne kadar etkilendiğini değerlendirmek için VADER kullanılarak bir duygu analizi deneyi gerçekleştirildi. Deneyin sonuçları, SI'nın zaman parametresinden ihmal edilebilecek kadar, %0,8 etkilendiğini göstermektedir.

I. INTRODUCTION

Approximately 54% of internet traffic comprises video streaming, with YouTube accounting for approximately 15% of the global app data traffic [1]. Globally, YouTube ranks as the second-highest contributor to internet traffic [2]. In terms of financial performance, the platform generated a substantial \$28.8 billion in advertising revenue in 2021 [3], with 55% of this revenue distributed to content producers [4]. The scale of this market and the remuneration allocated to content creators surpasses the GDP of many countries. Additionally, numerous brands have experienced augmented sales due to their YouTube content, leading to supplementary revenue streams beyond YouTube's advertising earnings. Acquiring a comprehensive understanding of the intricacies of the YouTube ecosystem is of paramount importance for channel owners and content producers, enabling them to optimize their presence and brand visibility. Hence, a meticulous exploration of the mechanisms inherent within the YouTube platform becomes a highly valuable endeavor.

YouTube employs various metrics to gauge the success of videos and channels. Among these metrics are indicators such as the count of likes, dislikes, views, subscribers, and view duration. These traditional metrics are subject to fluctuations over time, rendering them "time-dependent." Additionally, there exist derived metrics like the "like/dislike" ratio, derived from these traditional metrics. However, these derived metrics, despite their origin, retain the vulnerabilities inherent in traditional metrics. The purpose of this study is to elucidate the inherent advantages of sentiment-based metrics and advocate for their increased utilization vis-à-vis these existing metrics.

In the introduction section, the limitations of the current metrics will be examined, and the reasons why sentiment-based metrics are free from these limitations will be explained. The second chapter will comprise a comprehensive literature review. The third chapter will entail the execution of an experiment to apply sentiment analysis on a dataset, with its results intended for utilization in the subsequent chapter. Within the fourth chapter, an example metric tailored for this experiment will be devised to assess sentiment-based metrics against the time parameter, quantifying the extent to which this metric is influenced by time. Lastly, the fifth chapter will succinctly summarize the findings.

A. WEAKNESS OF TIME-DEPENDENT METRICS

- The phenomenon of videos gaining increasing viewership over time is a natural occurrence. It is anticipated that videos released by channels with a certain number of followers will experience a gradual rise in view count as time progresses. This temporal impact on video metrics poses difficulties when comparing the achievements of recently uploaded videos with those of a remote historical context.
- The phenomenon of YouTube user base growth: Another challenge in assessing video success arises from YouTube's remarkable expansion in user numbers in recent years. As reported in [5], YouTube's user count has nearly doubled over the past five years. To illustrate, consider a hypothetical scenario involving two videos from Channel X that share a similar theme and quality. Video A was uploaded 2 years ago, while Video B was released just 2 months ago. Upon comparing these videos, even if their "views" and analogous metrics 30 days post-release yield identical figures, it would be inaccurate to equate their performance. This discrepancy arises from the substantial variation in YouTube's user base between two years ago and the present day.

- The phenomenon of channel subscriber growth: The challenges associated with metric comparisons extend further. Consider a scenario where the count of YouTube users remains constant over time. Even under such circumstances, the hypothetical X channel could witness a rise in its subscriber base as time unfolds. In this context, juxtaposing the view counts of Video A and Video B, despite sharing the same theme and quality, would be ill-advised. The reason behind this is that as the subscriber count of Channel X escalates, the newly released video gains a competitive edge. In essence, the dynamic nature of subscriber numbers contributes to the complexity of comparing video performances.

B. WEAKNESSES OF METRICS DERIVED FROM TRADITIONAL METRICS: “LIKE/DISLIKE” METRIC

The "Like/Dislike" metric is derived by dividing two time-dependent traditional metrics. In this aspect, it is considered time-independent. However, due to its derivation from source metrics, it inherits certain weaknesses:

- Not every user has the habit of using the “Like” and “Dislike” buttons, and there may be differences in the tendency of user groups to interact with the video. Empirical studies have confirmed these differences [6]. For this reason, as an alternative to the "Like/Dislike" metric, a sentiment analysis-based metric consisting of positive and negative sentiments will be created after a sentiment analysis of the comments. For instance, as indicated by [6], YouTube users who seek self-status motivation tend to leave more comments while utilizing fewer 'like' buttons. This illustrates the extent to which a luxury leather brand that shares product-related videos requires sentiment analysis-driven metrics, either as a supplement to the 'Like' metric or potentially as an alternative. According to the same study, males were more likely to comment on YouTube videos in comparison with females. The findings indicated that among the factors influencing engagement on YouTube, the motive associated with seeking relaxing entertainment displayed the strongest correlation with liking and disliking videos, while the motivation for social interaction strongly predicted commenting and uploading activities. These results highlight that relying solely on the "like" metric to gauge the approval of customer segments driven by the social interaction motive may not be an accurate approach. Another finding indicating that the "like" metric is not highly sensitive is that individuals who were more experienced with YouTube were less likely to utilize the "like" feature on the platform.
- Viewers might hesitate to employ the 'dislike' button if a video they dislike is released by a favored channel. “Like” and “Dislike” buttons express opposing extreme judgments. These metrics do not capture audience sentiments falling between these two judgments. However, the sentiment analysis-based metrics allow for the expression of intermediate judgments.
- The metric displaying the number of dislikes for a video was hidden from users in November 2021 [7]. This alteration may have made a difference in users' “dislike” and “like” usage habits. A change in the behavior of YouTube users using the “dislike” button will make it difficult for publishers to compare videos before and after November 2021 using the "Like/Dislike" metric.
- Many groups provide fake “like” and “dislike” services on the Internet [8]. These groups can increase the number of likes and dislikes of a video, either by bots or by real people, for a fee. Consequently, in such scenarios, both the 'like' and 'dislike' metrics, including the 'Like/Dislike' metric, suffer a loss of measurement accuracy. Fake comments are easier to detect than fake likes and dislikes. Should a video's statistics become compromised or face suspicion of fake likes and dislikes, sentiment analysis-based metrics emerge as a viable complementary or alternative measure of the video's success.

In summary, most metrics do not work with full efficiency because the number of people using the YouTube platform changes, the number of subscribers of the channel changes, the number of views of the videos changes over time, etc. The "Like/Dislike" metric is time-independent, which is a solution to the time dependency problem, but it has also weak points.

II. LITERATURE REVIEW

Regarding YouTube metrics, Liikkanen[31] addressed the insufficiency of YouTube's public metrics and proposed three new metrics derived from existing ones in response. However, the limitations of the original metrics are not solely attributed to the inadequacies mentioned in that paper; there are other underlying factors. Consequently, the newly proposed metrics, derived from the original ones, might also inherit similar weaknesses. This study explored the weaknesses of the traditional YouTube metrics from different perspectives and employed sentiment analysis to develop a new metric. The study empirically evaluated the performance of the sentiment analysis-based metric concerning its time parameter.

Xiao et al. [32] developed a fuzzy mathematics-based method to assess user influence by integrating multiple metrics such as total view counts, comment counts, and likes on YouTube. The study ranked the most popular channels using this synthesized approach, which integrated multiple metrics such as total view counts, comment counts, and likes on YouTube. However, that paper did not explain the weaknesses of the current metrics and did not incorporate sentiment analysis of comments, which is considered in this study.

F. Poetze et al. [33] conducted a study on YouTube gamers and their Facebook communications. This study compared "traditional" metrics (like counts, comment counts, shares of posted content) with sentiment analysis results. The analysis revealed that sentiment analysis can detect follower negativity when user-generated activity tends to be relatively low. In some cases, it also showed significant positivity among content that did not receive popularity according to Facebook metrics. While this study shares similarities with the study conducted by F. Poetze et al. [33], there are some notable differences. That study identified different results between traditional metrics and sentiment analysis-based metrics but did not provide an explanation for the probable reason for these differences. Moreover, this study's approach includes the evaluation of sentiment analysis-based metrics in the context of time parameter.

Previous studies have noted occasional discrepancies between YouTube's conventional metrics and sentiment analysis metrics. Bhuiyan et al. [19] conducted their study based on this phenomenon. When searching on YouTube, the listed videos are generally ordered based on metrics such as views and likes. However, this ranking performed without the utilization of sentiment analysis-based metrics may yield unintended results for users' query intents. Queries related to movie titles or IT problem solutions exemplify the potential challenge of unintended ranking results. This study demonstrates through an experiment that an approach involving sentiment analysis metrics can enhance query performance. Moreover, this research emphasizes the significance of sentiment analysis-based metrics as a complementary metric to conventional metrics for YouTube user queries. This study shares a similar core concept but is more comprehensive, focusing not on optimizing query results, but rather on measuring and optimizing video and channel performance.

On data scraping, Thomas & Mathur did a study and data mining on Reddit using the Python language and Scrapy library [9]. The Scrapy library performs data extraction using the XPath method, which is similar to the Selenium library used in this study. Mesri conducted a study aimed at classifying comments in a bank software and obtained the necessary data for this research by web scraping and utilizing the XPath method [17].

Tokcaer conducted a comprehensive literature review on Sentiment Analysis by examining 43 publications and 12 theses published in peer-reviewed journals over the past decade [10]. Alhujaili & Yafooz performed a literature review study, with a specific focus on sentiment analysis using YouTube comments [15]. The authors categorized the selected studies based on various variables, including the training data employed, the methodologies utilized, and the language of the comments. Similarly, [12] and [13] conducted literature reviews regarding sentiment analysis. These studies make valuable contributions by providing insights into the existing body of literature on sentiment analysis. Furthermore, these studies emphasize the relatively limited research on sentiment analysis of YouTube comments, with a predominant focus on Twitter data.

Despite numerous studies examining sentiment analysis or comment classification, based on YouTube[16,18, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 34, 35] and Twitter[11, 14, 24] data, to ascertain whether a solution has been proposed for the metric challenge within YouTube, no approach has been identified in this regard.

Hutto & Gilbert studied a new tool called Vader (for Valence Aware Dictionary for sEntiment Reasoning) [14]. In that study, a comparison was made between the Vader lexicon and eleven other highly regarded sentiment analysis tools, revealing that Vader outperforms these tools. In cases where the dataset environment for sentiment analysis to be estimated is social media, Vader obtains an overall F-1 score of 0.96. This exceptional score is higher than other ai tools, but even better than individual human raters with a 0.84 overall F-1 score for recognizing emotions. [34] conducted a sentiment analysis study on comments of mobile unboxing videos on YouTube. In their research, they utilized the Vader library to label the dataset and trained an SVM algorithm to perform sentiment analysis. [35] conducted a study on a mixed dataset from Twitter and YouTube to analyze public sentiment regarding COVID vaccines. However, this study did not provide an F1 score specific to the YouTube data analyzed using the Vader library.

There are practical applications developed using the Vader library. One of these applications is the Google Chrome extension called YouTube Comments Sentiment¹. This software, designed for end-users, offers practicality but also has certain usage limitations. In this study, considering the relatively large amount of data, the main source files of the Vader library were used.

Numerous instances of sentiment analysis studies have been conducted on YouTube comments in the past. However, the insufficiency of conventional metrics on YouTube to measure video and channel success, as well as the necessity for sentiment analysis-based metrics, have not been deliberated in previous research. Furthermore, for the first time in this study, an experiment was conducted to assess the variation of a sentiment analysis-based metric in response to the time parameter.

III. SENTIMENT ANALYSIS

For this study, 19,668 comments were extracted from four distinct YouTube channels: "iJustin"², "Lydia Elise Millen"³, "Travel Alone Idea"⁴ and "Hannah Elise"⁵. These channels encompass a diverse range of themes, including lifestyle, travel, and more. Vlog channels fall under the "People and Blogs" category, which is one of the six categories on YouTube. According to 2018 data [28], this category constitutes the largest portion of content on YouTube, accounting for 32% of the total.

The collected data consists of videos that were published within the following time frames:

¹ <https://chrome.google.com/webstore/detail/youtube-comments-sentimen/dkfoidehmdpncplbcmenkfclahlhig>

² <https://www.youtube.com/@iJustine>

³ <https://www.youtube.com/@lydiamillen>

⁴ <https://www.youtube.com/@TravelAloneIdea>

⁵ <https://www.youtube.com/@HannahElise>

- August 22, 2021, to January 5, 2022, for the "iJustin" channel
- May 20, 2022, to June 14, 2022, for the "Lydia Elise Millen" channel
- April 7, 2022, to May 16, 2022, for the "Travel Alone Idea" channel
- April 4, 2022, to May 24, 2022, for the "Hannah Elise" channel

Researchers who want to repeat or improve the processes can access the relevant data from the link⁶.

In this study, data extraction was performed using the Python programming language along with the Selenium library, which serves as a data mining tool for this language. The prediction process followed a lexical-based approach. For sentiment analysis, the study utilized Vader (Valence Aware Dictionary and sEntiment Reasoner), a lexical analysis tool, with the initial work on this tool conducted by [14]. Additionally, the Googletrans library was employed to identify the language of the comments.

Comments were scraped using a script developed with the Selenium library. The script required two inputs: 1) the video URL and 2) the Xpath address of comments. This process yielded four pieces of information: the commenter's name, the comment text, the number of likes received, and the comment date. For analysis purposes, only the 'comment' and 'comment date' information were utilized from this process.

The initial dataset lacked sentiment labels, and an imbalance was observed between positive and negative classes, with positive comments predominating. To assess the effectiveness of the prediction model, a subset of comments from the dataset was manually labeled by the researchers for sentiment analysis validation. Subsequently, the prediction results were utilized to calculate a Sentiment Index for each video. The collection of these sentiment indices will then be utilized to generate a comprehensive Sentiment Index Chart, providing insights into the sentiment distribution of the analyzed videos.

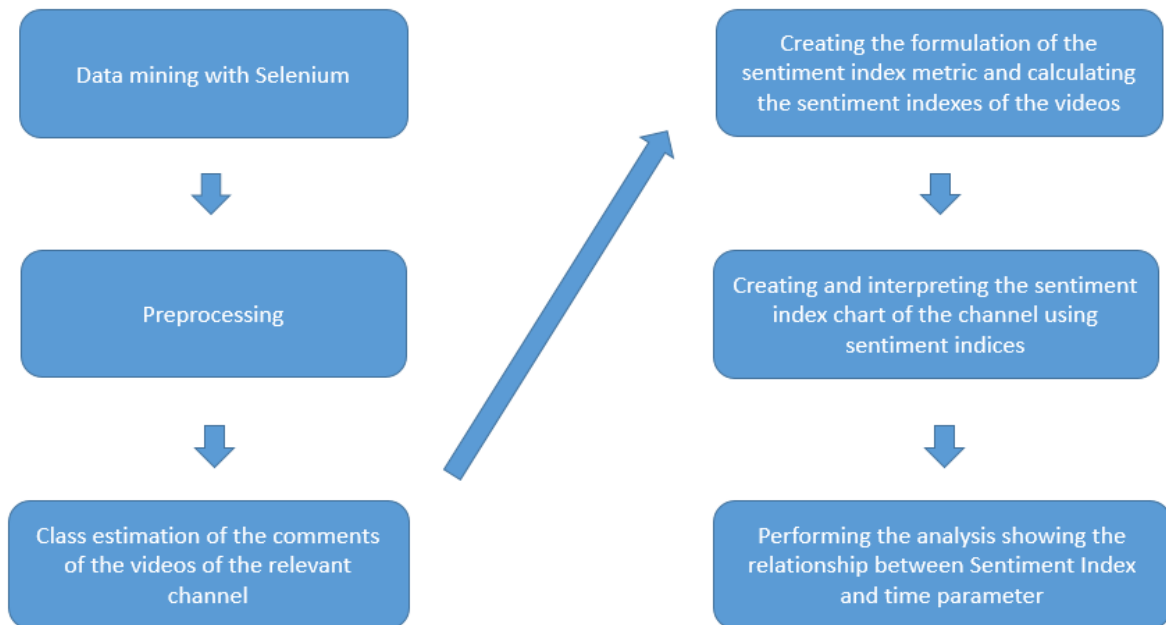


Figure 1. Steps of the experiment.

⁶

https://github.com/simplextable/Article_Sentiment_Analysis_with_YouTube_User_Comments_An_Alternative_Metric_for_YouTube_Analytics

While processing the extracted data, a crucial step is to clean the comments. As highlighted in [29], the preprocessing stage significantly impacts the success of sentiment analysis models. However, the Vader tool utilized in this study adopts a distinct approach. Conventional data processing tasks, such as converting words to lowercase, applying lemmatization, and eliminating numbers, punctuation, stop-words, and emojis, were intentionally omitted in order to optimize performance. Additionally, typos were not corrected to preserve slang words that might be lost otherwise. In this study, non-English sentences were detected and removed from the dataset, while URLs were eliminated during the data-cleaning phase.

A. SETTING UP THE MODEL

Two distinct approaches are commonly employed to address sentiment analysis challenges: lexicon-based and machine learning-based. As indicated in [30] and [13], there is minimal variance in their success rates. For this study, the lexicon-based approach was selected.

Comments were categorized into three classes: positive, negative, and neutral. To determine the sentiment polarity of comments, the Vader tool returns a compound value ranging from -1 to +1. Following the guidance provided in the library documentation, comments with values below -0.05 were designated as negative, those falling between -0.05 and +0.05 were assigned as neutral, and values exceeding +0.05 were marked as positive.

Individual F-scores were calculated for the positive and negative classes. These were then combined to generate a composite F-score that considers the class weights within the dataset. The computation of this metric involves utilizing the weighted parameter of the F1 score function in the Sklearn library.

The results were formed in Table 1 and Table 2.

Table 1. Confusion matrix.

		Prediction			
		Class No	Neg	Poz	Neu
Actual	Neg	25	18	12	55
	Poz	3	109	17	129
	Neu	4	36	77	117
	Total	32	163	106	

Table 2. Validation results.

Model No	Data Set	Accuracy	Precision	Recall	F Score
1	YouTube	0.70	0.71	0.70	0,69

B. DISCUSSION OF MODEL RESULT

Upon reviewing Table 1, it is evident that the negative, positive, and neutral classes are presented sequentially. The table showcases the validation outcomes based on 301 randomly selected comments. Analysis of the Confusion Matrix results indicates that the model's prediction success follows a

pattern: positive-labeled comments are predicted more accurately than neutral-labeled ones, while neutral-labeled comments exhibit better prediction than negative-labeled comments.

Validation results are depicted in Table 2. Accuracy, Precision, Recall, and F-score values exhibit close proximity. These values were computed considering class weights, resulting in an F-score of 0.69. In a separate study, [14] reported a high F-score of 0.96 for Vader in social Twitter-themed analyses. Their research further revealed that Vader yields F-scores of 0.61 for movie reviews, 0.63 for Amazon product reviews, and 0.55 for NY Times Editorials. Although YouTube comment data might initially share similarities with Tweets, the F-scores suggest distinct behavior for YouTube comments within the Vader library.

IV. SENTIMENT INDEX METRIC

The Sentiment Index (SI) was specifically devised for the purpose of serving as a representative metric within this experiment, aiming to demonstrate the potency of sentiment analysis-based metrics. Tailored formulations can be generated as per specific requirements. In this study, it serves as an illustrative instance to demonstrate the potential of sentiment analysis-based metrics.

Section A of the Introduction discussed the inadequacy of time-based metrics for comprehensive measurement. In Section B of the Introduction, the time-independent "Like/Dislike" metric available in YouTube Studio was introduced as a potential solution; nevertheless, its certain shortcomings were also acknowledged. The Sentiment Index, in contrast, overcomes these limitations. As demonstrated through empirical studies within the same section, specific customer segments opt to convey their perspectives through comments rather than merely utilizing the "Like" and "Dislike" buttons. A representative of sentiment analysis-based metrics, the Sentiment Index, which derives its data from comments, is introduced as a solution to avoid neglecting these viewers' viewpoints. As this section will demonstrate, the Sentiment Index experiences minimal temporal impact and remains relatively immune to manipulative actions like "Like" boosting. Unlike the binary nature of the "Like/Dislike" metric, the Sentiment Index offers viewers the flexibility to express sentiments through a range of values, transcending the constraints of 0 and 1. This inclusive approach accommodates viewers with nuanced levels of appreciation and empowers them to articulate their opinions more accurately.

The Sentiment Index is calculated by dividing the total number of comments predicted as positive by the model, by the sum of comments predicted as negative. Although it can be tailored as required, its formulation has intentionally been designed to bear a resemblance to the "Like/Dislike" metric found in YouTube Studio.

In order to maintain statistical accuracy, videos with fewer than 30 comments should not be indexed. Particular consideration has been given to ensuring that the selected videos for analysis contain a minimum of 30 comments.

In a channel, if P_{ij} represents the j -th positive comment predicted by the model in i -th video and N_{ij} represents the j -th negative comment predicted by the model in i -th video, SI_i (Sentiment Index of i -th video) can be calculated as (1):

$$SI_i = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij}}{\sum_{j=1}^n N_{ij}} \quad (1)$$

After predicting the sentiment of each comment as positive or negative, a Sentiment Index was computed for all the videos scraped from the channel. Subsequently, a Sentiment Index Chart was generated to visually represent the sentiment distribution within iJustin's channel.

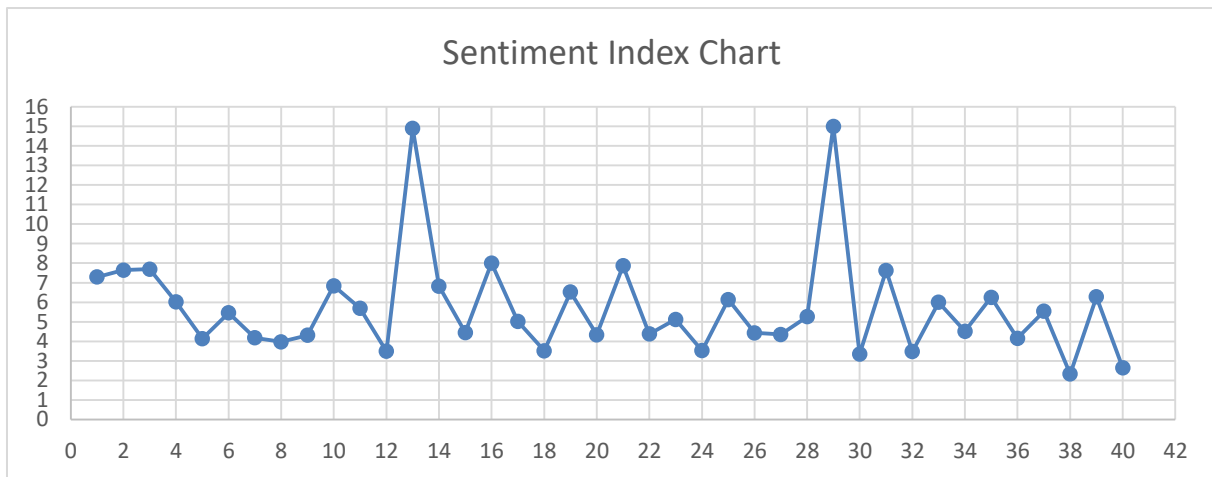


Figure 2. Sentiment Index Chart.

In Figure 2, the x-axis of the chart represents the video number. Video number 1 corresponds to the first video within the specified date range, while video number 40 represents the final video. While some video number labels on the x-axis are summarized due to space constraints, each individual video is depicted in the line chart. The y-axis displays the Sentiment Index associated with each respective video.

Upon reviewing the chart, several noteworthy observations emerge:

- Videos 13 and 29 exhibit the highest Sentiment Index, both reaching an approximate value of 15.
- Conversely, the video ranked 38th possesses the lowest Sentiment Index, registering a value of 2.33.
- Overall, Sentiment Index values for the videos cluster around the 5-point mark.

Content creators aiming to improve their video's Sentiment Index scores are advised to concentrate on analyzing videos that demonstrate notably high scores, such as videos 13 and 29.

When analyzing the video ratings, specific intuitive insights can be inferred:

- Travel-themed videos attract minimal negative comments, and the highest scores are associated with videos that introduce new destinations to viewers.
- In certain instances, the introduction of specific products (such as new model televisions) that lack the element of surprise due to societal familiarity with the technology can lead to a higher occurrence of negative comments.
- While there is no notable distinction in scores among travel-themed videos, score fluctuations may occur based on the product category in promotional videos. Therefore, it may be commercially advantageous for profit-oriented publishers promoting products to factor in the Sentiment Index score that the promoted product will receive when formulating pricing policies. This consideration is essential, as a product falling into a category that negatively impacts the Sentiment Index could potentially reduce the popularity of the publisher or channel.

A. AN EXPERIMENT TO MEASURE THE INFLUENCE OF TIME PARAMETER ON SENTIMENT INDEX METRIC

Previous sections have emphasized that a significant portion of the traditional metrics is influenced by the factor of time. In this section, an empirical experiment is conducted to determine the extent to which the Sentiment Index metric is affected by the passage of time.

To thoroughly investigate the relationship between the Sentiment Index and time, it is essential to tackle the following two questions:

1. How does the comment volume on videos change over time?
2. To what extent do Sentiment Index values vary for comments posted at different time points?

To address these inquiries and investigate the correlation between the Sentiment Index and time, an analysis was performed on a dataset.

Comments were categorized according to their creation dates. Those generated within a month following video publication were labeled as '1', while comments created one or more months later were labeled as '0'.

Several variables are defined as follows:

SI_A: Sentiment index of comments made within one month of the video's release,

SI_B: Sentiment index of the comments made one month after the release of the video,

SI_C: Sentiment index of comments made at any time after the video's release,

W_A: The proportion of the number of comments made within a month after the publication of the video to the total comments,

W_B: The proportion of the number of comments made one month after the release of the video to the total comments,

The relation between W_A and W_B is depicted in Figure 3.

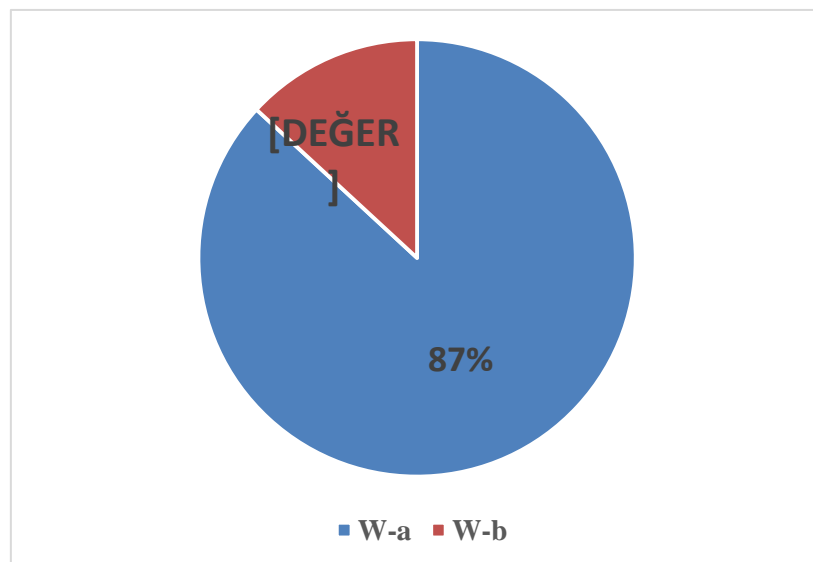


Figure 3. Distribution of comments by the time

According to the results, W_A , 86.6% (17,036 comments) of the total 19,667 comments were made within 30 days of the videos' publication, while the remaining, W_B , 13.3% (2,631 comments) were made after 30 days. Thus, it can be inferred that a majority of the comments were posted shortly after the videos' release and this noteworthy phenomenon may provide valuable insights for future researchers.

In the second phase of this experiment, emotional indexes were determined for both the 86.6% (W_A) and 13.3% (W_B) segments.

According to the model's predictions, out of the comments made within a month after the release of the video (W_A), 10,086 comments were categorized as positive, 1,460 as negative, and 5,331 as neutral. When computed using the formula in (1), these outcomes yield a Sentiment Index (SI_A) of 6.97.

According to the model's predictions, out of the comments made one month after the release of the video (W_B), 1456 comments were categorized as positive, 197 as negative, and 959 as neutral. When computed using the formula in (1), these outcomes yield a Sentiment Index (SI_B) of 7.39.

Figure 4 illustrates the contrast between SI_A and SI_B , emphasizing the variation in Sentiment Indexes between comments generated within a month after the video's release and comments produced one month thereafter.

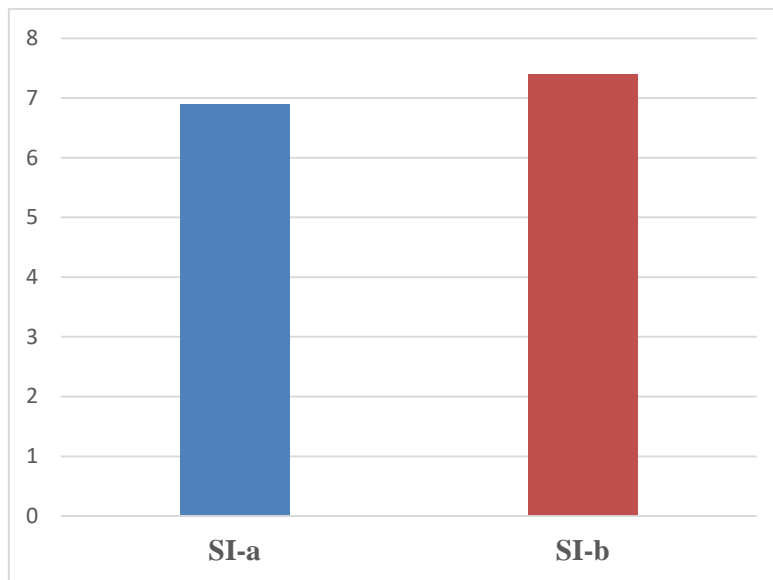


Figure 4. Sentiment Indexes of different time intervals

Based on these results, the difference between SI_A and SI_B is 0.5. However, to assess the impact of SI_B on SI_A , weights need to be taken into account. In this case, the magnitude of the difference between the effects of the Sentiment Indexes at two different times can be determined using equation (2).

$$SI_C = SI_A * W_A + SI_B * W_B \quad (2)$$

After utilizing the previously obtained results in equation (2) and calculating it, SI_C was found to be 6.97. By subtracting SI_A from SI_C to see how much the Sentiment Index of comments made within the month from the video release differs from the Sentiment Index of all comments made on the video, the equation (3) yields a value of 0.06.

$$SI_{\text{Difference}} = SI_C - SI_A \quad (3)$$

Using equation (4), the percentage of $SI_{\text{Difference}}$ relative to SI_C can be calculated. The obtained value is 0.008.

$$SI \text{ metric's time effect rate} = |SI_{\text{Difference}} / SI_C| \quad (4)$$

According to the results obtained, it can be stated that the time parameter has a negligible effect on the Sentiment Index metric in the experiment conducted for a specific period on the four YouTube channels, with only a 0.8% impact.

V. CONCLUSION

This study delves into the YouTube platform, exploring the necessity for an alternative or supplementary metric and display mechanism within the platform for the comprehensive evaluation of video and channel performance. The conventional metrics such as the number of likes, dislikes, views, and subscribers, as well as derived metrics like the like/dislike ratio, are scrutinized to understand why they might fall short in providing a fully encompassing measurement framework. At this juncture, the discussion centers on the limitations of these metrics. Subsequently, the focus shifts to elucidating the distinct advantages of sentiment analysis-based metrics, which emerge as a solution free from the vulnerabilities inherent in traditional metrics.

To measure the degree of dependency of sentiment analysis-based metrics on the time parameter, an illustrative metric named the Sentiment Index (SI) was formulated, and an experiment was conducted using this metric. For the experiment, a dataset of 19,668 comments was collected from four distinct YouTube channels. These comments were divided into two groups based on different time intervals, and sentiment analysis was applied to each group. The analysis revealed that a significant portion of comments on a given video were made within the initial month of its publication (approximately 87%), while a relatively smaller proportion (approximately 13%) were made after one month. Furthermore, the Sentiment Index values for these two groups were examined, resulting in a SI of 6.91 for the first group and a SI of 7.39 for the second group. Utilizing these figures, a calculation indicated that the Sentiment Index's susceptibility to the time parameter is approximately 0.8%.

In conclusion, upon reviewing the outcomes derived from this experiment, it can be inferred that sentiment analysis-based metrics exhibit a certain resilience towards the time parameter and are minimally influenced by the passage of time.

The practical implications of this study underscore the need for an alternative or complementary metric and visualization mechanism within the YouTube platform to comprehensively evaluate video and channel performance. The process of comprehending the limitations of conventional metrics and recognizing their potential inadequacy in providing a holistic measurement framework yields a series of practical outcomes. The unique advantages offered by sentiment analysis-based metrics facilitate content creators and producers in gaining insights and establishing more meaningful engagements with their target audience. By demonstrating the resilience of sentiment analysis-based metrics to the temporal parameter, this study introduces a novel approach for content optimization and effective communication with the audience, offering content creators and brands a resourceful avenue to enhance video performance. In this context, the findings of this research will aid professionals and researchers striving to augment content performance on the YouTube platform by transcending the constraints of conventional metrics and appreciating the value of sentiment analysis-based metrics.

VI. REFERENCES

- [1] Sandvine. (2022, June 7). *Global Internet Phenomena Report 2022* sandvine.com. [Online]. Available: https://www.sandvine.com/hubfs/Sandvine_Redesign_2019/Downloads/2022/Phenomena%20Reports/GIPR%202022/Sandvine%20GIPR%20January%202022.pdf (accessed June 7, 2022)
- J. Jones. (1991, May 10). *Networks (2nd ed.)* [Online]. Available: <http://www.atm.com>

- [2] (2022, June 10). *YouTube Ranking*, *similarweb.com*, [Online]. Available: <https://www.similarweb.com/tr/website/youtube.com/#ranking>.
- [3] (2022, June 11). *Youtube's Advertising Revenues*, *statista.com*, [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/289659/youtube-share-of-google-total-ad-revenues/#:~:text=In%202021%2C%20YouTube's%20advertising%20revenue,dollars%20in%20the%20previous%20year>
- [4] M. Hall. (2022, July 14). *How Do People Make Money on YouTube*, *investopedia.com*. [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/ask/answers/012015/how-do-people-make-money-videos-they-upload-youtube.asp#:~:text=YouTube%20monetizes%20videos%20via%20pre,must%20adhere%20to%20advertising%20guidelines>
- [5] GMI. (2022, June 28). *YouTube Users Statistics 2022*. [Online]. Available: <https://www.globalmediainsight.com/blog/youtube-users-statistics/>
- [6] M. L. Khan, "Social media engagement: What motivates user participation and consumption on YouTube?", *Computers in human behavior*, vol. 66, pp. 236-247, 2017.
- [7] YouTube Team. (2022, Semtemper, 7). *An update to dislikes on YouTube*. [Online]. Available: <https://blog.youtube/news-and-events/update-to-youtube/>
- [8] The Daily Iowan. (2022, May 13). *Ten Best Sites to Buy YouTube Likes* *dailyiowan.com* [Online]. Available: <https://dailyiowan.com/2022/05/13/buy-youtube-likes-2/#:~:text=Buying%20a%20YouTube%20like%20is,give%20your%20channel%20a%20boost> .
- [9] D. M. Thomas and S. Mathur, "Data analysis by web scraping using python", in *2019 Proceedings of the 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology*, Coimbatore, India, 2019, pp. 450-454.
- [10] S. Tokcaer, "Türkçe Metinlerde Duygu Analizi", *Journal of Yaşar University*, vol. 16, no. 63, pp. 1514-1534, 2021.
- [11] R. Dehkharghani and C. Yilmaz, "Automatically identifying a software product's quality attributes through sentiment analysis of tweets", *IEEE 1st International Workshop on Natural Language Analysis in Software Engineering (NaturaLiSE)*, San Francisco, Ca, USA, 2013, pp. 25-30.
- [12] P. Mehta and S. Pandya, "A review on sentiment analysis methodologies, practices and applications", *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 9.2, pp. 601-609, 2020.
- [13] Z. Drus and H. Khalid, "Sentiment analysis in social media and its application: Systematic literature review", *Procedia Computer Science*, vol. 161, pp. 707-714, 2019.
- [14] C. J. Hutto and E. Gilbert, "Vader: A parsimonious rule-based model for sentiment analysis of social media text", in *Proceedings of the international AAAI conference on web and social media*, vol. 8, no. 1, 2014, pp. 216-225.
- [15] R. F. Alhujaili and W. M. S. Yafooz, "Sentiment analysis for youtube videos with user comments", *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, Coimbatore, India.
- [16] H. C. Ko and W. N. Wu, "Exploring the determinants of viewers' loyalty toward beauty YouTubers: a parasocial interaction perspective", *Proceedings of ICEMT-2017*, Singapore, pp. 81-86.

- [17] A. Mesri. (2017). *Web Mining and Sentiment Analysis of a Bank Software by User Comments*, [Online]. Available: https://www.academia.edu/72647117/Web_Mining_and_Sentiment_Analysis_of_a_Bank_Software_by_User_Comments
- [18] A. Severyn, A. Moschitti, O. Uryupina, B. Plank, K. Filippova, "Multi-lingual opinion mining on YouTube", *Information Processing & Management*, vol. 52.1, pp. 46-60, 2016.
- [19] H. Bhuiyan, J. Ara, R. Bardhan, R. Islam, "Retrieving YouTube video by sentiment analysis on user comment", *IEEE ICSIPA-2017*, Kuching, Malaysia, pp. 474-478.
- [20] G. M. H. C. Gajanayake and T. C. Sandanayake, "Trending Pattern Identification of YouTube Gaming Channels Using Sentiment Analysis", *IEEE 20th ICTer-2020*, Colombo, Sri Lanka, 2020.
- [21] R. Pradhan, "Extracting Sentiments from YouTube Comments", *IEEE Sixth of ICIP-2021*, vol. 6, Shimla, India, pp. 1-4.
- [22] H. Timani, P. Shah, M. Joshi, "Predicting success of a movie from youtube trailer comments using sentiment analysis", *IEEE 6th INDIACom-2019*, New Delhi, India, pp. 584-586.
- [23] S. Singh and G. Sikka, "YouTube Sentiment Analysis on US Elections 2020", *IEEE 2nd ICSCC-2021*, Jalandhar, India, pp. 250-254.
- [24] X. Chen, M. Vorvoreanu, K. Madhavan, "Mining social media data for understanding students' learning experiences", *IEEE Transactions on learning technologies*, vol. 7.3, pp. 246-259, 2014.
- [25] C. S. Lee, H. Osop, D. H. Goh, G. Kelni, "Making sense of comments on YouTube educational videos: a self-directed learning perspective", *Online Information Review*, vol. 41.5, pp. 611-625, 2017.
- [26] C. Richier, E. Altman, R. Elazouzi, T. Altman, G. Linares, Y. Portilla, "Modelling view-count dynamics in youtube", *arXiv preprint*, arXiv:1404.2570, 2014.
- [27] J. C. M. Serrano, O. Papakyriakopoulos, S. Hegelich, "NLP-based feature extraction for the detection of COVID-19 misinformation videos on YouTube", in *Proceedings of the 1st Workshop on NLP for COVID-19 2020*, online.
- [28] (2022, June 11). *Distribution of total YouTube video content worldwide as of December 2018, by category* *statista.com*, [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1026914/global-distribution-youtube-video-content-by-category/>
- [29] A. Krouska, C. Troussas, M. Virvou, "The effect of preprocessing techniques on Twitter sentiment analysis", *IEEE 7th IISA*, Chalkidiki, Greece, 2016, pp. 1-5.
- [30] C. Dhaoui, C. M. Webster, L. P. Tan, "Social media sentiment analysis: lexicon versus machine learning", *Journal of Consumer Marketing*, vol. 34, no. 6, pp. 480-488, 2017.
- [31] L. A. Liikkanen "Three metrics for measuring user engagement with online media and a YouTube case study." *arXiv preprint*, arXiv:1312.5547, 2013.
- [32] C. Xiao, Y. Xue, Z. Li, X. Luo, Z. Qin, "Measuring user influence based on multiple metrics on YouTube", *Seventh International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming*, Nanjing, China, 2015, pp. 177-182



- [33] F. Poecze, C. Ebster, C. Strauss, "Social media metrics and sentiment analysis to evaluate the effectiveness of social media posts", *Procedia computer science* 130, pp. 660-666, 2018.
- [34] V. D. Chaithra, "Hybrid approach: naive bayes and sentiment VADER for analyzing sentiment of mobile unboxing video comments", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 4452-4459, 2019.
- [35] J. Al-Garaady and M. Mahyoob, "Public Sentiment Analysis in Social Media on the SARS-CoV-2 Vaccination Using VADER Lexicon Polarity", *Humanities and Educational Sciences Journal*, pp. 591-609, 2022.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bir Perakendeciye İletilen E-Ticaret Sipariş Kargo Atamalarında Kombinatoriyal Optimizasyon ve Sezgisel Metot Karşılaştırması

 Batuhan KOCAOĞLU^a,  Didem CİVELEK^{b,*}

^a *Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İktisadi İdari ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İstanbul Topkapı Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE*

^b *Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE*

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: didemcivelek@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1238224

Öz

Çoklu rekabet ve pandemi sürecinin getirdiği yeni normalleşme süreci ile birlikte çok kanallı çevrimiçi satış hacmi hızla büyümekte çevrimiçi ve mobil alışverişler daha çok tercih edilir hale gelmektedir. Bu çalışmada online olarak iletilen siparişlerin, müşterilere ulaştırma aşamasında kullanılan kargo firmalarına atanması konusu ele alınmıştır. Çalışma kapsamında minimum maliyetle siparişlerin uygun kargo firmalarına atanması için ilk aşamada bir kombinatoriyal optimizasyon modeli geliştirilmiştir. İkinci aşamada ise sezgisel bir algoritma olan açgözlü algoritma (Greedy) ile modelleme yapılmıştır. Bu iki çözüme ilişkin sonuçlar maliyet ve süre bazında incelenmiştir. Sonuç olarak; 1) Sabit lokasyon sayısı ve gelen sipariş sayısının artırılması senaryosunda optimizasyon modeli ve sezgisel algoritma saniyeler seviyesinde çözüm üretmiş, optimizasyon sonuçları sezgisel algoritma sonuçlarına göre maliyet iyileştirmesinde %3 ile %5,6 arasında daha iyi sonuçlar üretmiştir. 2) Sipariş ve lokasyon sayısının aynı anda değiştirilmesi örnekleminde ise sipariş sayısı ve lokasyon arttıkça optimizasyon algoritmasının çözüm süreleri uzamış, optimizasyon sonuçları sezgisel algoritma sonuçlarına göre maliyet iyileştirmesinde %9 ile %12 arasında daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açgözlü Algoritma, Kombinatoriyal Optimizasyon, Atama Problemleri, Sezgisel Algoritma

Comparison of Combinatorial Optimization and Heuristic Method in E-Commerce Order Cargo Assignment to a Retailer

ABSTRACT

With the new normalization process brought by the pandemic and multiple competition, the volume of multi-channel online sales is rapidly growing and online and mobile shopping is becoming more preferred. In this study, the assignment of orders transmitted online to the cargo companies used in the delivery stage is examined. In the scope of the study, a combinatorial optimization model was developed for assigning orders to the appropriate cargo companies with minimum cost in the first stage. In the second stage, a greedy algorithm is used to model the problem. Results of these two solutions are analyzed in terms of cost and time. As a result; 1) When the number of fixed locations and the number of incoming orders are increased, the optimization model and the heuristic algorithm produced solutions in seconds, the optimization results produced better results in terms of cost improvement between 3% and 5.6% compared to the results of the heuristic algorithm. 2) In the case of changing the number of orders and locations at the same time, the solution times of the optimization algorithm increased as the number of orders and locations increased, the optimization results produced better results in terms of cost improvement between 9% and 12% compared to the results of the heuristic algorithm.

I. GİRİŞ

Elektronik Ticaret Bilgi Sistemi tarafından 2022 yılı ilk 6 ayına göre açıklanan rapora göre Türkiye’de e-ticaret hacmi bir önceki yılın aynı dönemine göre %116’lık artış göstermiştir. Yine aynı rapora göre; 2022 yılı ilk 6 ayında sipariş adetlerinde ise %38 artış meydana gelmiştir. Gıda ve süpermarket harcama özelinde bakıldığında ise %124 artış olduğu görülmüştür. Satış hacmi ve sipariş adetlerindeki artış göz önüne alındığında e-ticaret üzerinden hizmet veren firmaların bu zincirde birtakım iyileştirmeler yapması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yapılan bir analize göre küresel e-ticaret pazarının ise yıllık %13,5 büyüme ile 2024 yılına kadar 6388 milyar doları aşacağı öngörüler arasındadır [1].

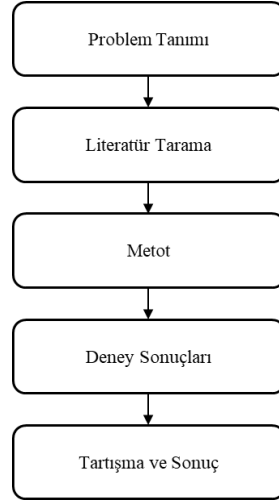
Firmalar operasyonlarını verimli hale getirirken kaliteden ödün vermeden, müşteri memnuniyetini en üst seviyede tutmayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra firmalar için bir diğer önemli unsur maliyettir. Firmalar sistem büyüdükçe ve süreçler karmaşılaştıkça maliyet minimizasyonu, ciro maksimizasyonu gibi hedeflerle en kaliteli hizmeti verecek çözüm arayışına yönelmektedir.

Teknolojinin hızla gelişmesi, dijitalleşmesi, tüketicilerin alışveriş deneyimlerindeki beklentilerini de arttırmaktadır. İnternet alışverişinin artması ile birlikte operasyonların bu artışa uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Çevrimiçi veya mobil olarak iletilen siparişlerin toplanması, fatura işlemlerinin yapılması, kargoya iletilmesi ve müşteriye teslim çalışmalarının doğru ve en hızlı şekilde yapılması önemlidir. Tüm bunlar yapılırken firmanın maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Çevrimiçi hizmet veren perakende firmaları siparişlerin müşterilere ulaştırılması aşamasında çeşitli kargo firmaları ile çalışmaktadırlar. Bu aşamada lojistik maliyetlerinin düşürülmesi perakendecilere önemli maliyet avantajları sunacağından rekabette de öne geçmelerine yardımcı olacaktır.

E-ticaret sitelerinin çalışma sistematigi incelendiğinde firmaların çalıştığı belli kargo firmaları bulunmaktadır. Bu firmaların bir kısmına bakıldığında kargo ücretini müşterinin ödemesi karşılığında kargo firması seçeneğini müşteriye bırakmaktadırlar. Diğer e-ticaret firmaları ise müşteriye kargo firması seçeneği sunmadan anlaşığı firmalar içerisinde lokasyon ve maliyet açısından en uygun firmayı seçmek için kendileri bir çalışma yürütmektedir [2].

Bu çalışma ile çevrimiçi hizmet veren perakende firmasına gelen siparişlerin kargo firmalarına atama işlemlerini kendi içerisinde yürüten e-ticaret firmaları için bu atama işlemlerinin optimizasyon ve sezgisel algoritma yardımı ile yapılması ile;

- 1) Mevcut durumda bu işlemler manuel olarak yapıldığı için kullanılan işgücünün daha verimli değerlendirilmesine yardımcı olacağı,
- 2) Mevcut duruma kıyasla bir maliyet avantajı sağlayacağı tespit edilmiştir.



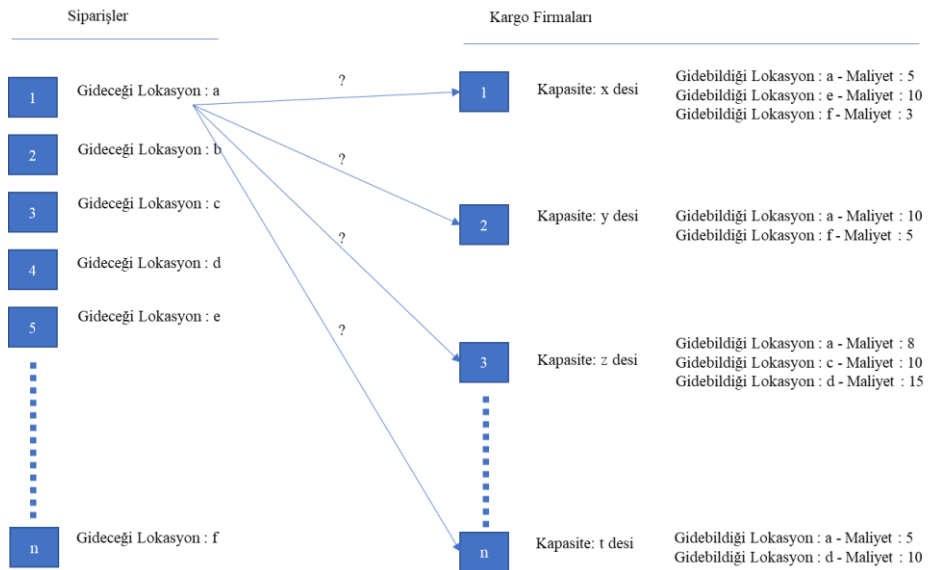
Şekil 1. Makale Akış Şeması

Şekil 1’ de bulunan makale akış şemasında görüldüğü gibi bu makale Problem Tanımı, Literatür Tarama, Çözüm Metotları, Deneysel Sonuçları, Tartışma ve Sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

A. PROBLEM TANIMI

Perakende sektöründe tüketicilerin çevrimiçi verdiği siparişler tüketicinin seçmiş olduğu tarih ve saat aralığında teslim edilmektedir. Bu tip siparişler müşterinin yakın olduğu mağaza lokasyonunda hazırlanıp firmanın kendi araçları ile dağıtılmaktadır. Bu işleyiş ek olarak bazı marketler internet siteleri üzerinden aldıkları siparişleri mağaza yerine depolardan göndermekte ve bu siparişleri anlaşmalı oldukları kargo firmaları ile müşterilerine teslim etmektedir. Bu durumda e-ticaret kanalı üzerinden gelen siparişlerin anlaşmalı oldukları kargo firmalarına atanması problemi ortaya çıkmaktadır. Mevcut durumda günlük gelen siparişlerin atanma süresinin uzun olması, aynı zamanda yapılan atamalarda hata payının yüksek olması durumu bu işi otomatize etme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Bu çalışmada e-ticaret üzerinden hizmet veren bir perakende firmasına müşteriler tarafından iletilen siparişlerin gün içerisinde kargo firmalarına atamalarının yapılmasını içermektedir. Firmanın bir deposu bulunmaktadır ve siparişler buradan kargolanmaktadır.



Şekil 2. Problem Tanımı

Şekil 2' de Problem Tanım görselinde görüldüğü gibi siparişler ve kargo firmaları bulunmaktadır. Kargo firmalarının her ilçede teslimat şubesi olmaması nedeniyle her kargo firmasının gittiği belirli lokasyonlar bulunmaktadır. Kargoların gittiği lokasyonlara göre desu başına maliyetleri bulunmaktadır. Kargo firmalarının günlük bir kapasiteleri mevcuttur. Firmanın amacını minimum maliyet ile her siparişi mutlaka bir kargo firmasına atamak oluşturmaktadır. Şekil 2' de görüldüğü gibi siparişin hangi firmaya atanması gerektiği sorusunun yanıtını bulmak amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

II. LİTERATÜR TARAMA

Yöneylem ve modelleme çalışmaları belirlenen problem için en uygun çözümün bulunmasını amaçlayan yöntemleri içermektedir. Mevcut güncel hayat ve karmaşık problemlere matematiksel model, algoritma ve istatistikî bilimsel yöntemleri kullanarak çözümler sunulmaktadır. Bu problemlerde en uygun çözümü aradığımız problemler optimizasyon problemleri olarak adlandırılmaktadırlar [3].

Optimizasyon modelleri karar değişkenlerinin yapısına göre kesikli optimizasyon ve sürekli optimizasyon modelleri olmak üzere iki başlıkta sınıflandırılabilirler. Kombinatoryal optimizasyon problemleri kesikli optimizasyon modelleri olarak ifade edilmektedir. En kısa yol problemi, gezgin satıcı problemi, atölye çizelgeleme problemleri, atama problemleri ve araç rotalama problemleri kombinatoryal optimizasyon problemleri olarak adlandırılmaktadırlar. Bu problemlerin türlerine göre amaç fonksiyonu maksimizasyon veya minimizasyon olabilmektedir.

Sezgisel algoritmalar en kısa sürede bulduğu en iyi çözüme ilişkin sonuçları iletirler ve optimum çözümü bulmayı garanti etmezler. Sezgisel algoritmaların tavlama benzetimi, genetik algoritmalar, karınca kolonisi, parçacık sürü optimizasyonu, çok yönlü ve hibrit metotları, yapay arı kolonisi, açgözlü algoritma gibi türleri bulunmaktadır. Açgözlü algoritma, benzetimli tavlama, yapay arı kolonisi, parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmalar atama problemlerinde kullanılan sezgisel algoritmalar [4].

Siparişlerin belirlenen kısıtlar çerçevesinde kargo firmaları ile eşleştirilmesi çalışmaları literatürde atama problemleri olarak adlandırılmaktadır. Atama problemlerinin çözümünde ise matematiksel modelleme, sezgisel algoritmalar veya bir takım hibrit algoritmalar kullanılmaktadır.

Tablo 1. Literatür Özeti

Makale	Yazar	Konu	Yöntem
[5]	Zhang, Fu,Chen,Mei, 2020	Bu çalışmada e-ticaret siparişlerinin depo içerisindeki en uygun konumlara atanma işlemi yapılmıştır.	Yapay Balık Sürüsü
[6]	Dethlefs, Ostermeier, Hübner, 2022	Bu çalışmada gelen siparişlerin depolara ataması ve araç rotalamasını da dikkate alarak bir çözüm geliştirilmiştir.	Karma Tam Sayılı Programlama
[7]	Karsu, Azizoglu, 2019	Burada tüm ajanlar	

		üzerindeki yüklerin karelerinin toplamının minimize edildiği bir atama modeli çalışması yapılmıştır.	Tam Sayılı Doğrusal Programlama ve Doğrusal Olmayan Programlama
[8]	Erten, 2021	Bu çalışmada ürün tedarik edilecek yan sanayi firmalarına iş yükü atamalarının ve işlerin atandığı firmaların sayısını minimizasyon işlemi yapılmıştır.	Tam Sayılı Programlama
[4]	Özçelik, Gündüz,2019	Bu çalışmada ürünlere uygun çeşitli kutuların uygun olacak raflara ataması yapılmıştır.	Açgözlü Algoritma
[9]	Hodzapfel, Kuhn, Sternberk, 2018	Bu çalışmada perakendede farklı depo merkezi türlerine ait dağıtım minimum maliyetle ürün ataması yapılmıştır.	Karma Tam Sayılı Programlama
[10]	Özçelik, Saraç, 2017	Bu çalışmada farklı yeteneklere sahip ajanların ve tek ajana atanması gereken kısıtların olduğu durumlar için bir atama modeli geliştirilmiştir.	Hedef Programlama
[11]	Liu, He, Shen, 2018	Bu çalışmada günlük yemeklerin kuryelere atanması ve teslimatın planlanmasına yönelik bir atama modeli geliştirilmiştir.	Karma Tam Sayılı Programlama
[12]	Cosmi, Oriolo, Piccialli, Ventura, 2022	Bu çalışmada siparişlerin kuryelere atanması konusunda bir model geliştirilmiştir.	Tam Sayılı Programlama
[13]	Khandelwal, Tiwari, Jain, Dube, Sachdeva, 2022	Bu çalışmada kurye atamaları üzerinde yöneylem araştırması tekniklerinin denenmesi konusunda bir çalışma yapılmıştır.	Tam Sayılı Programlama
[14]	Kurniawan, Puspitasari, 2020	Bu çalışmada mesafeleri ve kurye kapasitelerini dikkate alarak siparişlerin kuryelere atanması konusunda bir atama	Tam Sayılı Doğrusal Programlama

		modeli geliştirilmiştir.	
[15]	Lou, Jie, Zhang, 2020	Bu çalışmada siparişlerin kuryelere atanması ve kuryelerin işgücünün optimize edilmesi konusunda bir model geliştirilmiştir.	Karma Tam Sayılı Programlama

Atama problemlerine ilişkin literatür özeti Tablo 1’de yer almaktadır. Tabloda yer alan çalışmalarda atama problemlerine ilişkin çeşitli yöntemlerle çözülmüş problemler yer almaktadır. Literatürde atama problemlerinin farklı alanlarda uygulanmasına yönelik birçok çalışma mevcuttur. Tabloda paylaşılan atama problemlerine bakıldığında; siparişlerin depoda uygun konuma atanması, siparişlerin uygun tedarikçiye atanması, siparişlerin depoya atanması, ürünlerin raflara atanması problemleri yer almaktadır. Bu problemler belirli kısıtlar altında optimizasyon ve sezgisel algoritmalar ile modellenmişlerdir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bir e-ticaret sitesi üzerinden verilen siparişlerin kargo firmalarına atanmasına yönelik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma; mevcut literatürde bulunan atama problemlerinin çözüm yöntemlerinin e-ticaret siparişlerinin kargo firmalarına atanması problemine uygulanması açısından yenilikçi bir çalışmadır.

Tablo 1’de yer alan siparişlerin kuryelere atanması çalışmalarına bakıldığında ise yemek siparişlerinin veya gün içerisinde verilen gıda siparişlerin kuryelere atanmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar incelendiğinde çalışanların iş yükü kısıtları, siparişlerin rotası, siparişlerin teslim süreleri dikkate alınarak modellendiği görülmüştür. Geliştirilen çalışma kapsamında siparişlerin kargo firmalarına atamaları kargo firma kapasitesi, kargo firmasının gittiği lokasyon kısıtları dikkate alınarak geliştirilmiştir.

III. METOT

A. SİPARİŞ-KARGO ATAMA OPTİMİZASYON MODELİ

Atama problemleri genellikle kombinatorial optimizasyon problemleri olarak kabul edilmektedir. Bu problemlerin büyüklüklerine göre bazı durumlarda makul sürede çözüm bulunamaz. Bu nedenle NP-zor problemler olarak da adlandırılmaktadırlar [16]. Atama problemlerine genel olarak bakıldığında personele vardiya atama, araçlara kargo atama, raflara ürün atanması, kargoların depo içerisinde bulunan konumlara atanması, mağaza veya depolara ürün atanması gibi çalışmalara rastlanmaktadır.

Sipariş kargo atama optimizasyon modeli, bir atama problemi olarak modellenmiştir.

Modele ait indisler; sipariş, kargo firmaları ve lokasyonlardan oluşmaktadır.

Modele ait indisler:

i : Gelen siparişler, $i = \{1, \dots, I\}$

j : Kargo firmaları, $j = \{1, \dots, J\}$

k : Lokasyonlar, $k = \{1, \dots, K\}$

Modele ait kümeler; sipariş-lokasyon durumlarının olduğu ikili kümelerden oluşmaktadır.

Modele ait kümeler:

Y_{ik} : i siparişinin k lokasyonu gittiği durumların kümesi

Modelin parametrelerini siparişin desisi, kargo firması bazında kapasiteler,

Modelin parametreleri; siparişlerin desileri, kargo firmalarının kapasiteleri, siparişin gideceği lokasyon, kargo firmalarının gidebildiği lokasyonlar, kargo firmasının gittiği lokasyonlar bazında desi maliyetlerinden oluşmaktadır.

Modelin parametreleri:

d_i : i siparişinin desisi

C_j : j kargo firmasının kapasitesi

y_{ik} : i siparişinin k lokasyonuna gitmesi

t_{jk} : j kargo firmasının k lokasyonuna gitmesi

p_{jk} : j kargo firmasının k lokasyonuna gitmesinin desi maliyeti

Modelin karar değişkenlerini; siparişin kargo firmasına verilip verilmeme durumu ve siparişin o kargo firmasına verildiğinde oluşturduğu maliyeti oluşturmaktadır.

Karar değişkenleri:

z_{ijk} : i siparişinin j kargo firması k lokasyonuna gitmesinin maliyeti

x_{ij} : i siparişinin j kargo firması verilmesi 1 diğer durumda 0

$$\text{En küçük } \sum_i^I \sum_j^J \sum_k^K z_{ijk} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_j^J x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i^I x_{ij} * d_i \leq C_j \quad \forall j \quad (3)$$

$$z_{ijk} \geq d_i * p_{jk} (y_{ik} + x_{ij} - 1) \quad \forall i, j, k \text{ ve } (i, k) \in Y_{ik} \quad (4)$$

$$(2 - y_{ik} - x_{ij}) * M + t_{jk} - 1 \geq 0 \quad \forall i, j, k \text{ ve } (i, k) \in Y_{ik} \quad (5)$$

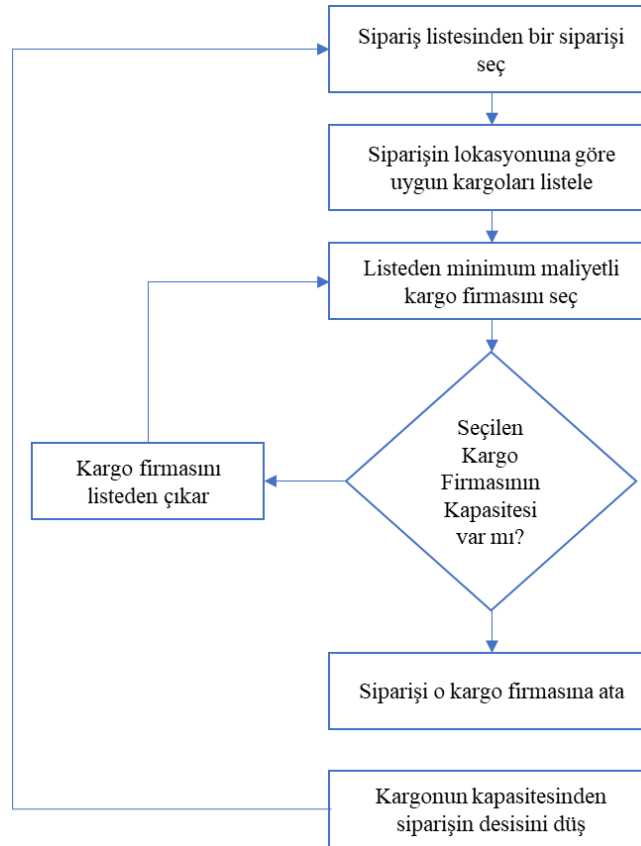
Modelin amaç fonksiyonu (1) maliyet minimizasyonu üzerine kurulmuştur. Burada amaç fonksiyonu siparişin gideceği lokasyona göre atanacağı kargo firmasının taşıma maliyetini minimize etmeyi hedeflemektedir. (2) numaralı kısıt her siparişin mutlaka bir kargo firmasına atanması gerektiğini göstermektedir. (3) numaralı kısıt her kargo firmasına atanan kargoların desi toplamının toplam kargo firmasının kapasitesini aşmaması gerektiğini göstermektedir. (4) numaralı kısıt amaç fonksiyonundaki siparişin kargo firmasına atanması durumunda kargo firmasının o lokasyona olan taşıma maliyetinin hesaplanmasını göstermektedir. (5) numaralı kısıt kargo firmasının sadece siparişin gideceği lokasyona gittiği durumlarda atamasını yapması gerektiğini göstermektedir.

Modelin varsayımları ise aşağıdaki gibidir.

- 1) Kargo firmalarının desu bazında çalıştığı varsayılmıştır.
- 2) Siparişlerin özel durumlarının olmadığı varsayılarak modelleme yapılmıştır (Kırılabilir ürünler, boyut, içerik olarak özel kargo firması ile taşınması gereken özel ürünler modele dahil edilmemiştir)
- 3) Lokasyon bazında bazı kargo firmalarının maliyet avantajı olsa da müşteri memnuniyeti açısından o firmalarla çalışılmama tercihi modele dahil edilmemiştir, her firma maliyet avantajı dışında eşit şekilde alınmıştır.

B. SİPARİŞ- KARGO ATAMA AÇĞÖZLÜ ALGORİTMA MODELİ

Sezgisel algoritmalar ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu tip algoritmaların çözüm süresi uzun olan veya makul sürede optimal bir çözüm elde edilemeyen problemlerde optimum çözümü garanti etmeden yaklaşık bir çözüm bulmak için kullanıldığı tespit edilmiştir. Diaz ve Fernandez [17] tarafından genel atama problemlerini NP-zor problemler olarak nitelendirerek bu problem çözümü için tabu arama sezgisel algoritma ile probleme çözüm getirmişlerdir. Özçelik ve Gündüz [4] tarafından, gerçek bir hayat problemi olan fabrikada kutuların raflara atanması probleminde problem boyutunun büyük olması ve matematiksel olarak çözülememesi nedeniyle açğözlü algoritma ile probleme çözüm getirilmiştir. Hızlı çözüm üretmesi ve kısıt sayısının az olması nedeniyle kolay uygulanabilir olması nedeniyle problem sezgisel algoritmaların içinden açğözlü algoritma ile modellenmiştir. Açğözlü arama tekniğinin mantığında ilgili aşamada eldeki seçenekler içinden en iyi olan seçilir. Açğözlü algoritmalarda amaç fonksiyonuna göre minimum ya da maksimum değer tercih edilebilir.



Şekil 3. Sezgisel Algoritma Akış Şeması

Şekil 3'te görüldüğü gibi; Gün içerisinde gelen siparişlerden bir tanesi seçilir, siparişin gideceği lokasyona göre uygun kargo firmaları listelenir, bu kargo firmaları arasından minimum maliyetli olan kargo firmasının kapasitesi varsa siparişin o kargo firmasına ataması yapılır. Kargo firmasının kapasitesi uygun değilse bir sonraki minimum maliyetli kargo firmasının kapasitesi kontrol edilir. Bu şekilde minimum maliyet ve kapasite doğrultusunda siparişlerin ilgili kargo firmalarına atamaları yapılır. Tüm atamalar tamamlandığında döngü sona erer. Bir lokasyona gidecek ortalama kargo sayısı o lokasyona gidecek kargo firmalarının kapasitesini karşılayacak şekildedir. Lokasyon bazında öngörülen sipariş miktarı baz alınarak aynı bölge için birden fazla kargo firması ile anlaşma sağlanması nedeniyle algoritma sonucunda her siparişin kapasite dışında kalmayacak şekilde ataması yapılabilmektedir.

IV. DENEY SONUÇLARI

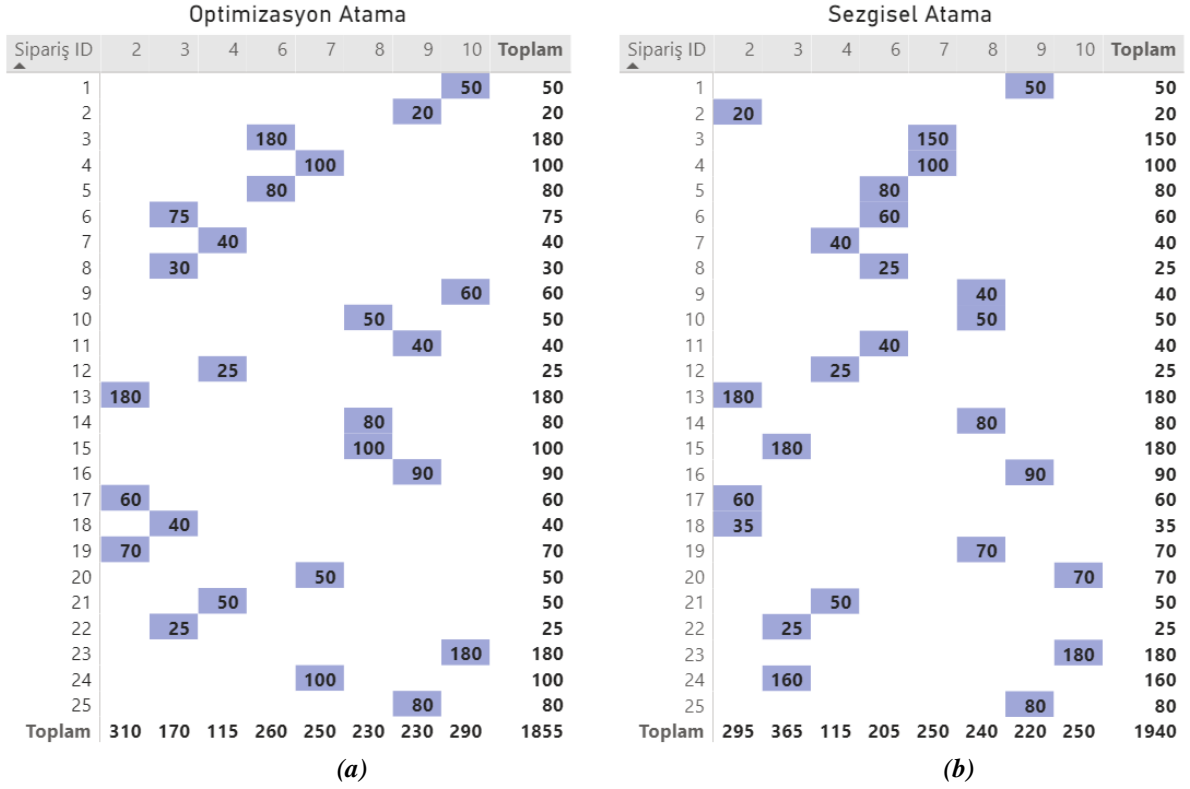
Çalışmalar optimizasyon ve sezgisel algoritma çözümleri üzerinde iki farklı senaryoda testler gerçekleştirilmiştir. Algoritmalar Python üzerinde kodlanmıştır. Optimizasyon çözümü için SCIP (Solve Constraint Integer Programs) optimizasyon çözücü kütüphanesi kullanılmıştır. Modeller i7 işlemci 16 GB ram 250 GB disk özelliklerine sahip bir dizüstü bilgisayarda çalıştırılmıştır.

İlk senaryoya göre siparişlerin gidebileceği lokasyon sayısı sabit tutulmuştur. Gelen sipariş sayısında değişim yapılmıştır.

Tablo 2. Senaryo 1 ve Sonuçları

Sipariş Sayısı	Kargo Firma Sayısı	Lokasyon Sayısı	Maliyet Sezgisel (₺)	Maliyet Optimizasyon (₺)	Fark Değeri (%)
25	10	25	1.940	1.855	4,4
50	10	25	3.330	3.185	4,4
100	10	25	9.731	9.353	3,9
200	10	25	19.329	18.460	4,5
300	10	25	30.991	30.048	3,0
400	10	25	41.021	39.109	4,7
500	10	25	50.846	48.904	3,8
600	10	25	62.192	59.958	3,6
1000	10	25	104.178	98.328	5,6
2000	10	25	204.412	195.585	4,3
3000	10	25	326.711	310.320	5,0

Yapılan değişiklikler ve sonuçlara ilişkin veriler Tablo 2'de yer almaktadır. Tablo 2 detaylı olarak incelendiğinde denenen veriler kapsamında optimizasyon çözümü ile sezgisel algorithmadan maliyet açısından %3 ile %5,6 arasında iyi bir sonuç elde edilmiştir. Bu veriler ile iki algoritma da saniyeler seviyesinde sonuç üretmiştir.



Şekil 4. (a) Optimizasyon Algoritması ve (b) Sezgisel Algoritma Sonuçlarına İlişkin Örnek Atamalar

Şekil 4 (a)'da Tablo 1'de yer alan 25 adet siparişin Optimizasyon algoritması ile atama sonuçları, Şekil 4 (b)'de Tablo 1'de yer alan 25 adet siparişin sezgisel algoritma ile atama sonuçları yer almaktadır. Optimizasyon algoritması tüm problemi ele aldığı için optimal açıklığı sıfır olup maliyeti 1855 olarak bulmuştur. Açgözlü sezgisel algoritma da ise gelen siparişlerin tümüne bakmaktansa sıradaki ilk sipariş için en uygun çözümü bulduğu için maliyeti 1940 olarak bulmuştur.

İkinci senaryoya göre hem sipariş hem lokasyon sayıları paralel olarak artırılmıştır.

Tablo 3. Senaryo 2 ve Süre Sonuçları

Sipariş Sayısı	Kargo Firma Sayısı	Lokasyon Sayısı	Süre Sezgisel (saniye)	Süre Optimizasyon (saniye)	Fark Değeri (%)
1000	10	100	4	223	98,2
1500	10	150	4	227	98,2
2000	10	200	6	229	97,4
2500	10	250	7	247	97,2
3000	10	300	8	536	98,5
3500	10	350	17	610	97,2
3800	10	380	17	1184	98,6
3900	10	390	20	24 saatte olurlu bir çözüm bulunamamıştır	--

Yapılan değişiklikler ve algoritma çözüm sürelerine ilişkin veriler Tablo 3'te yer almaktadır. Burada sipariş sayıları ve siparişlerin lokasyonları eş zamanlı olarak artırılmıştır. Elde edilen verilere göre

sezgisel algoritma saniyeler bazında çözüm üretmiştir. Problemin boyutu arttıkça optimizasyon algoritmasının çözüm sürelerinde artış meydana gelmiştir. Optimizasyon algoritmasında 3900 sipariş 10 kargo firması 390 lokasyon senaryosu çalıştırılmış ve 24 saat içerisinde olurlu bir çözüm bulunamamıştır. Optimizasyon sipariş lokasyon sayısı artırıldıkça optimizasyon algoritmasının çözümünün saatler sürdüğü tespit edilmiştir.

Tablo 4. Senaryo 2 ve Maliyet Sonuçları

Sipariş Sayısı	Kargo Firma Sayısı	Lokasyon Sayısı	Maliyet Sezgisel (₺)	Maliyet Optimizasyon (₺)	Fark Değeri (%)
1000	10	100	140.613	123.334	12,3
1500	10	150	214.041	189.733	11,4
2000	10	200	277.251	242.103	12,7
2500	10	250	373.846	326.060	12,8
3000	10	300	438.851	396.980	9,5
3500	10	350	528.425	480.805	9,0
3800	10	380	604.598	548.359	9,3

Yapılan değişiklikler ve algoritma maliyetlerine ilişkin veriler Tablo 4’te yer almaktadır. Burada sipariş sayıları ve siparişlerin lokasyonları eş zamanlı olarak arttırılmıştır. Maliyetlere bakıldığında optimizasyon algoritma sonuçlarının sezgisel algoritma sonuçlarına göre %9 ile %12,8 arasında bir maliyet avantajı sağladığı tespit edilmiştir.

V. TARTIŞMA VE SONUC

Bu çalışmada siparişlerin kargo firmalarına atanması problemine optimizasyon ve sezgisel olmak üzere iki yaklaşım ile çözüm getirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde problemdeki sipariş ve lokasyon sayılarındaki değişime göre kullanımı tercih edilecek algoritma da değişiklik göstermektedir. Problemin büyüklüğü arttıkça optimizasyon algoritmasının çözüm süresi artmakta bazı durumlarda çözüm veremez hale gelmektedir. Bu tarz büyük problemler için optimizasyon çözümünden %9 ile %12,8 arasında daha maliyetli aç gözlü algoritmanın seçilmesinin daha mantıklı olacağı tespit edilmiştir. Çalışmanın neticesinde firmanın günlük aldığı sipariş miktarı ve bu siparişlerin gittiği lokasyonlar dikkate alındığında optimizasyon algoritmasının günlük sipariş atamasında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bazı zamanlarda meydana gelen gün içerisinde gelen sipariş ve siparişlerin lokasyon sayısının optimizasyon çözüm limitlerini aşması durumunda sezgisel algoritmanın kullanılması öngörülmektedir.

Böyle bir çalışmanın mevcut sistemde ataması yapılan siparişlerin manuel işlemlerden kaynaklı hata oranlarının düşürülmesine, bu çalışmayı yapmak için kullanılan işgücünün daha verimli olarak kullanılabilmesine olanak sağlayacaktır.

Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde; literatürde çeşitli alanlarda atama problemleri yer almasına rağmen e-ticaret sitesinden verilen siparişlerin kargo firmalarına atanmasına yönelik optimizasyon ve sezgisel algoritma çözümü yer almaması nedeniyle bu çalışma ile literatüre katkı sağlanmıştır.

Mevcut durumda siparişlerin kargo firmalarına atamaları tüm siparişler dikkate alınmadan yapılmaktaydı, geliştirilen çözüm ile tüm siparişler, lokasyonları ve maliyetler dikkate alındığı için maliyet ve süre açısından kullanıcılara katkı sağlayacak bir çözüm geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın geliştirilmesi kapsamında matematiksel modelde varsayım olarak kabul edilen kargo firmalarının desu bazında çalışma varsayımı; kargo firmalarının farklı desiler için farklı maliyetlendirme politikası modele dahil edilerek yeni bir çalışma yapılma potansiyeli bulunmaktadır.

Kargo firmalarının eşit ağırlıkta değerlendirilmesi sadece maliyet avantajına göre atama yapılması varsayımı; kargo firmalarının çok kriterli karar verme yöntemleri ile değerlendirilmesi ve bunun çıktısı olarak modele kargo firmalarının ağırlıklarının dahil edilmesi çalışmaları için de yeni bir çalışma gerçekleştirilme potansiyeli bulunmaktadır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Statista, 2021. *Küresel Perakende E-Ticaret Pazar Büyüklüğü 2014–2023/Statista*. [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.statista.com/statistics/379046/worldwide-retail-e-commerce-sales>.
- [2] eticaret sitesi, *Kargo Anlaşması Nedir, Nasıl Yapılır?* [Çevrimiçi]. Erişim: <https://www.eticaret sitesi.com/kargo-anlasmasi-nedir-nasil-yapilir/>.
- [3] M. Berberler, “Sırt Çantası Problem Türleri ve Uygulamaları”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, Türkiye, 2009.
- [4] T. Över Özçelik ve G. Gündüz, "Sezgisel Algoritmaları Kullanarak Raf Optimizasyonu Çalışması ve Bir Yazılım Uygulaması", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı. 16, ss. 977-982, 2019.
- [5] S. Zhang, L. Fu, R. Chen, Y. Mei, “Optimizing the cargo location assignment of retail e-Commerce based on an artificial fish swarm algorithm”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [6] C. Dethlefs, Ostermeier, M., A. Hübner, “Rapid fulfillment of online orders in omnichannel grocery retailing”, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 100082, 2022.
- [7] Ö. Karsu, M. Azizoglu, “An Exact Algorithm For The Minimum Squared Load Assignment Problem”, *Computers and Operations Research*, 106, p. 76-90, 2019.
- [8] K. Erten, (2021). “Uygunluk kısıtlı çok kaynaklı genelleştirilmiş atama problemi için bir tavlama benzetimi algoritması”, Yüksek Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye, 2021.
- [9] A. Holzapfel, H. Kuhn and M. G Sternbeck, “Product Allocation to Different Types of Distribution Center in Retail Logistics Networks”, *European Journal of Operational Research*, 264: 948-966, 2018.
- [10] F. Özçelik, T. Saraç, “Farklı Yeteneklere ve Önceliklere Sahip Ajanların ve Aynı Ajana Atanması Gereken İşlerin Olduğu Çok Kaynaklı Genelleştirilmiş Atama Problemi için Bir Hedef Programlama Modeli”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(1), 75-90, 2017.
- [11] S. Liu, L. He and Z. J. M. Shen, “Data-Driven Order Assignment for Last Mile Delivery”, *SSRN Electronic Journal*, 2018.
- [12] M. Cosmi, G. Oriolo, V. Piccialli and P. Ventura, “Assigning Orders to Couriers in Meal Delivery via Integer Programming”, 2022.



- [13] R. Khandelwal, A. Tiwari, M. Jain, R. Dube and A. Sachdeva, “A Study on the Application of Operations Research in Courier Service Industry”, *International Journal of Environmental Economics, Commerce and Educational Management (ECEM)*, 9(12), 1-6, 2022.
- [14] V. R. B. Kurniawan and F. H. Puspitasari, “A Mathematical Model for Delivery Zone Groups Based on Courier Assignment Optimization: A Case Study in a Logistics Service Provider”, *Spektrum Industri*, 18(2), 183, 2020.
- [15] Z. Lou, W. Jie and S. Zhang, “Multi-objective optimization for order assignment in food delivery industry with human factor considerations”, *Sustainability*, 12(19), 7955, 2020.
- [16] G. Qu, D. Brown and N. Li, “Distributed greedy algorithm for multi-agent task assignment problem with submodular utility functions”, *Automatica*, 105, 206-215, 2019.
- [17] A. J. Diaz and E. Fernández, “A tabu search heuristic for the generalized assignment problem”, *European Journal of Operational Research*, 132(1), 22-38, 2001.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Implementing a hybrid Android sandbox for malware analysis

 Mert Can COŞKUNER ^{a,*},  Dr. Murat İSKEFİYELİ ^b

^a Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

^b Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: mert.coskuner@ogr.sakarya.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1239779

ABSTRACT

Increasing Android malware is becoming a problem for analysts in order to analyse and decide whether an application is malicious or benign. Research for this problem and prototypes is insufficient in terms of accessibility and analysis capabilities. In this paper, a hybrid Android sandbox for both dynamic analysis and static analysis is proposed while comparing malware sandboxes already used for malware analysis. As a result, a hybrid Android malware sandbox which has static and dynamic analysis capabilities is implemented.

Keywords: Android, Malware, Sandbox

Android zararlı uygulama analizi için hibrit kum havuzu geliştirilmesi

ÖZET

Artan zararlı Android uygulamalarının gerçekten zararlı olup olmadığına karar vermek için zararlı yazılım analistlerinin tipik olarak başvurduğu kum havuzları Android işletim sistemi için yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda yapılan akademik çalışmalar ve ortaya çıkan prototipler erişilebilirlik ve analiz yapabilme kapasitesi olarak yetersiz kalmaktadır. Bu makalede Android zararlı yazılım analizi için hibrit analiz yapabilecek bir kum havuzu önerilmiş ve zararlı yazılımların tespiti için kullanılan kum havuzlarının Android zararlı yazılımlar yönünden incelemesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda Android zararlı yazılım analizi için kullanılacak statik ve dinamik analiz yeteneği olan bir Android kum havuzu geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Android, Zararlı Yazılım, Kum Havuzu

Received: 21/01/2023, Revised: 06/04/2023, Accepted: 17/07/2023

I. GİRİŞ

Mobil telefon endüstrisi son yılların en hızlı gelişen endüstrilerinden biri olmuştur. Bu gelişmeler ışığında Android işletim sisteminin akıllı telefonlar içerisinde büyük bir pay elde etmesinin bir yan etkisi olarak Android işletim sistemi zararlı yazılım geliştiricilerinin de ilgisini çekmeye başlamıştır. Artan zararlı Android uygulamalarının gerçekten zararlı olup olmadığına karar vermek için zararlı yazılım analistlerinin tipik olarak başvurduğu kum havuzları, Android işletim sistemi için yetersiz kalmaktadır. Bu alanda L. Batyuk ve ark., A. Reina ve ark., M. Spreitzenbarth ve ark., L. K. Yan ve ark. yaptıkları çalışmalarda ve ortaya çıkardıkları prototiplerde erişilebilirlik ve analiz yapabilme kapasitesi olarak yetersiz kalmışlardır [1, 2, 3].

Zararlı yazılımlar kalıcılık, veri kaçırma, komuta kontrol sunucusu ile iletişim ve verilen komutları yerine getirme gibi yeteneklere sahip olabilir. Android zararlıları da sıradan zararlılar gibi bu özelliklere sahip olabilmektedir. Android zararlı yazılım analizi statik ve dinamik analiz olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Bir uygulamanın zararlı olup olmadığını anlamak için en kolay yöntemlerden birisi; şüpheli uygulamayı kontrollü bir telefona yüklemek, telefonun sistemindeki ve ağ trafiğindeki değişiklikleri izlemektir. Bu analiz yöntemine dinamik analiz adı verilmektedir [4]. Dinamik analiz işlemi, dinamik analiz kum havuzu kullanılarak yapıldığında bir zararlı yazılım analistinin harcayacağı efora kıyasla daha kısa sürede şüpheli uygulama hakkında bilgi verebilir. Dinamik analiz işleminde kullanılan kontrollü ortam; sanal ortam (bilgisayar) ya da gerçek bir cihaz olabilir. Dinamik analiz yöntemi, kısa sürede analiz edilen uygulama hakkında bilgi verdiğinden dolayı sıkça kullanılmaktadır. Statik analiz yöntemi ise; şüpheli uygulamanın çalıştırılmadan incelenmesi işlemine denmektedir. Hem statik, hem dinamik analiz yeteneklerine sahip olan kum havuzlarına hibrit kum havuzu denmektedir.

Akıllı telefon sektörünün %80'ine yakını elinde bulunduran Android işletim sistemi akıllı telefonlar için en popüler işletim sistemi olmakla beraber en büyük rakibi Apple Inc'in iOS işletim sistemidir. Fakat, iOS işletim sisteminin aksine, Android işletim sisteminin üçüncü parti mağazalardan uygulama indirip kurulmasına izin vermesi siber suçluların Android işletim sisteminde zararlı uygulama geliştirmesine ve dağıtmasına bir motivasyon sağlamaktadır. Anti-virüs şirketlerinin raporları Android işletim sistemi için geliştirilen zararlı uygulamaların artışı net bir şekilde ortaya koymaktadır: Sophos'un raporuna göre 650,000 eşsiz Android zararlısı tespit edilmiştir ve her gün 2,000 Android zararlısı bu sayıya eklenmeye devam etmektedir [5, 6].

Google LLC şirketi siber suçluların bu artan ilgisini görerek Şubat 2012 tarihinde Bouncer'ı tanıtmıştır [7]. Bouncer servisi Google Uygulama Mağazasına yüklenen uygulamaların zararlı olup olmadığına karar vermektedir. Bouncer servisinin devreye girmesiyle Google Uygulama Mağazasında yer alan zararlıların sayısı %40'a yakın bir düşüş göstermiştir. Yine de, Bouncer'ın tanıtılması Google Uygulama Mağazasında yer alan zararlı uygulamaların varlığını tamamiyle bitirmemiştir. Bunun en büyük örneği 2017 yılında Check Point tarafından Google Uygulama Mağazasında tespit edilen, bir milyonun üzerinde indirmesi bulunan ve bir sıfırıncı gün (zero-day) açığı kullanan zararlı fidye uygulamasıdır [8]. Ayrıca, Android ekosistemi içerisinde uygulama indirilebilen tek mağaza Google Uygulama Mağazası değildir. Uygulamalar torrent, hosting servisleri veya kendi depolarını oluşturan alternatif uygulama mağazalarından indirilebilmektedir. Alternatif yollarla yüklenen zararlı uygulamaların uzun süre tespit edilmeden faaliyetlerini devam ettirebildiği pek çok örnek mevcuttur [9, 10].

Google LLC'nin Bouncer'ı tanıtmasından sonra Bläsing ve ark. AASandbox adını verdiği Android uygulamaları için dinamik analiz platformunu tanıtmıştır [1]. Bu platformun tanıtılmasından sonra yeni dinamik analiz yapan kum havuzları akademide ve sektörde tanıtılmaya başlanmıştır. Windows çalıştırılabilir dosyaları için geliştirilen dinamik kum havuzları gibi Android kum havuzları da girdi

olarak verilen uygulamayı kontrollü bir ortamda çalıştırıp davranışını incelemektedir. İnceleme sonuçları zararlı yazılım analistine rapor olarak sunulmakta olup, uygulamanın zararlı olup olmadığına dair analistin karar vermesine yardımcı olmak adına amacıyla bir bilgilendirme niteliği taşımaktadır. Bu sistemlerin pek çoğu dinamik analiz sonuçlarına takviye olması anlamında statik analiz de yaparak hibrit bir yaklaşım izlemektedir. Fakat, Android zararlı uygulama analizi için kullanılan bu teknikler üzerine yapılan I. Burguera ve ark., M. C. Grace ve ark., Y. Zhou ve ark. tarafından yapılan araştırmalar kapsamlı bir teknik çözüm vermemektedir [11, 12, 13].

Android zararlı uygulamalarının her geçen gün artmasıyla analiz süreçlerinin maliyeti ve zamanı artmış ve bu artış etkili bir şekilde hibrit analiz yapabilen bir kum havuzu ihtiyacı doğurmuştur fakat Android platformunda dinamik analiz yapabilen kum havuzu sayısı kısıtlıdır. Bu çalışmada, Android platformunda kısıtlı olan hibrit kum havuzu ihtiyacını karşılayabilmek adına açık kaynak bir kum havuzu olan Cuckoo Sandbox kum havuzuna Android platformunda statik ve dinamik analiz gerçekleştirilme özelliği kazandırılmıştır. Bu çalışma aşağıdaki katkıları içermektedir:

Android uygulamalarının hibrit analizini yapabilen bir kum havuzu geliştirilmesi.
Statik analiz ile bilinen güvenlik ihlali göstergelerinin tespit edilmesi.
Dinamik analiz ile zararlı uygulamadaki davranışların tespit edilmesi.

Makalenin ikinci bölümünde Android zararlı uygulamalarının tespiti için kullanılan tekniklerin anlaşılabilirliği için Android zararlı uygulama tehditleri açıklanmıştır, üçüncü bölümünde zararlı yazılım analizinde aktif olarak kullanılan kum havuzlarının Android zararlı yazılım analiz yetenekleri incelenmiştir ve hibrit kum havuzunun sistem tasarımı açıklanmıştır, sonuç bölümünde ise geliştirilen hibrit kum havuzu ile alınan sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. ANDROID ZARARLI YAZILIM ANALİZİ

Bu başlıkta Android zararlı yazılımlarının tespiti için kullanılan tekniklerin anlaşılabilirliği için Android zararlı yazılım tehditlerinden bahsedilmiştir. Tehditlerin anlatımında Android zararlı yazılım geliştiricilerinin motivasyonu, zararlı uygulamaları dağıtım şekilleri ve zararlı uygulama veri setlerinin bulunabileceği ortamlardan bahsedilecektir.

Ağustos 2010 yılında AndroidOS.FakePlayer ismiyle ilk Android zararlı yazılımı keşfedilmiştir [10]. AndroidOS.FakePlayer bulaştığı hedeflerde ücretli servislere SMS mesajları atarak gelir elde etme amacı gütmektedir. AndroidOS.FakePlayer'ın çıkmasının üzerinden geçen bu zamanda Android zararlı yazılımlar giderek karmaşılaşmaya başlamıştır. Android zararlı yazılım geliştiricilerinin geliştirdikleri zararlı yazılımların karmaşıklığını giderek arttırmalarının arkasındaki motivasyon finansal kazançtır. Zararlı yazılım geliştiricileri, zararlı yazılımlarının bulaştıkları cihazlardan bankacılık bilgilerini çalabilir, AndroidOS.FakePlayer örneğinde olduğu gibi ücretli servislerle iletişim kurabilir, kişisel veriler çalınarak uzak sunucuya yükleyebilir ya da bulaştığı cihazı komuta kontrol sunucusuna bağlayabilir ve bir botnetin parçası haline getirebilir. Mobil bankacılık zararlı yazılımları arka planda bir servis başlatarak SMS mesajlarını çalma yoluyla veya ekran enjeksiyonu gibi yöntemler ile sosyal mühendislik aracılığıyla iki faktörlü doğrulama mekanizmalarını atlatacak kapasitelere sahip olabilir.

Kurbanlarına zararlı yazılımları yükletebilmek için zararlı yazılım geliştiricileri çeşitli yöntemler kullanmaktadırlar. Gerçek uygulamaların içerisine zararlı aktivite yapan kod parçaları yerleştirerek zararlı uygulama üretilebildiği gibi, Google Uygulama Mağazasında yer alan gerçek uygulamaları isim ve logo gibi unsurlarını taklit ederek zararlı amaçlar güden uygulamalar da üretilebilir. Zararlı yazılım geliştiricileri üçüncü parti uygulama mağazalarını tercih etseler de, Google Uygulama Mağazası da zararlı yazılım geliştiricileri için bir dağıtım merkezi görevi görmektedir [14, 9]. Bu konuda yapılan çalışmalarda Zhou ve ark. altı Android uygulama mağazasında yaptığı çalışmada tekrar paketlenmiş

uygulamaları incelediğinde bu uygulamaların sadece zararlı yazılım barındırmadığını, aynı zamanda reklam geliri elde etmek için çeşitli kütüphaneler de barındırdığını tespit etmiştir [15].

Zararlı yazılım geliştiricileri uygulamalar içerisinde yer alan reklamlar aracılığıyla da kullanıcılarına zararlı yazılımlar indirtebilmektedir. Bu yöntem için Google Uygulama Mağazasına yükledikleri ve görünürde zararlı bir aktivite yapmayan bir uygulama kullanarak internet, device admin ve paket yükleme gibi yetkiler aracılığıyla zararlı aktiviteler gösterecek olan asıl uygulamayı indirtebilmektedirler. Bilinen ve güncel Android zararlı uygulamaları, Koodous ve VirusTotal platformlarından indirilebilmektedir [16, 17, 18].

Android işletim sisteminde çalışan zararlı uygulamaların analizi ve tespiti x86 zararlı yazılım analizinin temellerine dayanmaktadır. 2008 yılında Android telefonların çıkmaya başlamasıyla birlikte uygulama analizi için Android işletim sistemine yönelik pek çok araç geliştirilmiştir. Analiz araçları uygulamaların işlevini analiz etmek için kullanıldığı gibi, bir uygulamanın zararlı olup olmadığına karar vermek için kullanılabilen araçlar da bulunmaktadır. Statik analiz teknikleri Android uygulama paketinden (APK) uygulamaya dair özelliklerin çıkarılmasında kullanılmaktadır. Dinamik analiz teknikleri ise uygulamanın kontrollü bir ortamda çalıştırılarak uygulamanın gösterdiği davranışın analiz edilmesinde kullanılmaktadır.

Statik analiz sonucunda elde edilen bilgiler uygulamanın dinamik analizi için hayati öneme sahip olabilir. Buna örnek olarak uygulamada yer alabilecek olan root tespiti ve emulator tespiti teknikleri gösterilebilir [19]. Statik analizde keşfedilen tespit yöntemleri doğrultusunda ilgili tespit teknikleri atlatılarak daha sağlıklı dinamik analiz yapılması sağlanabilmektedir. Ayrıca, uygulamanın gösterebileceği ve statik analiz yoluyla keşfedilmiş gizli davranışlar da bu sayede dinamik analiz ile incelenebilmektedir. Aşağıda farklı statik ve dinamik analiz yöntemleri ve araçları hakkında bilgiler verilecektir. Anlatılacak bilgiler, tasarlanan Android kum havuzunun tanıtılmasında yardımcı olacaktır.

A. STATİK ANALİZ ARAÇLARI

Statik analiz araçları aşağıdaki kategorilerden birinde yer alabilir:

Decompilerlar: Dalvik byte kodu seviyesinde decompile ya da disassembly yapan araçlar.

Metadata çıkarıcılar: Uygulamanın AndroidManifest dosyasından bilgi çıkaran ve istenen izinler, aktiviteler, servisler ve yayın alıcılar hakkında bilgi sunan araçlar. Bu araçlar tarafından çıkarılan bilgiler dinamik analiz süreçlerinde kullanılabilir.

Weaving: Uygulamada byte kodu seviyesinde değişiklik yapan araçlar.

Statik analiz için kullanılan araçlardan birisi Androguard aracıdır [20]. Dalvik byte kodunu Java kaynak koduna çevirebilir. İki APK dosyası verildiğinde, benzerlik oranını çıkarabilir. Benzerlik oranı çıkarma işlemi tekrar paketlenmiş uygulamalar ya da bilinen zararlı uygulamaların tespiti için kullanılmaktadır. Ayrıca, Androguard aracında yer alan bileşenler kullanılarak AndroidManifest dosyası içerisindeki bilgiler çıkarılabilir.

APKtool aracı, Android uygulamalarını tersine mühendislik yöntemleriyle incelemek için kullanılan bir araçtır. Android paketlerini neredeyse orijinal haliyle geri dönüştürme yeteneğine sahiptir. APKtool aracı ile bir Android uygulaması açılabilir, yeni özellikler eklenebilir ve tekrar paketlenir. Bu özelliğiyle byte kodu seviyesinde değişiklik yapmaya olanak tanımaktadır. Weaving yöntemi Joe Sandbox tarafından statik olarak kullanılmaktadır. Radare2 açık kaynak bir tersine mühendislik aracıdır. Disassemble, debug, analiz ve Android binary dosyaları manipüle etme özelliklerine sahiptir.

Android platformuna yönelik statik analiz ile alakalı diğer araçlar .class dosyasına yöneliktir. Android uygulamaları içerisinde yer alan .class dosyaları hali hazırda kullanılan Java araçları ile

işlenebilmektedir. Dex2jar aracı bir APK dosyasını .jar dosyasına çevirebildiği gibi, aynı işlemin tersini de yapabilmektedir. JEB Decompiler, lisanslı bir Android decompiler aracıdır. Dalvik byte kodunu direkt olarak Java kaynak koduna çevirebildiği gibi kaynak dosyaları, sertifika, manifest dosyası gibi bileşenleri de geri getirebilmektedir.

B. DİNAMİK ANALİZ ARAÇLARI

Dinamik analiz araçları şüpheli uygulamaları kontrollü bir ortamda çalışırken izleme ve izlenen uygulamaların davranışlarını çıkarma özelliklerine sahip araçlardır. Dinamik analiz araçları aşağıdaki teknikleri kullanarak bir uygulamanın davranışlarını izleyebilir:

Sistem seviyesinde izleme: Kullanılan sistem çağrılarının takibini yapan strace ya da kernel modülleri gibi araçlar sistem seviyesinde izleme için kullanılır. Native kodların kısmen takip edilmesine olanak sağlar.

Sanal makina seviyesinde gözlem: VMI tabanlı framework yapıları emülasyon yapılan ortamda olan olaylara müdahale etmektedir. Dalvik VM (DVM) tabanlı sistemler Android API çağrılarını DVM seviyesinde gözlemler. Qemu VMI tabanlı sistemler emulator seviyesinde native kod analizi yapabilmek için geliştirilmiştir.

Metot takibi: DVM içerisinde çalışan Java metotlarını takip eden araçlar.

Değişiklik takibi: Dinamik analiz sırasında şüpheli uygulamanın değiştirdiği ya da eriştiği kullanıcı bilgilerini tespit etmeye yarayan araçlar.

İlk dinamik Android analiz frameworklerinden birisi olan AASandbox, yüklenebilir kernel modülleri ile sistem çağrılarını izleyerek zararlı uygulama tespiti yapmaya çalışmaktadır [1]. TaintDroid popüler bir değişiklik takip frameworküdür [4]. DVM üzerine yazılmıştır ve uygulamaları hassas bilgi ifşasına karşı gözlemlenmektedir. Web arayüzü üzerinden erişilebilen Joe Sandbox Mobile APK Analyzer, ForeSafe, VisualThreat gibi dinamik analiz platformları analiz için kullandıkları teknikleri açıklamadıkları için bu platformlarda kullanılan yaklaşımların analiz edilebilmesi için yeterli bir bilgi bulunmamaktadır.

C. DİĞER ANALİZ ARAÇLARI

Online servis olarak çalışan ve Android uygulama analizi için kullanılan araçlar bu kategoride yer almaktadır. VirusTotal ve AndroTotal anti-virüs tarama servisleri bu kategoriye girmektedir [18, 21]. VirusTotal statik olarak antivirüs tabanlı tarama yaparak bir uygulamanın zararlı olup olmadığına karar vermektedir. AndroTotal şüpheli uygulamayı çalıştırarak mobil zararlı yazılım tespit eden antivirüslere karşı test ettirmektedir.

III. HİBRİT KUM HAVUZU VE SİSTEM MODELLEMESİ

Sistem tasarımı gerçekleştirilmeden önce Android zararlı yazılım analizinde kullanılan kum havuzlarının analiz yetenekleri incelenmiştir. İnceleme için Lastline, FireEye, VxStream ve Joe Sandbox platformları kullanılmıştır. Lastline, FireEye ve VxStream kum havuzları Android zararlı yazılımları için sadece statik analiz yapmaktadır. Joe Sandbox kum havuzu Android zararlı yazılımları için statik ve dinamik analiz yeteneklerine sahiptir. Ele alınan bu platformların inceleme sonuçları Tablo 1 içerisinde görülebilir.

Kum Havuzları	Statik Analiz Yeteneği	Dinamik Analiz Yeteneği
Lastline	Var	Yok
FireEye	Var	Yok
VxStream	Var	Yok
Joe Sandbox	Var	Var

Tablo 1. Kum havuzlarının Android analizi yönünden karşılaştırmaları

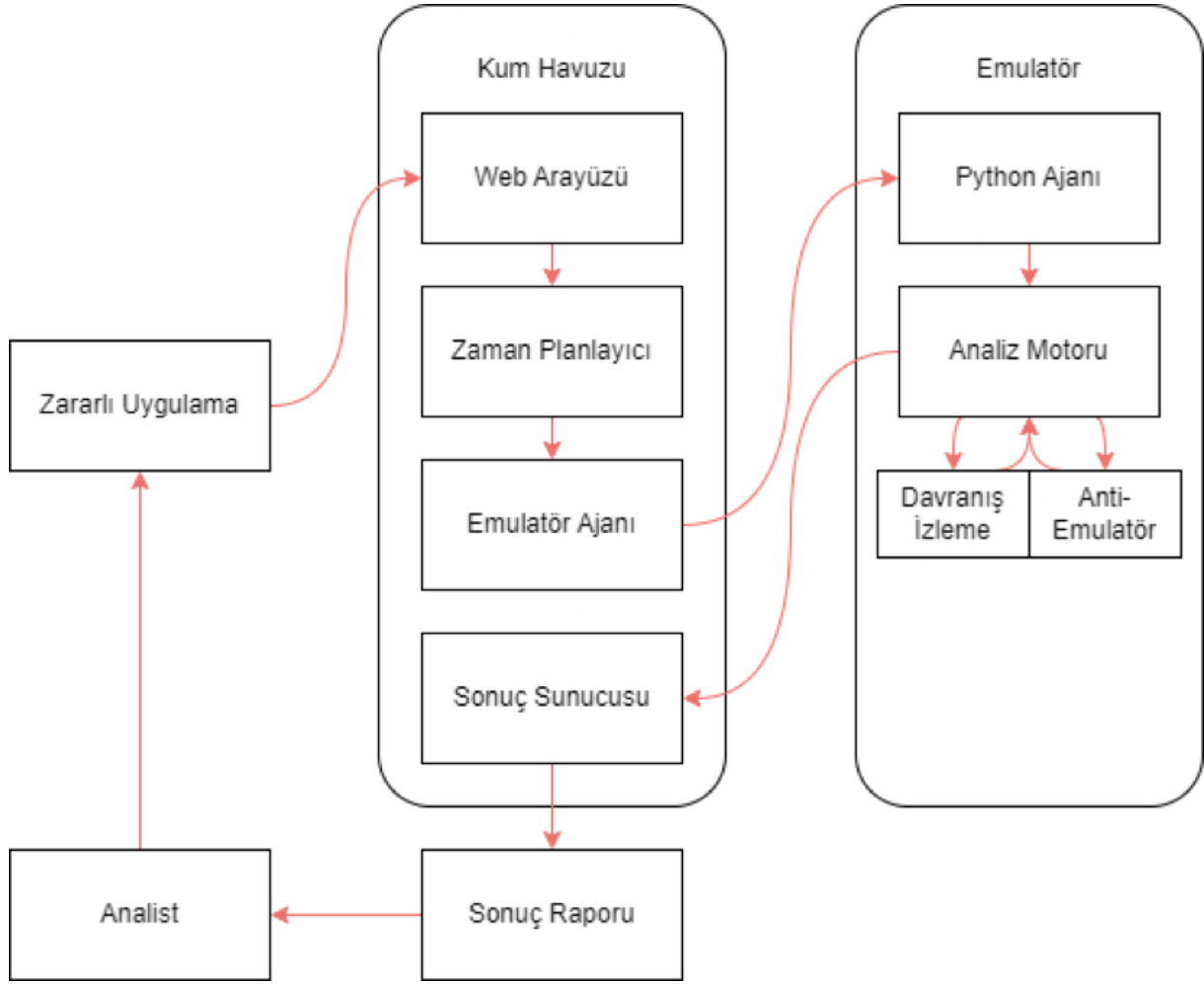
Tasarlanan kum havuzu hem statik hem dinamik analiz yeteneklerine sahiptir. Bu bölümde kum havuzunun statik ve dinamik analiz yeteneklerine dair detaylar ve bu yeteneklerin kum havuzunun bütününe nasıl etki ettiği anlatılacaktır.

Kum havuzu tarafından incelenen her Android uygulaması aşağıdaki adımlardan geçmektedir:

Statik Analiz: Uygulamanın byte kodundan ve manifest bilgilerinden (AndroidManifest.xml) çıkarılan bilgilerin analiz edilmesi işlemidir.

Dinamik Analiz: Uygulamanın Android ortamında çalıştırılması ve davranışlarının DVM seviyesinde takip edilmesi işlemidir.

Raporlama: Analiz sürecinin bitmesinden sonra elde edilen verilerin YARA kural veritabanı ve zararlı uygulama imza veritabanı içerisinde yer alan verilerle eşleştirme işlemidir. Bu işlem sonucunda tespit edilen YARA kural ve imza bilgileri ile statik analiz ve dinamik analiz detaylarını içeren bir rapor üretilmektedir. Analiz sürecinin şeması Şekil 1 içerisinde görülebilir.



Şekil 1. Sistem analiz şeması

A. STATİK ANALİZ

Android uygulamaları Android Uygulama Paketi (APK) olarak paketlenmiş bir dosyadır. İçerisinde manifest dosyası barındırır. Bu manifest dosyası, uygulamanın kurulumu ve çalıştırılması için gerekli bir dosyadır. Statik analizin ilk adımı olarak APK'nın açılması ve Java metotlarının, AndroidManifest içerisinde uygulama tarafından istenen izinler, servisler, yayın alıcılar, aktiviteler, paket adı ve SDK versiyonu gibi uygulama alt bilgilerinin ve string değerlerinin çıkarılması yer almaktadır. AndroidManifest içerisinde bulunan servis, yayın alıcı ve aktivite parçalarının tanımları aşağıdaki gibidir:

Aktiviteler: Aktiviteler kullanıcılarla etkileşim için sunulan ekranlara verilen isimdir. Bir aktivite çalışmak için AndroidManifest içerisinde tanımlı olmalıdır. Aktiviteler kullanıcılara sunulan ekranlardaki etkileşimleri ve bu etkileşimlerin sonucunun ne olacağını belirlemektedir. Kum havuzu dinamik analiz sırasında çalıştırılan aktivitelerin faaliyetlerini kayıt altına almaktadır.

Servisler: Android platformunda arka planda çalışan süreçlerdir. Aktivitelerden farklı olarak bir arayüz barındırmamaktadır. Arayüzleri bulunmadığı için zararlı yazılım geliştiricilerinin yaygın olarak kullandığı bileşenlerdendir. Zararlı yazılım geliştiricileri tarafından komuta kontrol sunucusu iletişimi, kişisel veri kaçırma ya da SMS mesajı kaçırmak için kullanılmaktadır. Uygulama tarafından kullanılan tüm servisler AndroidManifest içerisinde tanımlı olmalıdır. Kum havuzu dinamik analiz sırasında çalışan servis faaliyetlerini kayıt altına almaktadır.

Yayın Alıcılar: Yayın alıcılar sistem içerisinde ya da farklı uygulamalar yayımlanan aktiviteleri almak için kullanılmaktadır. Android işletim sistemi açıldıktan sonra işletim sisteminin yayınladığı BOOT_COMPLETED aktivitesi ya da bir SMS geldiğinde haberdar olmak için kullanılan SMS_RECEIVED aktivitesi örnek yayınlardan biridir. Yayın alıcılar diğer parçalardan farklı olarak AndroidManifest içerisinde tanımlanmak zorunda değildir. Kum havuzu dinamik analiz sırasında çalıştırılan yayın alıcılar ve faaliyetlerini kayıt altına almaktadır.

B. DİNAMİK ANALİZ

Android işletim sistemi akıllı telefon ve tabletler için tasarlandığından yaygın olarak ARM tabanlı cihazlarda çalışmaktadır. Dinamik analiz ortamının gerçek bir telefonu en yakın şekilde simüle etmesi için kum havuzunun dinamik analiz ortamı da ARM platformu ile hazırlanmıştır. Emülasyon ortamı olarak Android uygulamalarını çalışabileceği ve davranışlarının gözlemlenebileceği QEMU tabanlı bir ortam kullanılmıştır. Tasarlanan ortam ile Android işletim sistemi içerisindeki uygulamaların çalıştığı VM olan Dalvik VM yakından gözlemlenmiş ve incelenen uygulama tarafından çalıştırılan tüm aktiviteler kayıt altına alınmıştır. Dinamik analizin Dalvik VM seviyesinde yapılması dosya sistemi, arama ve SMS gibi aktivitelerin de gözlemlenebilmesine olanak sağlamıştır. Kapsamlı bir analiz için toplanan bu bilgiler yeterli değildir. Bu yüzden kum havuzu dinamik analiz sırasında zararlı davranışları detaylandırmak için aşağıda detaylandırılan ek bilgiler de toplamaktadır.

B. 1. Hassas Bilgi Kaçırma Tespiti

Hassas bilgi çalınması davranışına karşı telefonda çıkarılmaya çalışılan hassas bilgiler tespit edilmektedir. Hassas bilgi tespitinin yapılması kum havuzuna kabul edilebilir bir ekstra bir yük bindirmektedir. Fakat bu özellik sayesinde kum havuzu ağ üzerinden ya da SMS üzerinden telefonda çıkarılan bilgileri tespit edebilmektedir.

B. 2. Ağ Trafikinin Yakalanması

Ağ trafiğinin yakalanması modern zararlı yazılımların analizi için en önemli faktörlerden biridir. Zararlı yazılımın komuta kontrol sunucusu ile iletişiminin yakalanması buna bir örnektir. Yapılan çalışmalara göre x86 zararlı yazılımlarının %98'inden fazlası TCP/IP bağlantısı kurmaktadır [22]. Ağ trafiği yaratan uygulamaların çoğunlukta olması tek başına bu metriği barındıran bir uygulamanın zararlı yazılım olarak nitelendirilmesini engellemektedir. Bu yüzden, analiz sırasında telefon üzerinde üretilen tüm ağ trafiği yakalanmaktadır. Bunun sebebi incelenen uygulamanın internet izni olmasa bile tarayıcı gibi başka uygulamalar üzerinden veri kaçırabileceği ya da iletişim kurabileceği ihtimalidir.

B. 3. Metot Takibi

Çalıştırılan Java metotları, komutlar, bu metot ve komutlarda kullanılan parametreler kayıt altına alınmaktadır. Uygulama tarafından çalıştırılan metot ve komutların listesi analiz sonucu üretilen raporda yer almaktadır.

B. 4. Native Kütüphane Tespiti

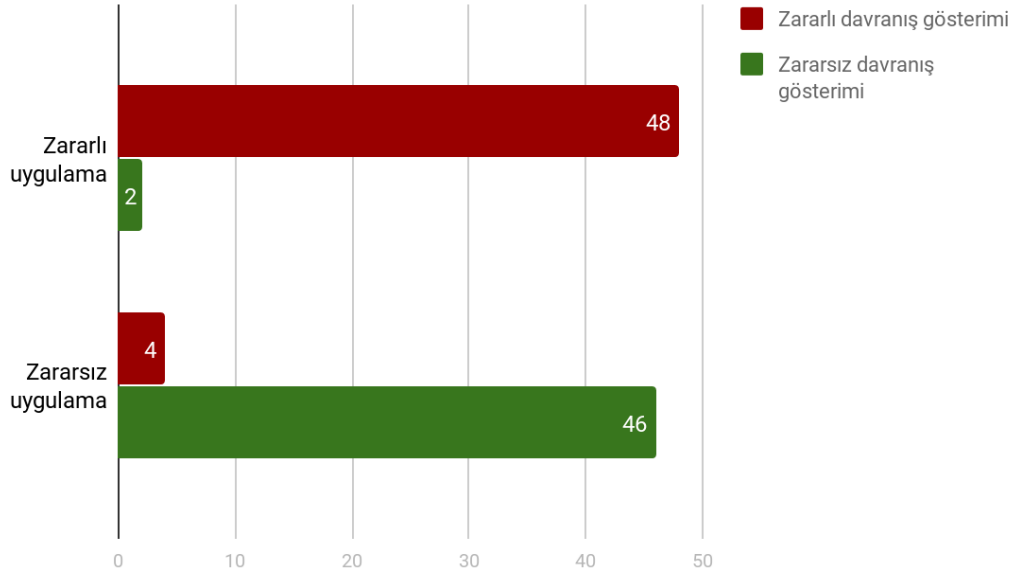
Android uygulamaları Java Native Interface (JNI) kullanarak sistem seviyesi kütüphanelerin kullanılması ile yazılan native kodları da çalıştırabilmektedir. Bu özellik 3D grafik gibi performans tabanlı işlemler için düşünülmüş bir özelliktir. Eğer incelenen uygulama tarafından kullanılıyorsa, yüklenen native dosyalar kayıt altına alınmaktadır.

Kum havuzunun kurulum ortamı, ağ kurulumu, veritabanı kurulumu gibi sistem unsurları diğer kum havuzları ile benzerdir. Zararlı yazılımların analiz ortamına zarar vermemesi için DoS saldırılarına, e-mail ya da SMS spamları yollamasına ve ağ içerisinde yayılmalarına karşı önlemler içermektedir. Bu önlemler x86 zararlı yazılım analizlerinde karşılaşılan vakalardan yola çıkılarak alınmıştır [23, 24].

IV. SONUC

Kum havuzunun hibrit analiz yeteneklerinin değerlendirilmesi için 50 zararlı ve 50 zararsız uygulama seçilmiştir. 50 zararsız uygulamanın hepsi Google Uygulama Mağazasından rastgele seçilmiştir. Zararlı yazılımlar ise VirusTotal ve Koodous platformlarından antivirüsler tarafından zararlı olarak nitelendirilen örnekler içerisinde rastgele seçilmiştir. Analizler sırasında herhangi bir davranış göstermeyen uygulamalar test örnekleri arasından çıkarılmıştır ve yerine yeni örnekler seçilmiştir. Örnekler rastgele seçilerek zararlı yazılım çeşitliliği mümkün olduğunca üst seviyede tutulmaya çalışılmıştır.

Analiz edilen kum havuzu raporları



Şekil 2. Test sonuçları

Test örnekleri ile yapılan çalışmalar sonucunda kum havuzunun hibrit analiz sonucu üretilen raporun analistin bir uygulamanın zararlı olup olmadığına karar vermesi için yeterli olduğu görülmüştür. Bazı zararlı uygulamaların sahip olduğu gelişmiş anti teknikler, bu zararlı uygulamaların kum havuzu analizini atlatmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda, bazı gerçek uygulamaların sahip olduğu zararlı benzeri davranışlar ilgili uygulamanın zararlı olarak nitelendirilmesine sebebiyet vermiştir.

Ayrıca, ilgili sistem tasarlanmadan önce yapılan akademik taramalarda tasarlanan kum havuzuna benzer çalışmalar incelenmiştir. Gilbert ve ark. zararlı aktivitelerin tespiti konusunda yaptığı çalışmada bağımlılık grafiklerine yer vermiştir [16]. DroidScope VMI üzerinden dinamik analiz yapan bir sistem önermiştir [25]. Java objelerinin analiz için tekrar oluşturulma işlemi gibi hassas işlemler barındırdığından Google LLC'nin her güncellemesinde DroidScope içerisinde büyük adaptasyonlar yapılması gerektiğinden kullanılması makul değildir. I. Burguera ve ark. tarafından geliştirilen CrowdDroid davranış tabanlı dinamik analiz sistemi önermiştir fakat Android işletim sisteminin özelliklerini yeteri kadar kapsayamamıştır [11]. Hibrit Android kum havuzu dinamik analiz ile davranış tespiti yapmaktadır ve davranış imza veritabanı kullanarak bilinen zararlı davranışları tespit etmektedir. İncelenen çalışmalar hibrit zararlı yazılım analizi yapabilecek bir kum havuzu ortamının oluşturulmasında yetersiz kalmaktadır. Geliştirilen sistem, bu bilgiler ışığında hibrit analiz yetenekleri olan bir kum havuzu elde etme amacıyla geliştirilmiştir.

Hibrit Android kum havuzunun amacı statik ve dinamik analiz yaparak raporlamak ve zararlı yazılım analistlerinin Android uygulama örnekleri içerisinde hangilerinin zararlı olabileceğine ve detaylı incelemeye gerek duyduğuna dair verecekleri kararı desteklemektir.

Otomatize bir analiz ortamının en büyük problemi sanal cihaz tabanlı olmasından kaynaklı olarak anti teknikleridir. Zararlı uygulamaların kullandığı anti-VM ve anti-sandbox teknikleri gelişmekte ve değişmektedir. Kum havuzu bünyesinde alınan önlemler karmaşık zararlı yazılımları kandırmakta yetersiz kalabilmektedir. Yapılan çalışmalar x86 zararlı yazılımlarda anti tekniklerinin yaygın olarak kullanılmadığını gösterse dahi Android tabanlı kum havuzları için bu varsayımın doğru olduğunu kanıtlayan bir çalışma bulunmamaktadır [19, 16].

Google Uygulama Mağazası için tanıtılan Bouncer teknolojisi göz önünde bulundurulduğunda Android zararlı uygulama geliştiricilerinin analiz ortamları tespiti üzerinde çaba harcayacakları tahmin edilebilir. Yapılan testlerde Şekil 2’de görüldüğü üzere kum havuzu %96 oranında başarıma, %8 yalancı pozitif ve %4 yalancı negatif oranına sahiptir. Başarım oranının %100 olmama sebebi yukarıda bahsedilen karmaşık zararlı uygulamaların kullandığı teknikler olarak değerlendirilmektedir. Yine de, kum havuzunun incelenecek uygulama sayısının fazla olduğu durumlarda analistlere sağladığı rapor, analistlerin hangi uygulamanın detaylı inceleme gerektirdiğine karar vermesi konusunda kolaylık ve hız kazandırmaktadır.

Mükemmel bir emülasyon ortamı geliştirilmedikçe zararlı uygulama geliştiricileri için ortam tespit ihtimali her zaman bulunacaktır. Bu yüzden, ortam tespitini zorlaştırmak için adımlar atarak zararlı uygulama geliştiricisinin işini mümkün olduğunca zorlaştırmak bu konuda atılabilecek en iyi adımdır. Bu makalede Android işletim sistemi için geliştirilen zararlı uygulamaların statik ve dinamik analizini yapabilen hibrit bir kum havuzu sunulmuştur. Sunulan sonuçlar kum havuzunun analiste herhangi bir uygulamanın zararlı olup olmadığına ve detaylı incelemeye gerek olduğunu tespit etme konusunda yol gösterdiğini göstermektedir.

V. REFERANSLAR

[1] T. Bläsing, L. Batyuk, A. -D. Schmidt, S. A. Camtepe and S. Albayrak, "An Android Application Sandbox system for suspicious software detection," 2010 5th International Conference on Malicious and Unwanted Software, Nancy, France, 2010, pp. 55-62, doi: 10.1109/MALWARE.2010.5665792.

[2] Reina, Alessandro, Aristide Fattori and Lorenzo Cavallaro, "A System Call-Centric Analysis and Stimulation Technique to Automatically Reconstruct Android Malware Behaviors.," 2013.

[3] Spreitzenbarth, Michael, Felix C. Freiling, Florian Echtler, Thomas Schreck and Johannes Hoffmann, "Mobile-sandbox: having a deeper look into android applications.," ACM Symposium on Applied Computing, 2013.

[4] Enck, William & Gilbert, Peter & Chun, Byung-Gon & Cox, Landon & Jung, Jaeyeon & McDaniel, Patrick & Sheth, Anmol, TaintDroid: An Information-Flow Tracking System for Realtime Privacy Monitoring on Smartphones, Communications of the ACM, 2010, pp. 57, doi: 10.1145/2494522.

[5] IDC, "Android and iOS Continue to Dominate the Worldwide Smartphone Market with Android Shipments Just Shy of 800 Million in 2013," <http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS24676414> (2023.07.09).

[6] V. Svajcer, "Sophos Mobile Security Threat Report," <http://www.sophos.com/en-us/medialibrary/PDFs/other/sophos-mobile-security-threat-report.ashx> (2023.07.09).

- [7] H. Lockheimer, "Android and Security," <http://googlemobile.blogspot.com/2012/02/Android-and-security.html> (2023.07.09).
- [8] Lookout, Pegasus for Android (April 2017).
- [9] Google, An investigation of chrysaor malware on Android (2023.07.09).
- [10] D. Maslennikov, "First SMS Trojan for Android," <https://www.securelist.com/en/blog/2254/First-SMS-Trojan-for-Android>, August 2010.
- [11] Burguera, Iker & Zurutuza, Urko & Nadjm-Tehrani, Simin, Crowdroid: Behavior-Based Malware Detection System for Android, SPSM '11, 2011, pp. 15-26, doi: 10.1145/2046614.2046619.
- [12] Grace, Michael & Zhou, Wu & Jiang, Xuxian & Sadeghi, Ahmad-Reza, Unsafe Exposure Analysis of Mobile In-App Advertisements ABSTRACT, WiSec'12 - Proceedings of the 5th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, 2012, doi: 10.1145/2185448.2185464.
- [13] Zhou, Yajin & Wang, Zhi & Zhou, Wu & Jiang, Xuxian, Hey, You, Get Off of My Market: Detecting Malicious Apps in Official and Alternative Android Markets, Proceedings of the 19th Network and Distributed System Security Symposium NDSS 2012, 2012.
- [14] CheckPoint, Charger malware calls and raises the risk on google play (2023.07.09).
- [15] Zhou, Wu, Yajin Zhou, Xuxian Jiang and Peng Ning, "Detecting repackaged smartphone applications in third-party android marketplaces.", Conference on Data and Application Security and Privacy, 2012.
- [16] Gilbert, Peter & Chun, Byung-Gon & Cox, Landon & Jung, Jaeyeon, Vision: Automated security validation of mobile apps at app markets, Proceedings of the Second International Workshop on Mobile Cloud Computing and Services, 2011, doi: 10.1145/1999732.1999740.
- [17] "Koodous", <https://koodous.com> (2023.07.09).
- [18] "VirusTotal", <https://virustotal.com> (2023.07.09).
- [19] D. Shi, X. Tang and Z. Ye, "Detecting environment-sensitive malware based on taint analysis," 2017 8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), Beijing, China, 2017, pp. 322-327, doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342924.
- [20] "Androguard", <https://github.com/androguard/androguard> (2023.07.09).
- [21] Maggi, Federico, Andrea Valdi and Stefano Zanero, "AndroTotal: a flexible, scalable toolbox and service for testing mobile malware detectors.", Security and Privacy in Smartphones and Mobile Devices, 2013.
- [22] Kapratwar, Ankita & Di Troia, Fabio & Stamp, Mark, Static and Dynamic Analysis of Android Malware, 2017, pp. 653-662, doi: 10.5220/0006256706530662.
- [23] Bayer, Ulrich & Kruegel, Christopher & Kirda, Engin, TTAalyze: A Tool for Analyzing Malware, 2006.
- [24] Xu Chen, J. Andersen, Z. M. Mao, M. Bailey and J. Nazario, "Towards an understanding of anti-virtualization and anti-debugging behavior in modern malware," 2008 IEEE International Conference

on Dependable Systems and Networks With FTCS and DCC (DSN), Anchorage, AK, USA, 2008, pp. 177-186, doi: 10.1109/DSN.2008.4630086.

[25] Kwong, Lok & Yin, Heng, DroidScope: Seamlessly Reconstructing the OS and Dalvik Semantic Views for Dynamic Android Malware Analysis, 2012, Proceedings of the 21st USENIX Security Symposium.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bilyalı Dövme ve Plazma Nitrürleme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi

Azmi Erdoğan ^{a,*}, Okan Ünal ^b, M. Sabri Gök ^c, Soner Özdemir ^d, Sabri Alkan ^e

^a Metalurji ve Malzeme Müh., Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fak., Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği., Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, TÜRKİYE

^c Makine Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^d Makine Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

^e Su Altı Teknolojisi Pr., Denizcilik MYO, Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE
DOI: 10.29130/dubited.1225813

ÖZ

Mevcut çalışmada endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan AISI 4140 çeliğinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile aşınma dayanımının nasıl değiştiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği farklı iki şiddette bilyalı dövme işlemine ve plazma nitrasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Mikroyapıda meydana gelen değişimler SEM ve XRD aracılığıyla belirlenirken yüzey dayanımında meydana gelen değişim mikrosertlik ölçümü ile belirlenmiştir. Plazma nitrürleme sonucunda yüzeyde oluşan ilave katmanın demir nitrür fazları olduğu görülmüş bununla beraber bilyalı dövme işlemlerinden sonra herhangi bir faz değişimi meydana gelmemiştir. Tüm işlemlerle birlikte numunelerin yüzey sertliklerinde artış sağlanmış ve plazma nitrürleme ile yüzeyde 700 HV_{0.2}'ye varan sertlik artışı görülmüştür. Buna bağlı olarak en iyi aşınma dayanımı plazma nitrürleme işlemi ile sağlanmıştır. Aşırı bilyalı dövme de aşınma kayıplarının kayda değer miktarda azaltırken geleneksel bilyalı dövme işlemi aşınma dayanımı üzerinde sınırlı bir etki göstermiştir. Uygulanan yüzey modifikasyon işlemlerinin sağladığı sertlik artışı aşınma dayanımında görülen artışa neden olarak gösterilmiştir. Bilyalı dövmede beklenen etkinin görülmemesi ise yüzeyde oluşan pürüzlülüğe atfedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Bilyalı Dövme, Plazma Nitrürleme

Effect of Shot Peening and Plasma Nitriding Processes on Wear Resistance of AISI 4140 Steel

ABSTRACT

It is aimed to determine how the wear resistance changes by improving the surface properties of AISI 4140 steel, which is frequently used in industrial applications. In this context, AISI 4140 steel was subjected to two different intensities of shot peening and plasma nitration processes. While the changes in the microstructure were determined by SEM and XRD, the change in the surface strength was determined by the microhardness measurement. It was observed that the extra layer formed on the surface as a result of plasma nitriding was iron nitride phases, however, no phase change occurred after the shot peening processes. All processes increased the surface hardness of the samples and an

increase of up to 700 HV_{0.2} was observed on the surface with plasma nitriding. Accordingly, the best wear resistance was achieved by plasma nitriding process. Conventional shot peening had a limited effect on wear resistance, while severe shot peening reduced wear losses considerably. The increase in hardness provided by the applied surface modification processes has been shown to cause the increase in wear resistance. The lack of the expected effect in shot peening is attributed to the roughness on the surface.

Keywords: AISI 4140, Shot Peening, Plasma Nitriding

I. GİRİŞ

Sürtünmeye ve aşınmaya bağlı mekanik hasarları en aza indirmek, günümüzün hareketli mekanik parçaları için hala en büyük zorluklardan biridir. Düşük alaşımlı çelikler endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek özgül mukavemete, iyi darbe tokluğuna ve şekillendirilebilirliğe sahip oldukları için, makine imalat endüstrisinde borular, kılavuz raylar gibi birçok parçalarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşınma, bu bileşen parçaları için önemli bir hasar modelidir [1]. Yüksek torklar, ağır yükler ve zayıf yağlama gibi zorlu çalışma koşullarından dolayı zorlu koşullar altında çalışan parçalarda aşınma hasarı sıklıkla görülür. İş parçalarının aşınma davranışı artık gerilim, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, mikro yapı vb. gibi yüzey özelliklerine duyarlıdır [2]. Literatürde aşınma problemi yoğun bir şekilde incelenmiştir ve mekanik yüzey mühendisliği veya kaplama ile yüzey sertliğini arttırmak, aşınma direncini arttırmak için etkili yöntemlerdir [3]. Yüzey sertleştirme, malzeme yüzeyindeki aşınmayı azaltabilir [2]. Bugüne kadar, bilyalı dövme (SP), plazma nitrürleme (PN) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) vb. gibi birçok yüzey iyileştirme yaklaşımı geliştirilmiştir [4]–[6].

Bilyalı dövme ile iş parçalarının yüzey özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, işlemin başarısını etkileyebilir [2]. Bilyalı dövme, düşük maliyetli, basit ve endüstriyel olarak güvenilir olan numunelerin aşınma direncini artırma yöntemlerinden biridir. Bu nedenle, bileşenleri aşınmaya ve yorulmaya karşı korumak için bilyalı dövme kullanımı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [7]. Bilyalı dövme işleminde, küçük sert parçacıklar (genellikle dökme demir, çelik veya camdan yapılmış 0.25 mm–1 mm çapında küresel bilyalar) bir yüzeyi bombardıman eder [8]. Sert parçacıklar yüzeye çarptığında darbe kuvvetleri ile yüzey deforme olur. Sert parçacıklar yüzeye çarpmaya devam eder ve deforme olmuş bölgeler genişleme eğilimi gösterir. Plastik olarak deforme olmuş yüzey tabakası genişlemeye çalıştığından, bu nedenle, numunelerin yüzeyini koruyan artık basma gerilmeleri oluşur [9]. SP işleminin sağladığı mukavemet artışı, tane incelmeye ve bilyaların çarpma girintisi nedeniyle oluşan daha yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlıdır [10]–[12]. Bilyalı dövme nedeniyle artan yorulma mukavemeti geniş çapta araştırılmıştır, ancak bilyalı dövmeli bileşenler için aşınma ve sürtünme etkisindeki davranışları çok az incelenmiştir [7], [13].

Çeliğin nitrürlenmesi sırasında, atomik azot, bir derişim gradyanı boyunca malzemenin yüzeyine yayılır ve ilk malzemeye bağlı olarak farklı tipte nitrürlerin oluşumuyla bir nitrürleme bölgesi oluşturur [14]. Bu nitrürleme bölgesi, malzeme içinde büyüyen bir bileşik katmanından ve alttaki difüzyon katmanından oluşur. Bileşik katman, malzemenin yüzeyinde oluşur ve çoğunlukla demir nitrür (γ' : Fe₄N, ϵ : Fe₂₋₃N) kombinasyonundan oluşur. Difüzyon katmanı bileşik katmanının altında bulunur ve konsantrasyon gradyanı boyunca malzemenin içine doğru büyür. Bileşik katman ile karşılaştırıldığında, difüzyon katmanı, başlangıç malzemesinin eksik bir dönüşümü ile karakterize edilir ve demir nitrürler (esas olarak γ') ve artık matris (α -Fe) içerir. Difüzyon tabakasındaki nitrür miktarı, derinlik arttıkça azalır ve difüzyon tabakasının sonunda hiç nitrür kalmaz [15], [16]. En yaygın nitrürleme prosesleri gaz nitrürleme, plazma nitrürleme ve tuz banyosunda nitrürlemedir. Diğer işlemlerle karşılaştırıldığında, plazma nitrürleme, işlem kontrolünde çok büyük bir esnekliğe sahiptir, bu da nitrürleme bölgesinin özelliklerinin geniş bir aralıkta değiştirilebileceği ve uyarlanabileceği anlamına gelir [15]. Plazma nitrürleme tekniği, işleme parametrelerine ve nitrürlenmiş katman özelliklerine bağlı olarak çeliklerin yüzey sertliğini, korozyon direncini ve tribolojik özelliklerini iyileştirebilir [17], [18].

Bilyalı dövme işlemi yüzeyde yarattığı kalıntı gerilmeler sebebiyle genellikle yorulma dayanımına etkisi üzerinden çalışılmaktadır. Ancak işlemin malzemelerin aşınma dayanımına etkisi üzerine literatürde yeterince çalışmaya rastlanmamaktadır. Buradan hareketle bu çalışmada bilyalı dövme ve nitrüleme işleminin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği iki farklı şiddette bilyalı dövme işlemine ve nitrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerde meydana gelen değişiklikler mikroyapı, sertlik ve aşınma dayanımı açısından incelenmiştir.

II. Materyal ve Method

Çalışmada bilyalı dövme ve nitrüleme işlemlerinin etkisini belirlemek amacıyla altlık malzeme olarak düşük alaşımlı AISI 4140 çeliği belirlenmiştir. AISI 4140 çeliğinin bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi iki farklı şiddette (geleneksel bilyalı dövme:CSP, aşırı bilyalı dövme:SSP) uygulanmıştır. Hava basınçlı SP işlemleri S2000’in 15 cm nozul mesafesi ve 90° nozul açısına sahip kapalı hazneli ekipmanında 3 mm çapındaki bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrüleme işlemi 500 V potansiyel altında, 5 mbar vakum basınçta gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yüzey işlemlerine ait diğer parametreler Tablo 2 ve 3’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 4140 çeliğinin kimyasal bileşimi.

% C	% Cr	% Mn	% Mo	% P	% Si	% S
0.41	0.9	0.9	0.15	≤0.0035	0.25	≤0.04

Tablo 2. Bilyalı dövme parametreleri.

	Almen şiddeti	Küresel bilya	Yüzey kaplama (%)	Hava basıncı	Dövme süresi (s)
CSP	13A	S230	200	30	10
SSP	29A	S230	200	60	15

Tablo 3. Plazma nitrasyon işlem parametreleri.

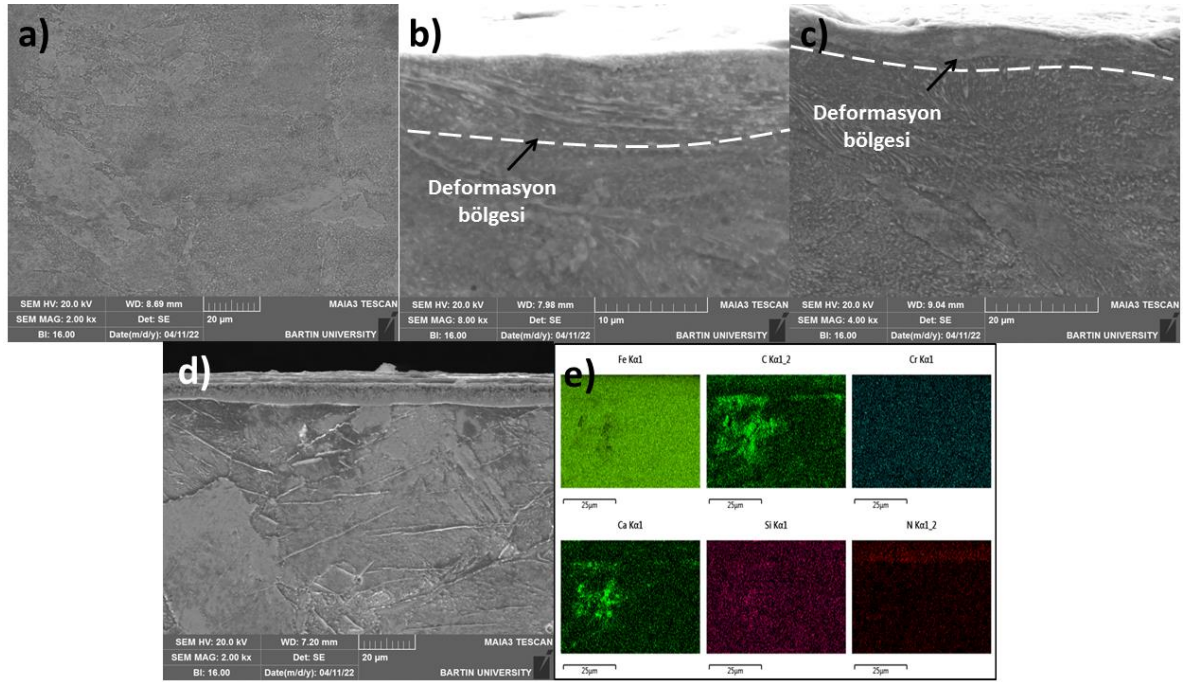
	Sıcaklık (°C)	Süre (h)	H ₂	N ₂	Vakum basıncı (mbar)	Plazma voltajı (V)
PN	520	12	%75	%25	5	500

Bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işlemlerinden sonra numuneler 10x10x3 mm boyutlarında kesilerek bakalit kalıplara alınmıştır. Numuneler 60-2500 mesh zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve elmas pasta ile parlatılmıştır. %2’lik Nital solüsyonu ile dağlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri TESCAN MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında alınmıştır. Test numunelerinin faz karakterizasyonu için 20° ila 80° açı aralığında, 1.541 Å dalga boyuna sahip bir Cu K α radyasyon kaynağına sahip Rigaku X-ışını difraktometresi (DMAX 2200) kullanılmıştır. Kesitten alınan sertlik değerleri QNESS Q10 M mikrosertlik cihazında 200 g yük altında belirlenmiştir.

Numunelerin aşınma testleri, TURKYUS POD&HT&WT ball-on-disk aşınma cihazında kuru kayma koşulları altında yapılmıştır. Testlerde aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmıştır. Testler 5, 10 ve 15 N yükler altında 0.02 m/sn kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri 5.5 mm’lik bir lineer hat üstünde toplam 144 m kayma mesafesinde yapılmıştır. Aşınma kayıpları HUVITZ 5800 3D optik profilometre cihazında belirlenmiştir. Tüm testler sonuçlarının doğrulanması adına en az 3 kez tekrar edilmiştir.

III. Bulgular ve Değerlendirme

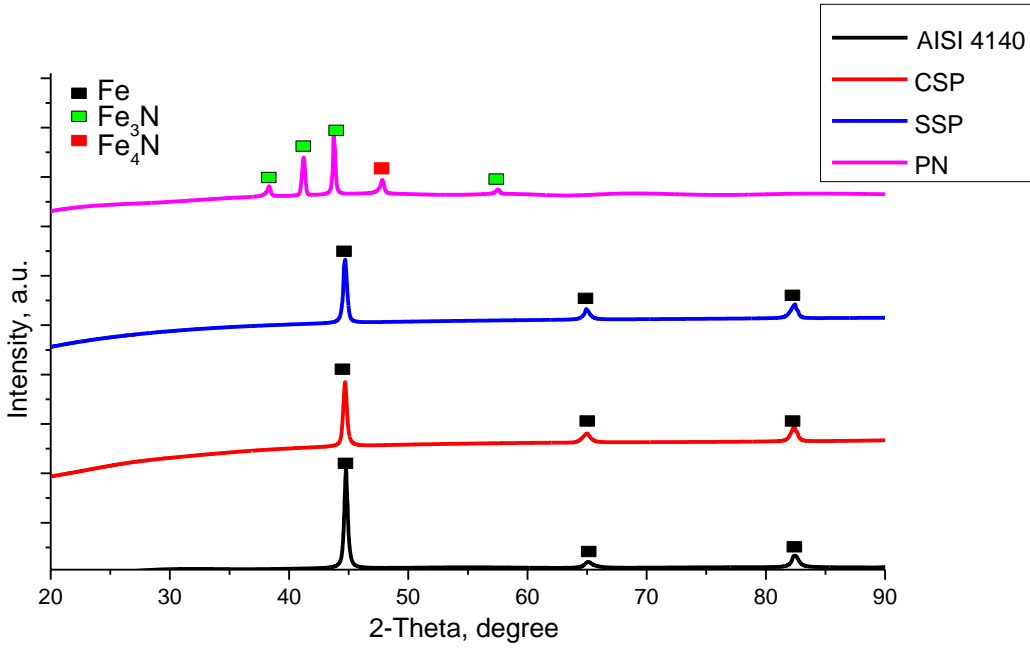
AISI 4140, CSP, SSP ve plazma nitrürlenmiş numunelere ait SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinde (Şekil 1a) homojen bir tane ve tane sınırı yapısından bahsetmek mümkündür. CSP (Şekil 1b) numunesinde ise uygulanan işleme bağlı olarak yüzeye yakın bölgelerde homojenliğin kaybolduğu yüzeye yakın bölgelerde deformasyonun varlığı görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi yüzeye çarpan bilya taneleri yüzeye yakın bölgelerde şiddetli plastik deformasyon oluşturmuştur. Plastik deformasyona bağlı olarak dislokasyon hareketleri ve ikizlenme sonucunda tane yapısı değişmiştir. SSP (Şekil 1c) numunesinde de benzer şekilde yüzey kısımlarda bilyalı dövmenin etkisi kendini belli ederken çekirdeğe doğru ilerledikçe AISI 4140 çeliğinin kendi mikroyapısını koruduğu bölgeler görülmektedir. Dövme şiddetinin artması deforme olan kısmın kalınlığını arttırmıştır. Plazma nitrürleme uygulanmış PN (Şekil 1d) numunesinde ise numunenin üstünde ortalama 5-6 µm kalınlığında farklı bir tabaka söz konusudur. EDS analizinde (Şekil 1e) de görüleceği üzere kimyasal kompozisyondaki değişimin de etkisiyle rahatça kendini belli eden bu tabakanın nitrür tabakası olduğunu söylemek mümkündür. Nitür tabakasının varlığının bir diğer ispatı da Şekil 2’de verilen XRD analizidir. PN numunesinde tespit edilen demir nitür fazları SEM görüntüsünde görülen tabakanın nitrür tabakası olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan numunelere ait SEM mikroyapı görüntüleri: a) AISI 4140, b) CSP, c) SSP, d) PN, e) PN-EDS analizi.

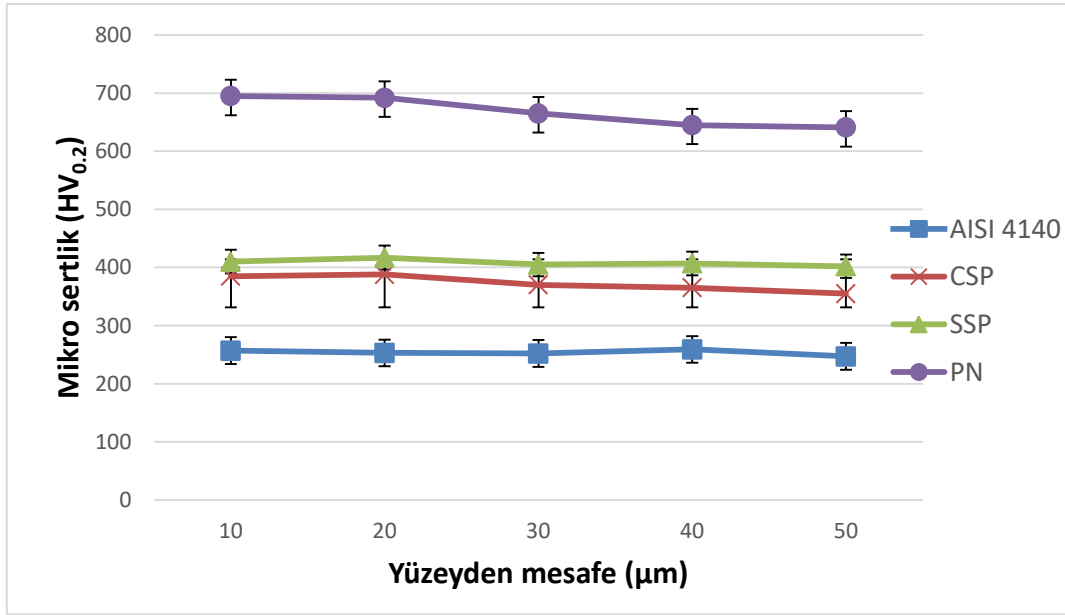
Şekil 2’de İşlem görmemiş (UN), bilyalı dövülmüş (CSP), aşırı bilyalı dövülmüş (SSP) ve plazma nitrürlenmiş (PN) numunelere ait XRD kırınım desenleri ve belirlenen fazlar verilmiştir. AISI 4140 çeliği ve tüm bilyalı dövme numuneleri için üç ana kırınım tepe noktası tespit edilmiştir. Bu pik noktalarının Fe fazı ile uyumlu olduğu yapılan taramalar ile belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemleri sonrasında farklı bir kırınım noktası tespit edilmemiştir. Bu herhangi bir kimyasal bileşim değişikliği olmaması sebebiyle normaldir. Ayrıca faz değişiminin meydana gelmediğini de göstermektedir [12], [14]. Ancak belki farklılık olarak bahsetmek gerekirse bilyalı dövme işleminden sonra pik şiddetlerinin azaldığından bahsetmek mümkündür. Bu yüzeye yakın kısımlarda meydana gelen plastik deformasyona atfedilebilir. Aşırı plastik deformasyon bu kısımlarda tane boyutunun azalmasına sebep olmuştur. Tane boyutunun değişmesi, yüzeyde meydana gelen kalıntı gerilmeler ve plastik deformasyona bağlı olarak oluşan kafes distorsiyonu sebebiyle XRD pik yoğunluklarında ve genişliğinde değişim meydana gelmektedir [5], [6], [19]. Bunun dışında plazma nitrasyon işlemi uygulanan numunede farklı açılarda kırınım noktaları tespit edilmiştir. Farklı açılarda kırınım noktalarının oluşması yapıda bir faz değişimini ya da kimyasal bileşim değişimini işaret eder. PN numunesinde, uygulanan plazma nitrürleme işlemine bağlı olarak yüzeye yakın bölgelerde yeni fazlar

oluşturmuştur. XRD analizi de yüzeye yakın bölgelerden bilgi verdiği için Fe fazına ait pikler PN numunesinde görülmemiştir [4], [18]. PN numunesinde belirlenen piklerin Fe_3N ve Fe_4N fazları ile uyumlu olduğu yine taramalar ile tespit edilmiştir.



Şekil 2. AISI 4140, Bilyalı dövülmüş (CSP), Aşırı bilyalı dövülmüş (SSP) ve Plazma nitrürleşmiş (PN) numunelere ait XRD grafiği.

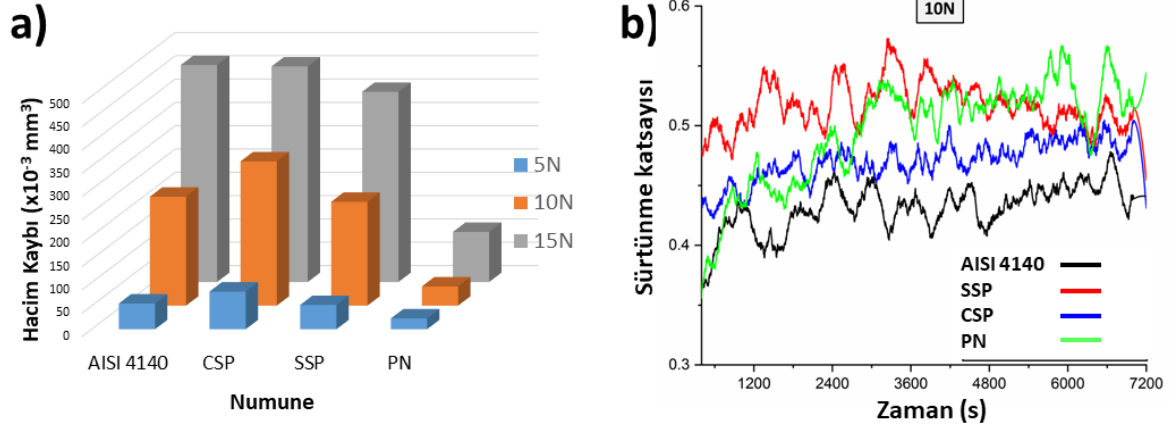
Numunelerin yüzeyden merkeze doğru mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimi grafiği Şekil 3'de verilmiştir. Bilyalı dövme, bir tür soğuk iş sertleştirme işlemidir [1]. Bilyalı dövme işleminden sonra matrisin yüzeyi plastik bir deformasyona uğramış ve sertleştirilmiş bir yüzey tabakası oluşmuştur. Bilyalı dövme yapılmayan numunelerin sertliklerinde derinlik artışı ile belirgin bir değişimin olmadığı ve ortalama sertliğin $250 HV_{0.2}$ civarında olduğu şekilden de görülmektedir. Şekil 3'te AISI 4140 çeliğinin yüzey sertliğinin farklı bilyalı dövme şiddetleri altında önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi Almen şiddeti sırasıyla A13 ve A29 olduğunda numunelerin ortalama yüzey sertlikleri 390 ve $410 HV_{0.2}$ 'ye ulaşmaktadır. İşlem görmemiş numuneye göre %50 den fazla bir mikrosertlik artışından bahsetmek mümkündür. Sonuçlar, bilyalı dövme şiddeti ne kadar yüksek olursa numunenin yüzey sertliğinin o kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Sertlikteki artışın nedeni bilyalı dövmenin neden olduğu yüzeydeki plastik deformasyondur ve bu da yüzeye yakın tanelerin boyutunda küçülmeye neden olur. Bilyalı dövme işlemi sebebiyle şiddetli plastik deformasyon oluşur. Plastik deformasyona bağlı olarak dislokasyon hareketleri ve ikizlenme sonrası alt tane oluşumu söz konusudur ve deformasyon yoğunluğu ile orantılı olarak tane incilmesi de artmaktadır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda deformasyon sertleşmesine uğramış bir tabaka oluşur [19]. Farklı dövme şiddetlerinde mikrosertliğin malzeme yüzeyinden matrisin iç kısmına doğru giderek azaldığı şekilden görülmektedir. Bu, bilyalı dövme işleminin yüzeyden iç kısma doğru etkisini yavaş yavaş kaybettiğini göstermektedir. Yüzeydeki mikrosertlik ölçümleri (Vickers $HV_{0.2}$), nitrürleme sonrası sertlikte önemli bir artış göstermektedir. Plazma nitrürleme işlemi ile malzeme sertliğinin $700 HV_{0.2}$ 'ye kadar arttığı görülmektedir ve bu artış, numune yüzeyinde sert demir nitrürlerin oluşumuna atfedilebilir [17], [20]. Ek olarak, nitrürleşmiş numunelerin daha derin bölgelerde de mikrosertlik profillerinin yüksek sertlik değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum için iki sebep gösterilebilir. Birincisi nitrür tabakası kalınlığı çok daha düşük olsa da azotun difüzyon bölgesi boyunca sertlik değerlerinin yüksek seyretmesidir [21]. İkinci sebep ise plazma nitrasyon işleminin aynı zamanda bir plazma yaşlandırma etkisi göstererek de numune yüzeyine yakın bölgelerde sertlik artışı sağlamasıdır [22].



Şekil 3. Yüzeyden merkeze doğru kesitten alınan mikro sertlik değerleri.

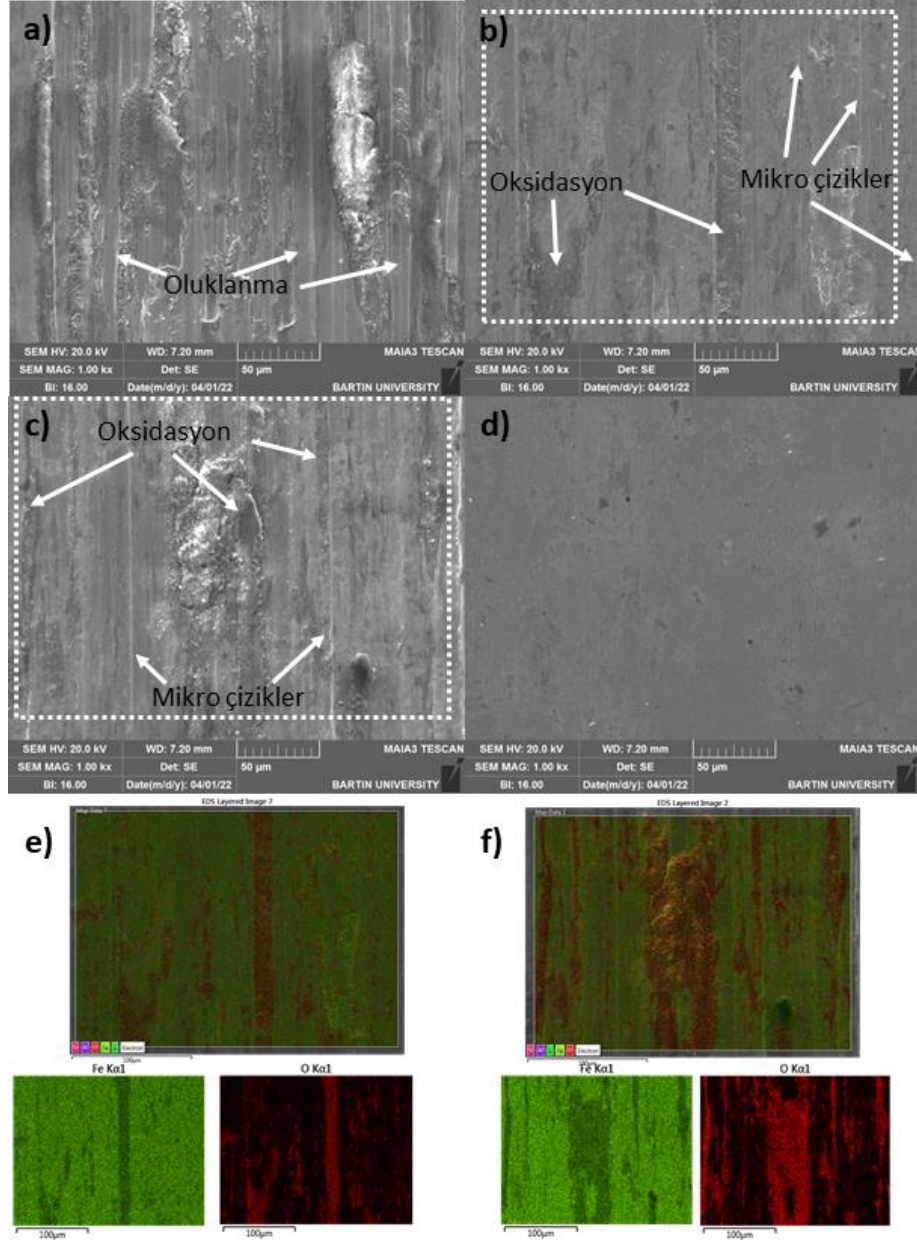
Numunelerin aşınma dirençleri farklı yükler altında kuru kayma aşınma koşullarında test edilmiştir. Testler sonrasında meydana gelen hacim kaybı değerleri Şekil 4a'da verilmiştir. Öncelikle yük açısından değerlendirmek gerekirse tüm numunelerde aşınma testinde uygulanan yükün artması ile hacim kaybı değerlerinin arttığı söylenebilir. Bu sonuç çoğunlukla beklenen bir durumdur. Çünkü aşındırıcı uç üzerine uygulanan yükün artması, ucun karşı yüzeyi daha fazla etkilemesine sebep olur. Aşınmaya çalışan parçalarda malzeme kaybı iki farklı yükün meydana getirdiği kuvvet ile meydana gelir. Bunlar normal kuvvet ve kesme kuvveti olarak sıralanabilir. Normal kuvvet batıcı ucun üzerine uygulanan yükü aşınan parçaya iletmesi ile meydana gelirken kesme kuvveti aşınan parça ve aşındırıcı ucun birbirine göre nispi hareketi sonucunda meydana gelir. Aşınma testi sırasında uygulanan yük batıcı ucun numune yüzeyine daha fazla penetre olmasını sağlar. Bu sırada devam eden nispi harekete bağlı olarak kesme kuvvetleri numune yüzeyinden malzeme ayrılmasını sağlar. Bu sebeple test sırasında uygulanan yükün 5 N'dan 10 ve 15 N'a artırılması ile birlikte malzeme kayıplarında artış meydana gelmiştir. Bunun dışında numunelere uygulanan yüzey işlemlerine göre meydana gelen hacim kayıpları değerlendirildiğinde aşınma dayanımının uygulanan yüzey işlemlerine bağlı olarak arttığını söylemek mümkündür. Aşınma kayıpları grafiğine bakıldığında düşük yüklerde bilyalı dövme işleminden sonra aşınma kayıplarının işlem görmemiş numuneye göre biraz arttığı görülebilir. Ancak yükteki artışla beraber bu durumun tam tersine döndüğü, yani aşınma dayanımının bilyalı dövme işlemi ile arttığını söylemek mümkündür. Burada bilyalı dövme işleminin yüzey sertliğinin artması sayesinde sağladığı fayda yanında yüzeyde oluşturduğu pürüzlenmenin de dezavantajından bahsetmek gerekir [23]. Bir malzemenin aşınma dayanımını arttırmak için başvurulması gereken en öncelikli yollardan birisi malzemenin yüzey sertliğini arttırmak olduğunu söylemek hiç de zor değildir. Ancak sertlik artışı sağlanırken yüzey özelliklerinde meydana gelebilecek diğer değişikliklerin de hesaba katılması gerekir. Örneğin yüzeydeki sağlanan sertlik artışı aynı zamanda aşırı kırılğan bir yapı meydana getirirse bu aşınma dayanımını arttırmak yerine tam tersine bir etkiye bulunabilir [24], [25]. Ya da bilyalı dövme gibi bir yüzey modifikasyon işleminin yüzeyde oluşturduğu pürüzlenme sebebiyle sertlikteki artışa rağmen yaratabileceği olumsuz etkinin de bilinmesi gerekir [26]. Bilyalı dövme işlemi sertliği arttırması sebebiyle aşınma dayanımını arttırıcı yönde etki eder. Ancak yüzeyde meydana gelen pürüzlülük aşınma dayanımında olumsuz etkiye sebep olur. Çünkü aşınma sırasında yüzeydeki yüksek pürüzlülük sebebiyle batıcı uç daha küçük bir alan tarafından taşınır. Yani batıcı uç ile malzeme arasındaki temas alanı daha küçüktür. Bu da aynı zamanda daha yüksek temas basıncı anlamına gelir. Daha yüksek temas basıncı sebebiyle malzemenin aslında daha yüksek bir yük ile aşındırılmasına sebep olur. Sonuç olarak şunu söylemek mümkündür bilyalı dövme işleminin düşük yüklerde aşınma kayıplarının daha yüksek çıkması yüzeydeki pürüzlenme ile ilişkilendirilebilir. Ancak artan yük ile beraber pürüzlüğün dezavantajına karşı sertlikteki artışında sağladığı avantaj daha baskın

hale gelerek aşınma kayıplarının azalmasını sağlamıştır. Aşırı bilyalı dövmede ise sertlik değerlerinin daha yüksek olması sebebiyle yukarıda bahsedilen durumla karşılaşılma ve her koşulda daha iyi aşınma dayanımı elde edilmiştir. Dikkat edilirse en düşük aşınma kayıpları plazma nitrasyon işlemi uygulanmış numunelerde görülmüştür. Buna sebep olarak XRD analizinde de verilen Fe_xN_y gibi demir nitrit fazları gösterilebilir. Oluşan bu fazlar daha yüksek yüzey sertliği sağlamış ve buna bağlı olarak da aşınma dayanımı artmıştır. Ayrıca bilyalı dövme işlemlerinde görülen yüzey pürüzlenmesi gibi bir negatif durum da söz konusu olmadığı için en yüksek aşınma dayanımı tüm yüklerde nitrürlenmiş numunelerde görülmüştür. Şekil 4b'de 10 N yük altında yapılan testlere ait sürtünme katsayısı eğrileri verilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı işlem görmemiş numunede görülürken bunu SSP numunesi takip etmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı değerleri CSP ve PN numunelerinde görülmüştür.



Şekil 4.a) Kuru kayma aşınma testlerinde meydana gelen hacim kayıpları, **b)** 10 N yük altında yapılan aşınma testlerinde meydana gelen sürtünme katsayısı eğrileri.

Şekil 5'te 10 N yük altında yapılan aşınma testleri sonrasında aşınmış yüzeylerden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. İşlem görmemiş AISI 4140 numunesi yüzeyinde yüksek oranda deformasyon dikkati çekmektedir. Aşınma prosesi sırasında yüzeyden ayrılan aşınma atıkları ve bunların oluşturduğu oluklanma aşınma mekanizması baskın aşınma mekanizması olarak söylenebilir. Bunun yanında yüzeyden ayrılan atıkların yük etkisi altında yüzeye tekrar birleşmesi sonucunda meydana gelmiş yeniden sıvanmış bölgeler görülmektedir. Bilyalı dövülmüş numunede ise yüzeyin daha dayanıklı olduğu aşınma izinden de belli olmaktadır. Oluklanmanın azalması bunun yerine mikro çiziklerin oluşumu söz konusudur. Bunun dışında oksitlenmiş bölgelerden bahsetmek de mümkündür. Aşırı bilyalı dövülmüş numunede CSP numunesi ile benzer mekanizmalar bulunmaktadır. Ayrıca yüzeyin daha yumuşak bölgelerinde ayrılmış parçaların yüzeye tekrarlı yükler altında tekrar yapıştığı bölge de dikkati çekmektedir. Bu kısım zamanla oksitlenmekte bununla beraber gevrekleşmekte ve devam eden aşınma prosesi sırasında parçalanarak aşınma atıkları oluşturmaktadır. Bu atıklarda zamanla tekrar mikro çizikler oluşturmaktadır. Plazma nitrürlenmiş numune yüzeyi ise en iyi aşınma dayanımını kanıtlar şekilde neredeyse tamamen pürüzsüz bir yapıya sahiptir. En yüksek sertliğe sahip bu numunede aşındırıcı bilya ancak yüzeyde bir parlatma işlevi görerek aşınmaya sebep olmuştur. Bu sırada anlık ısı artışlarına bağlı olarak meydana gelen oksitlenmiş bölgeler yüzeyde baskın olarak bulunmaktadır.



Şekil 5. 10 N yük ile yapılan aşınma testlerinde meydana gelen aşınma izi SEM görüntüleri: **a)** AISI 4140, **b)** CSP, **c)** SSP, **d)** PN, **e)** CSP aşınma izi EDS analizi, **f)** SSP aşınma izi EDS analizi.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde yapılan farklı işlemlerin aşınma dayanımına olan etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda AISI 4140 çeliği iki farklı şiddette bilyalı dövme ve plazma nitrürleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan yüzey modifikasyonlarının malzeme yüzeyinde meydana getirdiği değişiklikler mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma dayanımı açısından incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- XRD analizlerinde plazma nitrürlenmiş numunelerde Fe_3N , Fe_4N fazları tespit edilirken bilyalı dövülmüş numunelerde herhangi bir faz değişimi meydana gelmemiştir.
- Bilyalı dövülmüş numunelerde yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen aşırı plastik deformasyon sebebiyle tane boyutu incelmeye meydan gelmiştir. Plazma nitrürleme işlemi sonucunda yüzeyde yaklaşık 5-6 µm kalınlığında bir nitrür tabakası oluşumu gözlenmiştir.

- Uygulanan yüzey işlemleri ile AISI 4140 çeliğinin yüzey sertliğinde 3 kata varan artış tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri yaklaşık 700 HV_{0.2} ile plazma nitrürlenmiş numunede görülürken bilyalı dövme işlemleri ile yaklaşık 400 HV_{0.2} sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
- Tüm aşınma yükleri altında en yüksek aşınma dayanımı plazma nitrüleme işlemi ile sağlanmıştır. Geleneksel bilyalı dövme uygulanan numunelerde aşınma testinde kullanılan yüke göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Düşük yüklerde bilyalı dövme işlemi aşınma kayıplarında artış meydana getirirken yükün artması ile birlikte bilyalı dövme işlemi aşınma dayanımına fayda sağlamıştır. Yüzeyde meydana gelen sertlik artışına rağmen bilyalı dövme işleminin beklenenden daha düşük fayda sağlaması yüzey pürüzlülüğüne atfedilmiştir. Aşırı bilyalı dövme işlemi ise tüm yükler altında daha düşük aşınma kayıpları sağlamıştır.
- En düşük sürtünme katsayısı işlem görmemiş numunede görülürken bunu aşırı bilyalı dövülmüş numune takip etmiştir. Bilyalı dövülmüş ve plazma nitrürlenmiş numuneler birbirine yakın oranlarda ve yüksek sürtünme katsayısı değerleri göstermiştir.
- İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde aşınma testlerinden sonra oluklanma ve tekrar sıvanma gibi aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Ayrıca yüksek oranda deformasyon söz konusudur. Uygulanan işleme bağlı olarak yüzey dayanımında artış sağlanmış ve buna bağlı olarak aşınmış yüzey görüntülerinde çok daha az deformasyon olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2021-FEN-CY-005).

V. KAYNAKLAR

- [1] Z. Yang, J. Zheng, K. Zhan, C. Jiang, and V. Ji, "Surface characteristic and wear resistance of S960 high-strength steel after shot peening combing with ultrasonic sprayed graphene oxide coating," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 978–989, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.124.
- [2] H. Yan, P. Zhu, Z. Chen, H. Zhang, Y. Zhang, and Y. Zhang, "Effect of shot peening on the surface properties and wear behavior of heavy-duty-axle gear steels," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 17, pp. 22–32, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.12.126.
- [3] Y. B. Bozkurt, H. Kovacı, A. F. Yetim, and A. Çelik, "Tribocorrosion properties and mechanism of a shot peened AISI 4140 low-alloy steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 440, no. April, p. 128444, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128444.
- [4] H. Xiao *et al.*, "Promoted low-temperature plasma nitriding for improving wear performance of arc-deposited ceramic coatings on Ti6Al4V alloy via shot peening pretreatment," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 19, pp. 2981–2990, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.06.067.
- [5] J. Wang, S. Qu, H. Shao, X. Hu, B. Guo, and X. Li, "Ultra-high fatigue property and fracture mechanism of modified 20CrMoH steel by gas carburizing technology combined with shot peening treatment," *Int. J. Fatigue*, vol. 165, no. May, p. 107221, 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107221.
- [6] J. Zheng *et al.*, "Surface characteristic and corrosion resistance of different plasma-sprayed coatings (Zn, Al6061 and Zn/23Al) on S960 high strength steel with subsequent micro-shot peening," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 451, no. July, p. 129046, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.129046.
- [7] X. Han, Z. Zhang, B. Wang, S. J. Thrush, G. C. Barber, and F. Qiu, "Microstructures, compressive residual stress, friction behavior, and wear mechanism of quenched and tempered shot peened medium carbon steel," *Wear*, vol. 488–489, no. 5988, p. 204131, 2022, doi: 10.1016/j.wear.2021.204131.
- [8] M. Neslušán *et al.*, "Barkhausen noise emission of AISI 304 stainless steel originating from strain induced martensite by shot peening," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 20, pp. 748–762, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.107.
- [9] T. Gundgire, T. Jokiaho, S. Santa-aho, T. Rautio, A. Järvenpää, and M. Vippola, "Comparative study of additively manufactured and reference 316 L stainless steel samples – Effect of severe shot peening on microstructure and residual stresses," *Mater. Charact.*, vol. 191, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.matchar.2022.112162.
- [10] Y. Zhang, K. Zhang, Z. Hu, T. Chen, L. Susmel, and B. Wei, "The synergetic effects of shot peening and laser-shot peening on the microstructural evolution and fatigue performance of a medium carbon steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 166, no. July 2022, p. 107246, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107246.

- [11] H. Liu, C. Jiang, M. Chen, L. Wang, and V. Ji, "Surface layer microstructures and wear properties modifications of Mg-8Gd-3Y alloy treated by shot peening," *Mater. Charact.*, vol. 158, no. June, p. 109952, 2019, doi: 10.1016/j.matchar.2019.109952.
- [12] Z. Ma *et al.*, "Improving the oxidation resistance of SIMP steel to liquid Pb-Bi eutectic by shot peening treatments," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 578, no. July 2021, p. 151910, 2022, doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151910.
- [13] S. Kikuchi, K. Minamizawa, J. Arakawa, H. Akebono, S. Takesue, and M. Hayakawa, "Combined effect of surface morphology and residual stress induced by fine particle and shot peening on the fatigue limit for carburized steels," *Int. J. Fatigue*, vol. 168, no. July 2022, p. 107441, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107441.
- [14] M. Ozturk, F. Husem, I. Karademir, E. Maleki, A. Amanov, and O. Unal, "Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding," *Vacuum*, vol. 207, no. September 2022, p. 111552, 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111552.
- [15] T. Bergelt, P. Landgraf, T. Grund, G. Bräuer, and T. Lampke, "Modelling of layer development and nitrogen distribution on different microstructures during plasma nitriding," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 447, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128813.
- [16] Q. Kang, H. Fan, X. Yang, X. An, and J. Hu, "Evolution of aluminum hydroxide film during plasma nitriding and its enhancement effect," *Mater. Lett.*, vol. 330, no. October 2022, p. 133348, 2023, doi: 10.1016/j.matlet.2022.133348.
- [17] M. Naeem *et al.*, "Improved wear resistance of AISI-1045 steel by hybrid treatment of plasma nitriding and post-oxidation," *Tribol. Int.*, vol. 175, no. June, pp. 3–13, 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107869.
- [18] Z. Han *et al.*, "Composition, microstructure, and phase evolution of 17-4PH stainless steel with a work-hardened layer in the low-temperature plasma nitriding process," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 451, no. September, p. 128950, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128950.
- [19] S. Qu, C. Duan, X. Hu, S. Jia, and X. Li, "Effect of shot peening on microstructure and contact fatigue crack growth mechanism of shaft steel," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 274, no. April, p. 125116, 2021, doi: 10.1016/j.matchemphys.2021.125116.
- [20] B. Podgornik and A. Kocijan, "Surface & Coatings Technology Improving the surface properties of additive-manufactured Inconel 625 by plasma nitriding ~," vol. 452, no. November 2022, pp. 16–19, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.129130.
- [21] A. G. Poshtahani, S. Roostaie, and M. Azadi, "Plasma nitriding effect on tribological and corrosion properties of Stellite 6 and 12 PTA weld clad hardfaced on stainless steel 410," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 11, no. February, p. 100108, 2023, doi: 10.1016/j.rsurfi.2023.100108.
- [22] I. F. Ostrovski *et al.*, "Effect of the plasma nitriding on the mechanical properties of the 18Ni300 steel obtained by selective laser melting," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 466, no. June, p. 129688, 2023, doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129688.
- [23] T. Das, A. Erdogan, B. Kursuncu, E. Maleki, and O. Unal, "Effect of severe vibratory peening on microstructural and tribological properties of hot rolled AISI 1020 mild steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 403, p. 126383, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126383.
- [24] Y. Küçük, K. M. Döleker, M. S. Gök, S. Dal, Y. Altınay, and A. Erdoğan, "Microstructure, hardness and high temperature wear characteristics of boronized Monel 400," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 436, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128277.
- [25] A. Erdogan, B. Kursuncu, A. Günen, M. Kalkandelen, and M. S. Gok, "A new approach to sintering and boriding of steels 'Boro-sintering': Formation, microstructure and wear behaviors," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 386, p. 125482, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125482.
- [26] Y. Küçük, A. Erdoğan, B. Kurşuncu, and M. S. Gök, "Effects of surface roughness and counter body variables on the dry sliding wear behavior of AISI 4140 steel based on the elastoplastic flattening model," *Surf. Topogr. Metrol. Prop.*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.1088/2051-672X/accafe.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Bilgisayarlı Görüde Öz-Denetimli Öğrenme Yöntemleri Üzerine Bir İnceleme

 Serdar ALASU^{a,*},  Muhammed Fatih TALU^a

^a Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: serdaralasu@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1201292

ÖZ

Derin öğrenme modelleri son on yılda görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, görüntü bölütleme vb. bilgisayarlı görü görevlerinde büyük başarılar elde etmelerine rağmen denetimli öğrenme yaklaşımında olan bu modellerin eğitiminde büyük miktarda etiketli veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda insanlar tarafından manuel olarak etiketlenen veriye ihtiyaç duymadan etiketsiz büyük boyutlu veriden faydalanarak geliştirilebilir görüntü temsillerini öğrenebilen öz-denetimli öğrenme yöntemlerine ilgi artmıştır. Bu çalışmada, bilgisayarla görü görevlerinde kullanılan öz denetimli öğrenme yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve öz denetimli öğrenme yöntemlerinin kategorizasyonu sağlanmıştır. İncelenen öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve görüntü bölütleme hedef görevleri için performans karşılaştırmaları sunulmuştur. Son olarak, mevcut yöntemlerdeki sorunlu hususlar tartışılmakta ve gelecek çalışmalar için potansiyel araştırma konuları önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarlı Görü, Öz-Denetimli Öğrenme, Karşılaştırmalı Öğrenme

A Review on Self-Supervised Learning Methods in Computer Vision

ABSTRACT

Although deep learning models have achieved great success in computer vision tasks such as image classification, object detection, image segmentation in the last decade, a large amount of labeled data requires in the training of these models, which are in a supervised learning approach. Therefore, in recent years, there has been an increased interest in self-supervised learning methods that can learn generalizable image representations by utilizing large-scale unlabeled data without the need for manually labeled data by humans. In this study, self-supervised learning methods used in computer vision tasks are comprehensively reviewed and categorization of self-supervised learning methods is provided. Performance comparisons of the reviewed self-supervised learning methods for image classification, object detection and image segmentation target tasks are presented. Finally, problematic issues in current methods are discussed and potential research topics are suggested for future studies.

Keywords: Computer Vision, Self-Supervised Learning, Contrastive Learning

I. GİRİŞ

Son on yılda, uzman bilgisine ihtiyaç duymadan otomatik olarak probleme özgü özneliklerin çıkarılmasını sağlayan denetimli öğrenme yaklaşımına dayalı derin öğrenme modelleri, görüntü sınıflandırma [1]–[7], nesne tespiti [8]–[11], görüntü bölütleme [12]–[16] vb. bilgisayarlı görü görevlerinde yüksek performans elde etmişlerdir. Ancak denetimli öğrenme yaklaşımını kullanan derin öğrenme modelleri ayırt edici özneliklerin çıkarılmasında, insanlar tarafından manuel olarak etiketlenen büyük miktarda veriye ihtiyaç duymaktadır [17]. Veri etiketlemeyi kolaylaştırmak için birçok etiketleme aracı [18] geliştirilmesine rağmen, etiketli verinin elde edilmesi emek yoğun, zaman alıcı ve pahalı bir işlemdir. Ayrıca medikal görüntü alanında görüntü elde etme zorluğu ve uzman bilgisi gerekliliği bu alanda etiketli veri elde etmeyi daha da zorlaştırmaktadır [19]. Tek bir insanın dakikada bir görüntü etiketlediği ve etiketleme dışında başka bir iş yapmadığı bir durumda 14 milyondan fazla görüntü ve 20 binden fazla sınıftan oluşan ImageNet [20] veri setini etiketlemesi için 26 yıldan fazla zaman gerekmektedir.

Etiketli verinin az olduğu durumlar için genel yaklaşım denetimli öğrenime dayalı transfer öğrenimdir. Transfer öğrenimi yaklaşımında, kaynak görevden öğrenilen bilgi hedef göreve aktarılmaktadır [21]. Denetimli öğrenime dayalı transfer öğrenimi, genelleştirilebilir temsillerin öğrenilebilmesi için derin öğrenme modelinin etiketli çok büyük kaynak veri setiyle eğitilmesi ve bu temsillerin az sayıda etiketli veriden oluşan hedef görevde kullanılması aşamalarından oluşmaktadır [22]. ImageNet [20] veri setiyle eğitilmiş, AlexNet [3], VGG16 [4], ResNet [5], DenseNet [7], GoogleNet [6], InceptionV3 [1] ve EfficientNet [2] derin evrimsel sinir ağı (DESA) mimarilerinin ön-eğitilmiş derin öğrenme modelleri birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. Ancak denetimli öğrenme temelli transfer öğrenimi yaklaşımında, ön-eğitim aşamasında çok büyük etiketli veriye ihtiyaç duyulmakta ve kaynak veri setinin hedef veri setinden çok farklı olduğu durumlarda kaynak görevden elde edilen temsillerin hedef görev için genelleştirilmesi problemi yaşanmaktadır [24].

Denetimli öğrenme temelli transfer öğrenimindeki bu sorunlar nedeniyle, son yıllarda etiketsiz veriden otomatik olarak elde edilen etiketlerle derin öğrenme modelleri eğitilerek genelleştirilebilir temsiller elde edebilen öz-denetimli öğrenme yaklaşımları ortaya çıkmıştır. İnternetteki etiketsiz büyük boyutlu veriden faydalanan öz-denetimli öğrenme yöntemleri denetimli öğrenme yöntemleriyle rekabet edecek sonuçlar elde etmişlerdir [25]–[30]. Öz-denetimli öğrenmede, denetim sinyali etiketsiz veriden otomatik olarak oluşturulmakta ve yardımcı görev olarak adlandırılan görevin çözümünde bu denetim sinyali kullanılarak derin öğrenme modeli eğitilmektedir. Yardımcı görev ile elde edilen ön-eğitilmiş ağ, az sayıda etiketli veriye sahip görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve görüntü tespiti vb. hedef görevlerde kullanılmaktadır. Böylece hedef görevde kullanılacak derin öğrenme modelinin ağırlıklarının rastgele değerlerle başlatılarak sıfırdan öğrenilmesi yerine, yardımcı görevle öğrenilen ağırlıklarla derin öğrenme modelinin eğitilmesi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada bilgisayarlı görü görevlerinde kullanılan öz denetimli öğrenme yöntemlerinin kapsamlı incelemesi yapılarak öz denetimli öğrenme yöntemleri kategorize edilmiştir. İncelenen öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin farklı veri setlerindeki ve görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve görüntü bölütleme hedef görevlerindeki performans karşılaştırmaları sunulmuştur. Son olarak, mevcut yöntemlerdeki sorunlu hususlar tartışılmakta ve gelecek çalışmalar için potansiyel araştırma konuları önerilmektedir.

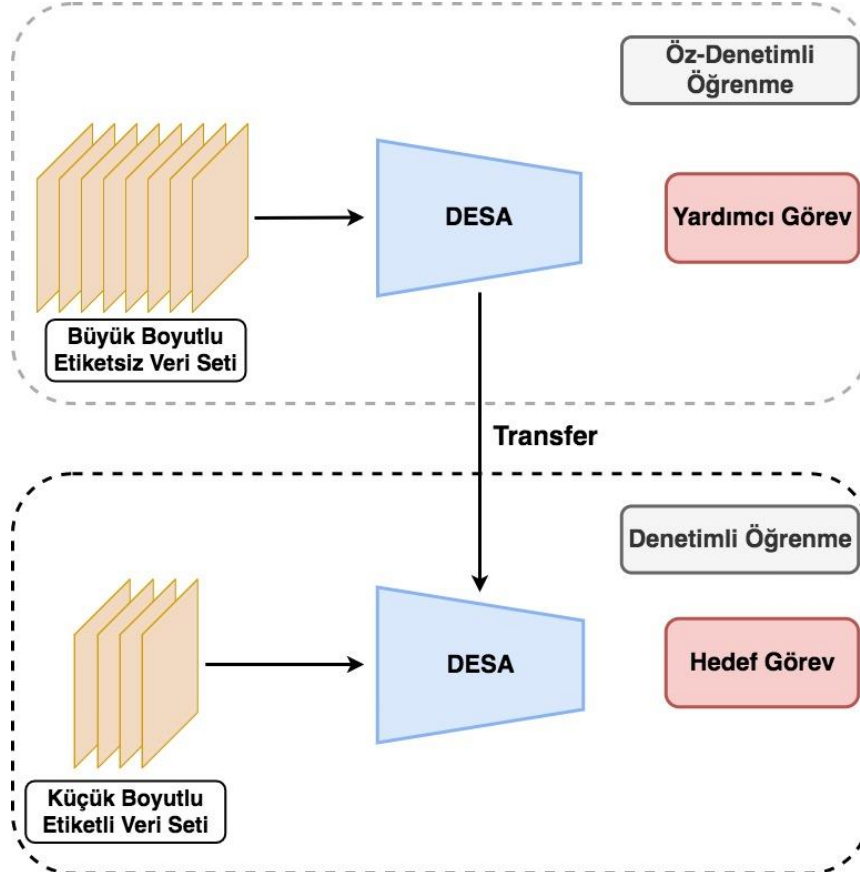
Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: II. Bölümde, öz-denetimli öğrenme yöntemleri kategorize edilerek, öz-denetimli öğrenme yöntemleri detaylı olarak anlatılmıştır. III. Bölümde öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin farklı veri setlerindeki ve farklı bilgisayarlı görü görevlerindeki performansları sunulmuştur. IV. Bölümde tartışma ve V. Bölümde ise sonuç kısmı yer almaktadır.

II. ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

Etiketli veri elde etmenin zaman alıcı, pahalı ve emek yoğun bir işlem olması ve internetteki etiketsiz büyük boyutlu verinin varlığı, araştırmacıların öz-denetimli öğrenme yaklaşımına ilgi duymalarına neden olmuştur [31]. Öz-denetimli öğrenmede, verilerin insanlar tarafından manuel olarak etiketlenmesine gerek duyulmadan, verinin kendi özellikleri kullanılarak çok büyük boyutlu veri otomatik olarak etiketlenmekte ve bu etiketler sözde etiket olarak isimlendirilmektedir. Öz-denetimli öğrenme yaklaşımı yardımcı görev ve hedef görevleri içermektedir. Gerçekte çözmek istediğimiz görüntü sınıflandırma, nesne tespiti, görüntü bölütleme vb. görevler hedef görev olarak adlandırılırken, hedef görevleri çözmeye yardımcı olan görevler yardımcı görev olarak adlandırılmaktadır [32]. Elde edilen etiketli veri, öz-denetimli öğrenme için tasarlanan yardımcı görevde eğitilerek genelleştirilebilir görüntü temsili öğrenilmektedir [33], [34]. DESA mimarilerinin çözmesi istenilen yardımcı görev ve otomatik olarak sahte etiketlerin elde edilmesi öz-denetimli öğrenmenin ön-eğitim aşamalarını oluşturmaktadır. Ön-eğitim aşamasında elde edilen genelleştirilebilir görüntü temsili, az sayıda etiketli verinin olduğu hedef göreve aktarılmaktadır. Genelleştirilebilir temsil ile hedef görevlere kolayca uyarlanabilir olması kastedilmektedir [35]. Böylece hedef görevde model ağırlıklarının rastgele atanmış değerlerle başlatılması yerine yardımcı görevde elde edilen ön-eğitimli ağı kullanılmaktadır.

Öz-Denetimli Öğrenme aşamaları:

1. Çok büyük boyutlu etiketsiz veri setinde otomatik olarak etiketlerin oluşturulması
 2. Oluşturulan sözde etiketler ile yardımcı görevde eğitilerek genelleştirilebilir görüntü temsillerin öğrenilmesi
 3. Elde edilen görüntü temsillerin, az sayıda etiketli veriye sahip hedef göreve aktarılması
- Şekil 1’de öz-denetimli öğrenme yaklaşımının genel mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 1. Öz-denetimli öğrenme yaklaşımının genel mimarisi

Denetimli öğrenme yaklaşımı görsel temsillerin çıkarılmasında insanlar tarafından manuel olarak oluşturulan etiketli veriye ihtiyaç duyarken, denetimsiz öğrenmede herhangi bir etiket bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Öz-denetimli öğrenmede ise insanlar tarafından manuel oluşturulan etiketli veri kullanılmadığından denetimsiz öğrenmenin bir alt alanı olarak görülmektedir [31], [36]. Ancak denetimsiz öğrenmede öğrenme sürecinde herhangi bir etiket bilgisine ihtiyaç duyulmazken, öz-denetimli öğrenmede verinin kendisinden otomatik olarak üretilen sahte etiketler yardımcı görevde eğitilerek öğrenme gerçekleştirilmektedir [32].

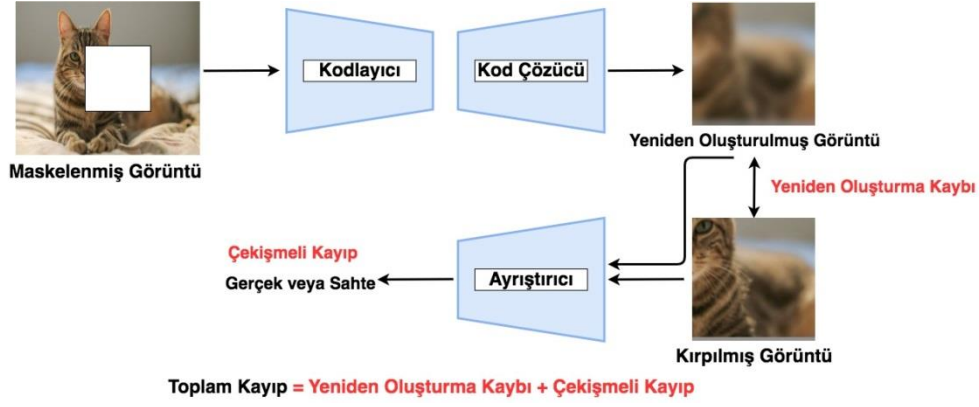
Öz-denetimli öğrenme yaklaşımını görüntü temsilinde kullanılan yardımcı göreve göre beş kategoriye ayrılabilir:

1. Yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme
2. Tahmin temelli öz-denetimli öğrenme
3. Kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme
4. Karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenme
5. Karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme

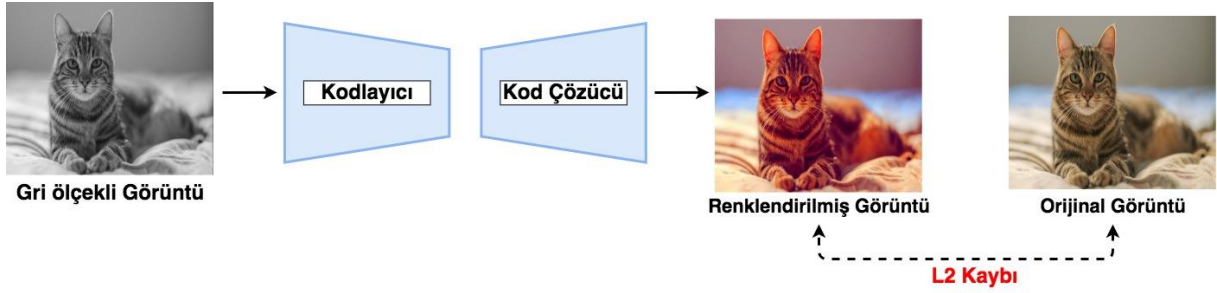
A. YENİDEN OLUŞTURMA TEMELLİ ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

Yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenmede, orijinal görüntü üzerinde değişiklik yapılarak yeni bir görüntü oluşturulmakta ve daha sonra değişiklik yapılmış görüntüyü orijinal görüntüye eşleyen bir oto kodlayıcı eğitilmektedir. Kodlayıcı-kod çözücü mimarisinin kullanıldığı oto kodlayıcılar [35], [37] yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenmenin ilk örnekleridir. Kodlayıcı ağı girdi görüntüsünü temsil vektörüne indirgerken, kod çözücü ağ ise temsil vektöründen orijinal görüntüyü yeniden oluşturmaya çalışmaktadır.

Yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının kullanım alanlarından biri maskelenmiş bir görüntü bölgesinin tahmin edilmesi problemidir. Görüntü maskeleme [38] çalışmasında görüntünün maskelenen kısmı, diğer kısımlarından faydalanılarak yeniden oluşturulmaktadır. Bu işlem ağın eğitilmesi için bir yardımcı görev olarak kullanılmaktadır. Kodlayıcı-kod çözücü ağ mimarisine sahip bir DESA, maskelenmiş bölgeleri olan çok sayıda etiketlenmemiş görüntü kullanılarak eğitilmektedir. Maskelenmiş görüntüyü girdi olarak alan kodlayıcı görüntü temsilini öğrenirken, kod çözücü görüntü temsilini kullanarak maskelenmiş bölgeyi yeniden oluşturmaktadır. Model, yeniden oluşturma kaybı ve çekişmeli kaybın birlikte kullanılmasıyla eğitilmektedir. Yeniden oluşturma kaybı (L_2), görüntünün eksik bölgesinin genel yapısının öğrenilmesini sağlarken, çekişmeli kayıp ise yeniden oluşturulan maske görüntüsünün daha gerçekçi olmasını sağlamaktadır. Bu yardımcı görevi çözebilmek için, model görüntüdeki farklı nesnelerin yapısını, renklerini ve görüntünün anlamsal özniteliklerini öğrenmek zorundadır. Şekil 2'de görüntü maskeleme problemi için yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının kullanımı gösterilmektedir.



Şekil 2. Görüntü maskeleye [38] problemi için yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımı
Yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının uygulandığı diğer bir problem görüntü renklendirme [39]. Bu problemde, girdi görüntüsü olarak gri ölçekli bir görüntü kullanılmakta ve bu görüntünün renkli versiyonu yeniden oluşturulmaya çalışılmaktadır. *Lab* renk uzayı kullanılan çalışmada, modele girdi olarak görüntünün *L* kanalı verilmekte ve model görüntünün *a* ve *b* renk kanallarını tahmin etmeye çalışmaktadır. Her pikselin doğru şekilde renklendirilebilmesi için modelin nesnelere tanınması ve ilişkili kısımların piksellerini birlikte gruplandırması gerekmektedir. Böylece model görsel temsilleri öğrenebilmektedir. Bu çalışmada, kod çözücü ağında temsilleri öğrenen kodlayıcı kısmında ise renklendirilmeyi gerçekleştiren tamamıyla evrimsel sinir ağı kullanılmıştır. Model, tahmin edilen renk ve orijinal renk arasındaki yeniden oluşturma (*L2*) kaybıyla eğitilmektedir. Yardımcı problem olarak görüntü renklendirme probleminin kullanımı Şekil 3'te gösterilmiştir.

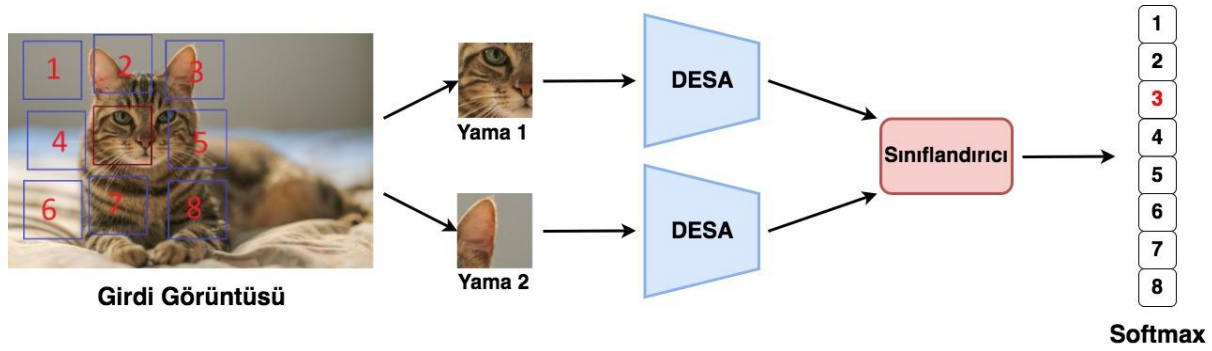


Şekil 3. Görüntü renklendirme [39] problemi için yeniden oluşturma temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımı

B. TAHMİN TEMELLİ ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

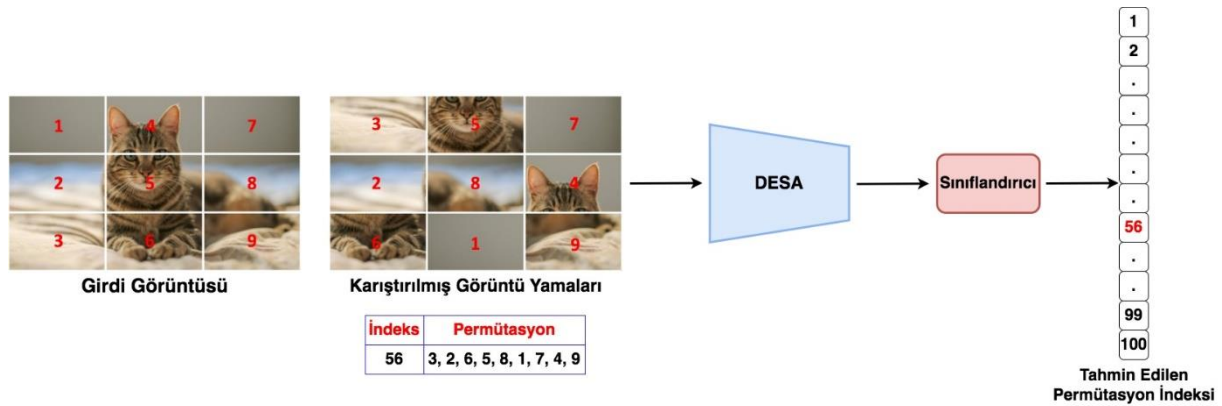
Tahmin temelli öz-denetimli öğrenmede, verilerin zengin uzamsal bilgisinden yararlanılarak etiketli veri otomatik olarak oluşturulmaktadır. Tahmin temelli yardımcı görevlerin kullanıldığı öz-denetimli öğrenme yaklaşımlarında, bir DESA otomatik olarak oluşturulan etiketli veriyi tahmin etmeye çalışarak eğitilmekte ve genelleştirilebilir görüntü temsili elde edilmeye çalışılmaktadır.

Tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının uygulandığı problemlerden ilki görece pozisyon tahminidir [40]. Bu problemde amaç, rastgele seçilen yamanın merkez yamaya göre pozisyonunu tahmin etmektir. Bunun için ilk olarak görüntüler 3x3 büyüklüğünde yamalara ayrılmaktadır. Daha sonra biri merkez yama, diğeri merkeze komşu 8 yamadan olmak üzere rastgele yama çiftleri oluşturulmaktadır. Yama çiftleri, AlexNet [3] mimarisinin omurga olarak kullanıldığı model ağırlıklarının paylaşan ikiz DESA'ya girdi olarak verilmekte ve bu iki DESA'dan elde edilen temsiller birleştirilmektedir. Birleştirilen temsiller kullanılarak rastgele seçilen yamanın merkez yamaya göre pozisyonu tahmin edilmektedir. Görüntüler yamalara ayrılırken yamalar arasında boşluk bırakılıp yama pozisyonlarında değişiklikler yapılarak hem görevin karmaşıklığı artırılmakta hem de DESA'nın basit çözümlere ulaşması engellenmektedir. Şekil 4'te görece pozisyon tahmini problemi için tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının kullanımı gösterilmektedir.



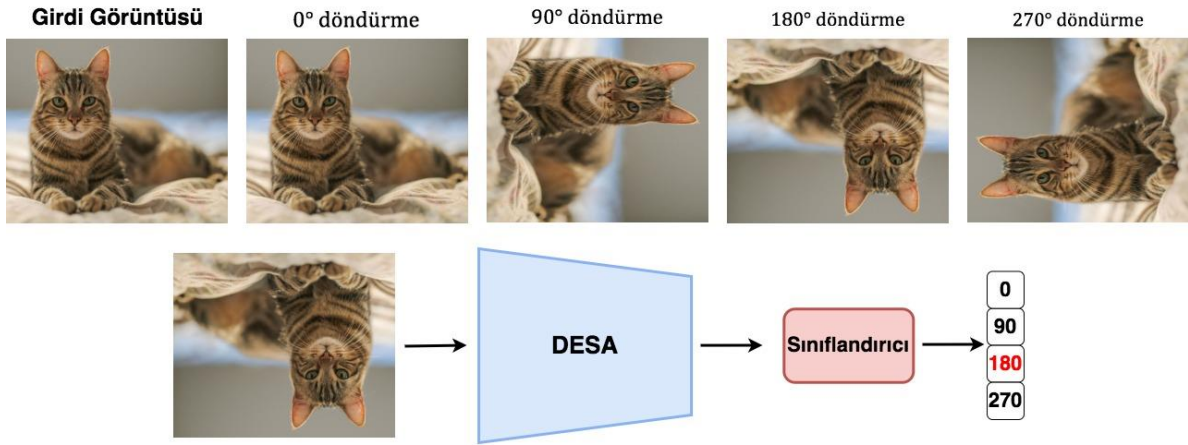
Şekil 4. Görece pozisyon tahmini [40] problemi için tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımı

Tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının kullanıldığı diğeri bir problem yapboz bulmacadır [41]. Yardımcı görev olarak yapboz bulmaca çözümünün önerildiği bu çalışmada, ilk olarak görüntü 3x3 büyüklüğünde yamalara ayrılmakta, sonrasında ise bu yamalar rastgele bir şekilde karıştırılarak yapboz bulmaca oluşturulmaktadır. Bu yamaların orijinal yerlerini bulacak şekilde DESA eğitilerek, DESA'nın nesnelere tanımayı ve nesnelere oluşturan parçaların uzamsal ilişkisini öğrenmesi istenmektedir. Görece pozisyon tahmini [40] çalışmasına benzer şekilde görüntüler yamalara ayrılırken yamalar arasında rastgele büyüklükte boşluklar bırakılarak DESA'nın basit çözümlere ulaşması engellenmektedir. Ayrıca, 9 yama için 362.880 (9!) olası permütasyon çok büyük bir çözüm uzayına neden olduğundan, bu kadar büyük bir çözüm uzayından kaçınmak için, DESA'nın eğitiminde en yüksek hamming mesafesine sahip belirli sayıda permütasyon seçilerek olası permütasyonların bir alt kümesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada yazarların Bağlamdan Bağımsız Ağ olarak adlandırdığı DESA kullanılmaktadır. Ağırlıkların paylaşıldığı Bağlam Bağımsız Ağ'da 9 yama girdi olarak kabul edilmekte ve ağın çıktıları birleştirilerek permütasyon kümesi tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 5'te yapboz bulmaca çözme problemi için tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımının kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 5. Yapboz bulmaca çözme [41] problemi için tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımı

Bir diğeri tahmin temelli öz-denetimli öğrenme yönteminde yardımcı görev olarak bir görüntüye uygulanan döndürülme açısının tahmini kullanılmaktadır [42]. Görüntülerin 0°, 90°, 180°, 270° açılar ile döndürülmesiyle elde edilen görüntüler ve görüntülerin döndürülme açıları etiketli veri setini oluşturmaktadır. Bu veri seti oluşturulduktan sonra, dört sınıflı bir sınıflandırma görevine benzer şekilde, bir DESA giriş görüntüsünün döndürüldüğü açının tahminiyle eğitilmektedir. Doğru tahmin için görüntüdeki nesnelere yüksek seviyede anlaşılması gerekmektedir. Şekil 6'da görüntü döndürme açısı tahmin probleminin öz-denetimli çözümü gösterilmektedir.

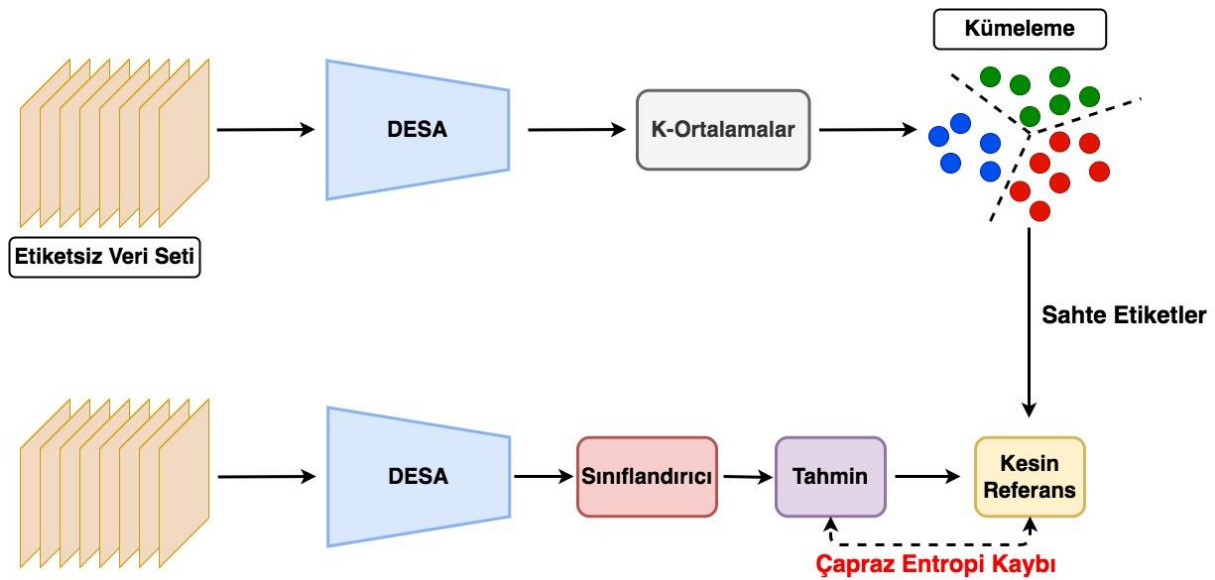


Şekil 6. Döndürme açısı tahmini probleminin öz-denetimli çözümü [42]

C. KÜMELEME TEMELLİ ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

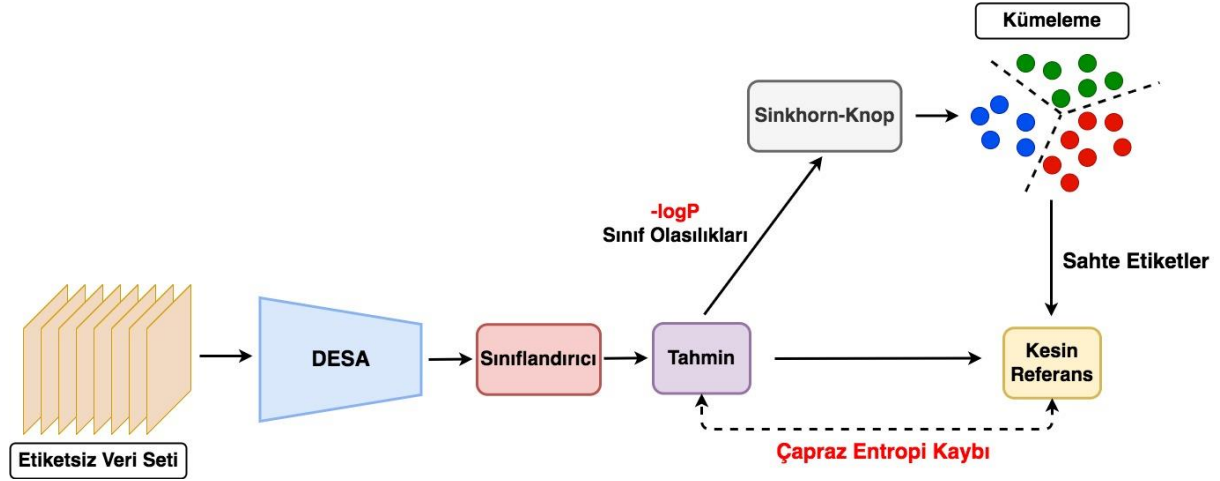
Kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde, DESA'nın eğitiminde kullanılacak etiketler, görüntü temsillerinin kümelenmesiyle otomatik olarak elde edilmektedir. Kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yöntemleri çevrim dışı ve çevrim içi yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Çevrim dışı yöntemlerde, veri kümesindeki tüm görüntüler DESA'dan en az bir defa geçirilerek elde edilen temsiller kümelenmektedir. Bu nedenle büyük boyutlu veri setleri için çevrim dışı yöntemler yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duymaktadırlar. Çevrim içi yöntemlerde ise kümeleme ve öğrenme eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir.

Kümelemeyi öz-denetimli öğrenmede kullanan ilk yöntemlerden biri derin kümeleme [43] çalışmasıdır. Bu çalışmada, birbirini takip eden kümeleme ve öğrenme aşamalarından oluşan bir çevrim dışı kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yaklaşımı kullanılmaktadır. Derin kümeleme [43] yönteminde, görüntüler bir DESA'dan geçirilmekte ve elde edilen temsillere temel bileşenler analizi, beyazlatma ve L2 normalizasyon uygulanmaktadır. Boyutu indirgenen ve normalize edilen temsiller daha sonra k-ortalamar yöntemiyle kümelenerek sözde etiketler oluşturulmakta ve bu etiketler kullanılarak DESA'nın eğitimi gerçekleştirilmektedir. Bu iki aşama tekrarlı bir şekilde çalıştırılarak genelleştirilebilir görüntü temsilleri elde edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 7'de derin kümeleme [43] yaklaşımı gösterilmektedir.



Şekil 7. Çevrim dışı kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme: Derin Kümeleme [43]

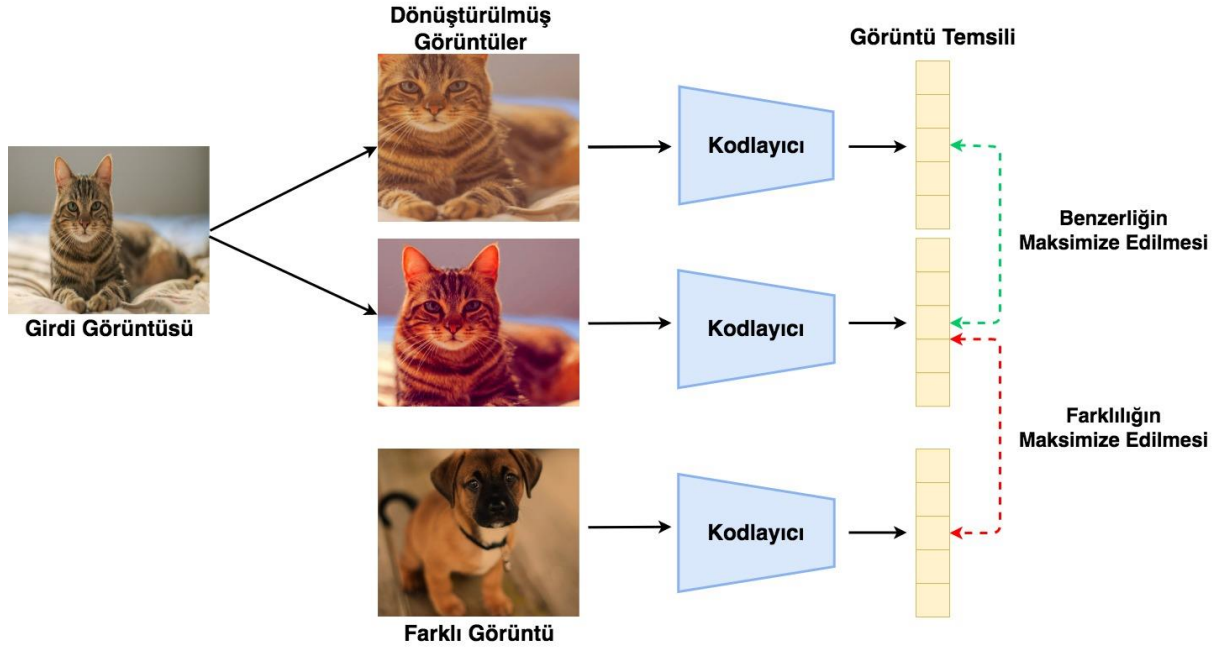
Kümeleme ve öğrenmenin eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği SeLA [44], çevrim içi kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yöntemidir. Bu yöntemde kümeleme ve öğrenme için tek bir amaç fonksiyonu kullanılırken, kümeleme en uygun aktarım problemlerinin çözümünde kullanılan Sinkhorn-Knopp algoritmasıyla [45] gerçekleştirilmektedir. Sinkhorn-Knopp algoritması [45], DESA'nın tahmininden elde edilen sınıf olasılıklarının oluşturduğu maliyet matrisi ve her kümeye eşit sayıda görüntü atanması kısıtını kullanarak kümelemeyi gerçekleştirmektedir. Şekil 8'de SeLA [44] yönteminin gösterimi yapılmıştır.



Şekil 8. Çevrim içi kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme: SeLA [44]

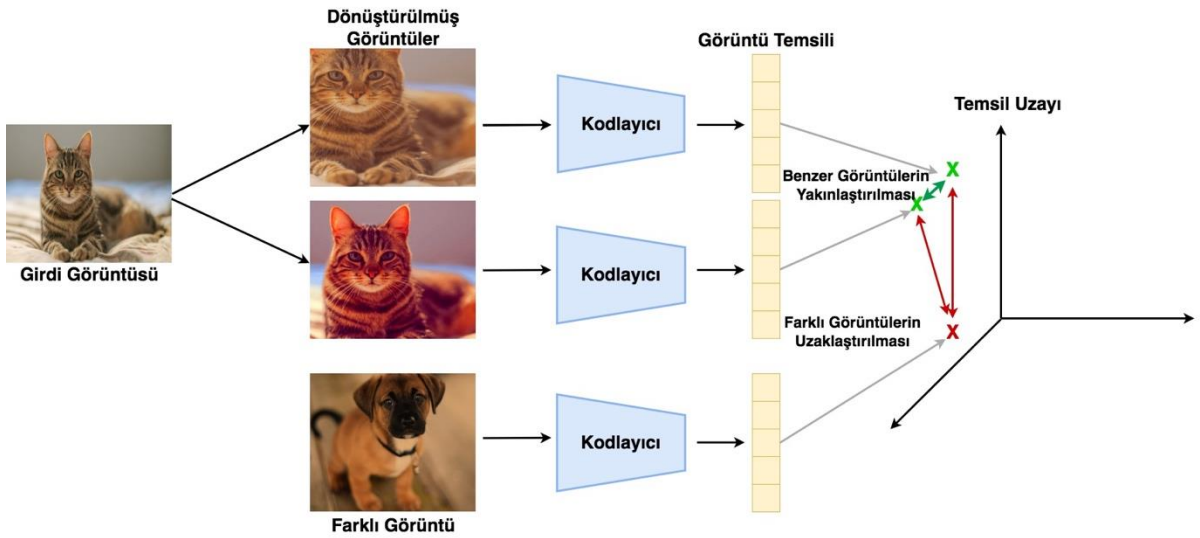
D. KARŞILAŞTIRMALI ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenmeyle ön-egitilen DESA'ların denetimli öğrenmeyle ön-egitilen DESA'lar ile rekabet edecek kabiliyette olduğu görülmüştür [25], [26], [30]. Bu yaklaşımda, DESA, benzer görüntü çiftlerini farklı görüntü çiftlerinden ayırt edebilecek genelleştirilebilir görüntü temsillerini üretmek için eğitilmektedir. Görüntü benzerliği, görüntülerin farklı dönüşümlerinin kullanımıyla otomatik bir şekilde tanımlanmaktadır. Aynı görüntüden farklı görüntü dönüşümleriyle oluşturulan birbirine benzer görüntü çiftleri *pozitif çift* ve farklı görüntülerin dönüşümlerinin oluşturduğu birbirinden farklı görüntü çiftleri ise *negatif çift* olarak adlandırılmaktadır. Karşılaştırmalı öğrenmeye benzer şekilde, insan beyni bir nesneyi diğerinden ayırt etmek için nesnenin tüm bilgisine ihtiyaç duymadan sadece ayırt edici özelliklerini tutmaktadır [46]. Şekil 9'da karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenme yaklaşımının genel gösterimi yapılmıştır.



Şekil 9. Karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenme yaklaşımının genel gösterimi

Karşılaştırma temelli öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde DESA'nın eğitiminde karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır. Karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu, temsil uzayında aynı görüntünün farklı dönüşümlerinden oluşturulan pozitif çiftlerin temsillerini birbirine yaklaştırmaya zorlarken, farklı görüntü çiftlerinin dönüşümlerinden oluşturulan negatif çiftlerin temsillerini ise birbirinden uzaklaştırmaya zorlamaktadır. Şekil 10'da karşılaştırmalı kayıp fonksiyonun çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 10. Karşılaştırmalı kayıp fonksiyonun çalışma prensibinin gösterimi

x orijinal görüntüyü, x^+ , x orijinal görüntüsüne benzeyen pozitif örneği, x^- , x orijinal görüntüsünden farklı negatif örneği, $\text{sim}()$ görüntü benzerlik fonksiyonunu göstermek üzere, karşılaştırmalı öğrenmede amaç $\text{sim}(f(x), f(x^+)) \gg \text{sim}(f(x), f(x^-))$ şartını sağlayan f kodlayıcısını öğrenmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır. Denetimli öğrenme uygulamalarında [47]–[49] kullanılmaya başlayan karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu, öz-denetimli öğrenmede ilk olarak InstDisc [50] çalışmasında kullanılmıştır. Her bir

görüntü örneğinin ayrı bir sınıf olarak ele alındığı InstDisc [50] çalışmasında, DESA sınıfları ayırt etmek için eğitilmektedir. Her görüntünün ayrı bir sınıf olarak kullanılması softmax fonksiyonun hesaplanmasında zorluk yaratacağı için, bu çalışmada softmax fonksiyonuna yakınsayabilen çok sınıflı sınıflandırma problemini ikili sınıflandırma problemine dönüştüren NCE [51] kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır.

NCE [51] kayıp fonksiyonun çok sayıda negatif çift içeren bir varyantı olan InfoNCE [52] karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde sıklıkla kullanılan diğer bir kayıp fonksiyonudur. z_i, z^+ aynı görüntünün çoğaltılmış görüntülerinin temsilleri, z_i, z^- farklı görüntülerin çoğaltılmış görüntülerinin temsilleri, τ sıcaklık derecesi (softmax sonucu elde edilen olasılık dağılımındaki rastgeleliğin kontrolü için kullanılan bir parametre) ve $N - 1$ negatif çift sayısını göstermek üzere, Eş. 1'de InfoNCE [52] kayıp fonksiyonu verilmiştir.

$$\mathcal{L}_{InfoNCE} = -\log \frac{\exp(\text{sim}(z_i, z^+)/\tau)}{\exp(\text{sim}(z_i, z^+)/\tau) + \sum_{j=1}^{N-1} \exp(\text{sim}(z_i, z_j^-)/\tau)} \quad (1)$$

Görüntü çiftlerinin temsillerinin arasındaki yakınlığın ölçümünde benzerlik metrikleri kullanılmaktadır. İki vektör arasındaki kosinüs açısını hesaplayan kosinüs benzerliği görüntü temsillerinin benzerliğinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Çoğaltılmış görüntülerin temsilleri z_i ve z_j olmak üzere, görüntü temsilleri arasındaki kosinüs benzerliği $s_{i,j}$ Eş. 2'de verilmiştir.

$$s_{i,j} = \frac{z_i^T z_j}{(\|z_i\| \|z_j\|)} \quad (2)$$

InfoNCE [52] kayıp fonksiyonu karşılıklı bilgi tahmircisi olarak da kullanılmaktadır. Pozitif çiftin görüntülerinin temsilleri arasındaki karşılıklı bilgiyi maksimize ederek genelleştirilebilir temsil öğrenilmeye çalışılmaktadır. Ancak yüksek boyutlu rastgele değişkenler arasındaki karşılıklı bilginin hesaplanma zorluğu nedeniyle InfoNCE [52] amaç fonksiyonu kullanılarak rastgele değişkenler arasındaki karşılıklı bilginin alt sınırı tahmin edilmektedir. Eş. 3'te de görüleceği üzere pozitif çifti oluşturan görüntü temsillerinin arasındaki karşılıklı bilginin alt sınırının maksimize edilebilmesi için InfoNCE [52] kayıp fonksiyonunun minimize edilmesine ve negatif çift sayısının artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle karşılaştırmalı öğrenmede genelleştirilebilir görüntü temsillerinin elde edilmesinde çok sayıda negatif çifte ihtiyaç duyulmaktadır.

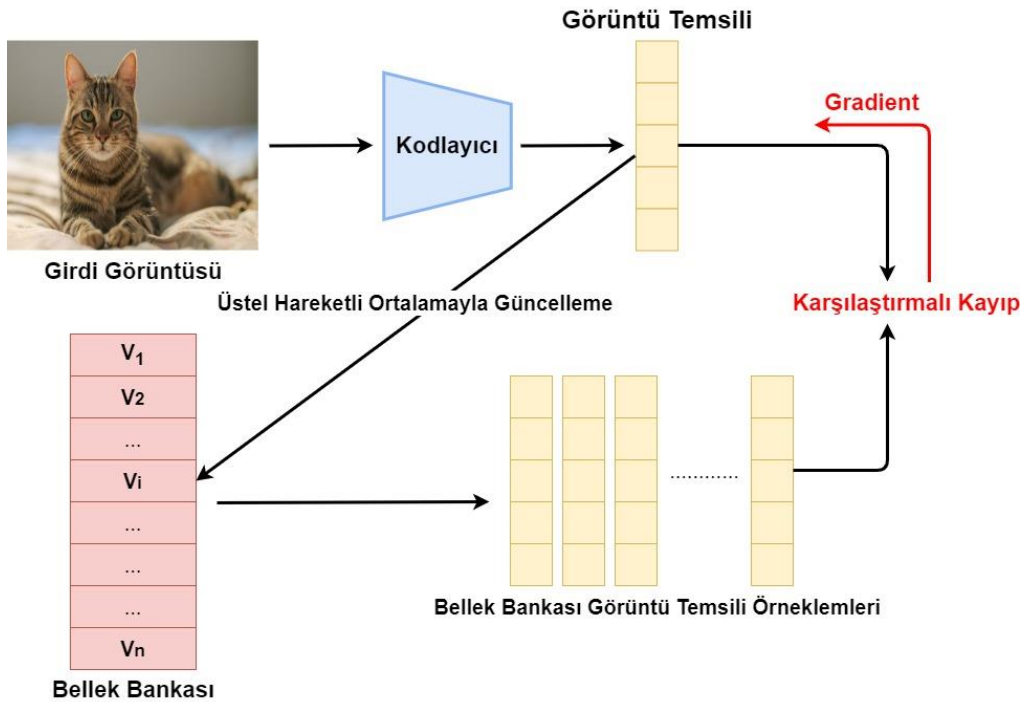
$$I(z_i, z^+) \geq \log(N) - \mathcal{L}_{InfoNCE} \quad (3)$$

Karşılaştırma temelli öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin ilklerinden olan Exemplar [53] yönteminde, veri setinden rastgele seçilen örnek için görüntü sınıfı oluşturmakta ve bir DESA bu örnekleri ayırt edecek şekilde eğitilmektedir. Bu çalışmada etiketsiz veri setinden rastgele seçilen görüntülerden 32x32 büyüklüğünde kırılan görüntü yamalarına anlamsal olarak bir değişikliğe neden olmayacak şekilde çok sayıda rastgele görüntü dönüşümleri uygulanarak elde edilen görüntülerle vekil sınıflar oluşturulmaktadır. Böylece etiketsiz veri setindeki her bir görüntü için bir sınıf olacak şekilde etiketli bir veri seti oluşturulmaktadır. Bir DESA, oluşturulan vekil sınıfları ayırt edebilmek için eğitilerek, genelleştirilebilir görüntü temsilleri elde edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 11'de seçilen görüntü yaması ve bu görüntü yamasına uygulanan rastgele dönüşümlerle oluşturulan vekil sınıfa ait görüntüler gösterilmiştir.



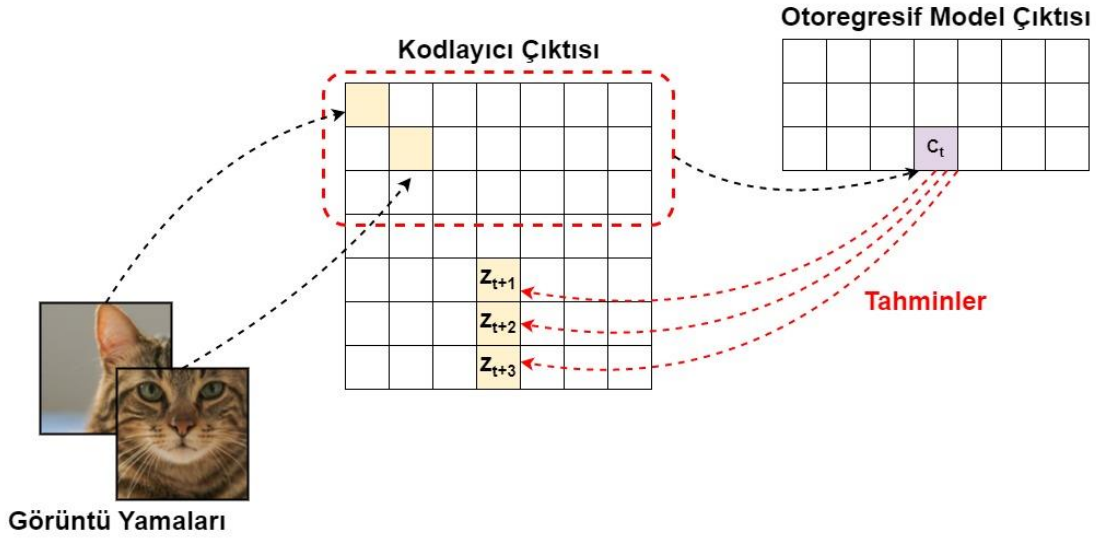
Şekil 11. Exemplar [53] yöntemi için oluşturulmuş vekil sınıf örneği

Exemplar [53] çalışmasında veri setinden rastgele seçilen görüntüler için bir vekil sınıfın oluşturulması seçilen görüntü sayısı arttıkça softmax fonksiyonun hesaplanmasında zorluk yaşanmasına neden olmaktadır. InstDisc [50] çalışması softmax fonksiyonuna yakınsayabilen çok sınıflı sınıflandırma problemini ikili sınıflandırma problemine dönüştüren NCE [51] karşılaştırmalı kayıp fonksiyonunu kullanarak Exemplar [53] yöntemindeki soruna çözüm getirmiştir. Bu çalışmada, her bir görüntü örneği ayrı bir sınıf olarak ele alınmaktadır ve DESA her bir görüntü örneğinin sınıflarını ayırt etmek için eğitilmektedir. Böylece görsel olarak benzer görüntülerin birbirine yakın ve görsel olarak farklı görüntülerin birbirinden uzak olarak haritalandığı görüntü temsil uzayı elde edilmeye çalışılmaktadır. Parametrik softmax fonksiyonunda bir sınıf prototipi olarak hizmet eden ağırlık vektörleri kullanılırken, bu çalışmada görüntü temsillerinin doğrudan karşılaştırıldığı parametrik-olmayan bir softmax fonksiyonu önerilmektedir. Ayrıca bu çalışmada görüntü temsilleri her iterasyonda yeniden hesaplanmak yerine bellek bankasında tutulmakta ve bellek bankasındaki temsiller her iterasyonda üstel hareketli ortalamayla güncellenmektedir. Şekil 12’de InstDisc [50] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 12. InstDisc [50] yönteminin gösterimi

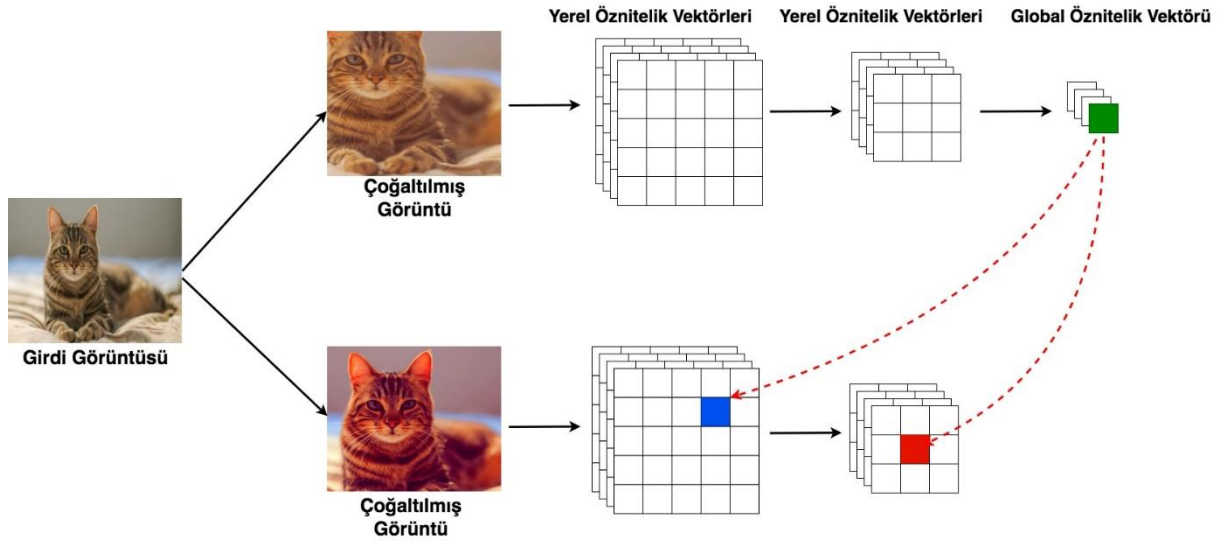
Karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerinden bir diğeri olan CPC [52], ardışık veri olarak modellenebilen ses, metin, görüntü, video vb. farklı veri tiplerine uygulanabilen bir yöntemdir. Bu çalışmada görüntü temsili öğrenilmesinde, bir sistemin mevcut ve geçmiş durumlardan faydalanılarak gelecekteki durumları tahmin etmeye çalışan tahmine dayalı kodlama ve karşılaştırmalı öğrenme beraber kullanılmaktadır. CPC [52] yönteminde, bir görüntü ardışık görüntü yamaları olarak görülmekte ve görüntüler için zaman çizelgesi görüntünün sol üstü geçmiş ve sağ altıda gelecek olacak şekilde ele alınmaktadır. Bu yöntemde ilk olarak, 256x256 boyutundaki giriş görüntüsünden 64x64 boyutunda ve komşu yamaların 32 pikseli üst üste gelecek şekilde yamalar kırılmakta ve bu yamalar bir kodlayıcıdan geçirilerek bu yamalara ait temsiller elde edilmektedir. Yamalara ait görüntü temsilleri elde edildikten sonra, PixelCNN [54] otoregresif modeliyle geçmişteki yama temsillerinden faydalanılarak içerik vektörleri oluşturulmakta ve içerik vektörleri gelecekteki yamaların temsillerinin tahmininde kullanılmaktadır. C içerik vektörü ve Z_{t+k} tahmin edilecek yamanın temsili olmak üzere CPC [52] C ve Z_{t+k} arasındaki karşılıklı bilgiyi ($I(C; Z_{t+k})$) maksimize etmeye çalışarak görüntü temsili öğrenmeye çalışmaktadır. Ancak yüksek boyutlu rastgele değişkenler arasındaki karşılıklı bilginin hesaplanma zorluğu nedeniyle, karşılıklı bilginin alt sınırının tahmininde InfoNCE [52] kullanılmaktadır. Bu kayıp fonksiyonunda içerik vektörü kullanılarak elde edilen tahmini yama temsili ve gelecekteki yamanın temsili pozitif çifti oluştururken, negatif çift diğer görüntülerin yama temsilleri ile oluşturulmaktadır. InfoNCE kayıp fonksiyonu, kodlayıcı ve otoregresif modeli gelecekteki yama temsillerine benzer tahmin yapmaya zorlamaktadır. CPC [52] mimarisinde yapılan değişiklikle sadece görüntü verisine uygulanan az etiketli veride başarılı olan CPC-v2 [55] geliştirilmiştir. CPC-v2 [55] mimarisinde daha derin ve geniş kodlayıcı kullanılmaktadır. Şekil 13'te CPC [52] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 13. CPC [52] yönteminin gösterimi

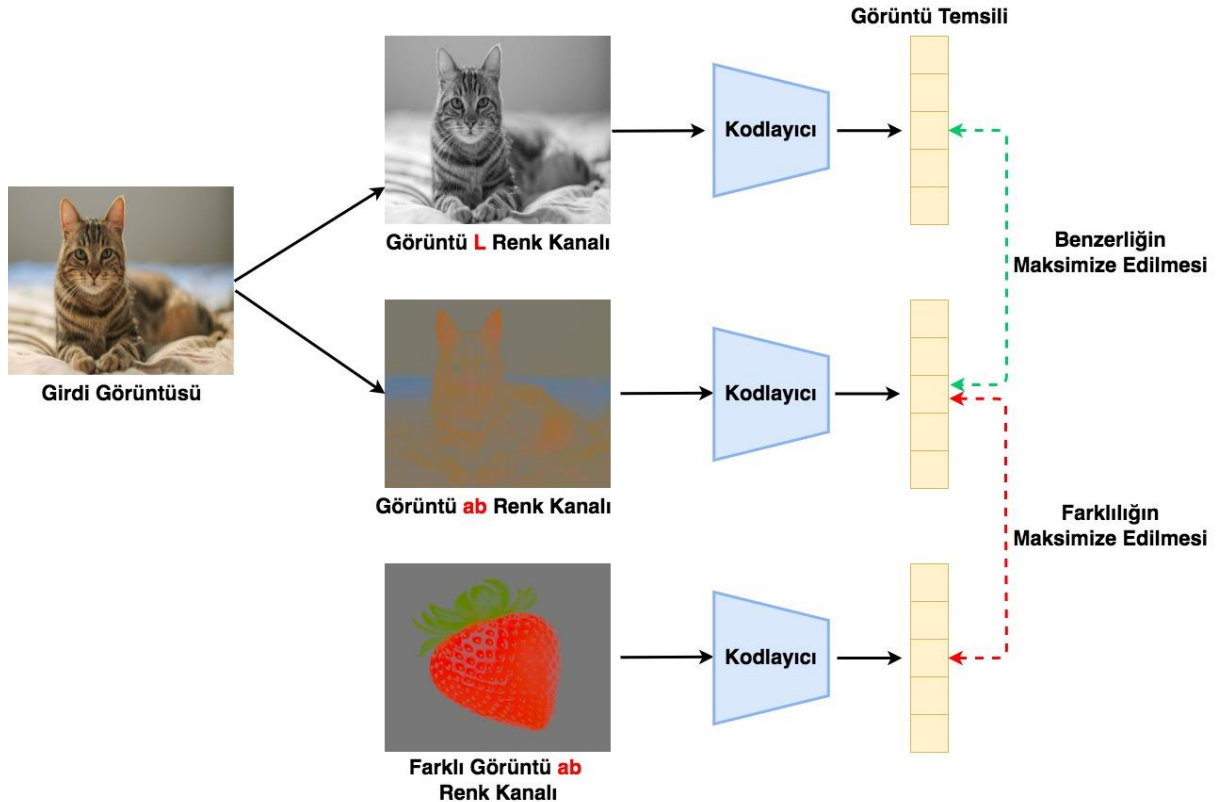
DIM [56] yönteminde CPC [52] yöntemine benzer şekilde InfoNCE [52] kayıp fonksiyonu kullanılarak global ve yerel öznitelikler arasındaki karşılıklı bilgi maksimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada görüntü temsili global ve yerel öznitelik çiftinin aynı görüntüden olup olmadığını sınıflandırarak öğrenilmektedir. Bir görüntünün kodlayıcıdan geçirilerek elde edilen son çıktı global öznitelikleri oluştururken, yerel öznitelikler ise kodlayıcının ara katmanların çıktılarından oluşmaktadır. Karşılaştırmalı kayıp fonksiyonunda, aynı görüntüye ait global ve yerel öznitelikler pozitif çifti oluştururken, farklı görüntülere ait global ve yerel öznitelikler negatif çifti oluşturmaktadır. Bu kayıp fonksiyonunun minimize edilebilmesi için global öznitelik vektörünün tüm farklı yerel bölgelerden bilgiyi yakalaması gerekmektedir. DIM [56] yönteminden farklı olarak, daha güçlü kodlayıcı ve girdi görüntüsünün çoğaltılmış görünümünden oluşturulan pozitif çiftleri kullanan AMDIM [57] geliştirilmiştir. Bu yöntemde, bir görüntünün çoğaltılmış görünümünün çoklu ölçeklerinden çıkarılan yerel öznitelikler ve çoğaltılmış görünümünün global öznitelikleri arasındaki

karşılıklı bilgiyi maksimize etmeye çalışarak görüntü temsili öğrenilmektedir. Şekil 14'te AMDIM [57] yöntemi gösterilmiştir.



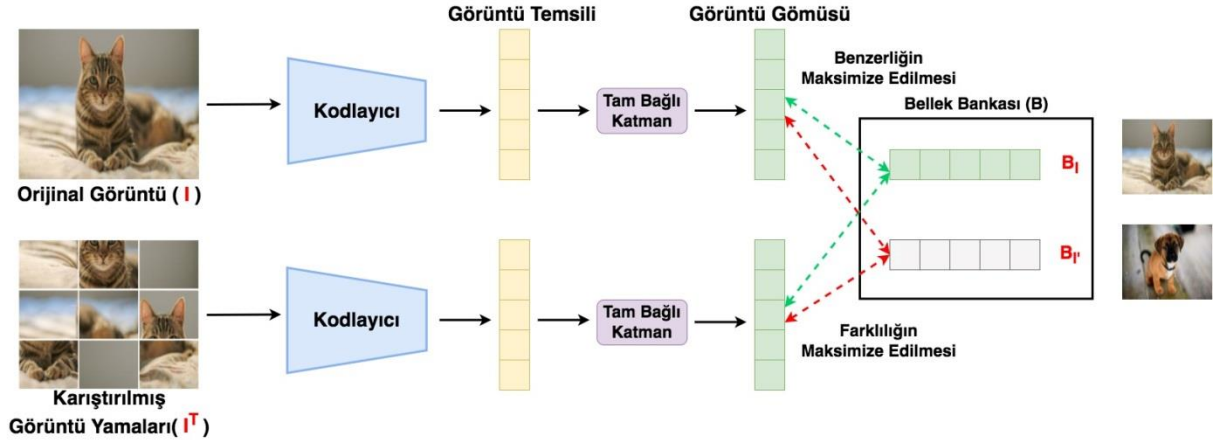
Şekil 14. AMDIM [57] yönteminin gösterimi

Diğer karşılaştırmalı öz-denetimli öğrenme yöntemlerinden farklı bir şekilde pozitif ve negatif çiftlerin oluşturulduğu CMC [58] yönteminde, bir görüntünün farklı görünüşlerinin temsilleri arasında karşılıklı bilgiyi maksimize etmeye çalışarak genelleştirilebilir görüntü temsili elde edilmeye çalışılmaktadır. Pozitif çift, aynı görüntünün farklı görünüşleriyle oluşturulurken, negatif çift ise farklı görüntülerin görünüşleriyle oluşturulmaktadır. Örneğin *Lab* renk uzayındaki bir görüntünün *L* kanalı, aynı görüntünün *ab* kanalı ile pozitif çifti oluştururken başka bir görüntünün *ab* kanalı ile negatif çifti oluşturmaktadır. Ayrıca bu çalışmada ikiden fazla görünüm kullanılarak öğrenilen görüntü temsili kalitesinin arttığı gösterilmiştir. Şekil 15'te CMC [58] yöntemi gösterilmiştir.



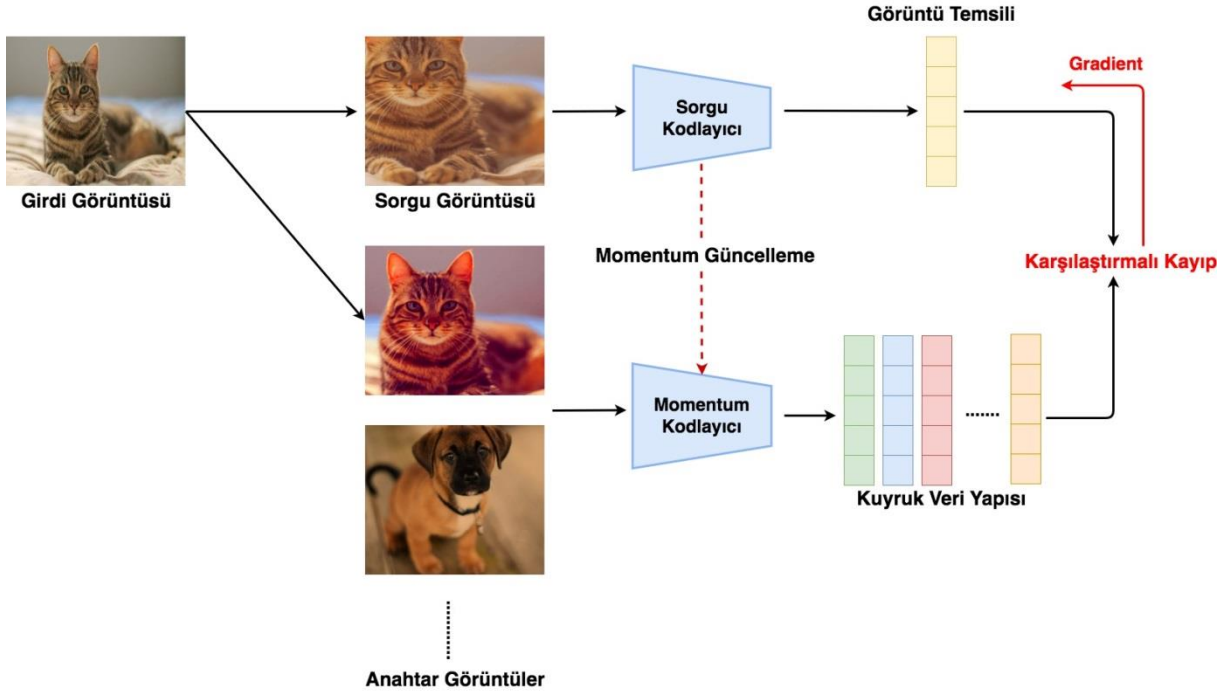
Şekil 15. CMC [58] yönteminin gösterimi

Karşılaştırmalı öğrenme ve yardımcı görevin birlikte kullanıldığı PIRL [59] yöntemi, yardımcı görevden bağımsız geliştirilebilir görüntü temsilleri elde edebilmektedir. Yardımcı görevler kullanarak görüntü temsillerini öğrenmeye çalışılan öz-denetimli öğrenme yöntemleri, yardımcı göreve özgü görüntü temsillerini öğrendikleri için bu görüntü temsillerinin hedef görevler için geliştirilmesinde problemler yaşanmaktadır. PIRL [59] yönteminde pozitif çift, orijinal görüntü ve görüntünün döndürülmesiyle veya yapboz bulmacaya dönüştürülmesiyle elde edilen görüntüyle oluşturulurken, negatif çift ise orijinal görüntü ve veri setindeki farklı görüntüler kullanılarak oluşturulmaktadır. Görüntüye uygulanan bu dönüşüm görüntüde anlamsal değişikliğe neden olmayacağı için pozitif çiftlerden elde edilen temsiller temsil uzayında birbirine yakın olmaya zorlanırken negatif çiftler ise birbirinden uzak olmaya zorlanmaktadır. Karşılaştırmalı öğrenmede geliştirilebilir temsillerin elde edilebilmesi için çok sayıda negatif örnek gerektiğinden, bu çalışma negatif örneklerin temsillerini InstDisc [50] çalışmasına benzer şekilde çok sayıda negatif çift tutabilen bellek bankasında tutmaktadır. Her mini-yığında hesaplanan görüntü temsillerinin bellek bankasındaki karşılıkları üstel hareketli ortalamayla güncellenmektedir. Şekil 16'da PIRL [59] yöntemi gösterilmiştir.



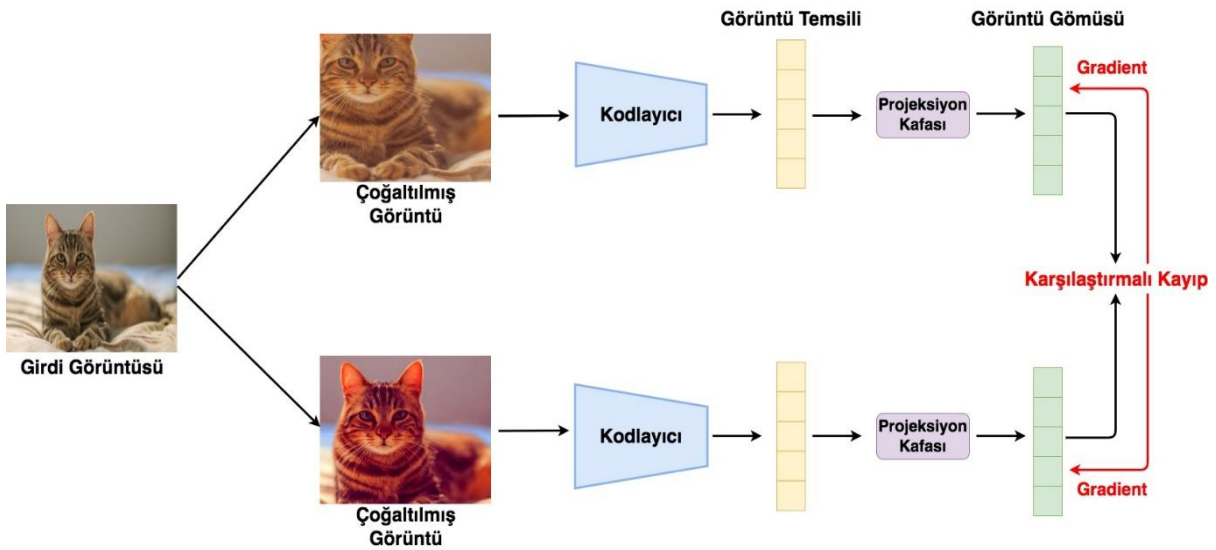
Şekil 16. PIRL [59] yönteminin gösterimi

İki kodlayıcıya sahip karşılaştırmalı öğrenme yöntemi olan MoCO [26] yönteminde negatif örnekler için kuyruk veri yapısı kullanılmaktadır. Bu yöntemde, her girdi görüntüsüne iki farklı veri çoğaltma uygulanarak sorgu ve anahtar olarak adlandırılan iki dönüştürülmüş görüntü oluşturulmaktadır. Sorgu ve anahtar görüntüleri, sorgu kodlayıcı ve momentum kodlayıcı olarak adlandırılan iki farklı kodlayıcıdan geçirilerek görüntü temsilleri elde edilmektedir. MoCO [26] yönteminde karşılaştırmalı kayıp fonksiyonun çok sayıda negatif örnek gereksinimi için negatif örnekler PIRL [59] ve InstDisc [50] yöntemlerinde kullanılan bellek bankasından farklı olarak kuyruk veri yapısında tutulmaktadır. Kuyruk veri yapısında görüntü temsillerinin tutarlı olmasını sağlamak için anahtar görüntülerinin geçerli mini-yığındaki görüntü temsilleri kuyruğa eklenirken, çok önceden kuyruğa eklenmiş güncelliğini yitirmiş görüntü temsilleri kuyruktan çıkarılmaktadır. Momentum kodlayıcının ağırlıkları, sorgu kodlayıcının ağırlıklarının üstel hareketli ortalamasıyla yavaş bir şekilde güncellenerek görüntü temsillerinin tutarlı olması sağlanmaktadır. MoCO [26] yöntemine çok katmanlı algılayıcı kafası ve daha güçlü veri çoğaltma yöntemleri eklenerek MoCO-v2 [60] geliştirilmiştir. Şekil 17'de MoCO [26] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 17. MoCO [26] yönteminin gösterimi

SimCLR [25], güçlü veri çoğaltma tekniklerinin ve negatif örnekler için yüksek boyutlu yığının kullanıldığı diğer bir karşılaştırmalı öğrenme yöntemidir. Negatif örnekler, PIRL [59] ve InstDisc [50] yöntemlerinde bellek bankasında, MoCO [26] yönteminde kuyruk veri yapısında tutulmaktayken, SimCLR [25] yönteminde ise negatif örnekler yüksek hesaplama maliyetine rağmen büyük boyutlu yığına tutulmaktadır. Bu yöntemde ilk olarak yığındaki her bir görüntüye rastgele seçilen iki farklı veri çoğaltma tekniği uygulanarak pozitif çiftler oluşturulmaktadır. Bu dönüştürülmüş görüntüler kodlayıcı ve doğrusal olmayan projeksiyon kafasından geçirilerek gömü vektörleri elde edilmektedir. Karşılaştırmalı kayıp fonksiyonu, pozitif çiftlerden elde edilen gömü vektörlerini gömü uzayında birbirine yakın olmaya zorlarken yığındaki diğer dönüştürülmüş görüntülerin gömü vektörlerinden ise uzak olmaya zorlamaktadır. SimCLR [25] mimarisinde değişiklikler yapılarak SimCLR-v2 [61] geliştirilmiştir. SimCLR-v2 [61] mimarisinde daha büyük kodlayıcı, daha büyük yığın ve daha derin doğrusal olmayan projeksiyon kafası kullanılmaktadır. Şekil 18’de SimCLR [25] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 18. SimCLR [25] yönteminin gösterimi

SwAV [30], çevrim içi kümelemeyi ve karşılaştırmalı öğrenmeyi birlikte kullanarak görüntü temsillerini öğrenmeye çalışan bir yöntemdir. Çevrim dışı kümelemede sahte etiketlerin elde edilmesi için tüm veri seti üzerinden en az bir defa geçilmesi gerekliken, çevrim içi kümelemede mini-yığındaki görüntüler kümelenebilir ve DESA'nın eğitimi için gerekli olan sözde etiketler elde edilmektedir. Böylece kümeleme ve öğrenme faaliyetleri için tek bir kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu yöntemin amacı, diğer karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerindeki gibi sadece pozitif çiftleri birbirine yakınlaştırmak değil, aynı zamanda birbirine benzeyen diğer tüm görüntü temsillerinin bir araya gelmesini sağlamaktır. Bu çalışmada veri setini özetleyen ve her biri bir kümeye karşılık gelen eğitilebilir prototip vektörleri kullanılmaktadır. Diğer karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerine benzer şekilde girdi olarak görüntülerin veri çoğaltmayla oluşturulmuş görünüşleri alınmaktadır. Oluşturulan görünüşlerden elde edilen temsillerin prototip vektörlerine atanması ile kümeleme gerçekleştirilmektedir. Kümeleme işlemi en uygun aktarım problemlerinin çözümünde kullanılan Sinkhorn-Knopp algoritmasıyla [45] gerçekleştirilmektedir. Sinkhorn-Knopp algoritması [45], temsil vektörlerinin oluşturduğu matris ile prototip vektörlerinin oluşturduğu matrisin çarpımıyla elde edilen maliyet matrisi ve her kümeye eşit sayıda görüntü temsili atanması kısıtını kullanarak kümelemeyi gerçekleştirmektedir. Görüntü temsillerinin kümelere atanmasıyla DESA'nın eğitimi için gerekli sözde etiketler elde edilmiştir. Bu yöntem, pozitif çiftlerin aynı kümeye atanmasını zorlamak için kayıp fonksiyonunda bu iki görünüm temsillerinin sözde etiketlerini yer değiştirmektedir. Bir görüntünün görünüşlerinin temsilleri z_s , z_t ve temsillerin sözde etiketleri q_s , q_t olmak üzere, görüntü temsillerinin kayıp fonksiyonu $\ell(z_t, q_s)$, $\ell(z_s, q_t)$ ve toplam kayıp $L(z_t, z_s)$ olarak gösterilmektedir. Eş. 4'te de görüleceği üzere bir görünümün temsillerinin sözde etiketleri diğer görünümün temsilleri kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmaktadır.

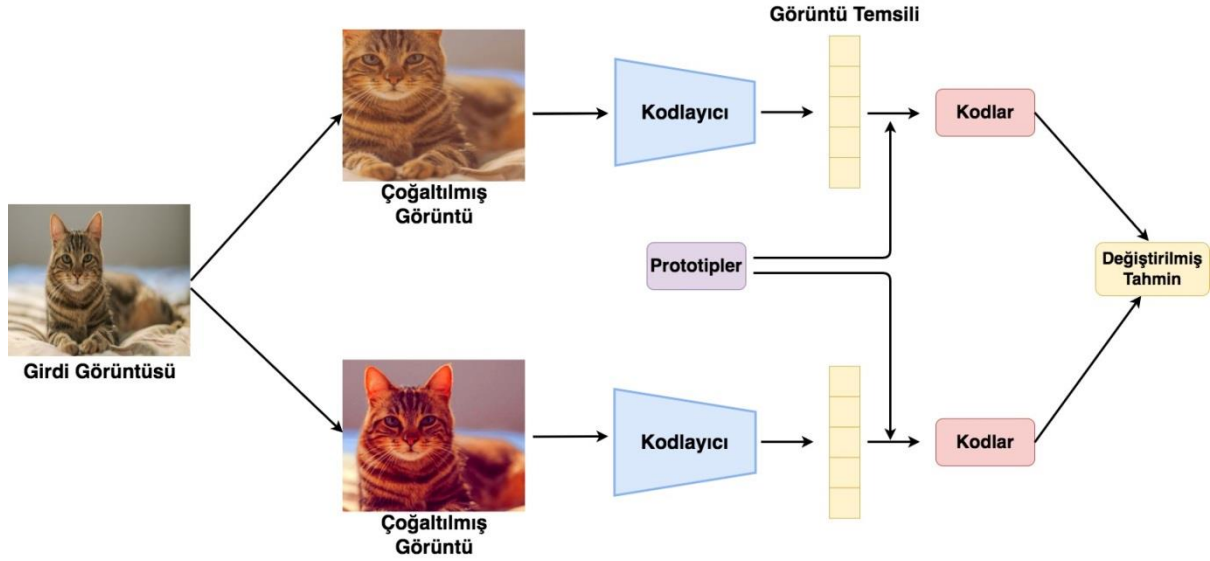
$$L(z_t, z_s) = \ell(z_t, q_s) + \ell(z_s, q_t)$$

$$\ell(z_t, q_s) = - \sum_k q_s^{(k)} \log p_t^{(k)} \quad (4)$$

Diğer karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerinde doğrudan görüntü temsilleri karşılaştırılırken, Eş. 5'te görüleceği üzere bu yöntemde görüntü temsilleri prototip vektörleri ile karşılaştırılmaktadır. k küme sayısını, τ sıcaklık derecesini ve $p_t^{(k)}$ ise görüntü temsillerinin k . küme prototipine benzeme olasılığını göstermektedir.

$$p_t^{(k)} = \frac{\exp\left(\frac{1}{\tau} z_t^T c_k\right)}{\sum_{k'} \exp\left(\frac{1}{\tau} z_t^T c_{k'}\right)} \quad (5)$$

Şekil 19'da SwAV [30] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 19. SwAV [30] yönteminin gösterimi

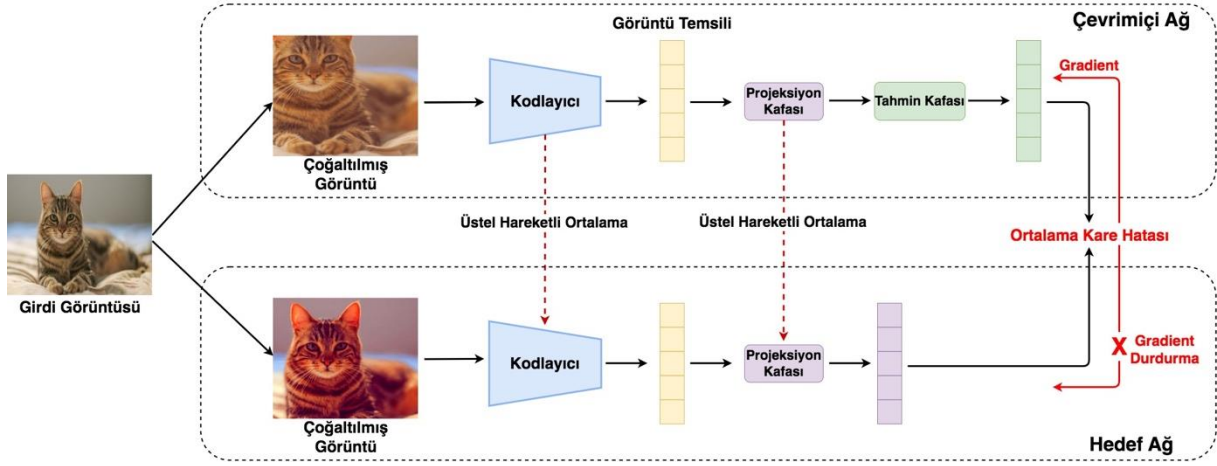
E. KARŞILAŞTIRMALI OLMAYAN ÖZ-DENETİMLİ ÖĞRENME

Aynı ağırlıkların paylaşıldığı siyam ağlarının eğitiminde, sadece pozitif çiftlerin kullanımı bu ağların tüm girdi görüntüleri için sabit bir vektör üretmesine neden olmaktadır. Genelleştirilebilir görüntü temsillerinin elde edilemediği bu durum başarısız çözüm olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle bu sorunun çözümü için karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerinin eğitiminde çok sayıda negatif çift kullanılmaktadır. Karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemleri, negatif çiftleri kullanmadan genelleştirilebilir görüntü temsillerini elde edebilen yöntemlerdir.

BYOL [27] yöntemi, negatif çift kullanmadan görüntü temsili öğrenilmesini gerçekleştirebilen ilk karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemidir. Bu yöntem birbirine etkileşime giren ve birbirinden öğrenen çevrim içi ve hedef olarak adlandırılan iki ağı içermektedir. Çevrim içi ağ, kodlayıcı, projeksiyon kafası ve tahmin kafasını içerirken, hedef ağ ise kodlayıcı ve projeksiyon kafasından oluşmaktadır. Hedef ağın ağırlıkları çevrim içi ağın üstel hareketli ortalamasıyla güncellenmektedir. Bu yöntemde, bir görüntüye iki farklı veri çoğaltma tekniği uygulanarak elde edilen dönüştürülmüş görüntüler çevrim içi ağa ve hedef ağa girdi olarak verilmekte ve çevrim içi ağ, hedef ağdan elde edilecek temsili tahmin edecek şekilde eğitilmektedir. Bu iki ağ tarafından elde edilen temsillerin temsil uzayındaki mesafesini minimize etmek için karşılaştırmalı kayıp fonksiyonundan farklı olarak, ortalama kare hatası kullanılmaktadır. Çevrim içi ağ ve hedef ağdan elde edilen gömü vektörleri sırasıyla $q_\theta(z_\theta)$ ve z'_ξ olmak üzere, ilk olarak gömü vektörlerine L2 normalizasyon uygulanmakta, sonrasında ise normalize edilen gömü vektörlerinin skaler çarpımıyla Eş. 6'da verildiği şekilde BYOL [27] kayıp fonksiyonu hesaplanmaktadır.

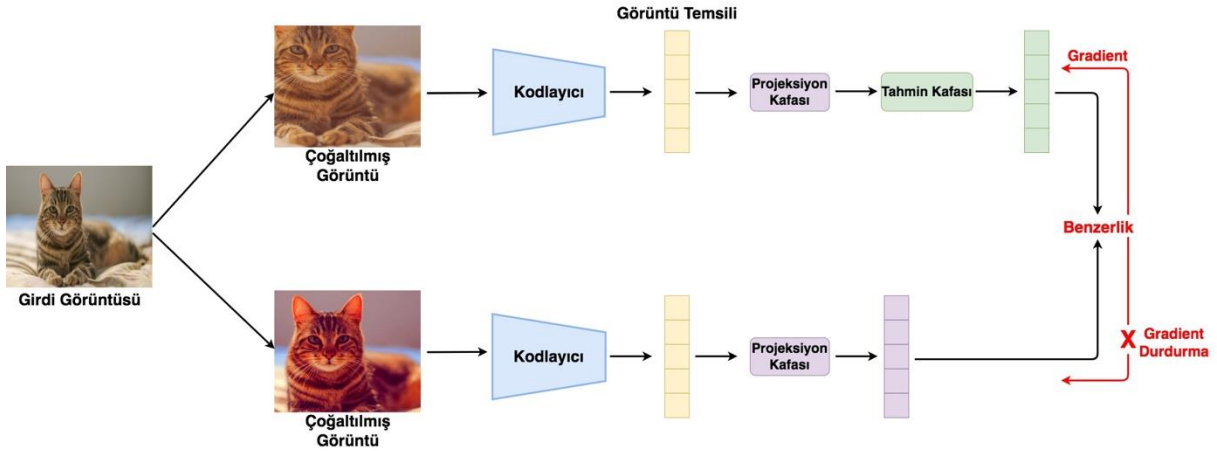
$$\mathcal{L}_\theta^{BYOL} = 2 - 2 \cdot \frac{\langle q_\theta(z_\theta), z'_\xi \rangle}{\|q_\theta(z_\theta)\|_2 \cdot \|z'_\xi\|_2} \quad (6)$$

Bu yöntemin diğer karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerine kıyasla yığın boyutundaki ve görüntü çoğaltma tekniklerindeki değişikliklere karşı daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir. Şekil 20'de BYOL [27] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 20. BYOL [27] yönteminin gösterimi

Diğer bir karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemi SimSiam [28], BYOL [27] yöntemine benzer şekilde negatif çiftleri kullanmadan görüntü temsili öğrenildiği bir yöntemdir. Başarısız çözüm problemini önlemek için ağın bir tarafında tahmin kafası ve ağın diğer tarafında ise gradientin durdurulması işleminin kullanıldığı SimSiam [28] yöntemi, momentum kodlayıcı kullanmayan BYOL [27] yöntemi olarak düşünülebilir. Bu yöntemde negatif çiftler ve momentum kodlayıcı kullanılmadan, aynı görüntünün çoğaltılmış iki görüntüsü girdi olarak alınmakta ve elde edilen görüntü temsillerinin benzerliği maksimize edilmeye çalışılmaktadır. Şekil 21’de SimSiam [28] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 21. SimSiam [28] yönteminin gösterimi

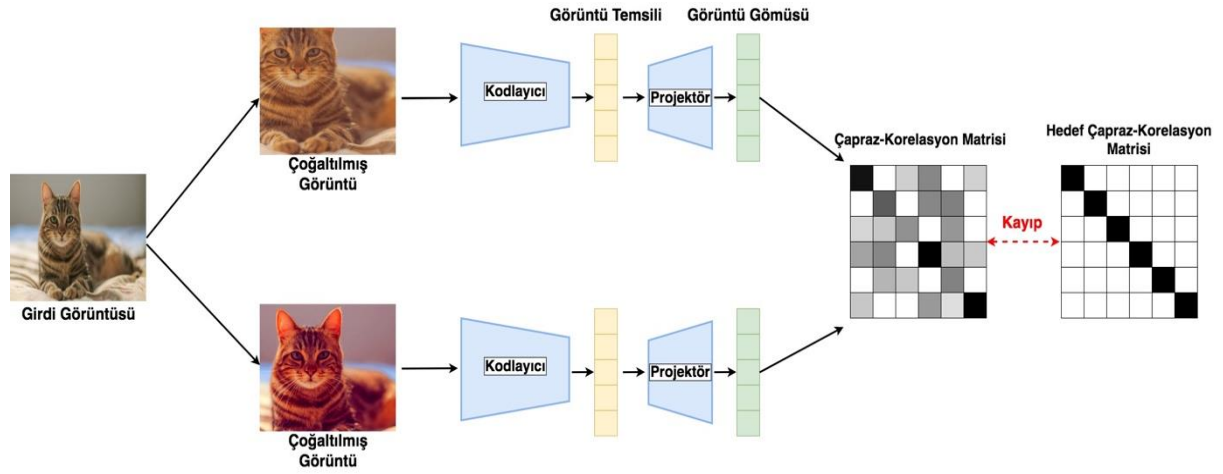
Görüntü temsili öğreniminde negatif çiftlerin kullanılmadığı diğer bir yöntem Barlow Twins [29] yöntemidir. Ancak BYOL [27] ve SimSiam [28] yöntemleri, başarısız çözümü önlemek için tahmin edici kafasına ve gradientin durdurulması işlemine ihtiyaç duyarken, Barlow Twins [29] yöntemi farklı bir kayıp fonksiyonu kullanarak başarısız çözümü önleyebilmektedir. Bu yöntemde, yığındaki (batch) her bir görüntünün veri çoğaltmayla elde edilen iki görünümü aynı ağırlıklara sahip ikiz ağlardan geçirilerek z^A ve z^B görüntü temsilleri matrisi (yığın boyutu x görüntü temsili boyutu) oluşturulmaktadır. Bu matrislerin sütunlarının skaler çarpımıyla C kare çapraz-korelasyon matrisinin her bir değeri hesaplanmaktadır. b yığını, i ve j görüntü temsillerinin boyut indislerini temsil etmek üzere E_{ij} de C çapraz-korelasyon matrisi verilmiştir.

$$C_{ij} = \frac{\sum_b z_{b,i}^A z_{b,j}^B}{\sqrt{\sum_b (z_{b,i}^A)^2} \sqrt{\sum_b (z_{b,j}^B)^2}} \quad (7)$$

Oluşturulan çapraz-korelasyon matrisini birim matrise mümkün olduğunca yakın hale getirmeyi amaçlayan bir kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu kayıp fonksiyonu sayesinde bir görüntünün veri çoğaltmayla elde edilen iki görünümünden elde edilen temsiller birbirine benzer hale getirilirken, temsil vektörlerinin boyutları arasındaki korelasyon minimize edilmektedir. İki terimden oluşan kayıp fonksiyonunda λ , kayıp fonksiyonun birinci ve ikinci terimlerinin önemini değiştiren bir parametredir. Eş. 8’de, Barlow Twins [29] yönteminde kullanılan kayıp fonksiyonu verilmiştir.

$$\mathcal{L}_{BT} = \sum_i (1 - C_{ii})^2 + \lambda \sum_i \sum_{j \neq i} C_{ij}^2 \quad (8)$$

Şekil 22’de Barlow Twins [29] yöntemi gösterilmiştir.



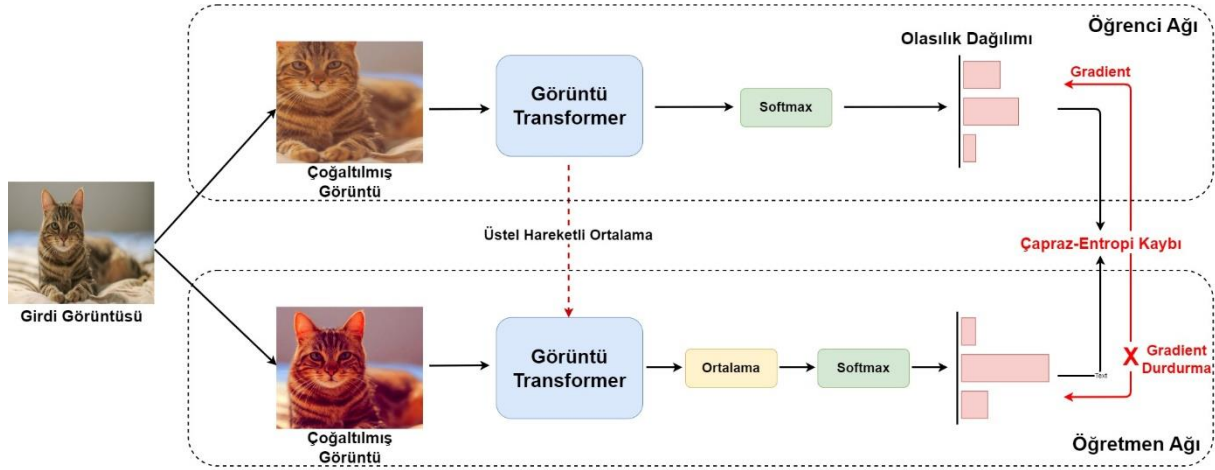
Şekil 22. Barlow Twins [29] yönteminin gösterimi

SimSiam [28], BYOL [27] yöntemlerine benzer şekilde, birbiriyle etkileşime giren ve birbirinden öğrenen öğrenci ve öğretmen olarak adlandırılan iki ağız sahip olan DINO [62], negatif çiftleri kullanmadan görüntü temsili öğrenildiği diğer bir yöntemdir. Diğer öz-denetimli öğrenme yöntemlerinden farklı olarak esnek bir yapıya sahip olan DINO [62] yönteminde, ön-egitimli ağız mimarisi olarak derin evrişimsel sinir ağları veya görüntü transformer mimarisi [63] kullanılabilir. Aynı derin evrişimsel sinir ağı veya görüntü transformer mimarisi sahip olan öğrenci ve öğretmen ağlarının ağırlıkları birbirinden farklıdır. Öğretmen ağının ağırlıkları öğrenci ağının üstel hareketli ortalamasıyla güncellenmektedir. DINO [62] yönteminde çoklu ölçekli kırpma veri çoğaltma tekniği uygulanmaktadır. Öğretmen ağı girdi olarak görüntünün büyük bir kısmını içeren global çoğaltılmış görüntüleri alırken, öğrenci ağı ise girdi olarak global çoğaltılmış görüntülerle birlikte görüntünün küçük bir kısmını içeren lokal görüntüleri de almaktadır. Çoğaltılmış görüntülerin öğrenci ağı çıktısına doğrudan softmax fonksiyonu uygulanırken, öğretmen ağı çıktısına softmax fonksiyonundan önce ortalama (centering) işlemi uygulanmaktadır. Ayrıca öğretmen ağına uygulanan softmax fonksiyonunda kullanılan sıcaklık derecesi, öğrenci ağına kıyasla daha küçük seçilerek keskinleştirme (sharpening) yapılmaktadır. Öğretmen ağına uygulanan ortalama ve keskinleştirme işlemleriyle başarısız çözüm problemini önlemek amaçlanmaktadır. Bu yöntemde öğrenci ve öğretmen ağını benzer tahminler yapmaya zorlayan çapraz-entropi kullanılmaktadır. DINO [62] yöntemine benzer şekilde görüntü transformer mimarisini [63] kullanan ve ince ayar yapma ihtiyaç duymadan görüntü sınıflandırma, görüntü bölütleme, nesne tespiti, derinlik tahmini vb. bilgisayarlı görü uygulamalarında yüksek başarı elde eden DINOv2 [64] yöntemi geliştirilmiştir. DINO [62] yönteminin ön-egitiminde sadece ImageNet [20] veri seti kullanılırken, DINOv2 [64]

yönteminin ön-eğitimi için çeşitli veri setleri ve web kaynakları kullanılarak 142 milyon görüntüden oluşan çok daha büyük bir veri seti oluşturulmuştur (LVD-142M) ve uygulamada çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Öğrenci ağının parametreleri θ_s , öğretmen ve öğrenci ağlarının olasılık dağılımları sırasıyla P_t ve P_s ve $H(a, b) = -a \cdot \log b$ olmak üzere DINO [62] kayıp fonksiyonu Eş. 9'da verilmiştir.

$$\min_{\theta_s} H(P_t(x), P_s(x)) \quad (9)$$

Şekil 23'te DINO [62] yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 23 DINO [62] yönteminin gösterimi

III. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Öz-denetimli öğrenme yöntemleriyle öğrenilen görüntü temsillerinin kalitesinin değerlendirilmesinde genellikle doğrusal değerlendirme ve ince-ayar kullanılmaktadır [39], [65].

A. DOĞRUSAL DEĞERLENDİRME

Doğrusal değerlendirmede öz-denetimli öğrenme yöntemleriyle öğrenilen ön-eğitilmiş ağdan sonra bir doğrusal sınıflandırıcı kullanılmaktadır. Oluşturulan bu mimaride etiketli veri ile doğrusal sınıflandırıcı eğitilirken ön-eğitilmiş ağın ağırlıkları dondurulmaktadır. Böylece öz-denetimli öğrenme yöntemleriyle öğrenilen görüntü temsillerinin doğrusal olarak ne kadar ayrılabilir olduğu ölçülebilmektedir. İlk öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak AlexNet [3] omurgası kullanılmaktayken son yıllarda önerilen öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak ResNet [5] ve görüntü tansformer omurgaları [63] kullanılmaktadır. Bu nedenle öz-denetimli yöntemlerin doğrusal değerlendirmesinde, ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak AlexNet [3] omurgasının kullanıldığı öz-denetimli yöntemler, ResNet [5] ve görüntü tansformer omurgalarının [63] kullanıldığı öz-denetimli yöntemler üç tabloda verilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2'de AlexNet [3] ve ResNet [5] mimarileri kullanılarak etiketsiz ImageNet [20] veri setinde ön-eğitilmiş öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin, ImageNet [20] ve Places205 [66] veri setlerinde doğrusal sınıflandırma Top-1 doğruluğu verilmektedir. Tablo 3'te ise ImageNet [20] veri setinde ön-eğitilmiş DINO [62] ve LVD-142M veri setinde ön-eğitilmiş DINO-v2 yöntemlerinin ImageNet [20] veri setindeki doğrusal sınıflandırma Top-1 doğruluğu verilmektedir. Görüldüğü üzere yeniden oluşturma temelli, tahmin temelli ve kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yöntemleri, ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak ResNet [5] omurgası kullanıldığında daha yüksek performans göstermelerine rağmen, karşılaştırmalı ve karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemleriyle rekabet edecek sonuçlar elde

edememişlerdir. Ayrıca Tablo 3’te görüldüğü üzere öz denetimli öğrenme yöntemlerinde görüntü transformer mimarileri kullanımı gelecek vadeden bir konudur.

Tablo 1. AlexNet [3] mimarisi kullanılarak, etiketsiz ImageNet [20] veri setinde ön-eğitilen öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin, ImageNet [20] ve Places205 [66] veri setlerinde doğrusal sınıflandırma Top-1 doğruluğu. [39]–[41] yöntemlerin Top-1 doğruluğu değerleri [35] yayınından alınmıştır.

Yöntem	Kategori	ImageNet	Places205
Denetimli Öğrenme [3]	-	50.5	39.4
Renklendirme [39]	Yeniden oluşturma temelli	32.6	30.3
Görece Pozisyon Tahmini [40]	Tahmin temelli	31.7	32.7
Yapboz Bulmaca [41]	Tahmin temelli	34.7	35.5
Döndürme [42]	Tahmin temelli	38.7	35.1
Derin Kümeleme [43]	Kümeleme temelli	39.8	37.5

Tablo 2. ResNet [5] mimarileri kullanılarak, etiketsiz ImageNet [20] veri setinde ön-eğitilen öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin, ImageNet [20] ve Places205 [66] veri setlerinde doğrusal sınıflandırma Top-1 doğruluğu. [39], [41] yöntemlerin Top-1 doğruluğu değerleri [65] yayınından alınmıştır.

Yöntem	Kategori	ImageNet	Places205
Denetimli Öğrenme [25]	-	76.5	53.2
Renklendirme [39]	Yeniden oluşturma temelli	39.6	37.5
Yapboz Bulmaca [41]	Tahmin temelli	45.7	41.2
Döndürme [42]	Tahmin temelli	48.9	41.4
Derin Kümeleme [43]	Kümeleme temelli	-	45.5
SeLA [44]	Kümeleme temelli	61.5	-
IntDisc [50]	Karşılaştırmalı	54	-
CPC [52]	Karşılaştırmalı	48.7	-
CPC-v2 [55]	Karşılaştırmalı	63.8	-
PIRL [59]	Karşılaştırmalı	63.6	49.8
MoCO [26]	Karşılaştırmalı	60.6	48.9
MoCO-v2 [60]	Karşılaştırmalı	71.1	51.8
SimCLR [25]	Karşılaştırmalı	69.3	52.5
SwAV [30]	Karşılaştırmalı	75.3	56.7
BYOL [27]	Karşılaştırmalı olmayan	74.3	54
SimSiam [28]	Karşılaştırmalı olmayan	71.3	-
Barlow Twins [29]	Karşılaştırmalı olmayan	73.2	54.1
DINO [62]	Karşılaştırmalı olmayan	75.3	-

Tablo 3. GT-T/8, 8 x 8 yama büyüklüğü temel görüntü transformer ve GT-B/14, 14 x 14 yama büyük görüntü transformer olmak üzere, ImageNet [20] veri setinde ön-eğitilen DINO [62] ve LVD-142M veri setinde ön eğitilen DINO-v2 yöntemlerinin ImageNet [20] veri setindeki doğrusal sınıflandırma Top-1 doğruluğu.

Yöntem	Kategori	ImageNet
Denetimli Öğrenme [63]	-	79.9
DINO [62] (GT-T/8)	Karşılaştırmalı olmayan	80.1
DINO-v2 [64] (GT-B/14)	Karşılaştırmalı olmayan	86.5

B. İNCE AYAR

Öz-denetimli öğrenme yöntemleriyle öğrenilen görüntü temsillerinin kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan diğer yöntem ince ayardır. Bu yöntemde ön-eğitilmiş ağırlıklar hedef görevde başlangıç ağırlıkları olarak kullanılmakta ve doğrusal değerlendirmeden farklı olarak eğitim sırasında bu ağırlıklara ince ayar yapılmaktadır. Ayrıca doğrusal değerlendirmede performans değerlendirmesi

sadece görüntü sınıflandırma görevi için yapılabilmektedirken, bu yöntem sayesinde nesne tespiti, görüntü bölütleme vb. bilgisayarlı görü görevleri performans değerlendirmesinde kullanılabilir. Böylece öz-denetimli öğrenmeyle elde edilen görüntü temsillerinin farklı görevlere genelleştirilebilirliği değerlendirilebilir. Doğrusal değerlendirmede olduğu gibi bu yöntemde de ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak AlexNet [3] omurgasının kullanıldığı öz-denetimli yöntemler ve ResNet [5] omurgasının kullanıldığı öz-denetimli yöntemler iki tabloda verilmiştir. Tablo 4'te AlexNet [3] mimarisi kullanılarak etiketsiz ImageNet [20] veri setinde ön eğitilmiş öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin, Pascal VOC 2007 [67] veri setinde görüntü sınıflandırma ve nesne tespiti hedef görevleri, Pascal VOC 2012 [68] veri setinde ise görüntü bölütleme hedef görevi için performans değerlendirmesi verilmiştir. Tablo 5'te ResNet [5] mimarisi kullanılarak etiketsiz ImageNet [20] veri setinde ön eğitilmiş öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin, Pascal VOC 2007 [67] veri setinde nesne tespiti hedef görevi için performans değerlendirmesi verilmiştir. Görüldüğü üzere karşılaştırmalı ve karşılaştırmalı olmayan öz denetimli öğrenme yöntemleri denetimli öğrenmeyle rekabet edecek sonuçlar elde etmişlerdir.

Tablo 4. AlexNet [3] mimarisi kullanılarak, Pascal VOC 2007 [67] veri setinde görüntü sınıflandırma, nesne tespiti hedef görevleri ve Pascal VOC 2012 [68] veri setinde görüntü bölütleme hedef görevi performans değerlendirmesi. Görüntü sınıflandırma ve nesne tespitinde ortalama AP ve görüntü bölütlemede ise ortalama IOU performans değerlendirme metriği kullanılmıştır. Nesne tespiti ve görüntü bölütleme hedef görevlerinde, omurga olarak AlexNet [3] kullanan sırasıyla Fast R-CNN [11] ve FCN [12] mimarileri kullanılmıştır.

Yöntem	Kategori	Sınıflandırma	Nesne Tespiti	Görüntü Bölütleme
Denetimli Öğrenme [3]	-	79.9	56.8 [69]	48 [12]
Görüntü Maskeleyme [38]	Yeniden oluşturma temelli	56.5	44.5	30
Renklendirme [39]	Yeniden oluşturma temelli	65.6	46.9	35.6
Görece Pozisyon Tahmini [40]	Tahmin temelli	65.3 [69]	51.1 [69]	-
Yapboz Bulmaca [41]	Tahmin temelli	67.6	53.2	37.6
Döndürme [42]	Tahmin temelli	72.9	54.4	39.1
Derin Kümeleme [43]	Kümeleme temelli	73.7	55.4	45.1

Tablo 5. ResNet [5] mimarisi kullanılarak, Pascal VOC 2007 [67] veri setinde nesne tespiti hedef görevi performans değerlendirmesi. Nesne tespiti hedef görevinde ortalama AP değerlendirme metriği ve ResNet [5] omurgası kullanan Faster R-CNN [10] mimarisi kullanılmıştır.

Yöntem	Kategori	Nesne Tespiti
Denetimli Öğrenme	-	81.3
PIRL [59]	Karşılaştırmalı	80.7
MoCO [26]	Karşılaştırmalı	81.5
MoCO-v2 [60]	Karşılaştırmalı	82.5
SwAV [30]	Karşılaştırmalı	82.6
SimSiam [28]	Karşılaştırmalı olmayan	82.4
Barlow Twins [29]	Karşılaştırmalı olmayan	82.6

IV. TARTIŞMA

Yeniden oluşturma temelli, tahmin temelli ve kümeleme temelli öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin yardımcı göreve özgü temsilleri öğrenmesi, öğrenilen temsillerin hedef görevde genelleştirilememesine neden olmakta ve denetimli öğrenme ile yüksek performans farkı

oluşmaktadır. Bununla birlikte karşılaştırmalı ve karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin denetimli öğrenmeyle olan performans farkının azaldığı deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. Ancak öz denetimli öğrenme yöntemlerinin kısa sürede elde ettiği bu başarıyla birlikte bazı hususların tartışılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

A. HESAPLAMA GÜCÜ İHTİYACI

Öz denetimli öğrenme yöntemlerinde büyük boyutlu eğitim verisi ve yığın kullanımı nedeniyle yüksek boyutlu hesaplama gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Yığın boyutunun 8192 olduğu SimCLR [25] yöntemi 128 TPU v3'e sahip donanımda ve yığın boyutunun 4196 olduğu BYOL [27] yöntemi 512 TPU v3'e sahip donanımda çalıştırılmaktadır. Ayrıca öz denetimli öğrenme yöntemleri, denetimli öğrenme yöntemlerine kıyasla daha uzun eğitime ihtiyaç duymaktadır. SimCLR [25] ve BYOL [27] yöntemleri en başarılı sonuçları 1000 epoch (tüm eğitim veri setinin model üzerinden bir defa geçmesi) çalıştırılarak elde etmekteyken, denetimli öğrenme yöntemleri genellikle 100 epoch çalıştırılmaktadır. Sonuç olarak yüksek hesaplama gücü kullanmadan genelleştirilebilir temsilleri öğrenebilen öz denetimli öğrenme yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

B. AĞ MİMARİLERİ

Ağ mimarisinin tasarımı öz denetimli öğrenme yöntemlerinin performansını büyük ölçüde etkilemektedir [70]. Öz denetimli öğrenme yöntemlerinde ön-eğitilmiş ağ mimarisi olarak genellikle AlexNet [3] ve ResNet [5] omurgası kullanılmaktadır ve ön-eğitilmiş ağ mimarisi büyüdükçe başarımın arttığı görülmüştür [61]. [71] çalışmasında öz-denetimli öğrenme yöntemlerinde kullanılan omurga çıktı boyutunun performans etkisi incelemiş ve omurga çıktı boyutu arttıkça öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin performansı artarken, denetimli öğrenme yöntemlerinin performansının azaldığı belirtilmiştir. Son yıllarda bilgisayarlı görü görevlerinde kullanılan diğer bir mimari de görüntü transformer mimarileridir [63]. Öz denetimli öğrenme yöntemlerinde de görüntü transformer mimarileri kullanılmış ve başarımın arttığı görülmüştür [62], [72]–[74]. Bu nedenle öz denetimli öğrenme yöntemlerinde görüntü transformer mimarileri kullanımı gelecek vadede bir konudur.

C. VERİ ÇOĞALTMA TEKNİKLERİ

Karşılaştırmalı ve karşılaştırmalı olmayan öz denetimli öğrenme yöntemlerinde her bir görüntüye yeniden boyutlandırma, rastgele kırpma, döndürme, öteleme, renk bozma vb. veri çoğaltma teknikleri uygulanarak pozitif çiftler oluşturulmaktadır [75]. SimCLR [25] çalışmasında, veri çoğaltma teknikleri tek başlarına veya iki veri çoğaltma tekniğini birlikte uygulanarak oluşturulan çoğaltılmış görüntülerle performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu çalışmada birlikte uygulanan rastgele kırpma ve renk bozma veri çoğaltma yöntemlerinin yüksek başarımla elde ettiği görülmüştür. SwAV [30] yönteminde ise çoklu ölçekli kırpma veri çoğaltma tekniği uygulanmaktadır. Çoklu ölçekli kırpma veri çoğaltma tekniğinde, bir görüntüden küçük boyutlarda çoklu kırpma yapılarak elde edilen görüntülere veri çoğaltma teknikleri uygulanarak çoklu çoğaltılmış görüntüler oluşturulmaktadır. Bu sayede diğer öz denetimli öğrenme yöntemlerinden farklı olarak bir görüntü için ikiden fazla çoğaltılmış görüntü kullanılırken, görüntülerin küçük boyutları sayesinde yüksek hesaplama ihtiyacından kaçınılmaktadır. SimCLR [25] yönteminde yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duyan birçok veri çoğaltma tekniğini kullanılırken, [76] çalışmasında veri çoğaltma yöntemi olarak sadece basit gauss gürültüsü kullanılarak genelleştirilebilir görüntü temsili elde edilebileceği gösterilmiştir ve [77] çalışmasında karmaşık veri çoğaltma tekniklerinin kullanımının modelin eğitiminde önemli ölçüde yavaşlamaya neden olacağı belirtilmiştir. Ayrıca doğal görüntülerde yaygın olarak kullanılan birçok veri çoğaltma tekniği medikal görüntüler için uygun olmadığı görülmüştür [78], [79]. Görüldüğü üzere kaliteli görüntü temsillerinin öğreniminde doğru veri çoğaltma tekniklerinin seçimi büyük öneme sahiptir [80], [81].

D. NEGATİF ÖRNEK SEÇİMİ

Karşılaştırmalı öğrenme yöntemleri, pozitif örnekleri negatif örneklerden ayırt ederek eğitilmektedir. Ancak genelleştirilebilir görüntü temsili elde edilebilmesi için çok sayıda negatif örneğe ihtiyaç duyulmaktadır [52]. Çok sayıda negatif örneği saklamak için IntDisc [50] ve PIRL [59] yöntemlerinde bellek bankası, MoCO [26] yönteminde kuyruk veri yapısı ve SimCLR [25] yönteminde ise yüksek boyutlu yığın kullanılmaktadır. Bununla birlikte pozitif örneklerden ayırt edilmesi zor olan negatif örneklerin seçilmesiyle karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerinin daha hızlı ve iyi eğitilmesi sağlanabilmektedir [82], [83]. Bu nedenle karşılaştırmalı kayıp fonksiyonun minimize edilmesinde negatif örnek seçimi önemli bir konudur.

E. BAŞARISIZ ÇÖZÜM SORUNU

Başarısız çözüm, modelin sadece pozitif çift kullanarak eğitilmesiyle tüm girdi görüntüleri için sabit bir vektör üretmesi sorunudur. Karşılaştırmalı öğrenme yöntemlerinde başarısız çözümden kaçınmak için çok sayıda negatif çift kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda negatif çift kullanmadan başarısız çözüm sorunu yaşamayan BYOL [27], SimSiam [28] ve Barlow Twins [29] karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemleri önerilmiştir. Barlow Twins [29] yöntemi farklı bir kayıp fonksiyonu kullanarak başarısız çözümü önleyebilmekteyken, BYOL [27] ve SimSiam [28] yöntemleri, başarısız çözümü önlemek için tahmin edici kafasına ve gradientin durdurulması işlemine ihtiyaç duymaktadır. Ancak negatif örnek kullanmadan genelleştirilebilir görüntü temsilleri elde edebilen bu yöntemlerin arkasındaki temel teoriyle ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır [84]. Bu nedenle karşılaştırmalı olmayan öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin teorik temelleri araştırılması gereken bir konudur.

V. SONUC

Ayırt edici görüntü temsillerinin elde edilmesinde denetimli öğrenme yöntemleri büyük miktarda etiketli veriye ihtiyaç duymaktadır. Etiketli veri elde etmenin zaman alıcı, pahalı ve emek yoğun bir işlem olması ve etiketsiz büyük boyutlu verinin varlığı, araştırmacıların son yıllarda öz-denetimli öğrenme yaklaşımına ilgi duymalarına neden olmuştur. Etiketsiz büyük boyutlu veriden faydalanarak genelleştirilebilir görüntü temsilleri elde edebilen öz-denetimli öğrenme yöntemleri, denetimli öğrenme yöntemleriyle rekabet edecek sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmada, bilgisayarlı görü görevlerinde kullanılan öz denetimli öğrenme yöntemlerinin kapsamlı bir literatür taraması yapılarak öz denetimli öğrenme yöntemleri kategorize edilmiştir. Ayrıca öz denetimli öğrenme yöntemlerinin farklı veri setlerindeki ve görüntü sınıflandırma, nesne tespiti ve görüntü bölütleme bilgisayarlı görü görevlerindeki performans karşılaştırılması sunulmuştur. Son olarak, mevcut yöntemlerdeki sorunlu hususlar tartışılmakta ve öz-denetimli öğrenme yöntemlerinin gelecekteki potansiyel araştırma yönleri önerilmektedir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 2818–2826.
- [2] M. Tan and Q. V. Le, "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks," in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2019, pp. 6105–6114.
- [3] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, pp. 1097–1105.

- [4] K. Simonyan and A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition,” in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2015, pp. 1–13.
- [5] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
- [6] C. Szegedy et al., “Going deeper with convolutions,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9.
- [7] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, “Densely connected convolutional networks,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 4700–4708.
- [8] J. Redmon and A. Farhadi, “YOLOv3: An Incremental Improvement,” arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.
- [9] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik, “Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 580–587.
- [10] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 91–99.
- [11] R. Girshick, “Fast R-CNN,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448.
- [12] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, “Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 3431–3440.
- [13] V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, “SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 12, pp. 2481–2495, 2017.
- [14] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation,” in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, 2015, pp. 234–241.
- [15] K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, and R. Girshick, “Mask R-CNN,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 2961–2969.
- [16] L. C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, and A. L. Yuille, “DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 40, no. 4, pp. 834–848, 2018.
- [17] C. Sun, A. Shrivastava, S. Singh, and A. Gupta, “Revisiting Unreasonable Effectiveness of Data in Deep Learning Era,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2017, pp. 843–852.
- [18] A. V Joshi, “Amazon’s Machine Learning Toolkit: Sagemaker,” in *Machine Learning and Artificial Intelligence*, 2020, pp. 233–243.

- [19] A. Chowdhury, J. Rosenthal, J. Waring, and R. Umeton, “Applying Self-Supervised Learning to Medicine: Review of the State of the Art and Medical Implementations,” *Informatics*, vol. 8, no. 3, p. 59, 2021.
- [20] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, Kai Li, and Li Fei-Fei, “ImageNet: A large-scale hierarchical image database,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2009, pp. 248–255.
- [21] M. Oquab, L. Bottou, I. Laptev, and J. Sivic, “Learning and Transferring Mid-Level Image Representations using Convolutional Neural Networks,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 1717–1724.
- [22] J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, and H. Lipson, “How transferable are features in deep neural networks?,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 3320–3328.
- [23] S. Shurrab and R. Duwairi, “Self-supervised learning methods and applications in medical imaging analysis: a survey,” *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 8, p. e1045, 2022.
- [24] A. Tendle and M. R. Hasan, “A study of the generalizability of self-supervised representations,” *Mach. Learn. with Appl.*, vol. 6, p. 100124, 2021.
- [25] T. Chen, S. Kornblith, M. Norouzi, and G. Hinton, “A Simple Framework for Contrastive Learning of Visual Representations,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2020, pp. 1597–1607.
- [26] K. He, H. Fan, Y. Wu, S. Xie, and R. Girshick, “Momentum Contrast for Unsupervised Visual Representation Learning,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 9729–9738.
- [27] J.-B. Grill et al., “Bootstrap Your Own Latent - A New Approach to Self-Supervised Learning,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 21271–21284.
- [28] X. Chen and K. He, “Exploring Simple Siamese Representation Learning,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021, pp. 15750–15758.
- [29] J. Zbontar, L. Jing, I. Misra, Y. LeCun, and S. Deny, “Barlow Twins: Self-Supervised Learning via Redundancy Reduction,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2021, pp. 12310–12320.
- [30] M. Caron, I. Misra, J. Mairal, P. Goyal, P. Bojanowski, and A. Joulin, “Unsupervised Learning of Visual Features by Contrasting Cluster Assignments,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 9912–9924.
- [31] X. Liu et al., “Self-supervised Learning: Generative or Contrastive,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 857–876, 2021.
- [32] K. Ohri and M. Kumar, “Review on self-supervised image recognition using deep neural networks,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 224, p. 107090, 2021.
- [33] L. Jing and Y. Tian, “Self-Supervised Visual Feature Learning with Deep Neural Networks: A Survey,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 43, no. 11, pp. 4037–4058, 2021.
- [34] Y. Bastanlar and S. Orhan, “Self-Supervised Contrastive Representation Learning in Computer Vision,” in *Applied Intelligence- Annual Volume 2022 [Working Title]*, London, United Kingdom: IntechOpen, 2022.

- [35] R. Zhang, P. Isola, A. A. Efros, and B. A. Research, “Split-Brain Autoencoders: Unsupervised Learning by Cross-Channel Prediction,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 1058–1067.
- [36] L. Ericsson, H. Gouk, C. C. Loy, and T. M. Hospedales, “Self-Supervised Representation Learning: Introduction, advances, and challenges,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 39, no. 3, pp. 42–62, 2022.
- [37] P. Vincent, H. Larochelle, Y. Bengio, and P. A. Manzagol, “Extracting and composing robust features with denoising autoencoders,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2008, pp. 1096–1103.
- [38] D. Pathak, P. Krahenbuhl, J. Donahue, T. Darrell, and A. A. Efros, “Context Encoders: Feature Learning by Inpainting,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 2536–2544.
- [39] R. Zhang, P. Isola, and A. A. Efros, “Colorful image colorization,” in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2016, pp. 649–666.
- [40] C. Doersch, A. Gupta, and A. A. Efros, “Unsupervised Visual Representation Learning by Context Prediction,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1422–1430.
- [41] M. Noroozi and P. Favaro, “Unsupervised learning of visual representations by solving jigsaw puzzles,” in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2016, pp. 69–84.
- [42] S. Gidaris, P. Singh, and N. Komodakis, “Unsupervised representation learning by predicting image rotations,” in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2018.
- [43] M. Caron, P. Bojanowski, A. Joulin, and M. Douze, “Deep clustering for unsupervised learning of visual features,” in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018, pp. 132–149.
- [44] Y. M. Asano, C. Rupprecht, and A. Vedaldi, “Self-labelling via simultaneous clustering and representation learning,” arXiv preprint arXiv:1911.05371, 2019.
- [45] M. Cuturi, “Sinkhorn distances: Lightspeed computation of optimal transport,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2013, pp. 2292–2300.
- [46] R. Epstein. (2023, Aug. 11). *The empty brain* [Online]. Available: <https://aeon.co/essays/your-brain-does-not-process-information-and-it-is-not-a-computer>.
- [47] R. Hadsell, S. Chopra, and Y. LeCun, “Dimensionality reduction by learning an invariant mapping,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2006, pp. 1735–1742.
- [48] F. Schroff, D. Kalenichenko, and J. Philbin, “FaceNet: A unified embedding for face recognition and clustering,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 815–823.
- [49] K. Sohn, “Improved deep metric learning with multi-class N-pair loss objective,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, pp. 1857–1865.

- [50] Z. Wu, Y. Xiong, S. X. Yu, and D. Lin, “Unsupervised Feature Learning via Non-parametric Instance Discrimination,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, pp. 3733–3742.
- [51] M. Gutmann and A. Hyvärinen, “Noise-contrastive estimation: A new estimation principle for unnormalized statistical models,” in *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*, 2010, pp. 297–304.
- [52] A. van den Oord, Y. Li, and O. Vinyals, “Representation Learning with Contrastive Predictive Coding,” arXiv Preprint arXiv:1807.03748, 2018.
- [53] A. Dosovitskiy, P. Fischer, J. T. Springenberg, M. Riedmiller, and T. Brox, “Discriminative unsupervised feature learning with exemplar convolutional neural networks,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 38, no. 9, pp. 1734–1747, 2016.
- [54] A. Van Den Oord, N. Kalchbrenner, and K. Kavukcuoglu, “Pixel recurrent neural networks,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2016, pp. 2611–2620.
- [55] O. J. Henaff et al., “Data-Efficient image recognition with contrastive predictive coding,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2020, pp. 4182–4192.
- [56] R. Devon Hjelm et al., “Learning deep representations by mutual information estimation and maximization,” in *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2019, pp. 1–24.
- [57] P. Bachman, R. Devon Hjelm, and W. Buchwalter, “Learning representations by maximizing mutual information across views,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2019, pp. 15535–15545.
- [58] Y. Tian, D. Krishnan, and P. Isola, “Contrastive Multiview Coding,” in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2020, pp. 776–794.
- [59] I. Misra and L. van der Maaten, “Self-Supervised Learning of Pretext-Invariant Representations,” in *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020, pp. 6707–6717.
- [60] X. Chen, H. Fan, R. Girshick, and K. He, “Improved Baselines with Momentum Contrastive Learning,” arXiv preprint arXiv:2003.04297, 2020.
- [61] T. Chen, S. Kornblith, K. Swersky, M. Norouzi, and G. Hinton, “Big self-supervised models are strong semi-supervised learners,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 22243–22255.
- [62] M. Caron et al., “Emerging Properties in Self-Supervised Vision Transformers,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 9630–9640.
- [63] A. Dosovitskiy et al., “An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale,” arXiv preprint arXiv:2010.11929, 2020.
- [64] M. Oquab et al., “DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision,” arXiv preprint arXiv:2304.07193, 2023.
- [65] P. Goyal, D. Mahajan, A. Gupta, and I. Misra, “Scaling and benchmarking self-supervised visual representation learning,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019, pp. 6390–6399.

- [66] B. Zhou, A. Lapedriza, J. Xiao, A. Torralba, and A. Oliva, “Learning deep features for scene recognition using places database,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014, pp. 487–495.
- [67] M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, and A. Zisserman, “The pascal visual object classes (VOC) challenge,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 88, no. 2, pp. 303–338, 2010.
- [68] M. Everingham, S. M. A. Eslami, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, and A. Zisserman, “The Pascal Visual Object Classes Challenge: A Retrospective,” *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 111, no. 1, pp. 98–136, 2015.
- [69] P. Krähenbühl, C. Doersch, J. Donahue, and T. Darrell, “Data-dependent initializations of convolutional neural networks,” arXiv preprint arXiv:1511.06856, 2015.
- [70] S. Arora, H. Khandeparkar, M. Khodak, O. Plevrakis, and N. Saunshi, “A theoretical analysis of contrastive unsupervised representation learning,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2019, pp. 9904–9923.
- [71] F. Bordes, S. Lavoie, R. Balestrieri, N. Ballas, and P. Vincent, “A surprisingly simple technique to control the pretraining bias for better transfer: Expand or Narrow your representation,” arXiv preprint arXiv:2304.05369, 2023.
- [72] Z. Xie et al., “Self-Supervised Learning with Swin Transformers,” arXiv preprint arXiv:2105.04553, 2021.
- [73] X. Chen, S. Xie, and K. He, “An Empirical Study of Training Self-Supervised Vision Transformers,” in *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 9620–9629.
- [74] C. Li et al., “Efficient Self-supervised Vision Transformers for Representation Learning,” arXiv preprint arXiv:2106.09785, 2022.
- [75] S. Albelwi, “Survey on Self-Supervised Learning: Auxiliary Pretext Tasks and Contrastive Learning Methods in Imaging,” *Entropy*, vol. 24, no. 4, p. 551, 2022.
- [76] F. Bordes, R. Balestrieri, and P. Vincent, “Towards Democratizing Joint-Embedding Self-Supervised Learning,” arXiv preprint arXiv:2303.01986, 2023.
- [77] R. Balestrieri et al., “A Cookbook of Self-Supervised Learning,” arXiv preprint arXiv:2304.12210, 2023.
- [78] C. Zhang, Z. Hao, and Y. Gu, “Dive into the Details of Self-Supervised Learning for Medical Image Analysis,” *Med. Image Anal.*, vol. 89, p. 102879, 2023.
- [79] S. C. Huang, A. Pareek, M. Jensen, M. P. Lungren, S. Yeung, and A. S. Chaudhari, “Self-supervised learning for medical image classification: a systematic review and implementation guidelines,” *NPJ Digit. Med.*, vol. 6, no. 1, p. 74, 2023.
- [80] Y. Tian, C. Sun, B. Poole, D. Krishnan, C. Schmid, and P. Isola, “What makes for good views for contrastive learning?,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 6827–6839.
- [81] X. Wang and G. J. Qi, “Contrastive Learning with Stronger Augmentations,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 45, no. 5, pp. 5549–5560, 2022.



- [82] Y. Kalantidis, M. B. Sariyildiz, N. Pion, P. Weinzaepfel, and D. Larlus, “Hard negative mixing for contrastive learning,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, pp. 21798–21809.
- [83] J. Robinson, C.-Y. Chuang, S. Sra, and S. Jegelka, “Contrastive Learning with Hard Negative Samples,” arXiv preprint arXiv:2010.04592, 2020.
- [84] Y. Tian, X. Chen, and S. Ganguli, “Understanding self-supervised Learning Dynamics without Contrastive Pairs,” in *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2021, pp. 10268–10278.



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Rüzgâr Temelli Piezoelektrik Jeneratör Tasarımı

 Okan Gökhan Usta ^a,  Sibel Akkaya Oy ^{b,*}

^aCanik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Canik, TÜRKİYE

^bFatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi, Ordu, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: sibelakkaya@odu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1253621

ÖZ

Bu çalışmada da rüzgâr temelli bir piezoelektrik jeneratör tasarımı yapılmıştır. Sunulan bu sistem piezoelektrik enerji dönüşümünü temel almaktadır. Bilindiği üzere piezoelektrik materyaller titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen materyallerdir. Bu çalışma, helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim enerji kartları ile rüzgâr hızından faydalanarak bir titreşim oluşturulup elektrik enerjisi üretimi esasına dayanmaktadır. Piezoelektrik enerji alternatif gerilim olarak üretilmektedir ve yapmış olduğumuz tasarımda kullanılan hasat kartında enerji üretim aşamasında minimum kayıp hedeflenerek doğru gerilim elde edilmiştir. Rezonans değerini yükseltmek amacıyla sensörlerin üstüne trapez yayları ve neodyum mıknatıs monte edilmiştir. Önerilen sistemde toplam 30 adet film tip piezoelektrik dönüştürücü kullanılmıştır. Tanıtılan deneysel jeneratörün 36 m/s rüzgâr hız aralığı için maksimum çıkış gücü 408,79 μ W civarındadır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr hızı; Piezoelektrik sensör; Enerji hasatı; Jeneratör

Wind Based Piezoelectric Generator Design

ABSTRACT

In this study, a wind-based piezoelectric generator was designed. This presented system is based on piezoelectric energy conversion. As it is known, piezoelectric materials are materials that can convert vibration energy into electrical energy. As it is known, piezoelectric materials are materials that can convert vibration energy into electrical energy. In this study, basically; Piezoelectric vibration energy cards placed on a helical vertical axis wind blades are based on the principle of generating electrical energy by utilizing the wind speed to create a vibration. Piezo electric energy is produced as alternating voltage; In the harvest card used in the design we have made, the correct voltage has been obtained by targeting the minimum loss in the energy production phase. In order to increase there sonance value, trapez oidal springs and neodymium magnets are mounted on the sensors. A total of 30 film type piezoelektrik transducers are used in the proposed system. The maximum output power of the introduced experimental generator is around 408,79 μ W for 36 m/sec wind speed range.

Keywords: Wind speed; Piezoelectric Sensor; Energy harvester; Generator

I. GİRİŞ

Geleneksel yakıtlardaki fiyat artışları, kaynakların sınırlı olması ve doğaya verdiği zararlar yüzünden yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine olan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Rüzgâr, ışık, ısı ve titreşim gibi ortamda dağılan enerjiyi geri dönüştürerek kullanan enerji hasatçısı teknolojileri son yıllarda gittikçe popüler olmaktadır [4]. Yüksek verimliliği, basit yapısı, yüksek gerilim üretme kapasitesi ve düşük maliyeti nedeni ile piezoelektrik enerji hasatçıları bu teknolojiler içinde önemli rol oynar [5,6]. Piezoelektrik malzeme kullanılarak ortamdaki piezoelektrik titreşim enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilir [7]. Bu titreşimin de belirli bir frekans değerinin üstünde olması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde küçük hareket, yük ve titreşim hareketlerini elektrik enerjisine dönüştürülmesi planlanmış ve yapılan tasarım ve testler ile gerçekleştirilmiştir [1, 2, 3]. Yapmış olduğumuz çalışmamızda piezoelektrik materyalin hali hazırda kullanılmakta olan bir rüzgâr enerji türbinine entegre edilmesi ve mevcut üretimin üzerine bir katkı sağlanabilirliği test edilmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında yaya ve araç yollarının altlarına, insan bedeninde bulunan basınç noktalarına, ayakkabı tabanlarına ve bazı bina ve köprülerde bulunan basınç noktalarına piezoelektrik materyal yerleştirilerek enerji hasatı test edilmiştir. Çalışmamızda ise hâlihazırda enerji üretimi için tasarlanmış savonius türbine entegre edilerek mevcut verimine etki etmeden nasıl katkı sağlanabileceği test edilmiştir [15,28].

Literatürde piezoelektrik enerji hasatçısı ile ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Cao ve ark. yol uygulamaları için piezoelektrik enerji hasatçısı tasarlamışlardır [8]. Bu piezo elektrik hasatçısı (PEH) 0,7 MPa–20 Hz'lik bir uyarım altında $0,0926 \text{ mW/cm}^3$ 'e güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Roshani ve ark. 1 kN–10 Hz'de uyarım altında 0,3–0,5 mW çıkış gücüne sahip sandviç tipi bir hasatçı tasarlamışlardır [6]. Weiland Taghavifar [9] araç süspansiyon harmonik hareketlerini kullanarak bir enerji hasatçısı geliştirmişlerdir. Bu hasatçı çakıllı ve düz yolda test edilmiştir ve 13 km / sa hızda 57,87 W çıkış gücü elde edilmiştir. Ortalama gücünde yol genliği ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Moure ve ark. 29 mm çapında ki zil tipi PEH ile 0,9 MPa basınca sahip ağır araç yükü altında 16 μW maksimum çıkış gücü elde etmişlerdir [10]. Abbas ve ark. PEH hasatçının çıkış gücünü iyileştirmek için hasatçı geometrisini optimize ettiler ve katmanlı bir polarizasyon yöntemi önerdiler. Bu yeni hasatçı 0,7 MPa'lık bir yük altında 2,1 mW'lık bir çıkış gücü üretmiştir. [11, 12, 13]. Khoshnoud ve ark. [14] süspansiyon sistemini kullanarak bir enerji hasatçısı geliştirmişlerdir. Titreşim enerjisini kullanmak içinde bir rejeneratif kuvvet aktuatörü (RFA) kullanmışlardır. Maksimum çıkış gücü 20 Hz frekansta 984.4W olarak kaydedilmiştir.

Xie ve ark. [15] su partiküllerinin enine dalga hareketlerinin etkilerini bir piezoelektrik levha üzerinde toplayarak elektrik elde eden bir okyanus dalga enerji hasatçısı simülasyon ortamında geliştirmişlerdir. Simülasyon sonucuna göre bu hasatçı 30 W'a kadar enerji üretebilecektir. Shan ve ark. [16] makro fiber composite (MFC), piezoelektrik enerji hasatçısı (PEH) geliştirmişlerdir. Bu enerji hasatçısının maksimum çıkış gücü, 0.5m/sa su hızında ve 1,1 mW/m² güç yoğunluğunda 1,32 μW 'tır. Cai ve ark. [17] 5 mW çıkış gücüne sahip küçük ölçekli bir piezoelektrik dalga enerjisi toplayıcı önermişlerdir.

Viet ve ark. [18] okyanus dalgalarından gelen enerjiyi kullanmak için piezoelektrik bağlantılı bir şamandıra geliştirmiştir. Xie ve ark. [19] boyuna dalga enerjisi hareketini kullanan bir okyanus dalgası enerjisi toplayıcısı geliştirmiştir. Yeong-min ve ark. [20] ortalama akım 71,4 μA ve 2,42V çıkış gerilimine sahip sabit dalga hareketine dayalı bir piezoelektrik enerji hasadı geliştirmiştir. Bu toplayıcının maksimum çıkış gücünde 0,173 mW'dir. Gianluca ve ark. [21] yağış enerjisinin piezoelektrik dönüştürücü üzerindeki titreşim etkisini kullanarak bir enerji hasatçısı sunmuşlardır. Bu harvester ile $2,916 \times 10^{-8} \text{ W}$ çıkış gücü elde etmişlerdir.

Wang ve ark. [22], gerçek insan hareketi ile doğrusal olmayan enerji hasadının optimum yük direncini araştırmıştır. Bu çalışma sonucunda 7 km/hkoşu hızı için maksimum çıkış gücü 30.55mW olarak elde edilmiştir. Türkmen ve Çelik [23] ayakkabıya entegre edilmiş piezoelektrik materyal ile enerji

hasatçısı sunmuşlardır. Yaptıkları analiz sonucunda 90 kg ağırlığı olan bir insanın yürüyüşü boyunca 1.43mW güç üretebileceği ortaya çıkmıştır.

Johar ve ark. [24] çıkış gerilimi 30V ve akımı 1,43 μ A olan hava akışı ve titreşim temelli bir piezoelektrik nano generator geliştirmişlerdir.

Akkaya ve Özdemir [25] rüzgâr temelli bir jeneratör geliştirmişlerdir. Piezoelektrik jeneratörün ihtiyaç duyduğu titreşim dengesiz sistemin dönmesi ile elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki 4,5–5 m/sa rüzgâr hızında, 150 K Ω 'luk yük direncinde, en yüksek çıkış gücü 519 μ W'tır. Oy [26] arabanın dışındaki rüzgâr akışının sağladığı mekanik titreşimi kullanan bir piezoelektrik enerji hasatçısı tasarlamıştır. Bu hasatçının maksimum çıkış gücü, 0° lokasyon açısında ve 110 km/sa hızında 1,125 mJ olarak ölçülmüştür.

Tasarımını geliştirmiş olduğumuz test düzeneği, geleneksel rüzgâr türbinlerinin geliştirilebileceği gerçeğini vurgulayan bir yapıya sahiptir. Helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik enerji hasat kartlarından oluşmaktadır. Bu sayede rüzgârın etkisiyle kartlar titreşerek mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Rezonans değerini artırmak amacıyla türbin platformunun montaj kısmına trapez yayları ve neodyum mıknatıslar monte edilerek verimlilik önemli ölçüde artırılmıştır. Trapez yayları ve neodyum mıknatısın verime etkisi göz ardı edilerek tamamen piezoelektrik enerji hasatçı kartlarından elde edilebilecek enerjiye odaklanılmıştır. Diğer çalışmaların aksine özgün olarak piezoelektrik materyalden elde edilen enerji hasatçı kartları sayesinde doğru gerilim (DC) olarak elde edilmektedir. Elde edilen gerilim diğer çalışmalardaki yapılan toplam gerilim dönüşümüne göre büyük ölçüde performans göstermektedir. İşte bu performans da gelecek çalışmalardaki enerji hasatında yaşanan kayıpların önüne geçeceği vurgulamaktadır.

Özellikle, yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar çalışmanın özgünlüğünü ve potansiyelini gözler önüne sermektedir. Yapılan testlerde uygulanan farklı rüzgâr hızlarında elde edilen güç verileri ışığında düşük güçlü uygulamalarda etkili ve verimli bir enerji üretimi sağlayabilecek potansiyelin olduğunu göstermektedir. Piezoelektrik enerji hasatçıların rüzgâr enerjisiyle birlikte kullanılması ve hibrit enerji üretimine yönelik potansiyeli, gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılama açısından umut vadetmektedir.

II.DEVRE TASARIMI

A. PİEZOELEKTRİK ETKİ VE KULLANILAN SENSÖR

Piezoelektrik etki pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş katı maddelerden oluşur. Bu negatif ve pozitif yüklü parçacıklar element içerisinde denge durumundadırlar. Denge durumunda piezoelektrik kristallerde elektriksel yükü bulunmamaktadır. Fakat mekanik metotlarla piezoelektrik kristal üzerine bir mekanik kuvvet uygulandığında ve ya katı madde titreşime maruz kaldığında piezoelektrik kristaller pozitif yüklerin merkezi ile negatif yüklerin merkezi birbirlerini iterek uzaklaşmaya başlarlar ve piezoelektrik kristalin yüzeylerinde pozitif ve negatif zıt yüklerin oluşmasına neden olur. Yüklerin bu şekilde oluşması bir elektrik enerjisi alanının oluşmasına ve maddenin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir elektrik enerjisi farkını oluşturur. Piezoelektrik etki için bu oluşan işlemlerin tersi içinde geçerlidir. Ters piezoelektrik etki ise birbiri ile karşı karşıya duran iki yüzey arasına elektrik gerilim uygulanan bir kristalde fiziksel olarak boyut ve ölçü olarak şekil değişimi gerçekleşmektedir [27, 28].

Piezoelektrik malzeme mekanik baskı altında deforme olur, polarize olur. Bu polarizasyon (P) denklem 1'deki gibi yazılabilir [24].

$$P = d \times T \quad \text{Denklem 1}$$

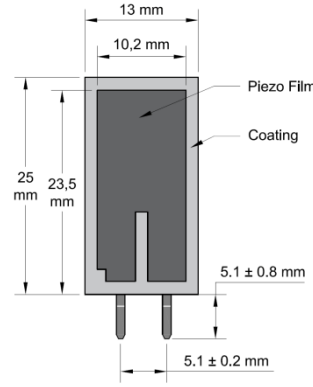
Burada “P” üretilen polarizasyon, “d” piezoelektrik stres katsayısı, “T” ise mekanik streştir. Şekil 1’de.

Bu polarizasyon dâhili bir elektrik alanı “E” yaratır ve bu da denklem 2’deki gibi yazılabilir [22].

$$P = \frac{E}{\epsilon} \quad \text{Denklem 2}$$

Burada ϵ , piezoelektrik malzemenin dielektrik sabitidir.

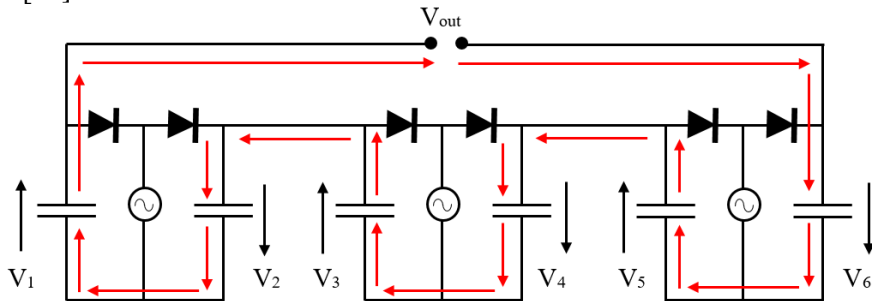
Diyafıramlı ve ince filmlü piezoelektrik dönüştürücüler birçok ülkede en çok kullanılan dönüştürücü türleridir. Jeneratör tasarımıımızda ince film piezoelektrik hasatçısı kullanmayı tercih ettik. Bu çalışmada mekanik titreşimden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan piezoelektrik dönüştürücünün boyutu da Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Piezosensörün Boyutu

B. DOĞRU GERİLİM HASAT KARTI TASARIMI

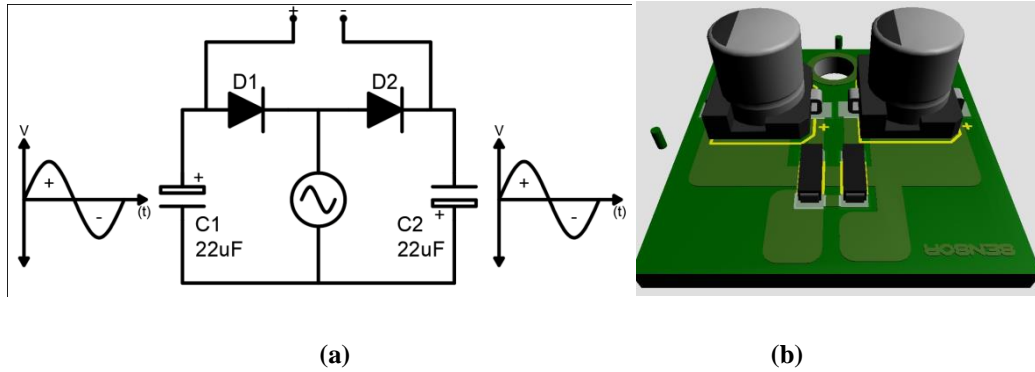
Ohm kanuna göre, elde edilen gerilim değeri sabit direnç altında düşürüldüğünde akım değerinin yükselmesi beklenmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için depolanmış bir gerilim değerine ihtiyaç vardır. Alternatif gerilimi depolanamadığı için piezoelektrik sensörden elde edilen AC gerilimi bir AC-DC dönüşüm kartı tasarlanarak depolama ünitesine DC gerilim olarak yönlendirilmektedir. Böylelikle hem verim yüksek olacak hem de üretilen gerilimin yönlendirilmesi ve kullanımı daha kolay olacaktır [23].



Şekil 2. Piezo Kart ile Oluşturulmuş Seri Gruplama

Bu nedenle bu çalışmada hem birden fazla PEH' i minimum gerilim kaybı ile doğrultan hem de uygun şekilde bir bağlantı ile birbirine bağlayan yeni bir devre topolojisi kullanılmaktadır [30]. Kullanılan devre topolojisi şekil 2'de gösterildiği gibidir. Şekil 2'de verilen devreye Kirchhoff gerilim yasası uygulandığında çıkış geriliminin kondansatör gerilimlerinin toplamı ($V_{OUT} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$) olduğu görülmektedir. Şekil 2 incelendiğinde PEH' ler tarafından üretilen gerilimin hem en az gerilim kaybı ile doğrultulduğu hem de dönüştürücüler arasındaki elektriksel bağlantının etkin bir biçimde yapıldığı görülmektedir. Ayrıca dönüştürücülerin birbiri üzerinden akım aktarmaması da diğer önemli bir husustur. Ek olarak kullanılan devre topolojisinde bir veya daha fazla dönüştürücünün arızalanması diğer dönüştürücülerden enerji hasadına engel olmamaktadır [31].

Bu devre topolojisi kullanılarak bir Piezoelektrik Titreşim Sensörü DC Hasat Kartı Tasarımı yapılmıştır [23]. Şekil 3a'da görüldüğü gibi kart tasarımında temel olarak gerilim ikileyici devre mantığı ile AC gerilimi DC gerilime dönüştürme işlemi yapılmaktadır. AC gerilim pozitif çevrimde iken Şekil 3'te bulunan D2 diyotu üzerinden geçerek C2 kondansatörünü şarj etmektedir. AC gerilim negatif çevrimde iken D1 diyotun iletimde olacaktır ve C1 kondansatörü şarja geçecektir ve şarj esnasında C7 kondansatörü deşarja geçecek ve çıkışlarda devamlı pozitif gerilim görülecektir. Tekrar çevrim pozitif pozisyona geçtiğinde C1 kondansatörü deşarja geçecek ve üretilen AC gerilim DC gerilime dönüştürülmüş olacaktır. Oluşturulan piezoelektrik sensör kartı tasarımının seri gruplar halinde bağlanarak üretilen gerilimin DC (Doğru akım) olarak toplanması esasına dayanarak bir elektrik üretimi gerçekleştirilir [22]. Yapılan tasarım ve test aşamasından sonra devrenin ne kadar küçültülebileceği hesaplanarak bütünsensör ve küçük devrelerde kullanılan yüzey dokunmalı (SMD) elektronik devre elemanları kullanılmıştır. Şekil 3b'de bu DC hasat kartın baskı devresi ve üç boyutlu şekli verilmiştir. Boyut olarak Şekil 3b'de görüleceği gibi 20mm ye 20mm gibi bir devre oluşturularak inilebilecek minimum devre boyutuna inilmiştir.



Şekil 3.(a)Piezoelektrik Hasat Kartı Çalışma Prensibi(b) Üç Boyutlu Hasat Kart

C. DEVRE TASARIMINDA KULLANILAN ELEKTRONİK DEVRE ELEMANLARI

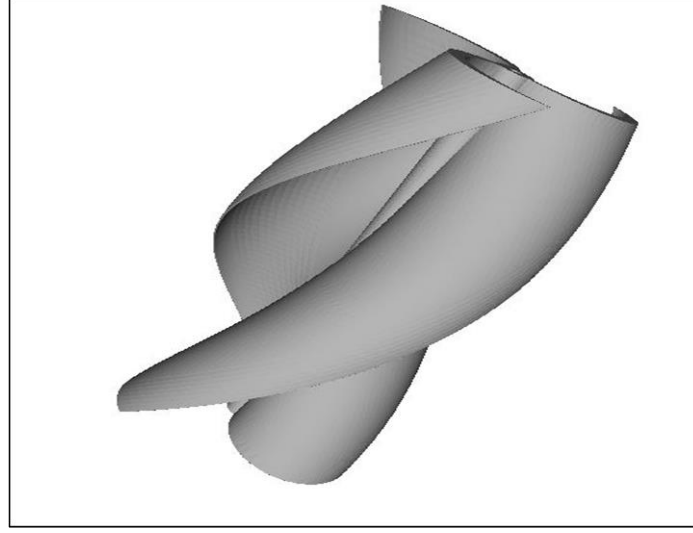
MBR0560 0,5A 60V Schottky Diyot: SOD123 yüzey dokunmalı kılıf yapısına sahip olan şotki diyot seçilmesinin başlıca sebebi 0,45 Volttan itibaren iletme geçiyor olmasıdır. Çünkü seçilen diyot ne kadar küçük gerilim değerlerinde iletme geçerse gerilim kaybı minimum düzeyde olacaktır. Gerilim maksimum gerilim değerinin 60v olması ise piezoelektrik sensörden gelecek olan gerilim değerini kayıpsız taşıyabileceği için seçilmiştir [23,31].

22uF 16V SMD Elektrolitik Kondansatör: ELEC-6.3 kılıf yapısına sahip olan elektrolitik kondansatör 16v değerine kadar şarj olabilmektedir. Kapasite olarak 22uF (mikrofarad) seçilmesinin sebebi piezoelektrik malzemeden gelen enerji titreşimle doğru olarak frekansın oldukça fazla oluşu yani pozitif alternanstan negatif alternansa geçişin hızlı olması sebebi ile kapasite düşük tutulmaktadır.

Böylece alternatif gerilimden doğru gerilime geçişin eksiksiz ve birbirini tamamlar seviyede olması sağlanmaktadır [23, 31].

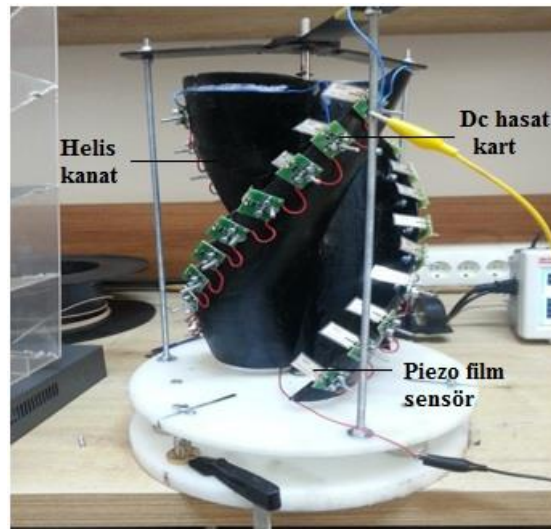
III. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmadan piezoelektrik maddelerin elektrik üretici olarak kullanımı için bir 3 boyutlu dikey eksen helis yapılı üç kanatlı bir yapı modellenmiştir. Bu modelleme işleminin ardından Şekil 4'te görüleceği gibi helis kanatlı dikey eksen rüzgâr terminali oluşturulmuştur [28].



Şekil 4.3 Kanatlı, Dikey Eksen Rüzgâr Hasat Kanatları Modeli

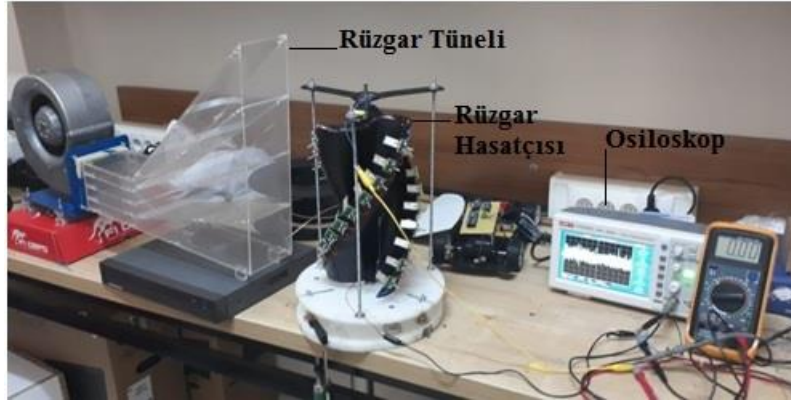
Bu kanat yapısındaki amaç 120 derecelik açılar ile yerleştirilen kanatlar rüzgâr yönü fark etmeksizin en güçlü yönden gelen rüzgârı elips yapılı kanatlarının içinde toplayarak ortasındaki dikey eksen yönünde yukarıya taşımaktadır. Kanatların üzerine yerleştirilen piezoelektrik sensör ile bu rüzgârın girişi ve çıkışı sırasındaki titreşimden ve basınçtan faydalanarak elektrik enerjisi dönüşüm işlemi gerçekleştirmektedir [23]. Şekil 5'te dikey eksen üzerine yerleştirilmiş helis yapılı kanatlar üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim hasat kartları görülmektedir.



Şekil 5. Piezoelektrik Titreşim Hasat Kartlarının Seri Gruplar Halinde Kanatlar Üzerine Yerleşimi

Rüzgâr tüneli ile test işlemlerine başlamadan önce 3 boyutlu yazıcı ile oluşturulan kanat üzerine 30 adet piezoelektrik titreşim ile enerji hasat kartlarını her kanadın üzerine 10 adet düşecek şekilde yerleştirilerek birbirleri ile seri bağlantı oluşturulmuştur. Piezoelektrik titreşim hasat kartlarının yerleşim işlemi bittikten sonra tüm mekanizma 120 derecelik açı ile yerleştirilmiş yaylı trapezler üzerine oturtulmuştur. Kullanılan trapez yaylar sistemin rüzgâr karşısında salınımını kolaylaştırırken rüzgârın akışının kesildiği anlarda başlangıç durumuna dönmesini sağlayacaktır. Trapez yaylar kullanılarak piezoelektrik titreşim üreticinin en verimli çalışma şekli rüzgâr basıncı, yay titreşimi ve salınım olayları sağlanmıştır [23]. Yaylar üzerine oturtulan sistem rezonans değerini desteklemek amaçlı N-N veya S-S kutupları birbirini görecekle şekilde yine 120 derecelik açı ile taban ve mekanizma arasına hava delikli neodyum mıknatıslar yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslar yaylardan doğacak olan salınımın sıklığını artırmak amaçlı birbirini iten bir yapı oluşturularak salınımın devamlılığını sağlamıştır. Sistem üzerinde bulunan dikey eksen hem alttan hem de üstten yerleştirilen transmisyon mili üzerinden üretilen enerji kablolar vasıtası ile sistemin dışına aktarılmıştır [23].

Ölçüm ve test aşamalarında bütün test kademelerinde kullanılma üzere paralel ölçüm alacak şekilde 1 adet osiloskop ve 3 adet multimetre kullanılmıştır. Ölçülmesi hedeflenen akım değeri seviyeleri mikroamper (μA) seviyelerinde olduğu için ölçüme en uygun hassasiyete sahip ölçüm cihazları tercih edilmiştir. Kablolama işlemi ise piezoelektrik titreşim üreticilerinin verimini olumsuz yönde etki etmeyecek şekilde rüzgâr tünelinin arka planında kablolama işlemi yapılmıştır. Rüzgâr hızını (m/s) tespit etmek için kullanılan analog anemometre için ise bir adet multimetre ile çıkışındaki gerilim değerine göre rüzgâr hızının tespiti gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da rüzgâr test esnasında kullanılan ölçüm düzeneği ve yapılan ölçüm işlemleri görülmektedir [23].



Şekil 6. Rüzgâr Testlerinde Kullanılan Deney Düzeneği

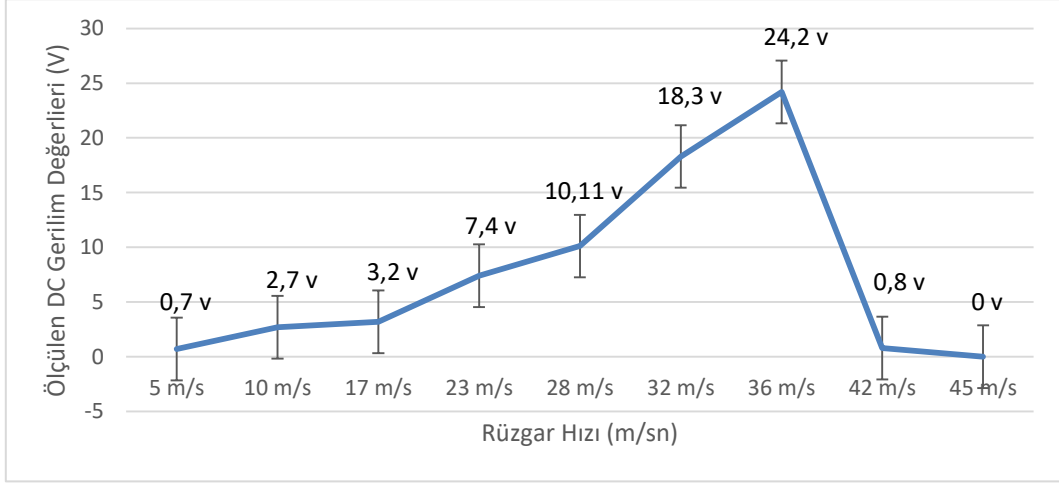
A. DENEY SONUÇLARI

Gerilim ölçümleri deney düzeneği kurulumunun ardından rüzgâr tüneli ile sabitlenerek düşük rüzgâr hızından yüksek rüzgâr hızlarına doğru gidilerek test işlemi ve gerilim ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerin sağlıklı olması amacı ile 3 adet voltmetre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ile rüzgâr tüneli arasına anemometre yerleştirilerek deney düzeneği üzerinde bulunan kanatlara çarpan rüzgâr hızı metre/saniye cinsinden hesaplanmıştır.

Şekil 5'te oluşturulan grafikte rüzgâr değerlerine göre üretilen maksimum gerilim değerleri görülmektedir.

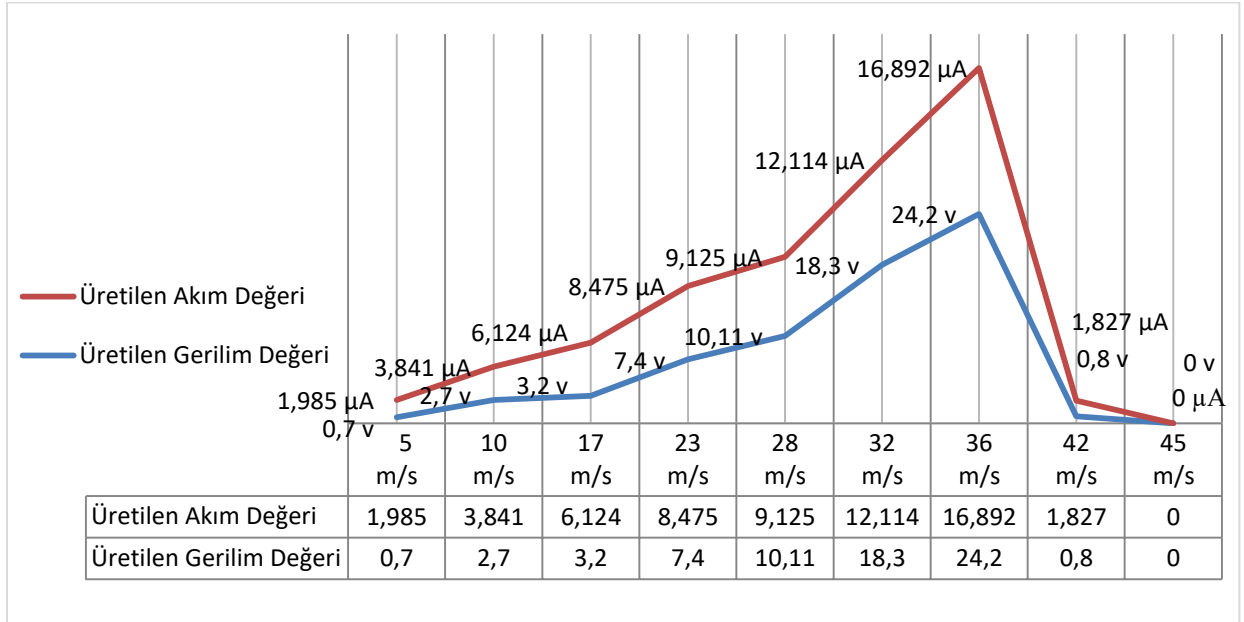
Düşük rüzgâr hızlarından oluşan rezonans düşük olduğu için erişilen gerilim değerleri oldukça düşük değerdedir. Piezoelektrik titreşim üreticileri üzerine düşen rüzgâr miktarının artması sonucu rezonans değerinin de artması ile yüksek gerilim değerlerine ulaşılmıştır. Piezoelektrik titreşim yapıları üzerine giren ve çıkan rüzgâr miktarı ne kadar hızlıysa üretilen enerji miktarı da o kadar yüksektir. 36

m/s'deki gerilim değeri 24,2v'tur ve bu değer ulaşılabildiğimiz maksimum değerdir. Bundan sonraki hızlarda dikey eksen türbinin gövde ve kanatlarda yaşanan hava akımı rezonansının sifıra yaklaşması PEH'lerde üretimin durmasına neden olduğu görülmüştür. Şekil 7'de görüldüğü gibi 36 m/s hızda maksimuma ulaşan üretim daha yüksek hızlarda düşmekte ve rüzgâr akımı 45 m/s hıza geldiğinde rezonans sıfırlanarak üretimin durduğu tespit edilmiştir. Artık PEH'ler rezonansın sıfır olması sebebi ile üretim yapmayı kesmiştir.



Şekil 7. Ölçülen Maksimum Gerilim Değerleri

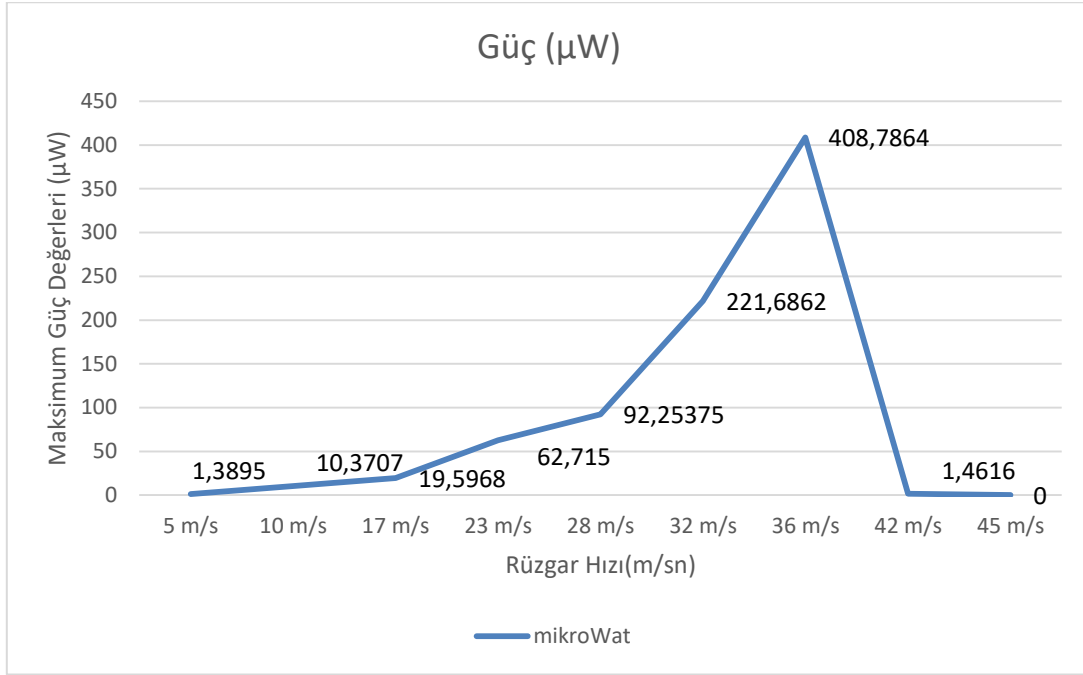
Şekil 8'de ise rüzgâr hızına göre Gerilim/Akım Artış Eğrileri görülmektedir. 36 m/s rüzgâr hızındaki akım değeri 16,892 μ A'dir. Bu değer yükselen rüzgâr hızlarında üretimin durmasına bağlı olarak sifıra doğru kırılma eğrisi gösterdiği incelenmektedir. Buradan devamlı ve yüksek hızlı rüzgârların üzerine etki ettiği rezonans gücünün yitirdiği sonucuna varabiliriz. Şekil 8 de bu söylevi destekler niteliktedir.



Şekil 8. Rüzgâr Hızına Göre Gerilim Akım Artış Eğrileri

Burada rüzgâr hızına göre elde edilen güç verilerini grafiksel olarak Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen güç de belli bir rüzgâr hızına kadar doğru orantılıdır. Rüzgâr hızı arttıkça yaşanan rezonans artmaktadır. Fakat rüzgâr hızı arttıkça hem türbin gövdesinde hem de PEH'lerde rezonans sifıra indiği

için üretim durmaktadır. Maksimum çıkış gücü 36 m/s (metre/saniye) hızda 408,79 μ W olarak tespit edilmiştir. Bu tasarımda maksimum üretim 36 m/s sabit rüzgâr altında elde edildiği görülmektedir.



Şekil9. Rüzgâr Hızlarına Göre Maksimum Çıkış Gücü Değerleri

IV. SONUC

Bu çalışmada düşük güçlü uygulamalar için deneysel bir rüzgâr jeneratörü tanıtılmıştır. Bu jeneratör, helis bir dikey eksen rüzgâr kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim enerji kartlarından meydana gelmiştir. Rezonans değerini yükseltmek amacıyla sensörlerin üstüne trapez yayları ve neodyum mıknatıs monte edilmiştir. Titreşim temelli olan bu çalışma rüzgâr ile birlikte kullanılan yay ve mıknatıslar ile birlikte diğer mekanik enerji kaynakları ile hibrit bir üretimin gerçekleşeceğini göstermiştir.

- Yedi farklı rüzgâr hız aralığı için yapılan deneylerde elde edilen maksimum çıkış güç değerleri sırası ile 1,3895 μ W, 10,3707 μ W, 19,5968 μ W, 62,715 μ W, 92,25375 μ W, 221,6862 μ W ve 408,7864 μ W'tır.
- Kullanılan arayüzdevresinin yapısından dolayı PEH sayısı ve çıkış gücü arasında doğrusal bir oran vardır. Bu sebeple PEH sayısı artırılarak tanıtılan jeneratör yapısı mW ölçekli çıkış gücüne sahip aygıtlar için bataryasız güç kaynağı olarak kullanılabilir.
- Tasarlanan bu jeneratörün önemli bir avantajı ise küçük çaplı uygulamalar ve dik kanat yapısı ile çok küçük bir türbülans alanı ile hem görüntü hem de kompakt tasarımı sayesinde çevreyi rahatsız etmeyen bir yapıda olmasıdır.
- Bir de dikey eksen olması ile birlikte türbülans değerini artırmak amaçlı eksen boyunu uzatarak verimi artırılabilir.
- Yapılan karşılaştırma testlerinde dikey eksen rüzgâr türbinlerinde kanat yapısına göre hava çıkışı ya aşağı yönlü ya da yukarı yönlü olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda piezoelektrik hasatçıların hibrit üretimde kullanılması sonucunda türbin hızı üzerinde elle tutulur bir olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür.

Piezoelektrik hasatçıların değişken yönlü rüzgârlarda enerji üretimi konusunda daha verimli olabileceği öngörülmektedir. Fakat enerji üretiminin stabil olmayacağına inanılmaktadır. Yüksek

hızlarda maksimum üretim yapıldığı fark edildiği için fabrika bacaları, yüksek basınç tankları tahliyeleri gibi yapay hava akımının olduğu yerlerde kullanımı daha uygundur.

V. KAYNAKLAR

- [1] Kayıkçı, Z., Akarsu, C., Sönmez, V.Z., & Sivri, N. (2023). Atık su Arıtma Tesislerinde Sürdürülebilir Enerji Üretimi için Mikro Hidroelektrik Teknolojisi Kullanımı: İstanbul Örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*.
- [2] Li, T., & Lee, P. S. (2022). Piezoelectric energy harvesting technology: from materials, structures, to applications. *Small Structures*, 3(3), 2100128.
- [3] Liu, Y., Khanbareh, H., Halim, M. A., Feeney, A., Zhang, X., Heidari, H., & Ghannam, R. (2021). Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications. *Nano Select*, 2(8), 1459-1479.
- [4] C.L. Yang, K.W. Chen, and C.D. Chen, "Model and Characterization of a Press-Button-Type Piezoelectric Energy Harvester", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 1, pp. 132-143, 2019.
- [5] J. Schoeftner and G. Buchberger, "A contribution on the optimal design of a vibrating cantilever in a power harvesting application—Optimization of piezoelectric layer distributions in combination with advanced harvesting circuits," *EngStruct*, vol. 53, no. 92, pp. 101, 2013.
- [6] Q. Luo and V. Tong, "Design and testing for shape control of piezoelectric structures using topology optimization." *EngStruct*, vol. 97, pp. 90–104, 2015.
- [7] H. Lee, H. Jang, J. Park, S. Jeong, T. Park and S. Choi, "Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 141, pp. 32–44, 2013.
- [8] Y. Cao, J. Li, A. Sha, Z. Liu, F. Zhang and X. Li, "A power-intensive piezoelectric energy harvester with efficient load utilization for road energy collection: Design, testing, and application", *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, pp. 133287, 2022.
- [9] C. Wei and H. Taghavifar, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: half-vehicle model", *Energy*, vol. 134, pp. 279-288, 2017.
- [10] A. Moure, M.A. Izquierdo Rodríguez, S. Hernández Rueda, A. Gonzalo, F. Rubio-Marcos, D. Urquiza Cuadros, A. Pérez-Lepe, J.F. Fernández, "Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 246–253, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.030>
- [11] A. Jasim, H. Wang, G. Yesner, A. Safari and A. Maher, "Optimized design of layered bridge harvester for piezoelectric energy harvesting from roadway." *Energy*, vol. 141, pp. 1133–1145, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.005>.
- [12] A. Jasim, G. Yesner, H. Wang, A. Safari, A. Maher and B. Basily, "Laboratory testing and numerical simulation of PEH for roadway applications", *Appl. Energy*, vol. 224, pp. 438–447, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.040>.

- [13] A.F. Jasim, H. Wang, G. Yesner, A. Safari and P. Szary, "Performance analysis of piezoelectric energy harvesting in pavement: laboratory testing and field simulation." *Transport. Res. Rec.* vol. 2673, pp. 115–124, 2019.
- [14] F. Khoshnoud, D.B. Sundar, M.N.M. Badi, Y.K. Chen, R.K. Calay and C.W. De Silva. "Energy harvesting from suspension systems using regenerative force actuators", *Int J Veh Noise Vib*, vol. 9, no. 3-4, pp. 294-311, 2013.
- [15] X.D. Xie, Q. Wang and N. Wu, "Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate", *International Journal of Engineering Science*, vol. 81, pp. 41–48, 2014.
- [16] Shan, X., Shan, R., Song, B., Liu, B., & Xie, T., "Novel energy harvesting: A macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex", *Ceramics International*, vol. 41, pp. 763–767, 2015.
- [17] W. Cai, V. Roussinova and V. Stoilov, "Piezoelectric wave energy harvester", *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 973-982, 2022.
- [18] N.V. Viet, X.D. Xie, K.M. Liew, N. Banthia and Q. Wang, "Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester", *Energy*, vol. 112, no. 1, p. 1219e1226, 2016.
- [19] X.D. Xie, Q. Wang and N. Wu, "Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves", *J. Sound Vib.* vol. 333, no. 5, p. 1421e1429, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.11.008>.
- [20] N. Yeong-min, L. Hyun-seok and P. Jong-kyu, "A study on piezoelectric energy harvester using kinetic energy of ocean", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 10, 4747-4755, 2018.
- [21] G. Acciari, M. Caruso, R. Miceli, L. Riggi, P. Romano, G. Schettino and F. Viola, "Piezoelectric Rainfall Energy Harvester Performance by an Advanced Arduino-Based Measuring System" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1 (January/February), pp. 458-468, 2018.
- [22] W. Wang, J. Cao, C.R. Bowen, S. Zhou and J. Lin, "Optimum resistance analysis and experimental verification of nonlinear piezoelectric energy harvesting from human motions", *Energy*, vol. 118, pp. 221-230, 2017.
- [23] A.C. Turkmen and C. Celik, "Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe", *Energy*, vol. 150, pp. 556-564, 2018.
- [24] M.A. Johar, J.H. Kang, M. A. Hassan and S.W. Ryu, "A scalable, flexible and transparent GaN-based heterojunction piezoelectric nanogenerator for bending, air-flow and vibration energy harvesting", *Applied Energy*, vol. 222, pp. 781–789, 2018.
- [25] S. Akkaya Oy, A. E. Özdemir, "Piezoelectric based low power wind generator design and testing", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, no. 6, pp. 2759–2767, 2018.
- [26] S. Akkaya Oy, "A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle". *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* vol. 30, p. e12655, 2020.
- [27] A. Ballato, "Piezoelectricity: History and new thrusts". *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings.* San Antonio, USA, 1996.
- [28] O.G. Usta, "Rüzgâr temelli piezoelektrik jeneratör tasarımı ve MPPT ile kontrolü", Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye, 2019.

[29] R.S. Dahiya and M. Valle, *Robotic Tactile Sensing*. Springer, New York, 2013.

[30] A. Ozdemir, “A novel circuit topology for piezoelectric transducers in a piezoelectric energy harvester”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, pp. 2105-2110, 2019.

[31] S. Akkaya Oy, “A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting”, *Scientia Iranica*, vol. 28, no. 6, pp. 3504-3511, 2021.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

The Effect of Resolution and Watermark Strength on Multi-level DWT Image Watermarking

 Hüseyin Bilal MACİT^{a,*},

^a Department of Information Systems and Technologies, Bucak ZTYO, Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: hbmact@mehtetakif.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1246175

ABSTRACT

With the widespread use of the Internet and the decrease in storage costs, many media have been transferred to digital media. This situation reduces the security and reliability of digital media. Media producers use watermarking methods for copyright protection. This study focuses on wavelet transform, which is one of the frequency conversion methods for watermarking. The wavelet transform for the watermarking process is usually applied on one of the four subbands obtained in a single level. In this study, the watermarking process is carried out in a total of 12 sub-bands, including the 1st, 2nd and 3rd levels. In addition, a performance evaluation metric for digital image watermarking is presented. The evaluation is applied using 10 different watermark strength factors on 46 different image resolutions. The Ultra High-definition Demoiré Dataset is used for testing. The mathematical results obtained as a result of 22080 iterations are shown with tables and graphics, and the performance relations between the cover image resolution value and the sub-band selection are interpreted.

Keywords: Wavelet transform, Watermarking, Resolution

Çok Seviyeli DWT Görüntü Damgalamada Çözünürlük ve Damga Gücünün Etkisi

ÖZET

İnternetin yaygınlaşması ve depolama maliyetlerinin azalması ile çok sayıda medya dijital ortama taşınmıştır. Bu durum, dijital medyaların güvenliğini ve güvenilirliğini azaltmaktadır. Medya üreticileri, fikrî mülkiyet haklarının korunması için dijital damgalama yöntemlerini kullanırlar. Bu çalışma, damgalama için frekans dönüşüm yöntemlerinden biri olan dalgacık dönüşümüne odaklanmaktadır. Damgalama işlemi için dalgacık dönüşümü genellikle tek seviyede elde edilen dört alt banttan biri üzerinde uygulanır. Bu çalışmada damgalama işlemi, 1., 2. ve 3. seviye olmak üzere toplam 12 alt bantta gerçekleştirildi. Ayrıca dijital görüntü damgalanması için bir performans değerlendirme metriği sunuldu. Bu değerlendirme 46 farklı çözünürlük üzerinde 10 farklı damga dayanım faktörü kullanılarak uygulandı. Test için Ultra High-definition Demoiré Dataset kullanıldı. 22080 iterasyon sonucunda elde edilen matematiksel sonuçlar tablo ve grafikler ile gösterildi ve kapak görüntü çözünürlük değeri ile alt-bant arasındaki performans ilişkileri yorumlandı.

Anahtar Kelimeler: Dalgacık dönüşümü, Damgalama, Çözünürlük

I. INTRODUCTION

With the widespread use of electronic systems, data generation and transmission is getting easier day by day [1]. Ease of access to devices used to capture data such as photos, audio and video [2], improved image capture technologies of smart phones, new data compression techniques, new data storage methods and increasing personal data storage opportunities greatly increase the speed of digital media production of people. It is estimated that a total of 660 million digital photographs were created in 2013 and 1.2 trillion digital photographs were created in 2018 [3]. Rise Above Research, a consulting firm providing market research for the digital imaging industry, estimates that 1.4 trillion photos have been produced in 2021, and this number will grow by 100 million each year over the next 5 years [4]. The rapid increase in the number of digital images and the distribution of them in insecure environments [5,6] has led to the need to develop new image authentication techniques [7]. Digital images are also used for commercial purposes. This brings along the problems of copyright infringement [5]. The most effective method for copyright protection of a multimedia item is to use a watermark [1,6,7]. A watermarking technique is to embed visible or hidden information such as a logo [2], a signature, or a digital identifier into a media file and extract it when necessary [5]. In addition to copyright protection, digital watermarking methods are also used in application areas such as content verification, digital forensics, content identification and management, fingerprinting, tampering detection, broadcast monitoring and media file archiving [5]. Today, digital watermarking techniques are applied on digital video and digital audio media as well as digital images [2,6,8].

The two most important criteria for evaluating watermarking algorithms are; imperceptibility and robustness [6,7]. The robustness of the watermarking method shows the strength of the watermark against unauthorized attempts [8]. Robust watermarking methods are widely used for copyright protection and authentication [6]. Imperceptibility refers to the amount of alteration in a digital image after the embedding process [2]. Robustness and imperceptibility of a watermarking method are directly related to parameters such as the embedding and the extracting algorithm, characteristics of the watermark, and the strength factor. It is not possible for a watermarking method to be both very robust and very imperceptible at the same time [7].

Watermarking methods are examined in two classes according to the analog or digital processing of the multimedia element [8,9]. The watermarking methods applied in the digital environment are called the spatial domain watermarking methods. In the spatial domain, the watermark is embedded to the monochrome pixels of still images [5], audio samples, or pixel values of video frames. No transformation is applied to the main signal during watermark embedding. Spatial domain techniques are often used in authentication and tamper detection applications [2]. These techniques are highly vulnerable to image processing attacks, predictive analysis, and statistical analysis, and are less popular these days [10]. The watermarking methods applied in the analog environment are called the frequency domain watermarking methods. In these methods, the object to be watermarked is perceived as a signal. In other words, it is expressed in the frequency domain [11]. Today, most frequency domain watermarking methods are used because they provide better robustness [7,12]. These methods are resistant to forgery attacks such as clipping and adding noise, so that some parts of the watermark can be recovered after these attacks [13,14].

The basic numerical properties that define a digital image are expressed as color space, aspect ratio and resolution. Color space refers to the number of colors of the image and the luminance value for each color. Numerous color spaces are defined depending on the application. Color spaces are interrelated, so, an image in one color space can be transferred to another color space using the appropriate mathematical conversion formula [10]. Let I be a digital image with each pixel $x_{i,j}$.

$$I(c, r) = \{x_{i,j} | 1 \leq i \leq r, 1 \leq j \leq c\} \quad (1)$$

where c is the number of columns and r is the number of rows. The aspect ratio of an image is the ratio of its width to its height, and is expressed as $c:r$ for I . The total number of pixels of I is called

the resolution and is expressed in *cxr*. For example, the resolution value of an image consisting of 600 rows and 800 columns is 800x600 and the aspect ratio is 4: 3. As the resolution size increases (Figure 1), the amount of detail of the image increases.

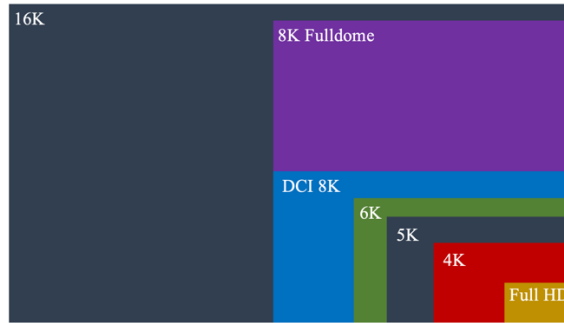


Figure 1. Some common broadcast resolutions

In the digital photo and video industry, resolution sizes are standardized by sensor or software manufacturers. Some of these standards are given in Table 1.

Table 1. Some of the display resolution standards

Standard	Resolution	Aspect Ratio	Standard	Resolution	Aspect Ratio
QQVGA	160 x 120	4:3	CGA	320 x 200	4:3
VGA	640 x 480	4:3	WVGA	800 x 480	5:3
WSVGA	1024 x 600	16:9	HD	1280 x 720	16:9
Full HD	1920 x 1080	16:9	DCI 2K	2048 x 1080	1.9:1
DCI 4K	4096 x 2160	1.9:1	6K	6016 x 3384	16:9
DCI 8K	8192 x 4320	1.9:1	16K	15360 x 8640	16:9

Video Graphics Array (VGA) is a video display controller device and a graphics standard first introduced in 1987 with the IBM PS/2 computer series [15]. Many low-resolution standards have been named, based on VGA. In 1990, IBM announced the XGA standard, which offers higher resolution [16]. In 2005, Digital Cinema Initiatives (DCI), one of the leading standards of the cinema industry, published the Digital Cinema System Specification [17]. This specification standardizes high resolution images such as DCI 2K, DCI 4K [18], and DCI 8K. Television and consumer media often uses 4K UHD (3840 × 2160) defined in SMPTE ST 2036-1 [19]. In 2019, Apple introduced the first 6K monitor called Pro Display XDR with a resolution of 6016x3384 [20]. The resolution of 7680x4320, called Ultra HD 8K, has been standardized by the International Telecommunication Union with the patent number ITU-R BT.2020-2 [21]. A 16K image is approximately 132 megapixels, 16 times the size of a 4K standard image. The world's first 16K display with a resolution of 15360×8640 was introduced by Innolux in Taiwan in 2018 [22]. At the beginning of 2023, 213 image standards and specifications are listed on Wikipedia [23].

Spatial domain image watermarking methods are resolution dependent. In these methods, as the number of pixels of the cover image decreases, the size of the watermark that can be used decreases. But, in the frequency domain, watermarking methods are independent of resolution. Also, the color space plays an important role in image watermarking [10]. Watermarking in the spatial domain is performed on a single-color space. In the frequency domain, the color space has no effect [12]. This article focuses on examining the effect of the resolution on watermarking performance in the frequency domain of color images. Discrete Wavelet Transform (DWT), which is one of the most applied methods for frequency domain transformation [5], has been applied in this paper. DWT-based watermarking methods have the advantages of multiple resolution, good energy compression, and imperceptible visual quality [24,25] and they are similar to theoretical models of the Human Visual System (HVS) [8]. The main purpose of this article is to compare the watermarking performance of sub-bands obtained by DWT at different resolutions. Four random images are selected from the Ultra High-definition Demoiré Dataset [26] for the application. Test images are watermarked in 46

randomly selected resolution standards starting from QQVGA up to 16K. The robustness and imperceptibility results of watermarking on each resolution are demonstrated with a proposed hybrid metric score.

II. RELATED WORK

There are thousands of studies on watermarking in the literature. This section specifically mentions some of the sources cited in this article. Kahlessenane et.al. [27] presented a blind and robust watermarking technique that allows the integration of electronic patient records into computed tomography scanning. They applied a wavelet transform to the image, then made a topological rearrangement of the coefficients of the LL sub-bands using the ZigZag scanning method. Abdulrahman and Öztürk [5] proposed a new robust color image watermarking method based on Discrete Cosine Transform (DCT) and DWT. They divided RGB cover art into red, green and blue components, and applied DCT and DWT to each color component. Hemdan [9] offered a robust medical image watermarking approach based on Wavelet Fusion (WF), Singular Value Decomposition (SVD) and Multi-Level Discrete Wavelet Transform (M-DWT) with blending techniques. Liu et.al. [6] proposed a new image watermarking method based on DWT, Hessenberg Decomposition (HD) and SVD. They decomposed the cover image into a series of sub-bands with DWT and used the obtained coefficients as input for HD. They embedded the decomposed watermark into the cover image with the scaling factor. Ernawan et.al. [2] proposed an adaptive scaling factor based on selected DWT-DCT coefficients of its image content. The adaptive scaling factor was generated based on the role of selected DWT-DCT coefficients against the average value of DWT-DCT coefficients. Yin et.al. [12] proposed a novel watermarking scheme of embedding a scrambling watermark into the green component of the color image based on DWT-SVD. Al-Haj [8] describes an imperceptible and a robust combined DWT-DCT digital image watermarking algorithm. Kumar and Singh [7] proposed an adaptive color image watermarking scheme based on DWT by combining alpha blending and entropy concepts. Giri et.al. [28] provided a broader view as to how much work has been carried out so far and what are the different dimensions that have been taken into consideration to watermark color images using discrete wavelet transformation. Patvardhan et.al. [10] proposed a digital image watermarking technique to hide the relevant information in color YCbCr color space. Yu et.al [26] introduced a new digital watermarking encryption algorithm in which the watermarking information was based on the size of the image. Jing [1] proposed an image watermarking method based on the DCT algorithm, implemented it with Matlab, and proved the imperceptibility of the method with experimental results.

III. METHOD

Many methods have been proposed for transforming the image in the frequency domain. Some of the examples of these are DCT [1], (SVD) [29,30], Karhunen-Loeve transform [31,32], Hadamard transform [33,34], Contourlet transform [35,36]. DWT is the most used method of digital watermarking due to its success in spatial placement [8]. With DWT, the image is divided into frequency sub-bands. The watermark is embedded into one of these sub-bands with mathematical functions. Transforming a signal is actually just another way of representing that signal. Wavelet Transform provides time-frequency representation of the signal [37]. The transformation does not change the information contained in the signal; it just expands the signal into a wavelet domain. So, information that is not visible in the signal can be accessed. In other words, the signal is divided into different frequency components called wavelet coefficients using mathematical functions called wavelets [38]. Wavelets are special functions used as basal functions to represent signals [12]. Complex Wavelets, Daubechies Wavelet, Haar Wavelet, Bi-orthogonal Wavelets, Berkeley Wavelets, Wavelet Packets, Stationary Wavelets, Balanced Multi-wavelets, Non-tensor Wavelets, and Morphological Wavelets [28] are the wavelets generally used for watermarking applications.

Let the image to be watermarked be I and the watermark be W . Let the resolution of the I be $m \times n$. Since the image is a two-dimensional signal [39], a two-dimensional wavelet transform is applied. The two-dimensional wavelet transform is a one-dimensional analysis of a two-dimensional signal [37]. The wavelet chosen to perform the transformation in this paper is the Haar wavelet. Because the HVS is less sensitive to symmetry [28] and the Haar wavelet is a simple [27] and symmetrical wavelet. In the applied transformation, a window size is determined, then the signal is split into windows. The wavelet function is hovered over the windows sequentially. If the window and the wavelet are identical, the wavelet coefficient is calculated as $c = 1$ [40]. When the window width is kept large (at low frequency), the general outline of the signal is obtained with the slowly changing wavelet. When the window width is kept small (at high frequency), fast changing (detail) components of the signal are obtained. The important components of the image signal are obtained by passing through the Low Pass Filter (LPF) and the detail components are obtained by passing through the High Pass Filter (HPF). This process is called down-sampling (Equations 2 and 3).

$$LPF = \sum_i I(i)y[2I - i] \quad (2)$$

$$HPF = \sum_i I(i)a[2I - i] \quad (3)$$

Here, i indicates the index of the pixel being processed in the one-dimensional signal, $y[]$ and $a[]$ are high-pass and low-pass filter functions, respectively. The main purpose here is to separate the image from the noise. With DWT, the input signal is decomposed into four separate frequency sub-bands, each of size $(m/2) \times (n/2)$ corresponding to vertical, diagonal and horizontal details [27] respectively (Figure 2).

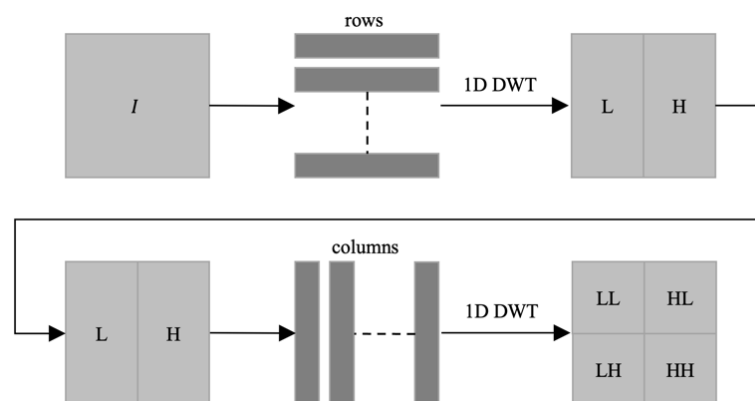


Figure 2. DWT frequency sub-bands

The low frequency (LL) sub-band contains more energy [27] and most of the information of the I is concentrated in this band [41,42]. This feature makes the LL sub-band suitable for robust watermarking [43]. LH and HL are vertical detail coefficients [2]. If a result in the middle of robustness and imperceptibility is desired, the watermark can be embedded in LH or HL sub-bands [44]. HH is the diagonal detail coefficient [2]. Embedding the watermark in high frequency coefficients means non-robust watermarking against JPEG compression [12]. Embedding the watermark in the HH sub-band offers robust watermarking against some attacks such as clipping, sharpening, contrast changing, histogram equalization, and gamma correction [45,46]. Figure 3 shows the sub-bands for the test image.

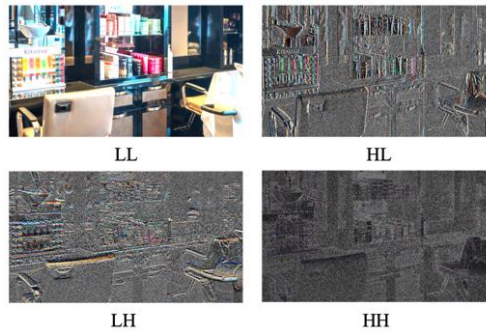


Figure 3. DWT frequency bands of test image

The watermark can be embedded in one or more of the LL, HL, LH, and HH sub-bands. For this, I is divided into sub-bands, W is set to the same row-column size as the sub-bands, then equation 4 is applied to the same sized sub-band and W .

$$SB_{I_w(i,j)} = (W_{(i,j)} \cdot \alpha) + (SB_{I(i,j)}) \quad (4)$$

In the equation, SB_I is the non-watermarked sub-band, and SB_{I_w} is it the watermarked one. i and j are the horizontal and vertical index information of the pixel. α is the watermark strength factor and it must be chosen between 0 and 1. When the α value is 0, the watermarking does not occur, when it is 1, the watermark is embedded by 50% of the sub-band. If the watermark is distinguishable by HVS after watermarking, it is called a visible watermark. Visible watermarks are generally embedded where detection of logo or label image is desired. If the watermark is not distinguishable by HVS, it is called an invisible watermark. Such watermarks are often embedded to identify the content owner [5]. α has a direct effect on the visibility of the watermark and the robustness of the watermarking. After embedding the watermark into the selected sub-band by applying Equation 4, the watermarked image I_w is reconstructed combining the embedded sub-band and the other three sub-bands (Equation 5) by Inverse DWT (IDWT).

$$I_w = \sum_{i=-\infty}^{\infty} (HPF[I]a[2W - I] + LPW[I]y[2W - I]) \quad (5)$$

The watermark extraction stage is the process of reading the watermark by subtracting it from the watermarked image [2]. The DWT method used in this study uses an unblind detector. The non-blind detector has prior information about the original image during the watermark extraction phase [27]. So, both I and I_w are required for watermark extraction. Sub-bands of I_w are obtained to extract the watermark, as in the watermarking phase. For this, I_w is treated as a one-dimensional signal, and it is passed through LPF and HPF as in equations 2 and 3, respectively. To extract the watermark, equation 6 is applied to the sub-band which carries the watermark.

$$W_e(i,j) = \frac{SB_{I_w(i,j)} - SB_{I(i,j)}}{\alpha} \quad (6)$$

Here, W_e is the extracted watermark. By applying DWT again to the 1st level sub-bands, it can be passed to the 2nd level sub-bands. When the k .level sub-band is reached, the resolution of the entire sub-band is $(m/2^k) \times (n/2^k)$. If the resolution of the image is much larger than the resolution of the watermark, the watermark can be embedded in the lower-level sub-bands by applying multiple DWTs. In this paper, the watermarking process on the sub-bands of the image is carried out by moving over the same sub-band(s) as shown in Figure 4. For example, to embed the watermark into the 3rd level HL sub-band (HL3), first the 1st level HL sub-band (HL1) is obtained. HL1 is again divided into sub-bands and 2nd level HL sub-band (HL2) is obtained. Then, HL2 is divided into sub-bands and 3rd level HL sub-band (HL3) is obtained. The watermark is resized and embedded in the HL3. Lastly, the IDWT operations are performed sequentially and I_w is obtained.

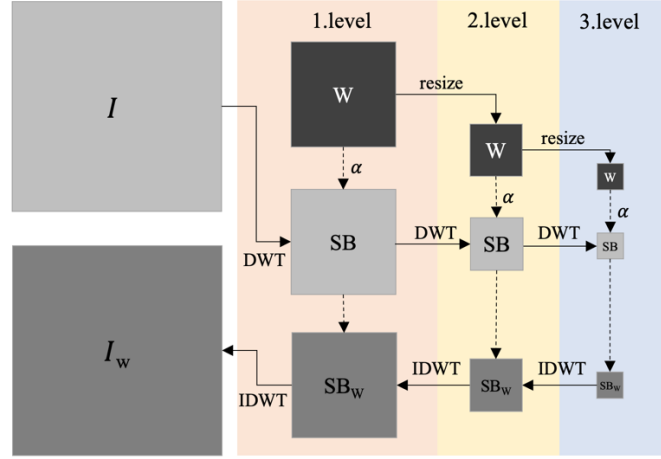


Figure 4. Flowchart of multi-level DWT watermarking

The two most important criteria for evaluating the performance of a watermarking algorithm are imperceptibility and robustness. The imperceptibility is measured by the amount of similarity between I and I_w , and the robustness is measured by the similarity between W and W_e . If these images are considered as signals, the alteration in the watermarked image can be calculated by the distance between two signals. In this paper, a hybrid similarity metric is calculated using Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), Normalized Correlation (NC) and Structured Similarity Index (SSIM).

PSNR calculates the Gauss noise [47] between two signals using the Mean Squared Error (MSE). MSE is an old test to see whether two signals are how much similar [48]. Let I and S are two signals composed of N samples, x_i and y_i be samples of I and S , respectively. MSE is calculated in equation 7.

$$MSE(I, S) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 \quad (7)$$

Let L is the peak value of I and S . PSNR is calculated by equation 8.

$$PSNR(I, S) = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE(I, S)} = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE(I, S)} \quad (8)$$

Here, the peak value is the maximum numerical value of a pixel. The maximum color value a pixel can hold for a 24-bit color image is 255. If two signals are the same, $PSNR = \infty$. $PSNR > 40$ is calculated if the two signals are structurally close to each other. However, PSNR is a mathematical approach and is not directly related to HVS. In signal processing, one of the techniques used to measure the similarity of two signals is cross-correlation. Since images are two-dimensional signals, two-dimensional correlation analysis can measure the similarity of two images. The correlation coefficient is calculated by shifting two images of $m \times n$ size over each other $m \cdot n$ times so that all pixels pass over each other. Equation 9 calculates the NC between the $m \times n$ sized cover image and the watermarked image.

$$NC(I, S) = \frac{\sum_m \sum_n (I - \bar{I})(S - \bar{S})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (I - \bar{I})^2)(\sum_m \sum_n (S - \bar{S})^2)}} \quad (9)$$

PSNR and NC are suitable for structural computation but they are not close to HVS. SSIM measurement is performed to obtain results close to HVS. To calculate SSIM (equation 10), images are decomposed into luminance component l , contrast component c , and structure component s [24].

$$SSIM(I, S) = l(I, S)^\alpha \cdot c(I, S)^\beta \cdot s(I, S)^\gamma \quad (10)$$

α , β , and γ are the three parameters used to adjust the importance of each of the three components. If the two images are identical, the SSIM value of 1 is calculated [47]. In this paper, a hybrid similarity score, which is the multiply of PSNR, NC, and SSIM, (Equations 11, 12) is proposed to measure the robustness and imperceptibility of watermarking in DWT sub-bands.

$$Ro = PSNR(W, W_e).NC(W, W_e).SSIM(W, W_e) \quad (11)$$

$$Im = PSNR(I, I_w).NC(I, I_w).SSIM(I, I_w) \quad (12)$$

Here, Ro refers to the robustness and Im refers to imperceptibility of the watermarking method.

IV. RESULTS AND CONCLUSIONS

In this paper, images 40, 199, 206 and 231 in the Ultra High-definition Demoiréing Dataset [26] were used as test1, test2, test3, and test4 images, respectively (figure 5). The fact that the histogram characteristics of the selected test images are not similar to each other is important for the reliability of the results of the study.

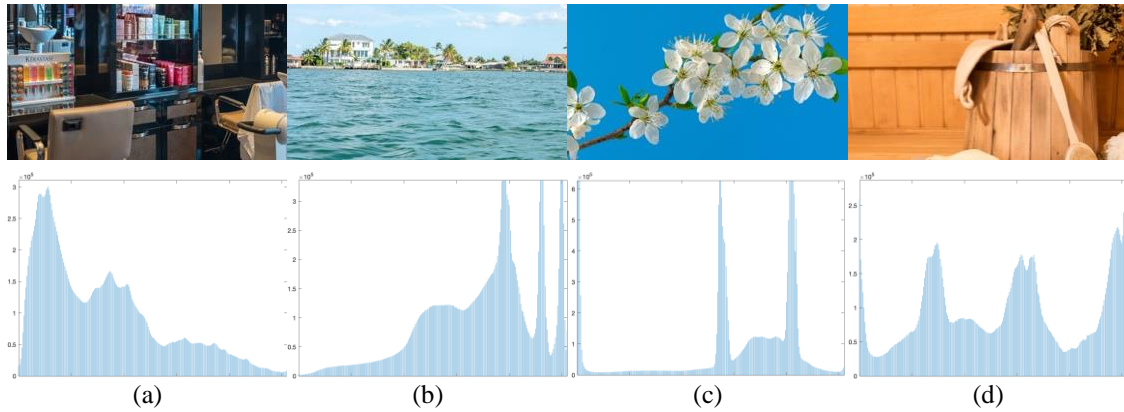


Figure 5. (a) test1 (b) test2 (c) test3 (d) test4 images and their histograms

A monochrome logo image was used as a watermark (figure 6).



Figure 6. Watermark

Test images were watermarked with the 46 different resolution standards shown in table 2. Ten different α values were used as $\{\alpha \in 0.01, 0.1, \dots, 1\}$. Each test image was watermarked with these parameters in the 1st, 2nd, and 3rd level LL, LH, HL and HH sub-bands. That is, a total of 22080 iterations were performed for the 4 test images. After each iteration, Ro and Im values were calculated and saved in Ro_{SB} and Im_{SB} matrices for the relevant sub-band, respectively. The average of these matrices was saved in the $Ro_{\mu SB}$ and $Im_{\mu SB}$ matrices for each sub-band. Table 2 shows the maximum and minimum robustness and imperceptibility values in $Ro_{\mu SB}$ and $Im_{\mu SB}$ matrices.

Table 2. Maximum and minimum of robustness and imperceptibility values of the mean results of test images with multi-level sub-band watermarking.

Standard	Resolution	min($I_{m_{\mu}}$)			max($I_{m_{\mu}}$)			min(Ro_{μ})			max(Ro_{μ})		
		sb	α	Value	sb	α	Value	sb	α	Value	sb	α	Value
QQVGA	160x120	LL3	0.91	0.84447	HH3	0.01	21.5308	HH1	0.01	-0.0650	LL1	0.31	0.38867
HQVGA	240x160	LL3	0.91	0.79407	HH3	0.01	23.4684	LH1	0.01	-0.0731	LL1	0.31	0.53059
CGA	320x200	LL3	0.91	0.73006	HH3	0.01	25.0289	LH1	0.01	-0.0783	LL1	0.21	0.63342
QVGA	320x240	LL3	0.91	0.69643	HH3	0.01	25.9791	HL1	0.01	-0.0827	LL1	0.21	0.70607
WQVGA	432x240	LL3	0.91	0.68613	HH3	0.01	26.5256	HL1	0.01	-0.082	LL1	0.21	0.71877
CGA	640x200	LL3	0.91	0.70624	HH3	0.01	25.9582	HL1	0.01	-0.0724	LL1	0.21	0.65205
HVGA	480x320	LL3	0.91	0.67334	HH3	0.01	28.3424	HL1	0.01	-0.0869	LL1	0.21	0.78889
VGA	640x480	LL3	0.91	0.61042	HH3	0.01	31.5342	HL1	0.01	-0.0885	LL1	0.21	0.84758
SVGA	800x600	LL3	0.91	0.56893	HH3	0.01	33.604	HL1	0.01	-0.0845	LL1	0.21	0.86815
PAL	1024x576	LL3	0.91	0.55742	HH3	0.01	33.8232	HL1	0.01	-0.0825	LL1	0.11	0.87293
DVGA	960x640	LL3	0.91	0.5633	HH3	0.01	34.5091	HL1	0.01	-0.079	LH1	0.91	0.91636
XGA	1024x768	LL3	0.91	0.53554	HH3	0.01	36.0028	HL1	0.01	-0.0694	LL1	0.11	0.92035
WXGA	1280x720	LL3	0.91	0.53074	HH3	0.01	35.9732	HL1	0.01	-0.0735	LH1	0.91	1.4853
WXGA	1280x768	LL3	0.91	0.52589	HH3	0.01	36.5044	HL1	0.01	-0.0677	LH1	0.91	1.4857
WXGA	1280x800	LL3	0.91	0.51977	HH3	0.01	36.8289	HL1	0.01	-0.0668	LH1	0.81	1.4858
SXGA	1280x960	LL3	0.91	0.50063	HH3	0.01	38.2496	HL1	0.01	-0.0444	LH1	0.91	1.4873
WXGA+	1440x900	LL3	0.91	0.43738	HH3	0.01	37.8929	HL1	0.01	-0.0564	LH1	0.71	1.9318
SXGA	1280x1024	LL3	0.91	0.4869	HH3	0.01	38.7471	HL1	0.01	-0.0398	LH1	0.91	1.4876
HD+	1600x900	LL3	0.91	0.43188	HH3	0.01	38.0892	HL1	0.01	-0.056	LH1	0.61	1.5199
1080i	1440x1080	LL3	0.91	0.48754	HH3	0.01	39.4644	HL2	0.01	-0.0382	LH1	0.71	1.9337
UXGA	1600x1200	LL3	0.91	0.46633	HH3	0.01	40.669	HL2	0.01	-0.0353	LH1	0.61	1.5217
DCI 2K	2048x1080	LL3	0.91	0.46817	HH3	0.01	40.1364	HL2	0.01	-0.034	LL1	0.11	0.97712
Full HD+	1920x1280	LL3	0.91	0.44585	HH3	0.01	41.6166	HL2	0.01	-0.0368	LL1	0.11	0.98734
TXGA	1920x1400	LL3	0.91	0.43479	HH3	0.01	42.3666	HL2	0.01	-0.0345	LL1	0.11	0.99931
QXGA	2048x1536	LL3	0.91	0.42599	HH3	0.01	43.3559	HL2	0.01	-0.0335	HL1	0.61	1.1374
WQHD	2560x1440	LL3	0.91	0.41618	HH3	0.01	43.0006	HL2	0.01	-0.0317	HL1	0.61	1.0616
WQXGA	2560x1600	LL3	0.91	0.40528	HH3	0.01	43.9754	HL2	0.01	-0.031	HL1	0.61	1.197
QSXGA	2560x2048	LL3	0.91	0.37415	HH3	0.01	46.3237	HL2	0.01	-0.0253	HL1	0.31	1.5277
WQXGA+	3200x1800	LL3	0.91	0.38052	HH3	0.01	45.2008	HH1	0.01	-0.055	HL1	0.61	1.2217
UW4K	3840x1600	LL3	0.91	0.3856	HH3	0.01	44.0789	HH1	0.01	-0.0572	HL1	0.61	1.1974
4K UHD-1	3840x2160	LL3	0.91	0.35293	HH3	0.01	47.0685	HH1	0.01	-0.0546	HL1	0.31	1.7291
WQUXGA	3840x2400	LL3	0.91	0.34003	HH3	0.01	48.2521	HH1	0.01	-0.0506	HL1	0.31	2.0277
UW5K	5120x2160	LL3	0.91	0.34084	HH3	0.01	47.1135	HH1	0.01	-0.0541	HL1	0.31	1.7296
HXGA	4096x3072	LL3	0.91	0.31114	HH3	0.01	50.2408	HH1	0.01	-0.0472	HL1	0.31	2.4902
5K	5120x2880	LL3	0.91	0.30969	HH3	0.01	50.2176	HH1	0.01	-0.0455	HL1	0.31	2.7514
WHXGA	5120x3200	LL3	0.91	0.29886	HH3	0.01	50.7446	HH1	0.01	-0.0449	HL1	0.11	2.1595
HSXGA	5120x4096	LL3	0.91	0.27866	HH3	0.01	52.717	HH1	0.01	-0.0389	HL1	0.31	1.4547
6K	6016x3384	LL3	0.91	0.28892	HH3	0.01	51.3585	LH1	0.01	-0.0457	HL1	0.21	2.5458
WHSXGA	6400x4096	LL3	0.91	0.27006	HH2	0.01	52.8571	LH1	0.01	-0.0443	HL1	0.31	1.4548
HUXGA	6400x4800	LL3	0.91	0.26498	HH2	0.01	53.4224	LH1	0.01	-0.0432	HL2	0.21	2.9734
8K UHD-2	7680x4320	LL3	0.91	0.26264	HH2	0.01	53.4889	LH1	0.01	-0.0469	HL1	0.31	1.5027
WHUXGA	7680x4800	LL3	0.91	0.2593	HH2	0.01	53.5158	LH1	0.01	-0.046	HL2	0.21	2.9752
DCI 8K	8192x4320	LL3	0.91	0.26083	HH2	0.01	53.5146	LH1	0.01	-0.0466	HL1	0.31	1.5027
UW10K	10240x4320	LL3	0.91	0.25487	HH2	0.01	53.575	LH1	0.01	-0.0461	HL1	0.31	1.5027
8K FullDome	8192x8192	LL3	0.91	0.24665	HH2	0.01	53.7432	LH1	0.01	-0.0455	LL1	0.11	1.0386
16K	15360x8640	LL3	0.91	0.23324	HH3	0.01	53.83	LH1	0.01	-0.0441	LL1	0.11	1.0398

The worst imperceptibility value was measured by watermarking the LL3 sub-band with high strength factor at all resolutions. I and I_w diverged from each other as the amount of resolution increased in the LL3 sub-band. The best imperceptibility was measured in the high-level sub-bands. High imperceptibility value was calculated with low strength factor in the sub-band HH2 at low resolutions and HH3 sub-band at high resolutions. Both of the worst and the best robustness values were measured in the 1st and 2nd level sub-bands. Watermark robustness is average in all the level 3 sub-bands. The robustness values in the 1st and 2nd level sub-bands vary according to the resolution and the histogram characteristic of the image. Figure 7 shows the estimated (a) worst imperceptibility, (b) best imperceptibility, (c) worst robustness and (d) best robustness results for test1 image based on the average values shown in Table 2.

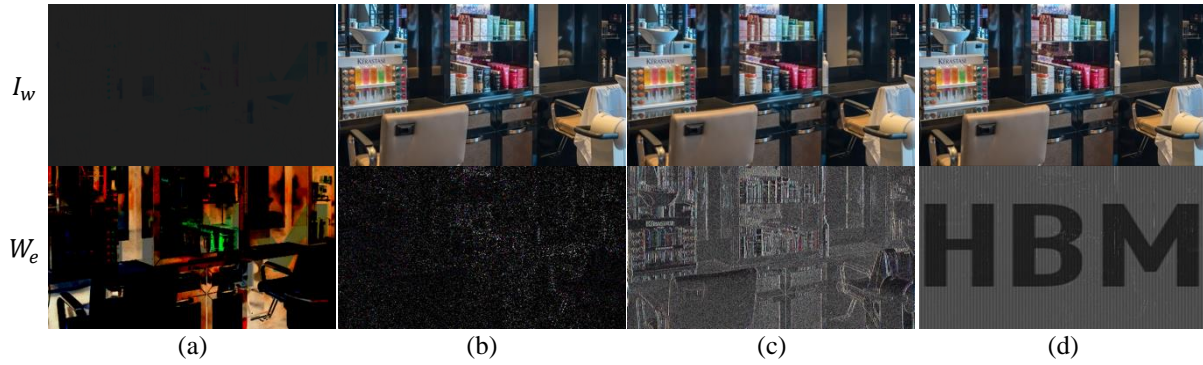


Figure 7. (a) 16K image watermarked in LL3 with $\alpha = 0.91$ (b) 16K image watermarked in HH3 with $\alpha = 0.01$ (c) VGA image watermarked in HL1 with $\alpha = 0.01$ (d) HUXGA image watermarked in HL2 with $\alpha = 0.21$

Figure 8 shows the surface plots of the imperceptibility, watermark strength, and pixel count for the Im_{μ} matrix. It is clear that the strength value only visibly affects the imperceptibility in the HL sub-band. In other sub-bands, the watermark strength does not affect the imperceptibility much. Watermarking into LL sub-bands is unsuccessful in imperceptibility, regardless of sub-band, watermark strength, and pixel count. In the HH and LH sub-bands, resolution up to 2 million pixels at 1st level DWT has no visible effect on imperceptibility. However, as the number of pixels increase in the 2nd and 3rd level sub-bands, the imperceptibility increases.

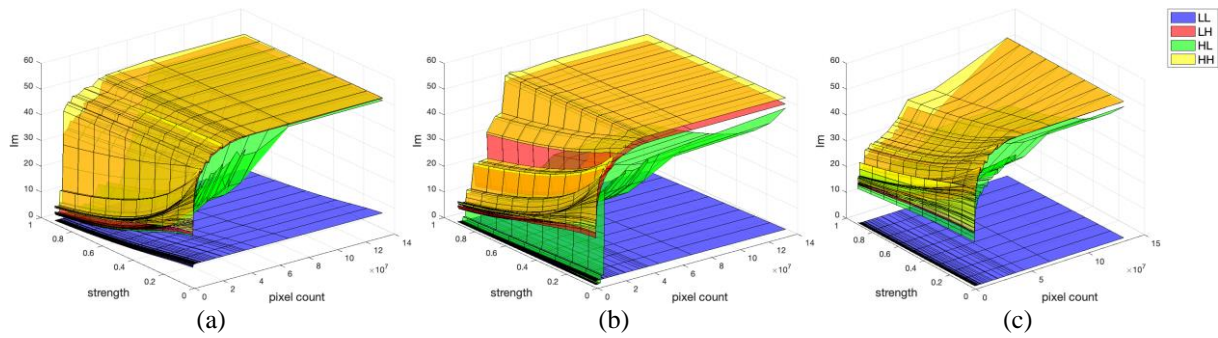


Figure 8. (a) Im_{μ} in 1st level sub-bands (b) Im_{μ} in 2nd level sub-bands (c) Im_{μ} in 3rd level sub-bands

Figure 9 shows the surface plots of the robustness, watermark strength, and pixel count for the Ro_{μ} matrix. Accordingly, more robust watermarking occurs in the LH sub-bands at low resolutions. At medium resolutions, on the other hand, more robust watermarking is achieved in the HL sub-band. At high resolutions, the LL sub-bands results with more robust watermarking. An increase in the watermarking strength increases the robustness in the LL1 and HL3 sub-bands, but decreases it in the LL1 sub-band.

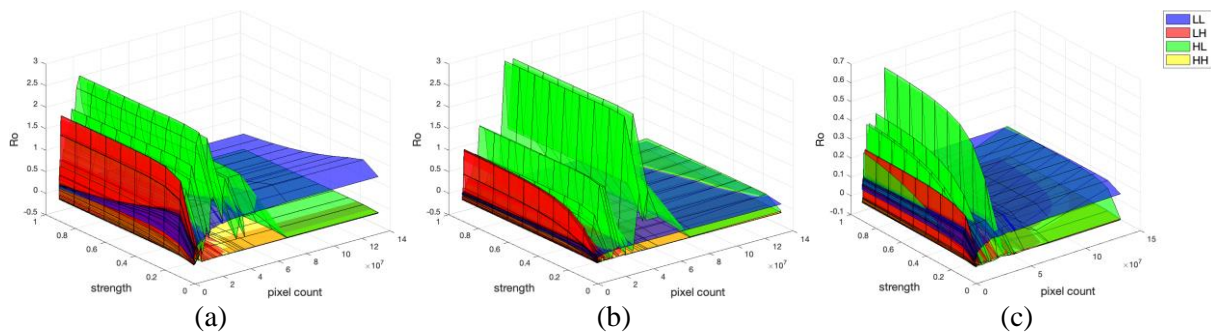


Figure 9. (a) Ro_{μ} in 1st level sub-bands (b) Ro_{μ} in 2nd level sub-bands (c) Ro_{μ} in 3rd level sub-bands

There are many studies in the literature on DWT watermarking or the technique of combining DWT and another watermarking technique. However, most of these studies focused on LL sub-bands. Few

studies use blend techniques combining two or more sub-bands. Also, few studies have compared performance between sub-bands. Table 3 shows the sub-band comparison results of some papers in the literature. As it is clearly seen in the table, there is no standard comparison metric.

Table 3. Literature comparison.

Paper	Test cover image(s)	Metric result(s) achieved	Sub-band			
			LL	LH	HL	HH
[27]	512x512 medical image database (computerized tomography scan)	Energy distribution of sub-bands.	99.9636%	0.0272%	0.0055%	0.0036%
[8]	Lena image	NC values after 0.4 Fausain noise attack	NaN	NaN	0.660	0.652
[49]	Lena image	Diagonal entries (singular values)	64.462	313	586	204
[50]	60 test images from 512x512 to 3840x2160 resolution	$T_{S_n,l}$ and $T_{S_n,h}$ (low and high energy or energy variance threshold values)	$T_{S_n,l} = 1.5$ $T_{S_n,h} = 2.5$	$T_{S_n,l} = 2$ $T_{S_n,h} = 8$	$T_{S_n,l} = 2$ $T_{S_n,h} = 8$	$T_{S_n,l} = 2$ $T_{S_n,h} = 8$
[51]	Lena image	NC between extracted and original watermark	0.9997	0.9391	0.9526	1.0154
[52]	Unspecified	PSNR of watermarked video (2-level DWT)	34.65	50.12	48.19	47.92
[53]	Unspecified	PSNR values of different sub-bands under different embedding intensities with the capacity of 128x128 resolution ($\alpha = 0.01$)	102.2821	78.7027	64.0317	57.4745

In this study, the watermarking performance was measured in 12 different sub-bands of DWT for 3 levels. Results were evaluated with a multi-criteria hybrid metric. In summary, it can be said that the robustness and imperceptibility criteria of the watermarking method do not depend only on the selected sub-band. The resolution of the image to be watermarked is as important a criterion as choosing the right sub-band.

V. REFERENCES

- [1] W.H. Jing, "A DCT domain image watermarking method based on Matlab," Int. J. Adv. Netw. Monit. Control, vol. 2, no. 2, pp. 38-45, 2017.
- [2] F. Ernawan, D. Ariatmanto and A. Firdaus, "An improved image watermarking by modifying selected DWT-DCT coefficients," in IEEE Access, vol. 9, pp. 45474-45485, 2021.
- [3] H.B. Macit, "Mobil cihaz görüntüleri için entropi tabanlı kırılğan damgalama metodu geliştirilmesi," Ph.D. dissertation, Comput. Eng., Süleyman Demirel Univ., Isparta, Turkey, 2019.
- [4] D. Haueter, "Worldwide image capture forecast," Rise Above Research, pp. 2021 – 2026, 2022.

- [5] A.K. Abdulrahman and S. Öztürk, "A novel hybrid DCT and DWT based robust watermarking algorithm for color images," *Multimed. Tools and Appl.*, vol. 78, pp. 17027-17049, 2019.
- [6] J. Liu, J. Huang, Y. Luo, L. Cao, S. Yang, D. Wei and R. Zhou, "An optimized image watermarking method based on HD and SVD in DWT domain," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 80849-80860, 2019.
- [7] S. Kumar and B.K. Singh, "DWT based color image watermarking using maximum entropy," *Multimed. Tools and Appl.*, vol. 80, pp. 15487–15510, 2021.
- [8] A. Al-Haj, "Combined DWT-DCT digital image watermarking," *J. Comput. Sci.*, vol. 9, pp. 740-746, ISSN 1549-3636, 2007.
- [9] E.E. Hemdan, "An efficient and robust watermarking approach based on single value decompression, multi-level DWT, and wavelet fusion with scrambled medical images," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, pp. 1749–1777, 2021.
- [10] C. Patvardhan, P. Kumar and C.V. Lakshmi, "Effective color image watermarking scheme using YCbCr color space and QR code," *Multimed. Tools Appl.*, vol.77, pp. 12655–12677, 2018.
- [11] M. Boreiry and M.R. Keyvanpour, "Classification of watermarking methods based on watermarking approaches," *Artif. Intell. Robot.*, Tehran, Iran, pp. 73-76, 2017.
- [12] C. Yin, L. Li, A. Lv and L. Qu, "Color image watermarking algorithm based on DWT-SVD," *Proc. IEEE Int. Conf. Automat. Logistics*, Jinan, China, August 18-21, 2007.
- [13] M. Patel, P.S. Sajja, R. Sheth, "Analysis and survey of digital watermarking techniques," *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng.*, vol. 3, no. 10, pp. 203-210, 2013.
- [14] A. Abdülkhaev, "A new approach for video watermarking," M.S. thesis, *Elect. Electron. Eng.*, Gaziantep Univ., 66p, 2016.
- [15] C. Petzold, "Triple standard: three new video modes from IBM," *PC Magazine*, July 1987.
- [16] J. Richter, *Power programming the IBM XGA*, MIS Press, ISBN: 1-55828-127-4, 1992.
- [17] Digital Cinema Initiatives LLC, "Digital cinema system specification document (v.1.4.2)," 2022.
- [18] Digital cinema distribution master, SMPTE 428-1-2006, The Society of Motion Picture and Television Engineers, 2006.
- [19] Ultra-High Definition Television, Image Parameter Values for Program Production, SMPTE ST 2036-1:2014, Society of Motion Picture and Television Engineers, 2014.
- [20] D. Lee, "Apple announces \$4,999 Pro Display XDR,". [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2019/6/3/18644791/apple-mac-pro-display-xdr-6k-retina-hdr-wwdc-2019>, 2019.
- [21] Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange, Rec. ITU-R BT.2020-2, International Telecommunication Union, Geneva, 2015.

- [22] D. Lokas, "Innolux premieres world's first 100 inch 16K display the best vision ever," DisplayDaily, [Online]. Available: <https://displaydaily.com/innolux-to-showcase-smartwatch-with-flexible-oled-display/>, 2018.
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_common_resolutions, Access date: 30.12.2022
- [24] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh and E.P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," IEEE Trans. Image Process., vol. 13, no. 4, pp. 600-612, 2004.
- [25] Z.H. Wei, P. Qin and Y.Q. Fu, "Perceptual digital watermark of images using wavelet transform," IEEE Trans. Consum. Electron., vol. 44, no. 4, pp. 1267-1272, Nov. 1998.
- [26] X. Yu, P. Dai, W. Li, L. Ma, "Towards efficient and scale-robust ultra-high-definition image demoreing," arXiv:2207.09935, 2022.
- [27] F. Kahlessenane, A. Khaldi, R. Kafi and S. Euschi, "A DWT based watermarking approach for medical image protection," J. Ambient Intell. Humanized Comput., vol. 12, pp. 2931-2938, 2021.
- [28] K.J. Giri, S.M.K. Quadri, R. Bashir and J.I. Bhat, "DWT based color image watermarking: a review," Multimed. Tools Appl., vol. 79, pp.32881-32895, 2020.
- [29] H.C. Huang, F.H. Wang and J.S. Pan, "Efficient and robust watermarking algorithm with vector quantization," Electron. Lett., vol. 37 no. 13, pp. 826-828, 2001.
- [30] C. Qin, P. Ji, J. Wang and C.C. Chang, "Fragile image watermarking scheme based on VQ index sharing and self-embedding," Multimed. Tools Appl., vol. 76, no. 2, pp. 2267-2287, 2017.
- [31] M. Barni, F. Bartolini, A.D. Rosa and A. Piva, "Color image watermarking in the Karhunen-Loeve transform domain," J. Electron. Imaging, vol. 11, no. 1, pp. 87-95, 2002.
- [32] M. Botta, D. Cavagnino, V. Pomponiu, "Fragile watermarking using Karhunen-Loeve transform: the KLT-F approach," Soft Comput., vol. 19, no. 7, pp. 1905-1919, 2015.
- [33] E. Etemad, S. Samavi, S.M.R. Soroushmehr, N. N. Karimi, M. Etemad, S. Shirani and K. Najarian, "Robust image watermarking scheme using bit-plane of hadamard coefficients," Multimed. Tools Appl., vol. 77, no. 2, pp. 2033-2055, 2018.
- [34] J. Li, C. Yu, B.B. Gupta and X. Ren, "Color image watermarking scheme based on quaternion Hadamard transform and Schur decomposition," Multimed. Tools Appl., vol. 77, no. 4, pp. 4545-4561, 2018.
- [35] L. Chen and J. Zhao, "Contourlet-based image and video watermarking robust to geometric attacks and compressions," Multimed. Tools Appl., vol. 77, no. 6, pp. 7187-7204, 2018.
- [36] Q. Su, G. Wang, G. Lv, X. Zhang, G. Deng and B. Chen, "A novel blind color image watermarking based on Contourlet transform and Hessenberg decomposition," Multimed. Tools Appl., vol. 76, no. 6, pp. 8781-8801, 2017.
- [37] D. Mistry and A. Banerjee, "Discrete wavelet transform using Matlab," Int. J. Computer Eng. Technol., vol. 4, no. 2, ISSN:0976-6375, pp. 252-259, 2013.
- [38] Ş. Doğan, "Yeni bir sayısal damgalama tekniği ile biyometrik uygulamalar," Ph.D. dissertation, Comput. Eng. Comput. Sci. Control, Firat Univ., Elazığ, Turkey, 2011.

- [39] K. Mahmoud, S. Datta and J. Flint, "Frequency domain watermarking: An overview," *Int. Arab J. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 33-47, 2005.
- [40] P. Porwik, "The Haar-wavelet transform in digital image processing: Its status and achievements," *Mach. Graph. Vision*, vol. 13, no.1/2, pp. 79-98, 2004.
- [41] V. Santhi, N. Rekha and S. Tharini, "A hybrid block based watermarking algorithm using DWT-DCT-SVD techniques for color images," *Int. Conf. Comput., Commun. Netw.*, pp. 1-7, 2008.
- [42] O. Jane and E. Elbaşı, "A new approach of non-blind watermarking methods based on DWT and SVD via LU decomposition," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 22, no. 5, pp. 1354-1366, 2014.
- [43] A. Mishra, C. Agarwal, A. Sharma and P. Bedi, "Optimized gray-scale image watermarking using DWT-SVD and firefly algorithm," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 17, pp. 7858-7867, 2014.
- [44] M. Hsieh, D. Tseng and Y. Huang, "Hiding digital watermarks using multiresolution wavelet transform," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 5, pp. 875-882, 2001.
- [45] E. Yavuz, "Duruk imgelerde damgalama ve veri saklama," Ph.D. dissertation, *Elect. Electron. Eng.*, Ankara University, 2008.
- [46] A. Sverdlov, S. Dexter and A.M. Eskicioglu, "Robust DCT-SVD domain image watermarking for copyright protection: Embedding data in all frequency," presented at the 13th European Signal Processing Conference, Antalya, 2005.
- [47] D.R.I.M. Setiadi, "PSNR vs SSIM: imperceptibility quality assessment for image steganography," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, pp. 8423-8444, 2021.
- [48] P.M. Naini, *Digital watermarking using Matlab, engineering education and research using Matlab*, Ali Assi, Ed., ISBN: 978-953-307-656-0, InTech, Iran, 2011.
- [49] E. Ganic and A.M. Eskicioğlu, A.M., "Robust DWT-SVD domain image watermarking: Embedding data in all frequencies," presented at the 6th Workshop Multimed. Secur., Magdeburg, Germany, September 20-21, 2004.
- [50] Y.S. Lee, Y.H. Seo and D.W. Kim, "Blind image watermarking based on adaptive data spreading in n-Level DWT subbands," *Hindawi Secur. Commun. Netw.*, 2019.
- [51] N.V. Dharwadkar, B.B. Amberker and A. Gorai, "Non-blind watermarking scheme for color images in RGB space using DWT-SVD," 2011 presented at the Int. Conf. Commun. Signal Process., Kerala, India, pp. 489-493, 2011.
- [52] S. P. Sathya and S. Ramakrishnan, "Fibonacci based key frame selection and scrambling for video watermarking in DWT-SVD domain," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 102, pp. 2011-2031, 2018.
- [53] Z. Zhang, C. Wang and X. Zhou, "Image watermarking scheme based on Arnold transform and DWT-DCT-SVD," presented at the IEEE 13th Int. Conf. Signal Proc., Chengdu, China, pp. 805-810, 2016.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Chemical Composition and Antibacterial Activity of Volatile Compounds *Genista carinalis* Plant

 Hilmican ÇALIŞKAN^{a,*},  Merve ARGON^a,  Muazzez GÜRGAN^b,  Temine ŞABUDAK^a

^a Namık Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Tekirdag, TÜRKİYE.

^b Namık Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Biology, Tekirdag, TÜRKİYE.

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: hlmcn.clskn@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1316704

ABSTRACT

Volatile compounds play a significant role in the plant chemistry. Natural products have been widely used in antiviral, antibacterial, antiparasitic, antifungal, insecticidal, medicinal and cosmetic applications since the Middle Age. Our aim in this study was to investigate the volatile components of the *Genista carinalis* Griseb. (Fabaceae) plant grown in the Trakya region by GC-MS method and to determine the antibacterial activity of the raw extracts. Volatile components of n-hexane extract from the plant *G. carinalis* were investigated using the GC-MS method. As a result of our research on the volatile components of *G. carinalis*, fifty-two bioactive components were identified. The ethyl acetate extract of *G. carinalis* was the most effective on both Gram-positive and Gram-negative bacteria tested, with higher antibacterial activity against Gram positive bacteria.

Keywords: *Genista*, *Genista carinalis*, *Fabaceae*, *Volatile compound*, *Antibacterial activity*

Genista carinalis Bitkisinin Uçucu Bileşiklerinin Kimyasal Bileşenleri ve Antibakteriyel Aktivitesi

Öz

Uçucu bileşikler, bitki kimyasında önemli bir rol oynamaktadır. Doğal ürünler, Orta Çağ'dan beri antiviral, antibakteriyel, antiparazitik, antifungal, böcek öldürücü, tıbbi ve kozmetik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki amacımız, Trakya bölgesinde yetişen *Genista carinalis* Griseb. (Fabaceae) bitkisinin uçucu bileşenlerini GC-MS yöntemi ile araştırmak ve ham ekstratlarında antibakteriyel aktivitesini belirlemektir. *G. carinalis* bitkisinden elde edilen n-hekzan ekstresinin uçucu bileşenleri, GC-MS yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. *G. carinalis*'in uçucu bileşenleri üzerine yaptığımız araştırma sonucunda elli iki adet biyoaktif bileşen tespit edilmiştir. Çalışmada denenen hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakteriler üzerinde en yüksek antibakteriyel etki *G. carinalis*'in etil asetat ekstresi ile elde edilmiştir. Bu ekstrenin Gram-pozitif bakterilere etkisinin Gram-negatiflere oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Genista*, *Genista carinalis*, *Fabaceae*, *Uçucu bileşik*, *Antibakteriyel aktivite*

I. INTRODUCTION

Natural products from some of the higher plants may be a new source of antimicrobial agents, which may have biological mechanisms of action [1]. Volatile compounds from aromatic plants are used in medicine and pharmacology as antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant, expectorant, analgesic and in the treatment of many ailments. They are also effective in defense against herbivores and pathogens [2]. The volatile compounds, which include chemical classes such as alcohols, esters, aliphatic and aromatic hydrocarbons, terpenes, nitrogen and sulphur compounds, are small molecules biosynthesized by primary and secondary metabolic pathways [3].

Plant essential oils, which may be called under different names such as volatile oil, aromatic oil or spirit, are important components of plant chemistry [4]. Essential oils, which constitute an important part of the traditional pharmacopoeia (codex), are generally obtained from various aromatic plants that grow in the geography between the warm-tropical countries and the temperate Mediterranean countries [5].

Nowadays, obtaining and evaluating medicinal plants and essential oils from such plants is very important scientifically and economically. Researches show that the essential oils of these plants have antimicrobial activities. In the antibiotic resistance era, new extracts and materials having antimicrobial activities are vital [6]. Besides the antimicrobial effects, by examining the pharmacological properties of essential oils and their components, it is stated that the possibilities of using them in medicine, cosmetics and industrial areas can be beneficial [7].

Genista species are used in the treatment of some human diseases. Of these, flowers or flowering branches of *G. tinctoria* and *G. lydia* species are used as diuretic, diaphoretic or laxative. In addition, the flowers of these plants are used to dye wool and linen fibers yellow or green [8].

The flowering time of the *G. carinalis* plant is June. It spreads around the world in Bulgaria, Greece and Türkiye. In Türkiye, it spreads in the northwest and west (Kırklareli, Istanbul, Kocaeli, Balıkesir and Izmir). It is found in maquis and forest clearing areas [9].

Our aim in this study is to investigate the volatile components of n-hexane extract of the *G. carinalis* grown in the Trakya region by GC-MS method and to determine the antimicrobial activity of the raw extracts (n-hexane, chloroform, ethyl acetate and n-butanol).

II. MATERIAL AND METHODS

A. PLANT MATERIAL AND EXTRACTIONS

G. carinalis (2048.56 g) plant was collected from Trakya region (Kırklareli; Location: 41°52'47.8"N 27°34'42.9"E and 41°52'29.5"N 27°34'36.4"E), at the time of flowering in May 2018. Identification of the plant has been done and its Herbarium number (EDTU-16811) has been given by Asst. Prof. N. Guler at Trakya University. After the whole plant was collected, it was dried in shade, ground into powder and divided into small portions and extracted with methanol (Merck-1070184000) at room temperature. The extraction process was repeated every three days, a total of four times. After the methanol was evaporated in the evaporator, a small amount of water was added to the crude extract obtained and back-extracted with n-hexane (Merck-1043742500) (46.85 g), chloroform (Merck-

1070242500) (15.50 g) ethyl acetate (Merck-1007892500) (45.66 g) and n-butanol (Merck-1019902500) (434.51 g) in order of polarity. Then, the solvents were evaporated in the evaporator and crude extracts were obtained [10]. A total of four crude extracts were obtained. The n-hexane, chloroform, ethyl acetate and n-butanol extracts have been used in the antibacterial activity tests. In addition, n-hexane extract was investigated by GC-MS method for the determination of volatile compounds in the plant.

B. GC-MS ANALYSIS

The instrument Hewlett-Packard HP 6890 series GC-MS equipped with a mass selective detector was used for chromatographic analysis. HP-5MS (5% phenyl methyl siloxane, 30m x 250 μ m x 0.25 mm) capillary column was used. Helium was used as carrier gas at a flow rate of 1.51 ml/min with an injection volume of 5 μ l. After injection, the samples were introduced into the column, which was initially held at 50°C for 5 minutes, then the temperature was elevated to 220°C with a 10°C/min heating ramp. The samples were injected in the split mode (split ratio: 40:1). The working time was recorded as 50 minutes [11]. The MS scanning range was found using electron effect ionization (EI) (70 eV) and an ion source temperature of 200°C. Compound determinations were performed using Wiley 9 and NIST libraries. The proportions of discrete compounds were computed by the computer integrator based on total ion chromatography. Retention index (RI) were determined extensively under the same chromatographic conditions, using a series of n-alkanes (C₆-C₂₂) [12].

C. ANTIBACTERIAL ACTIVITY

The obtained extracts were tested on 2 Gram negative (*Escherichia coli* ATCC 25922 and *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 278523) and 2 Gram positive (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and *Enterococcus faecalis* ATCC 29212) using agar well diffusion method [13]. The bacteria were obtained from Turkish Republic General Directorate of Public Health, Ankara, Türkiye. They were first grown on blood agar (BioMerieux, France) and adjusted to be 0.5 McFarland in sterile saline solution. The bacteria were spread on Mueller Hinton agar plates (under aseptic conditions. Agar wells of 6 mm diameter were formed on agar and 100 μ l of each extract dissolved in anhydrous DMSO (99.9%, Sigma Aldrich, Germany) was added in the wells. DMSO was also used as negative control, while Gentamicin sulfate (Sigma Aldrich, Germany) was used as positive control [14]. The plates were kept at 37°C overnight. The diameter of the zones around each well were measured. The experiment was repeated twice. The effects of extracts were compared using one-way ANOVA in Minitab 13 software.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The GC-MS chromatography analysis of *G. carinalis* revealed that there were fifty-two peaks and compounds in the n-hexane extract. The chemicals were identified according to their retention indices (RI) and concentration (calculated by the peak area %). These characterized compounds of *G. carinalis* plant are shown in Table 1 and Table 2, the former revealed a total of 52 compounds as a result of GC-MS analysis of the n-hexane extract of *G. carinalis* plant. In particular, *G. carinalis* n-hexane extract contains Hexadecanoic acid (Palmitic acid) (23.09%), one of the saturated fatty acids, 1-hexadecene (Flax) (10.46%), which is an alkene, and fatty acid (Z, Z, Z)-9,12,15-octadecatrienoic acid (Linolenic acid) (9.20%) and the phenolic compound 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-phenol (8.66%) are thought to be potential sources.

Table 1. The composition of *n*-hexane extract obtained from *G. carinalis*.

No	RI	Compounds	Percentage (%)
1	1022	1-methyl-2-pyrrolidinone	0.96
2	1055	Nonanal	0.51
3	1095	1-Dodecene	3.53
4	1102	Decanal	0.22
5	1144	1-Methoxyethyl benzoate	0.28
6	1151	Dodecane	0.15
7	1153	N,N-dibutyl-formamide	0.11
8	1195	1-Pentadecene	9.29
9	1199	Hexadecane	0.33
10	1206	Dodecanal	0.38
11	1261	2,6,11-trimethyl-dodecane	0.13
12	1273	1-bromo-3-(2-bromoethyl)-nonane	0.31
13	1281	1-methylpropyl ester 2-propenoic acid	0.17
14	1284	(1-methyl-1,2-ethanediyl) bis[oxy(methyl-2,1-ethanediyl)] ester 2-propenoic acid	0.18
15	1297	Docosane	0.59
16	1310	Hexadecanal	0.13
17	1315	2,4-bis(1,1-dimethylethyl)- phenol	8.66
18	1341	5,6,7,7a-tetrahydro-4,4,7a-trimethyl- 2(4H)-benzofuranone	0.41
19	1361	Lauric acid	0.62
20	1381	1,6-hexanediyl ester 2-propenoic acid	0.27
21	1389	Cetene	10.46
22	1396	Tridecane	0.27
23	1444	1-Dodecanol	0.21
24	1457	3-ethyl-2,7-dimethyl-octane	0.12
25	1460	(1-hydroxycyclohexyl) phenyl- methanone	1.23
26	1465	5-methyl-5-propyl-nonane	0.33
27	1467	Cyclopentadecanol	0.36
28	1493	Tetradecanoic acid	0.75
29	1498	(4-methylphenyl) phenyl- methanone	0.36
30	1564	1-Octadecene	6.87
31	1610	Isopropyl myristate	0.14
32	1617	Neophytadiene	0.12
33	1620	6,10-dimethyl-2-undecanone	1.14
34	1627	Pentadecanoic acid	0.14
35	1629	Dotriacontane	0.13
36	1633	Isobutyl phthalat	0.24
37	1634	N,N-diethyl-1-Octanamine	0.19
38	1638	5-Methyl-2-ethoxy-3,4-dihydro-2H- pyran	0.48
39	1643	Nonadecane	0.42
40	1646	Eicosane	0.35
41	1653	3-Ethyl-5-(2'-ethylbutyl) octadecane	0.17
42	1655	Undecanal	0.28
43	1658	Methyl palmitate	1.23
44	1659	7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5) deca- 6,9-diene-2,8-dione	1.14

45	1977	Palmitic acid	23.09
46	1694	E-15-Heptadecenal	3.21
47	1734	Cetal	1.17
48	1750	Phytol	0.56
49	1759	Methyl linolelaidate	2.94
50	1763	Linolenic acid	9.20
51	1774	Stearic acid	4.28
52	1793	1-Docosene	1.22

RI: Retention Indices.

These compounds are evaluated according to their functional group; the main components in the extract are alkenes (31.37%), saturated fatty acids (24.60%), unsaturated fatty acids (13.48%) and phenolic compounds (8.66%) (Table 2).

Table 2. The chemical class distribution of *G. carinalis* in n-hexane extract.

Compounds	Percentage (%)
Nitrogen Containing Heterocyclic Compound	0.96
Aldehyde	4.73
Alkene	31.37
Ester	6.59
Alkane	2.99
Amide	0.11
Alkyl Halides	0.31
Phenolic Compound	8.66
Terpene	1.09
Saturated Fatty Acid	24.60
Alcohol	1.74
Ketone	2.73
Amine	0.19
Heterocyclic Compound Containing Oxygen	0.48
Unsaturated Fatty Acid	13.48
Total (%)	100.03

Looking at the literature; Palmitic acid value also found in GC-MS analysis of *G. numidica* (15.34%), *G. saharae* (32.32%), *G. ulicina* (18.60%) and *G. vepres* (26.40%) plants, was observed at a value close to that of our study (%23.09) [15], [16]. Additionally, Rigano et al. [17], suggested that hexadecanoic acid (20.20%) was the main fatty acid identified in the *G. sessilifolia* and (E)- β -ionone (9.10%) was the main carbonylic compound identified in the *G. tinctoria*.

The antibacterial activities of *G. carinalis* n-hexane extract on different bacteria are demonstrated in Figure 1, and examples of agar plates for the antibacterial testing of different extracts of *G. carinalis* are given in Figure 2. The selected bacteria are representatives of normal human flora which have opportunistic subspecies that cause serious nosocomial infections [18]. It is well known that the solvent DMSO has no antibacterial activity [19], [20]. The ethyl acetate extract of *G. carinalis* was the most effective extract on *E. coli* (p=0.001). Apart from ethyl acetate, the others did not have significant effect on *E. coli*. On the other Gram-negative bacterium *P. aeruginosa* ethyl acetate extract of the plant was the most effective (p=0.000), followed by chloroform and n-butanol back extracts. N-hexane extract of *G. carinalis* did not have a significant antibacterial effect on this bacterium.

The degree of the effects of the back extracts were not the same on each bacteria tested (Figure 1). Species specific characteristics of the bacteria can affect the efficacy of antibacterial agents, as suggested for metal antimicrobial agents [21]. In addition, the structural difference between Gram-positive and Gram-negative bacteria can be responsible for the different resistance levels to antibacterial agents. Nevertheless, ethyl acetate extract was also the one exerting the highest antibacterial activity on the other two bacteria *S. aureus* and *E. faecalis* ($p=0.000$ for both). Ethyl acetate can be used as a good solvent for the plant extracts for medicinal purposes. There are several studies showing the efficacy of plant extracts obtained in ethyl acetate [22], [23], [24]. Therefore, ethyl acetate should be the choice for the back extraction of *G. carinalis* n-hexane extracts.

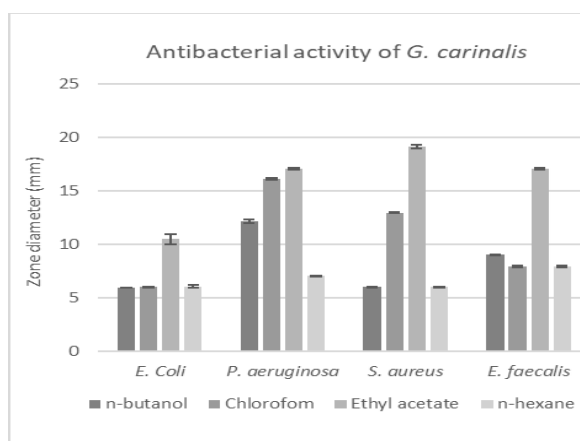


Figure 1. The antibacterial activities of *G. carinalis* in different solvents.

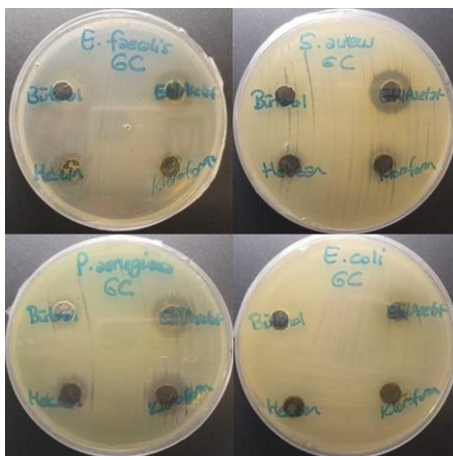


Figure 2. The plate photos of the antibacterial testing of *G. carinalis* extracts on different bacteria.

As tabulated in Table 1, one of the dominant ingredients of n-hexane extract of *G. carinalis* was palmitic acid (23.09%). Palmitic acid was found to be the major antibacterial ingredient of ethyl acetate extract of *Pentanisia prunelloides*. The extracts were reported to have antimicrobial activity against *E. coli*, *K. pneumoniae*, *B. subtilis* and *S. aureus* [25]. The second most abundant content of extract of *G. carinalis* was centere (10.46%) which was found to be an ingredient of the extract of *Loxostylis alata*, which had significant antibacterial effect against *Salmonella* species [26]. Linoleic acid and stearic acid are fatty acids known to have antibacterial activities [27] are also found in the extract of *G. carinalis* in 9.20% and 4.28%, respectively. To the best of our knowledge, there is no study investigating the antibacterial activity of *G. carinalis*, however, other species from the same

genus were studied. In one study, linoleic acid was detected in the oil obtained from *G. ulicina* and *G. vepres* in ratios of 3.1 and 11.7%. The oils obtained were also found to have antibacterial activity against the bacterial species used in our present study [16]. Another study carried out on *G. numicida* revealed that methanol extract of the aerial parts of the plant had antibacterial activity against some Gram-positive and Gram-negative bacteria. The contents of n-hexane extract of *G. carinalis* should have structured contents similar to the ones cited in the literature, therefore they can be said to have antibacterial activity against the two Gram-negative and two Gram-positive bacteria tested.

IV. CONCLUSION

The purpose of this document was to analyze the components of the *G. carinalis* n-hexane extract and to determine the antibacterial activity of the raw extracts. This research is the pioneer study on chemical composition of n-hexane extracts of *G. carinalis* together with the antibacterial activity of the raw extracts (n-hexane, chloroform, ethyl acetate and n-butanol).

The chemical classes of the n-hexane extract of *G. carinalis* were reported Table 2. Based on the administered chemical classes, the compounds were divided into fifteen classes, nitrogen containing heterocyclic compound, aldehyde, alkene, ester, alkane, amide, alkyl halides, phenolic compound, terpene, saturated fatty acid, alcohol, ketone, amine, heterocyclic compound containing oxygen and unsaturated fatty acid. On the whole, alkenes (31.37 %) constituted the main fractions of the n-hexane extract of *G. carinalis*. GC-MS analysis of hexane extracts from *G. carinalis* revealed various chemical compounds of pharmaceutical importance with different chemical structures.

The agar plates for the antibacterial testing results exhibited that the ethyl acetate extract of *G. carinalis* was the most effective extract on the bacteria tested. Therefore, ethyl acetate can be selected as the solvent to exhibit the antibacterial activity of the extracts of *G. carinalis*.

The results triggered us as a future study to antibacterial MIC testing and the isolation studies.

ACKNOWLEDGEMENTS: This study was funded by Scientific Research Projects Coordination Unit of Tekirdag Namik Kemal University (Project no: NKUBAP.01.DR.22.352).

V. REFERENCES

- [1] D. Runyoro, M. Matee, N. Olipa, C. Joseph, H. Mbwambo, "Screening of Tanzanian medicinal plants for anti-candida activity," BMC Complementary and Alternative Medicine, vol. 6, pp. 1-10, 2006.
- [2] L. Ercan, M. Dogru, "Determination of activity of *Nasturtium officinale* and its content of volatile organic compounds and fatty acids," Journal of Agriculture and Nature, vol. 25, pp.11-21, 2022.
- [3] A. Garrido, L.A. Atencio, R. Bethancourt, A. Bethancourt, H. Guzman, M. Gutiérrez, A.A. Durant-Archibold, "Antibacterial activity of volatile organic compounds produced by the octocoral-associated bacteria *Bacillus* sp. BO53 and *Pseudoalteromonas* sp. GA327," Antibiotics, vol. 9, no. 12, pp. 923, 2020.
- [4] E. Celik, G.Y. Celik, "Bitki uçucu yağlarının antimikrobiyal özellikleri," OrLab On-Line Mikrobiyoloji Dergisi, vol. 5, no. 2, pp. 1-6, 2007.

- [5] F. Bakkali, S. Averbeck, D. Averbeck, M. Idaomar, "Biological effects of essential oils-A review," *Food and Chemical Toxicology*, vol. 46, no. 2, pp. 446-475, 2008.
- [6] R. Laxminarayan, A. Duse, C. Wattal, A.K.M. Zaidi, H.F.L. Wertheim, N. Sumpradit, E. Vlieghe, G.L. Hara, I.M. Gould, H. Goossens, C. Greko, A.D. So, M. Bigdeli, G. Tomson, W. Woodhouse, E. Ombaka, A.Q. Peralta, F.N. Qamar, F. Mir, S. Kariuki, Z.A. Bhutta, A. Coates, R. Bergstrom, G.D. Wright, E.D. Brown, O. Cars, "Antibiotic resistance-the need for global solutions," *In The Lancet Infectious Diseases*, vol. 13, no. 12, pp. 1057-1098, 2013.
- [7] S. Kırbag, E. Bağcı, "*Picea abies* (L.) Karst. ve *Picea orientalis* (L.) Link uçucu yağlarının antimikrobiyal aktivitesi üzerine bir araştırma," *Journal of Qafqaz University*, vol. 3, no. 1, pp. 183-190, 2000.
- [8] T. Baytop, *Türkiye'de Bitkiler ile Tedavi*, Ankara, Türkiye: Nobel Tıp Kitapevleri, 1999.
- [9] P.E. Gibbs, *Flora of Turkey and the East Aegean Islands*, Edinburgh, UK: Edinburgh University Press, 1970.
- [10] T. Sabudak, H. Caliskan, H.H. Orak, M. Ozer, "Biological activity of new flavonoids and phenolic compounds from *Cirsium italicum* (Savi) DC." *Natural Product Research*, vol. 35 no. 10, pp. 1613-1619, 2021.
- [11] K.K. Keshala, A.M.P.W. Bandara, C. Padumadasa, L.D.C. Peiris, "Bioactivities and GC-MS profiling of Malewana Madhumeha Choorna polyherbal hot infusion," *South African Journal of Botany*, vol. 140, pp. 194-203, 2021.
- [12] D. Gulen, T. Sabudak, H.H. Orak, H. Caliskan, M. Ozer, "Bioactive compounds antibacterial and antifungal activities of two *Cirsium* species," *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, vol. 18, no. 5, pp. 213-221, 2019.
- [13] M. Balouiri, M. Sadiki, S.K. Ibsouda, "Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review," *Journal of Pharmaceutical Analysis*, vol. 6, no. 2, pp. 71-79, 2016.
- [14] N.A. Awadh Ali, B.K. Chhetri, N.S. Dosoky, K. Shari, A.J.A. Al-Fahad, L. Wessjohann, W.N. Setzer, "Antimicrobial, antioxidant and cytotoxic activities of *Ocimum forskolei* and *Teucrium yemense* (Lamiaceae) essential oils," *Medicines (Basel)*, vol. 4, no. 2, pp. 17, 2017.
- [15] T. Lograda, A.N. Chaker, P. Chalard, M. Ramdani, J.C. Chalchat, H. Silini, G. Figueredo, "Chemical composition and antimicrobial activity of essential oil of *Genista numidica* Spach. and *G. saharae* Coss et Dur," *Asian Journal of Plant Sciences*, vol. 8, no. 7, pp. 495-499, 2009.
- [16] T. Lograda, A.N. Chaker, J.C. Chalchat, M. Ramdani, H. Silini, G. Figueredo, P. Chalard, "Chemical composition and antimicrobial activity of essential oils of *Genista ulicina* and *G. vepres*," *Natural Product Communications*, vol. 5, no. 5, pp. 835-838, 2010.
- [17] D. Rigano, A. Russo, C. Formisano, V. Cardile, F. Senatore, "Antiproliferative and cytotoxic effects on malignant melanoma cells of essential oils from the aerial parts of *Genista sessilifolia* and *G. tinctoria*," *Natural Product Communications*, vol. 5, no. 7, pp. 1127-1132, 2010.
- [18] B. Poorabbas, J. Mardaneh, Z. Rezaei, M. Kalani, G. Pouladfar, M.H. Alami, J. Soltani, A. Shamsi-Zadeh, S. Abdoli-Oskooi, M.J. Saffar, A. Alborzi, "Nosocomial infections: Multicenter surveillance of antimicrobial resistance profile of *Staphylococcus aureus* and Gram negative rods isolated from blood and other sterile body fluids in Iran," *Iranian Journal of Microbiology*, vol. 7, no. 3, pp. 127-135, 2015.

- [19] C. Yavuz, D.D. Dereli Kılıç, A. Ayar, T. Yıldırım, "Antibacterial effects of methanol extracts of some plant species belonging to Lamiaceae family," *International Journal of Secondary Metabolite*, vol. 4, no. 3, pp. 429-433, 2017.
- [20] Q. Zhang, C. Yue, Y. Zhang, Y. Lu, Y. Hao, Y. Miao, J. Li, Z. Liu, "Six metal-organic frameworks assembled from asymmetric triazole carboxylate ligands: Synthesis, crystal structures, photoluminescence properties and antibacterial activities," *Inorganica Chimica Acta*, vol. 473, pp. 112-120, 2018.
- [21] N. Gugala, D. Vu, M.D. Parkins, R.J. Turner, "Specificity in the susceptibilities of *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* clinical isolates to six metal antimicrobials," *Antibiotics*, vol. 8, no. 2, pp. 51, 2019.
- [22] M.J. Kohoude, F. Gbaguidi, P. Agbani, M.A. Ayedoun, S. Cazaux, J. Bouajila, M. Eko, J. Kohoude, "Chemical composition and biological activities of extracts and essential oil of *Boswellia dalzielii* leaves," *Pharmaceutical Biology*, vol. 55, no. 1, pp. 33-42, 2016.
- [23] T. Sharmin, R. Sultana, F. Hossain, S.K. Shakil, F. Hossen, M. Mamun, O. Rashid, "Neuropharmacological and antibacterial effects of the ethyl acetate extract of *Diospyros malabarica* (Ebenaceae) seeds," *Clinical Phytoscience*, vol. 4, no. 1, pp. 1-8, 2018.
- [24] J.D. Tamokou, D.J. Simo Mpetga, P. Keilah Lunga, M. Tene, P. Tane, J.R. Kuate, "Antioxidant and antimicrobial activities of ethyl acetate extract, fractions and compounds from stem bark of *Albizia adianthifolia* (Mimosoideae)," *BMC Complementary and Alternative Medicine*, vol. 12, no. 1, pp. 1-10, 2012.
- [25] B.T.S. Yff, K.L. Lindsey, M.B. Taylor, D.G. Erasmus, J.A. Jager, "The pharmacological screening of *Pentanisia prunelloides* and the isolation of the antibacterial compound palmitic acid," *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 79, no. 1, pp. 101-107, 2002.
- [26] D.A. Gado, M.A. Abdalla, A.S. Ahmed, B. Madikizela, S.M. Nkadimeng, M.M. Ehlers, L.J. McGaw, "*In vitro* antibacterial activity of *Loxostylis alata* extracts and isolated compounds against *Salmonella* species," *BMC Complementary Medicine and Therapies*, vol. 21, no. 1, 1-16, 2021.
- [27] G. Casillas-Vargas, C. Ocasio-Malave, S. Medina, C. Morales-Guzman, R.G. Del Valle, N.M. Carballeira, D.J. Sanabria-Rios, "Antibacterial fatty acids: An update of possible mechanisms of action and implications in the development of the next-generation of antibacterial agents," *Progress in Lipid Research*, vol. 82, no. 101093, 2021.



Düzce University Journal of Science & Technology

Research Article

Thermo-mechanical behaviours investigation of Nano-Sized Al₂O₃, TiO₂, and Graphene Nanoplatelet Reinforced Epoxy Composites

 Gül den Kabakçı^{a,*},  Mert Kılınçel^a,  Güler Bengüsu Tezel^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Düzce University, Düzce, TURKEY

^b Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Bolu Abant İzzet Baysal University, Bolu, TURKEY

* Corresponding author's e-mail address: guldenkabakci@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1422620

ABSTRACT

Composite materials have been frequently used for extensive applications in various industries, thanks to their remarkable properties. These sectors include energy, maritime, motor sports, aviation, space and defense. The materials commonly used in these sectors are fibre reinforced plastic (FRP) composite materials. Epoxy materials are suitable for the production of FRP materials. This study delves into the enhancement of epoxy-based nanocomposites by using graphene nanoplatelets (GNP-5nm), TiO₂ (13nm), and Al₂O₃ (8nm) nanoparticles. These nanoparticles were added at varying mass ratios into a commercial epoxy to investigate their effects on some chemical, thermal and mechanical properties. Meticulous mixing methodologies were used to reduce clumping effects and ensure even distribution during the process. The curing process was carried out in a PLC (Programmable Logic Controller) controlled hot air oven under isothermal conditions under the influence of 100 °C for 30 minutes. Tensile strength, elongation at break, toughness, resilience modulus, elasticity modulus, hardness, FTIR analysis and thermal conductivity properties were characterized to assess the nanoparticle influence on the epoxy matrix. The results showed that there were remarkable improvements in mechanical properties with nanoparticle reinforcement. Especially, 1.25% Al₂O₃ inclusion exhibited a substantial increase of 140.32% in tensile strength and a 7% rise in shore D hardness compared to pure epoxy. This enhancement was attributed to enhanced O-H bonding between 'O' atoms in Al₂O₃ nanoparticles and epoxy polymer chains, enhancing matrix-filler interactions. Additionally, the effect of 1.0% TiO₂ led to plasticity, displaying a 32% rise in elongation at break, signifying improved deformation energy absorption compared to neat epoxy. In thermal conductivity measurements, the highest thermal conductivity was observed in the sample with 1.25% GNP added and it increased by 123.5% compared to neat epoxy. In TiO₂ and Al₂O₃ added samples, an increase of 69% and 47%, respectively, was observed at 1.25% additive rates compared to neat epoxy. According to the results, thanks to the nanoparticle reinforcement added into the epoxy matrix, composite structures can be given new and superior properties specific to the applications.

Keywords: Epoxy resin, Al₂O₃, TiO₂, GNP nanoparticles

Nano Boyutlu Al₂O₃, TiO₂ ve Grafen Nanoplatelet Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Termo-mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Öz

Kompozit malzemeler, dikkate değer özellikleri sayesinde çeşitli endüstri alanlarında geniş uygulama alanlarına sahiptir. Bu sektörler arasında enerji, denizcilik, motor sporları, havacılık, uzay, savunma gibi sektörler yer almaktadır. Bu sektörlerde yaygın olarak kullanılan malzemeler fiber takviyeli plastik (FRP) kompozit malzemelerdir. Epoksi malzemeler FRP malzemelerin üretiminde matris olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, grafen nanoplateletler (GNP-8nm), TiO₂ (13nm) ve Al₂O₃ (5nm) nanopartikülleri kullanılarak epoksi bazlı nanokompozitlerin geliştirilmesini araştırmaktadır. Çalışmada nanopartiküller, bazı kimyasal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için ticari bir epoksiye kütlece farklı oranlarında eklenmiştir. İşlem sırasında topaklanma etkilerini azaltmak ve eşit dağılım sağlamak için titiz karıştırma metodolojileri kullanılmıştır. Kütleme işlemi PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) kontrollü sıcak hava fırınında izotermal koşullar altında 100°C sıcaklık etkisi altında 30 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Epoksi matris üzerindeki nanoparçacık takviyesinin etkisini değerlendirmek için çekme mukavemeti, kopma uzaması, tokluk, esneklik modülü, elastikiyet modülü, sertlik, FTIR analizi ve termal iletkenlik özellikleri karakterize edilmiştir. Bulgularda nanopartikül ilaveleriyle mekanik özelliklerde dikkate değer gelişmelerin olduğu görülmüştür. Özellikle, %1,25 Al₂O₃ katılımı, saf epoksi ile karşılaştırıldığında çekme mukavemetinde %140,32'lik önemli bir artış ve Shore D sertliğinde %7'lik bir artış sergilemiştir. Bu gelişme, Al₂O₃ nanopartiküllerindeki 'O' atomları ve epoksi polimer zincirleri arasındaki gelişmiş O-H bağlarına atfedilerek matris-dolgu etkileşimlerini güçlendirdi. Ek olarak, %1,0 TiO₂'nin eklenmesi plastisiteye yol açarak kopma uzamasında %32'lik bir artış gösterdi; bu da saf epoksi ile karşılaştırıldığında daha iyi deformasyon enerjisi emilimi anlamına geliyordu. Isıl iletkenlik ölçümlerinde en yüksek ısıl iletkenlik %1,25 GNP ilaveli numunede gözlemlendi ve saf epoksiye göre %123,5 arttı. TiO₂ ve Al₂O₃ katkılı numunelerde saf epoksiye göre %1,25 katkı oranlarında sırasıyla %69 ve %47 artış gözlemlenmiştir. Sonuçlara göre epoksi matris içerisine eklenen nanopartikül takviyesi sayesinde kompozit yapılar uygulamalara özel yeni ve üstün özellikler kazandırılabilir. Termal iletkenlik ölçümlerinde ise en yüksek termal iletkenlik %1,25 GNP katkılı numunede gözlemlenmiştir ve saf epoksiye kıyasla %123,5 artış sağlamıştır. TiO₂ ve Al₂O₃ katkılı numunelerde ise %1,25 katkı oranlarında, saf epoksiye göre sırası ile %69 ve %47 artış gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, epoksi matris içerisine eklenen nanoparçacık takviyesi sayesinde kompozit yapılar uygulamalara özel yeni ve üstün özellikler kazandırılabilir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi reçine, Al₂O₃, TiO₂, GNP, nanoparticle

Received: 19/01/2024, Revised: 27/03/2024, Accepted: 03/04/2024

I. INTRODUCTION

Composite materials, structures composed of one or more materials merging to form structures with superior properties, are referred to as composite materials. Composite structures consist of two fundamental components: the matrix and the reinforcement phase[1]. One of the most commonly used matrix materials belongs to the thermoset polymer group, which includes epoxies [2], [3]. Epoxy resins are widely employed due to their outstanding mechanical, thermal, and electrical properties. However, cured epoxy materials possess cross-links formed during the curing process between hardener and epoxy groups, making the material more brittle [4].

Various filler materials are utilized to improve the properties and eliminate the brittleness of cured epoxy materials. Filler materials are classified into two groups: fiber reinforcement and particle

reinforcement [5]. Recent studies on epoxy polymers mainly involve applications utilizing particle reinforcements [6]. Better results in enhancing epoxy polymer properties have been achieved by obtaining for nano-sized particles instead of micro-sized ones. The decrease in particle size leads to an increase in the surface area within the mixture, forming better interfacial interactions. Combinations of epoxy-nano fillers have shown good improvements in material properties such as fracture toughness, coefficient of thermal expansion, and resistance to cutting and compression. For the industrial applications, the addition of nano additives to epoxy significantly influences the matrix phase to acquire a more rigid structure. A stiffer matrix distributes applied loads more homogeneously within the structure, enhancing resistance against cracking [7], [8]. The post-curing mechanical properties of epoxy relates to many variables, including the type of nano additives, compatibility with the epoxy-hardener system, the rate of homogeneous distribution within the matrix, interfacial interactions, and curing methods [8-9].

Among nano materials compatible with epoxy, graphene-based particles, Al_2O_3 (alumina), and TiO_2 stand out for their superior properties. Graphene and its derivatives, possessing two-dimensional carbon content, have been widely used in numerous applications due to their excellent mechanical, electrical, and thermal properties in enhancing the strength of composite materials [10]. Epoxy materials are generally known as polymers with brittle properties. With the use of nano particle reinforcements, this amount of brittleness is reduced and a certain amount of toughness can be provided to the material. In this sense, there are many studies on the use of nanoparticle reinforcement in different types, sizes and contribution rates into the epoxy matrix. Studies have been reported that the addition of alumina to epoxy enhances properties such as tensile-fracture strength, wear resistance, and thermal conductivity. Nanoparticles reinforced within the epoxy matrix provide improvements depending on the area of use. The ability of materials to eliminate instantaneous thermal loads to which they are exposed and to quickly distribute these thermal loads also plays an important role in the mechanical strength of the material [11-12]. TiO_2 stands out in recent research due to its high values in hardness, fracture, corrosion resistance, low cost, and additional attributes like bacterial resistance [13].

In a study by Aradhana et al. obtained by mass variable ratios of graphene ranging from 0% to 1.0%, 0.5% additive ratio showed approximately as 31% increase in tensile strength compared to pure epoxy [14]. Zandiatashbar et al. used graphene additives at the ratios of by mass 0.1-0.3-0.5 then observed a significant enhancement in material mechanical properties [15]. Mirmohseni and Zavareh used TiO_2 nanoparticles to increase tensile strength without reducing impact resistance while observing increases of 64% and 168% in tensile and impact resistance, respectively [16]. Kaushal Kumar et al. incorporated TiO_2 in sizes of 30-40 nm at the ratios of by mass 5-10-15% as noting increase of 22.38% in tensile strength and 37.5% in mechanical strength at a 10% additive ratio [17]. Hamid Rıza Salehi observed a 7.8% increase in tensile strength by employing TiO_2 at ratios of by mass 0.25-0.5 and 1% [18]. Fahamsyah et al. used of by mass 0-10% Al_2O_3 then obtained decrease in tensile, fracture, and hardness values with increasing additive ratios [19].

The purpose of this current study is to investigate the thermal and mechanical properties of a commercially used epoxy resin by reinforcing nanoparticles at certain rates by mass. TiO_2 (13nm), Al_2O_3 (5nm), GNP (8nm) nanoparticles were added at a rate of 0.75-1.0-1.25 percent by mass into the epoxy system consisting of Epikote MGS L285 epoxy and 100/40 \pm 2gr MGS LH285 hardener provided for this purpose, and they were cured at 100 degrees. After the curing processes, tensile test, hardness test, FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) analysis and thermal conductivity measurements of the samples were carried out. Besides, SEM (Scanning Electron Microscope) images were analysed both the nanoparticles before curing and the samples prepared by mixing them with epoxy after curing.

II. MATERIALS AND METHODS

In this study, a commercial Epikote MGS L285 epoxy and 100/40 ± 2gr MGS LH285 hardener were used. The properties of the epoxy system are given in Table 1.

Table 1. The properties of the epoxy system.

	EPIKOTETM MGS L285	MGS LH285
Equivalent weight (g/g)	155-170	-
Density (g/cm ³)	1.18-1.23	94-0.97
Amine value (mgr KOH/gr)	-	480-550

In addition to the epoxy matrix structure, nano-sized Al₂O₃, TiO₂ and GNP powders were added in certain proportions. The mass ratios of the particles selected and used in the study were decided by considering the studies given in the relevant introduction. These ratios are given in the Table 2 based on weight fraction.

Table 2. The properties of the epoxy system

	Al ₂ O ₃	GNP	TiO ₂
Particle reinforcement rates (% by weight)	0.75	0.75	0.75
	1	1	1
	1.25	1.25	1.25

A. PREPERATION OF THE SPECIMENS

The mixtures were prepared by subjecting them to mechanical mixing for 15 minutes and magnetic mixing for 5 minutes at room temperature in order to ensure homogeneous distribution of nanoparticles into the resin. In the next stage, the mixtures were kept in an ultrasonic bath for 15 minutes to remove air bubbles and were mixed with the hardener at a stoichiometric ratio (100: 40±1) at room temperature. Schematic view of the mixing stages of the components are given Figure 1.

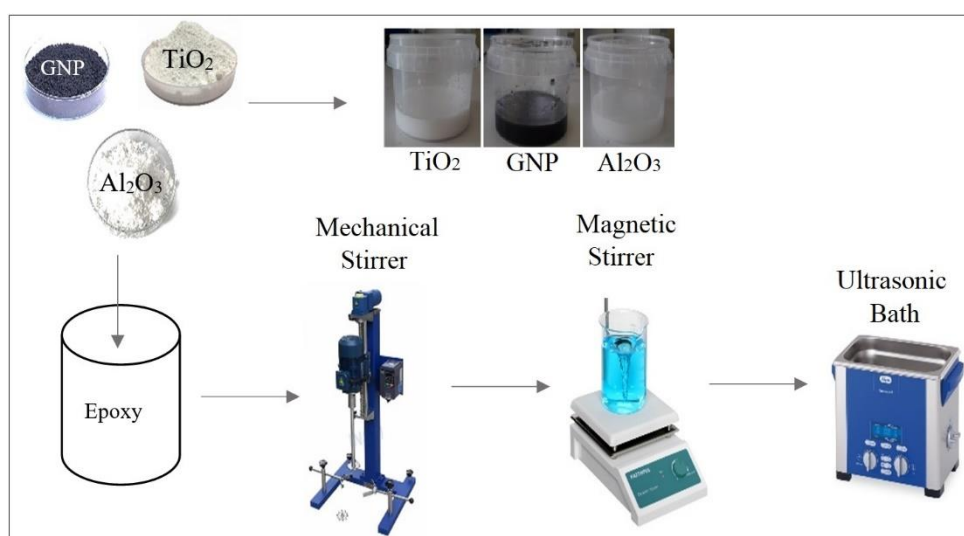


Figure 1. The Schematical view of preparation of the mixtures.

B. EXPERIMENTAL TEST SETUP

In experimental studies, mixtures were first prepared as described in the sample preparation phase. The prepared mixtures were poured into glass molds with a 4 mm thick cavity. Then, they were kept in the oven (UTEEST/UTD-1305) for 30 minutes to cure at 100 °C. After the curing process epoxy plates were kept in the molds for potential spring back or distortions at room temperature. Then the completely cured rectangular shaped plates were removed from the mold. Later on, plates were cut with a CNC router according to the dimensions of the test type to be applied.

In order to determine the certain mechanical and thermal properties of the samples, tensile test (TS EN ISO 527-1), hardness test (Shore D ASTM D2240), FTIR (chemical wavelength guide) analysis and thermal conductivity tests (ASTM D7984) were carried out.

In addition, SEM imaging was performed to determine the nanoparticle sizes. The gold coating was applied to the surface for better images since the structure is polymer. The SEM imaging was set and captured images powder particles are given in Figure 2.

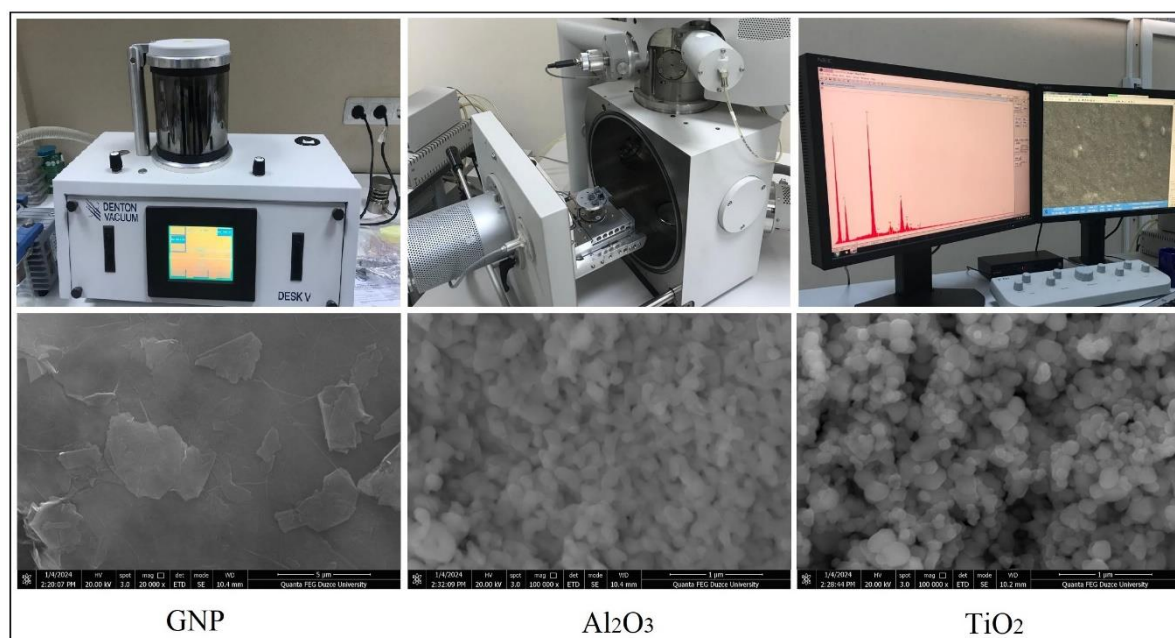


Figure 2. The view of SEM imaging set and captured images.

III. RESULTS AND DISCUSSION

In the study, the thermo-mechanical properties of nanoparticles were incorporated into the epoxy matrix were examined. The results are given under separate headings in this section.

A. TENSILE TEST RESULTS

The tensile test results obtained are presented in the following graphs and tables. When the graphs given in Figure 3 and Figure 4 are evaluated, tensile strength of neat epoxy was measured higher in Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles types at 0.75% and 1.0% contribution rates. In addition, the highest tensile strength values were measured in Al₂O₃. In the combination of epoxy matrix and TiO₂, polymer chain covalent bonding occurs with Van der Waals forces, thanks to the Ti molecules in the structure. These bonds provide a stronger structure [20].

They were also observed and presented in FTIR analysis results. On the other hand, although an increase in the tensile strength, breaking strength and load carrying capacity of the composite structure was observed with the TiO₂ additive compared to pure epoxy, it was as 3% lower compared to Al₂O₃ listed in Table 3.

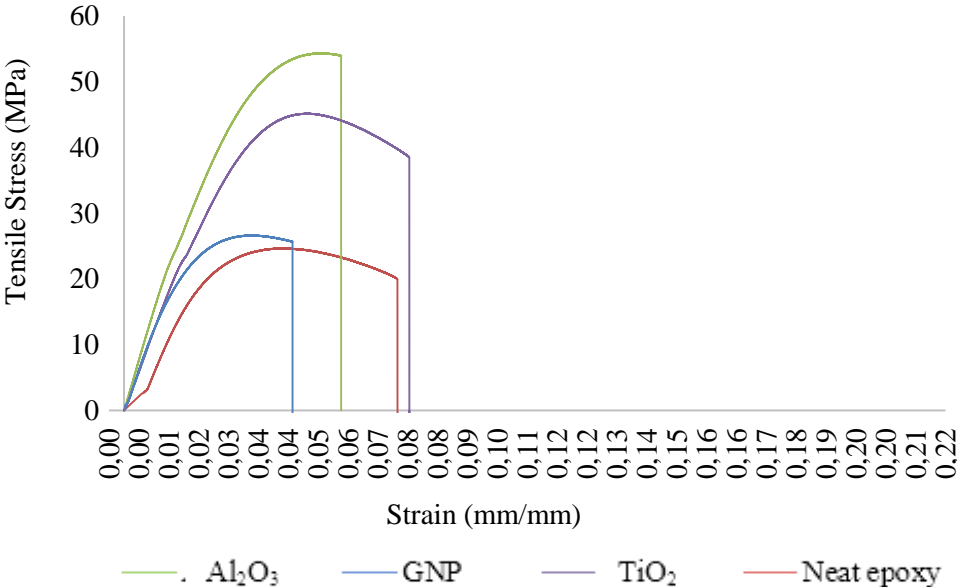


Figure 3. Stress-strain graph according to nanoparticle type at 0.75% percentage by mass.

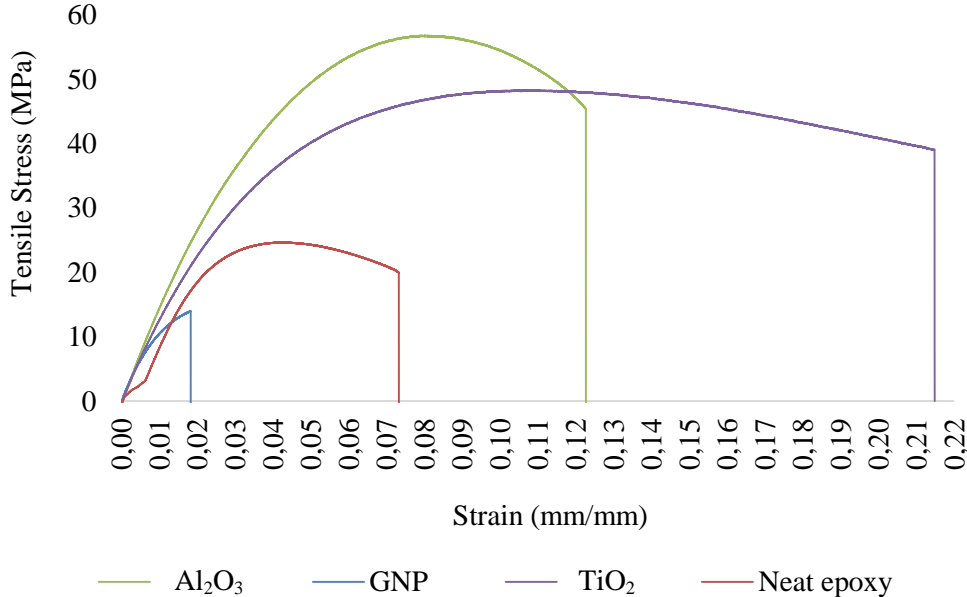


Figure 4. Stress-strain graph according to nanoparticle type at 1.0 % percentage by mass

Contrary to Al₂O₃ and TiO₂ additives decrease in tensile strength, then maximum load values have been reached for GNP additives. Similar situations have been recorded in previous studies in this field [21], [22]. This situation can arise from the weak and brittle H-C bonds formed between the "H" atoms in the polymer chains and the "C" atoms in the GNP nanoparticle [23].

When the stress-strain curve in Figure 5 is evaluated, the highest tensile strength value was reached in the samples modified with Al₂O₃ nanoparticles at 1.25%. It is due to the O atoms present in the Al₂O₃ nanoparticles form strong hydrogen bonds with the polymer chains of the epoxy matrix [24]. By

increasing the amount of Al₂O₃ in the epoxy and ensuring its homogeneous distribution, the distance between the polymer chains decreases and atomic movements are minimized. In this way, matrix-filler interaction increases and stronger bonds are formed [25].

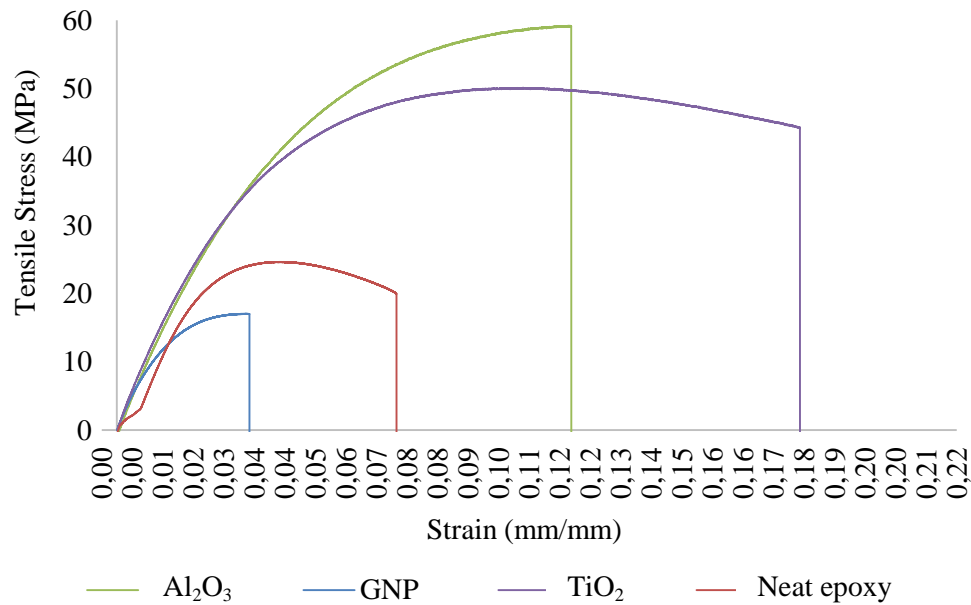


Figure 5. Stress-strain graph according to nanoparticle type at 1.25 % percentage by mass

Mechanical properties of the specimens such as tensile strength, elongation at break, toughness, modulus of elasticity, modulus of elasticity are given in Table 3.

Table 3. Mechanical properties of the specimens

Particle reinforcement rates (% by weight)	Specimen	Max. Force (N)	Tensile Stress (MPa)	Breaking Stress (MPa)	Breaking Elongation (mm)	Elongation (mm/mm)
Neat	Epoxy	862.70	24.65	19.97	5.86	0.0732
	Al ₂ O ₃	2247.30	54.39	53.99	5.82	0.0728
0.75	TiO ₂	1807.56	45.16	46.53	6.12	0.0954
	GNP	985.30	26.63	25.66	3.61	0.0453
1.0	Al ₂ O ₃	2346.46	56.82	45.99	9.75	0.1225
	TiO ₂	1812.41	48.35	40.25	16.40	0.2051
	GNP	523.00	13.99	13.98	1.46	0.0181
1.25	Al ₂ O ₃	2446.87	59.24	59.07	9.45	0.1182
	TiO ₂	1874.82	50.16	44.82	14.01	0.1751
	GNP	638.00	17.05	17.01	2.78	0.0351

B. HARDNESS TEST

Figure 6 shows the effect of nanoparticle type on hardness according to additive ratios. It can be clearly seen that the hardness values increased with the increase in the amount of nanoparticle additives in the hardness analysis. This can be attributed to the increase in the intermolecular interactions due to the increase in mixture concentration.

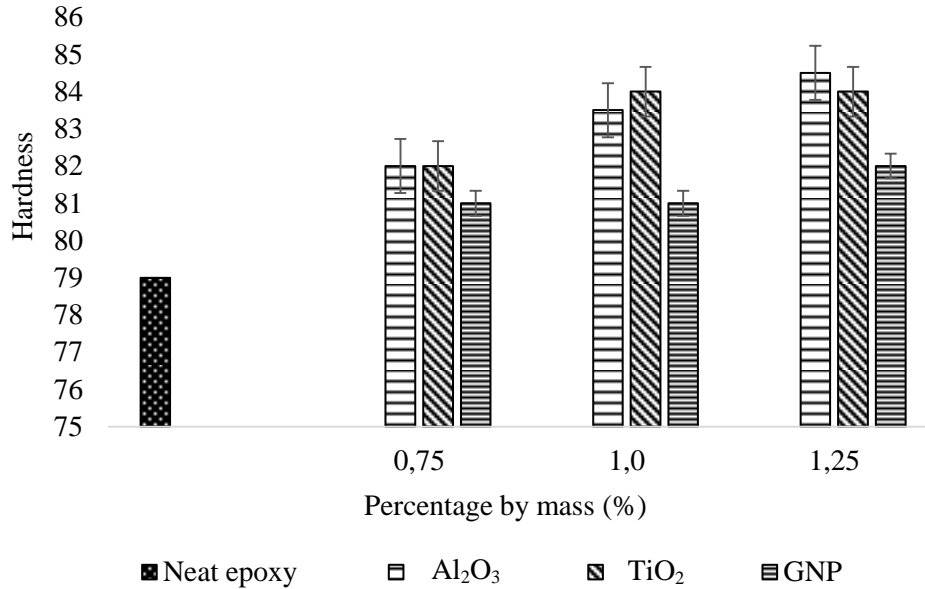


Figure 6. Hardness test results of the specimens.

C. THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS

In the literature study, it was observed that nanoparticles added into epoxy increased the thermal conductivity of the structure, GNP contribution was more effective in improving the thermal conductivity of neat epoxy, followed by TiO₂ and Al₂O₃, respectively [26-28].

As seen in Figure 7, the thermal conductivity value increased with increasing contribution rate, regardless of the nanoparticle type. The highest thermal conductivity was observed in the 1.25% GNP added sample and a 123.5% increase was achieved compared to pure epoxy. This increase value obtained is 3.5 times higher than the literature[29, 30]. 1.25 % of TiO₂ and Al₂O₃ added samples, an increase of 69% and 47% respectively compared to pure epoxy. 37% and 24% higher results were obtained for TiO₂ and Al₂O₃ respectively according to related studies [31, 32].

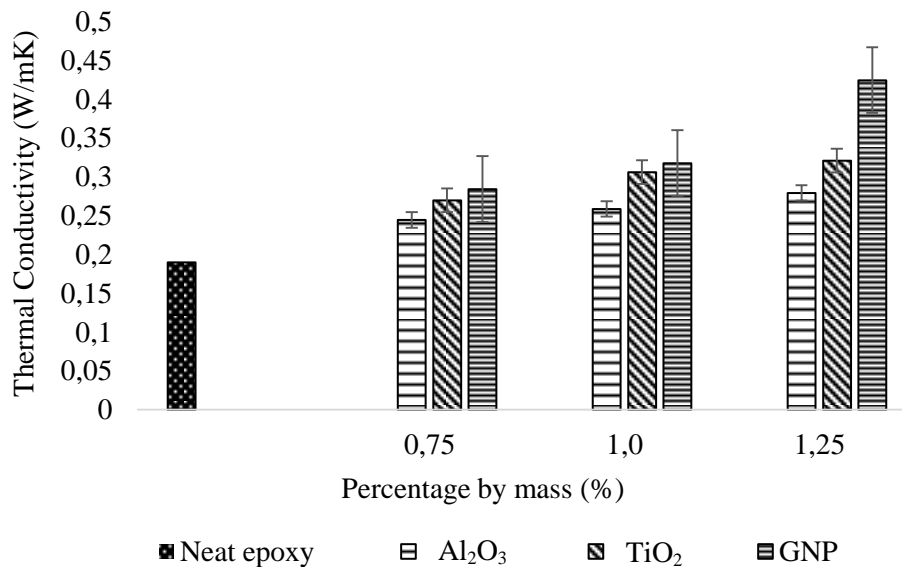


Figure 7. Thermal conductivity values of specimens.

D. SEM IMAGES

Figure 8 shows the SEM and EDS analysis results of Al₂O₃, TiO₂ and GNP added samples. In the SEM images obtained, globular formations were observed in Al₂O₃, plates in GNP and spheroid formations in TiO₂. It was observed that the data obtained was compatible with the images given in the literature [33]. Pore formation in the Al₂O₃ and TiO₂ doped structure is clearly seen in the SEM images. This detected porous formation is shown in the literature as evidence that an effective matrix/filler interaction occurs and that the nanoparticle distribution in the resin is homogeneous. [34]. Accordingly, under the specified curing conditions, the TiO₂ additive showed a more homogeneous bond with the epoxy and, accordingly, it is thought to have better mechanical strength due to formations with filled pores improve the mechanical properties of the structures [35].

The addition of Al₂O₃ into epoxy, the formation of filled pores was observed in small numbers and in certain regions. Smooth surfaces in SEM images can be sign of the the weakness of the interaction between filler/matrix. [36]. It has been determined that GNPs added to epoxy remain in the form of plates within the structure and are less dispersed in the epoxy as stated in the literature [37].

Figure 8 shows the EDS results for three nanoparticles. Looking at these results, C and Cl peaks were observed in pure epoxy as well as in all nano-filling materials, while trace amounts of O, Au and Pd were detected in their structures. In addition to these results, a high amount of Al was detected in Al₂O₃ and a high amount of Ti was detected in TiO₂. While the lowest O rate was observed in TiO₂, O was measured at similar rates in GNP and pure epoxy.

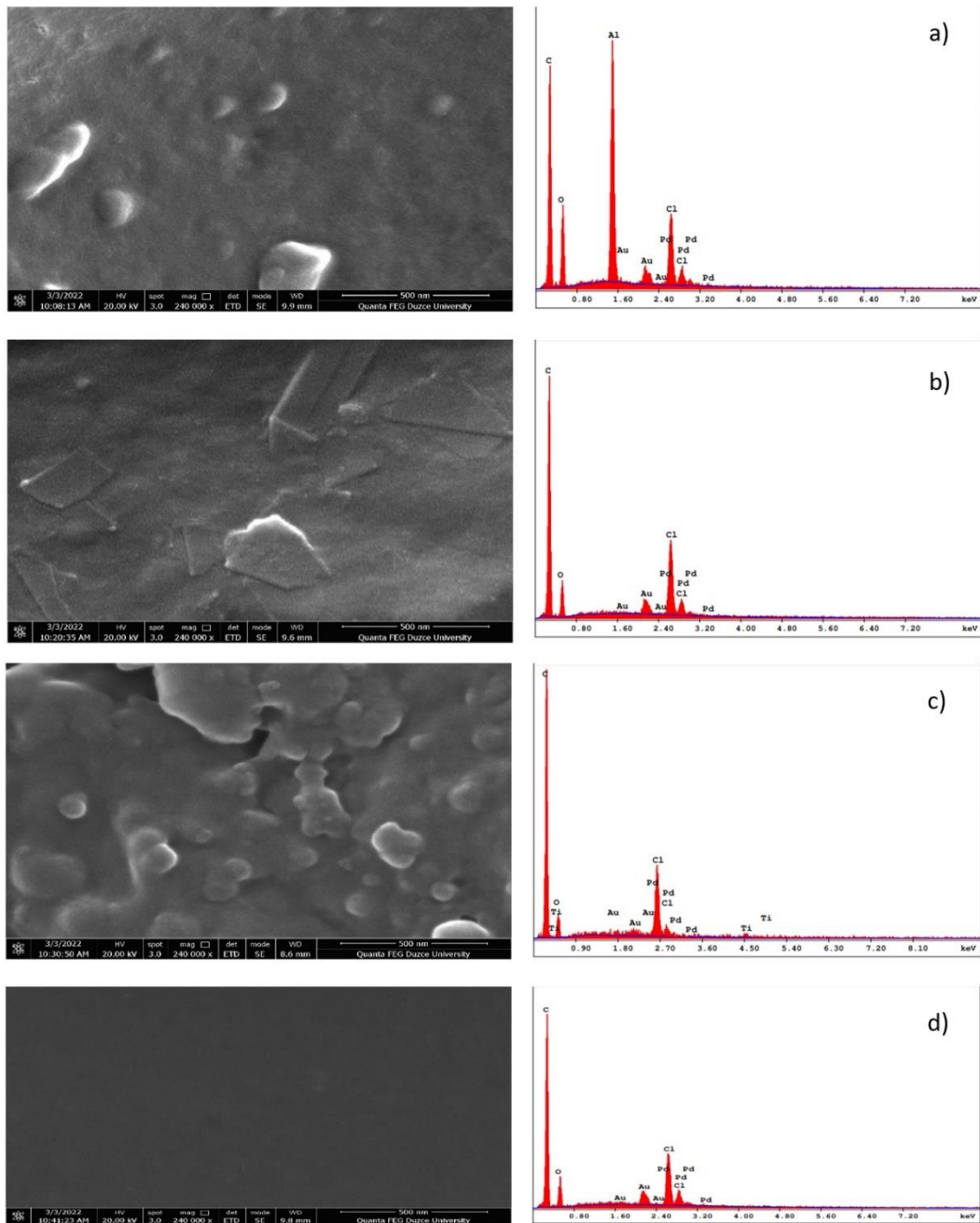


Figure 8. SEM and EDS analysis results of Al_2O_3 , TiO_2 ve GNP added samples
a) Al_2O_3 b) GNP c) TiO_2 d) Neat epoxy.

E. FTIR ANALYSIS

Data's regarding the peaks detected in the FTIR spectrum are shown in Table 4. When these absorption bands are evaluated, vibrations due to intense C-H and N-H bonding are observed in the samples with 0.75% and 1.0% GNP additive, while vibrations due to C-H bonding in the 1.25% GNP additive are noteworthy. As the GNP contribution increased, voltage vibrations due to C-H bonding increased.

Table 4. Data on the peak points of GNP-doped samples detected in the FTIR spectrum.

Specimen	Wavelength (cm ⁻¹)	Vibration type
%0.75	1080.732	C-C / C-O / C-N
	1241.328	
	2901.114	C-H
	3165.923	O-H / C-H
	3244.988	O-H
	3394.306	N-H
	3476.437	
%1.0	1080.580	C-C / C-O / C-N
	1241.828	
	2884.317	C-H
	3066.970	
	3170.098	O-H / C-H
	3242.415	
	3264.092	O-H / N-H
% 1.25	3398.928	
	3456.571	N-H
	3473.324	
	1241.672	C-C / C-O / C-N
	2898.23	C-H
	3397.752	N-H

The peaks detected in the FTIR spectrum are shown in Table 5. When these absorption bands are evaluated voltage vibrations due to intense O-H bonding are noteworthy at all doping ratios. While N-H bonds accompanied the tension vibrations due to O-H bonding in the structure with 0.75% Al₂O₃ contribution, tension vibrations due to C-H bonding were observed at 1.0% and 1.25% contribution rates.

Table 5. Data on the peak points of Al₂O₃-doped samples detected in the FTIR spectrum.

Specimen	Wavelength (cm ⁻¹)	Vibration type
%0.75	1244.497	C-C / C-O / C-N
	1609.875	C=C / C=O / C=N
	2958.748	C-H
	3114.407	
	3128.589	O-H / C-H
	3290.354	
	3450.731	N-H
%1.0	1241.459	C-C / C-O / C-N
	1605.150	C=C / C=O / C=N
	2892.803	C-H
	3142.648	O-H / C-H
	3245.914	O-H
	1241.887	C-C / C-O / C-N
	1606.584	C=C / C=O / C=N
% 1.25	2908.987	C-H
	3111.109	O-H / C-H
	3283.234	N-H

When the bond structures in Table 5 are evaluated, the cross-bonding model expected to occur between Al_2O_3 nanoparticles and epoxy-hardener system is expected to be as in Figure 9.

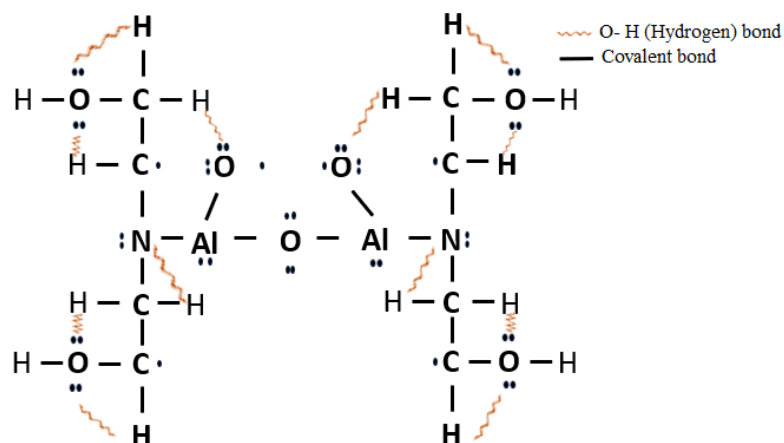


Figure 9. Cross-link expansion model in Al_2O_3 +epoxy combination.

When these absorption bands are evaluated, at all doping ratios, tension vibrations due to C-H bonding within the structure, which increases in parallel with the doping ratio are significant. In addition, voltage peaks due to low amounts of O-H bonding were observed in addition to C-H bonds at 1.0% and 1.25% contribution ratios, and an N-H peak was observed in addition to O-H and C-H peaks at 1.25% contribution ratios.

Table 6. Data regarding the peak points of TiO_2 doped samples detected in the FTIR spectrum.

Specimen	Wavelength (cm^{-1})	Vibration type
%0.75	1244.497	C-C / C-O / C-N
	1609.875	C=C / C=O / C=N
	2958.748	C-H
	3114.407	O-H / C-H
	3128.589	
	3290.354	N-H
	3450.731	
%1.0	1241.459	C-C / C-O / C-N
	1605.150	C=C / C=O / C=N
	2892.803	C-H
	3142.648	O-H / C-H
	3245.914	O-H / N-H
% 1.25	1241.887	C-C / C-O / C-N
	1606.584	C=C / C=O / C=N
	2908.987	C-H
	3111.109	O-H / C-H
	3283.234	N-H

When the bond structures in Table 6 are evaluated, the cross-bonding model expected to occur between Al_2O_3 nanoparticles and epoxy-hardener system is expected to be as in Figure 10.

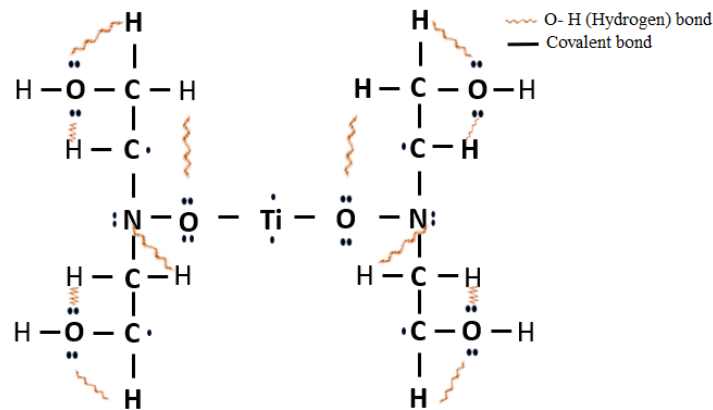


Figure 10. Cross-link expansion model in TiO_2 +epoxy combination.

IV. CONCLUSION

In this study, the effect of nanoparticle additives on the mechanical properties and curing kinetics of epoxy-based polymer composites was examined together and a new perspective was gained for studies in this field. Below are some highlights and conclusions obtained from the results and suggestions to further improve this study.

With the addition of 1.25% Al_2O_3 , the tensile stress and breaking stress of epoxy increased by 140.3% and 195.8%, respectively. The main reason for this increase is due to the strong O-H bonds formed between alumina nanoparticles and the epoxy polymer matrix. On the other hand, the highest elongation at break was measured in the 1% TiO_2 added sample, which showed a 179.9% increase compared to pure epoxy. It is the main reason for the observed increase in TiO_2 contribution is that TiO_2 molecules trigger the cross-linking between the epoxy matrix and polymer chains through Van der Waals interactions.

GNP additive reduced the epoxy tensile strength by 35% due to the formation of H-C bonds between the polymer chains through the interaction between the hydrogen atom of the epoxy and the carbon atoms of GNP. This situation made the epoxy material brittle and its elongation at break decreased.

Elasticity modulus increased for all particle types and additive ratios. The highest modulus value was reached with the addition of 0.75% TiO_2 , which increased by 151% compared to pure epoxy. In the hardness measurements, hardness values increased compared to pure epoxy for all particle types and additive ratios. Hardness values with Al_2O_3 , TiO_2 and GNP additives increased by 7%, 6% and 3.8%, respectively, compared to neat epoxy. The highest thermal conductivity was observed in the 1.25% GNP added sample and a 123.5% increase was achieved compared to neat epoxy.

ACKNOWLEDGEMENTS: This work is supported by Düzce University Scientific Project (Project no: 2019.06.05.1025).

V. REFERENCES

- [1] S. Apay and M. Kilincel, "The investigation of wear properties of nanoparticle-reinforced epoxy composite material surfaces," *Surface Topography: Metrology and Properties*, vol. 11, no. 2, pp. 02-012, 2023.
- [2] M.A. Maghsoudlou, R.B. Isfahani and S. Saber-Samandari, "Effect of interphase, curvature and agglomeration of SWCNTs on mechanical properties of polymer-based nanocomposites: experimental and numerical investigations," *Composite Part: B Engineering*, vol. 175, pp. 107-119, 2019.
- [3] M.R. Ayatollahi, R. Moghimi Monfared and R. Barbaz Isfahani. "Experimental investigation on tribological properties of carbon fabric composites: effects of carbon nanotubes and nano-silica" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 233, pp. 874–884, 2019.
- [4] C.M. Hadden, D.R. Klimek-McDonald and E.J. Pineda, "Mechanical properties of graphene nanoplatelet/carbon fiber/epoxy hybrid composites: multiscale modeling and experiments," *Carbon*, vol. 95, pp. 100–112, 2015.
- [5] R. Moghimi, M.R. Ayatollahi and R. Barbaz Isfahani, "Synergistic effects of hybrid MWCNT/nanosilica on the tensile and tribological properties of woven carbon fabric epoxy composites," *Synergistic effects of hybrid MWCNT/nanosilica on the tensile and tribological properties of woven carbon fabric epoxy composite*, vol. 96, pp. 272–284, 2018.
- [6] A. Jumahat, C. Soutis, F.R. Jones, and A. Hodzic, "Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading," *Composite structure*, vol. 92, no. 2, pp. 295-305, 2010.
- [7] P.Y. Mechin , V. Keryvin, J.C. Grandidier, "Effect of the nano-filler content on the compressive strength of continuous carbon fibre/epoxy matrix composites," *Composite Part B*, vol. 224, pp. 1-20, 2021.
- [8] B.B. Johnsen, A.J. Kinloch, R.D. Mohammed, A.C. Taylor and S.Sprenger, "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers," *Polymer*, vol. 48, pp. 530-541, 2007.
- [9] A. Jumahat, C. Soutis, F.R. Jones and A. Hodzic, "Effect of silica nanoparticles on compressive properties of an epoxy polymer," *Journal of Materials Science*, vol. 45, pp. 5973-5983, 2010.
- [10] A Kumar, K. Sharma, A.R. Dixit, "A review on the mechanical and thermal properties of graphene and graphene-based polymer nanocomposites: understanding of modelling and MD simulation," *Molecular Simulation*, vol. 46, pp. 136–154, 2019.
- [11] S. Yazman and A. Samancı, "A comparative study on the effect of CNT or alumina nanoparticles on the tensile properties of epoxy nanocomposites," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, no. 2, pp.1353–1363, 2018.
- [12] X. Li, Y. Wu, and Z. Yu, "Tribological properties of organic functionalized ZrB₂-Al₂O₃/epoxy composites" *Tribology Letters*, vol. 65, no. 1, pp. 1-4, 2017.

- [13] L. Reijnders, "The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 94, pp. 873–876, 2009.
- [14] R. Aradhana, S. Mohanty, and S.K. Nayak, "Comparison of mechanical, electrical and thermal properties in graphene oxide and reduced graphene oxide filled epoxy nanocomposite adhesives," *Polymer*, vol. 141, pp. 109–123, 2018.
- [15] A. Zandiatashbar, C.R. Picu and N. Koratkar, "Control of Epoxy Creep Using Graphene," *Journal of Small*, vol. 8, no. 11, pp. 1676–1682, 2012.
- [16] A. Mirmohseni and S. Zavareh, "Preparation And Characterization Of An Epoxy Nano Composite Toughened By A Combination Of Thermoplastic, Layered And Particulate NanoFillers," *Journal of Materials and Design*, vol. 31, no. 6, pp. 2699–2706, 2010.
- [17] K. Kumar, P.K. Ghosh and A. Kumar "Improving Mechanical and Thermal Properties of TiO₂-Epoxy Nanocomposite," *Composites Part B: Engineering*, vol. 97, pp. 353–360, 2016.
- [18] O. Starkova, S.T. Buschhorn, E. Mannov, K. Schulte and A. Aniskevich, "Creep and Recovery of Epoxy/MWCNT Nanocomposites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, no. 8, pp. 1212–1218, 2012.
- [19] F.H. Latief, A. Chafidz, H. Junaedi, A. Alfozan, R. Khan, "Effect of alumina contents on the physicomechanical properties of alumina reinforced polyester composites," *Advances in Polymer Technology*, vol. 2019, 2019.
- [20] A. Chatterjee and M. S. Islam, "Fabrication and characterization of TiO₂-epoxy nanocomposite," *Material Science Engineering A*, vol. 487, no. 1, pp. 574–585, 2008.
- [21] R. B. Isfahani, "Molecular dynamics simulations of the effect of temperature and strain rate on mechanical properties of graphene-epoxy nanocomposites," *Molecular Simulation*, vol. 46, no.6, pp. 476-486, 2020.
- [22] W.P.S. Saw, M.Mariatti, "Properties of synthetic diamond and graphene nanoplatelet-filled epoxy thin film composites for electronic applications," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 23, pp. 817–824, 2012.
- [23] H. Kasım and B. Demir, "Grafen dolgu malzemesi içeren elastomer esaslı basınç sensörlerinin çevrimli yük altında mekanik ve elektriksel karakterizasyonu" *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 32, no. 9, pp. 3588–3608, 2021.
- [24] G. Kabakçı, M. Kılınçel and G. B. Tezel, "Nanofiller Effects on the Isothermal Curing Kinetics of Epoxy Resin," *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 57, no. 6, pp. 1490–1502, 2023.
- [25] O.M. Yousri, M.H. Abdellatif and G. Bassioni, "Effect of Al₂O₃ Nanoparticles on the Mechanical and Physical Properties of Epoxy Composite," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, pp. 1511–1517, 2017.
- [26] X. Zhe, Z. Cheng, L. Yang, Z. Jun, L. Yuefeng, Y. Bobo, H. Rongrong and Q. Qi "Effect of the alumina micro-particle sizes on the thermal conductivity and dynamic mechanical property of epoxy resin," *Journal of Plos one*, vol. 18, no. 10, pp. 1-17, 2023.
- [27] A. Mishra, M. Shukla, M.K. Shukla, D. Srivastava, and A.K. Nagpal, "Thermal and mechanical characterization of alumina modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 30, pp. 1-11, 2022.

- [28] K. Gouda, S. Bhowmik and B. Das, “Thermomechanical behavior of graphene nanoplatelets and bamboo micro filler incorporated epoxy hybrid composites,” *Material Research Express*, vol. 7, no. 1, pp. 1-14, 2020.
- [29] M. Kilincel “Investigation Of The Use Of Different Interface Reinforcements On Interface Strength In CFRP-Aluminum Honeycomb Sandwiches,” *V. Baskent International Conference On Multidisciplinary Studies*, vol 5, no. 1, pp. 141-146, 2023.
- [30] A. Osman, A.Elhakeem, S. Kaytbay and A. Ahmed, “Thermal, electrical and mechanical properties of graphene/nano-alumina/epoxy composites,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 257, pp. 123809, 2021.
- [31] S. K. Singh, S. Singh, A. Kumar and A. Jain, “Thermo-mechanical behavior of TiO₂ dispersed epoxy composites,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 184, pp. 241–248, 2017.
- [32] A. Rasheed, S. Islam and I. Fawad, “Mechanical, Thermal, and Electrical Properties of Graphene-Epoxy Nanocomposites-A Review,” *Polymers*, vol. 8, no.8 pp. 281, 2016.
- [33] J. Wei, R. Atif, T. Vo, and F. Inam, “Graphene Nanoplatelets in Epoxy System: Dispersion, Reaggregation, and Mechanical Properties of Nanocomposites,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, pp. 1–12, 2015.
- [34] A. Öndürücü and H. F. Kayıran, “Hibrit Kompozit Kirişlerin Yanal Burkulma Davranışlarına Soğuk Ortamın Etkisi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 22, no. özel, pp. 156–164, 2018.
- [35] R. Zaldivar, “Lessons Learned in the Processing of Polycyanurate Resin Composites,” *The Aerospace Corporation Laboratory Operations Report, El Segundo, Rap. 8565 no.8*, 2002.
- [36] M. Biron, “Thermoplastics and thermoplastic composites: technical information for plastics users,” third edition, Elsevier, 2007
- [37] N. Korkmaz, E. Çakmak and Mehmet Dayık, “Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu,” *Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 338-353, 2016.