



# Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

## Konya Journal of Engineering Sciences



**(KONJES)**  
E-ISSN: 2667-8055



2022 - Cilt: 10 - Sayı: 4  
2022 - Volume: 10 - Issue: 4

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)  
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

**OWNER/SAHİBİ**

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**  
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**

**Chief Editor/Şef Editör**

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

**Editors/Editörler**

**Prof. Dr. Halife KODAZ**

**Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

**Section Editors/Alan Editörleri**

**Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ**

Prof. Dr. Hüseyin DEVEC

Prof. Dr. İhsan ÖZKAN

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

**Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

**Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM**

**Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN**

**Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

**Assist. Prof. Dr. Secan BÜLBÜL**

**Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif EN**

**Advisory Board/Danışma Kurulu**

**Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University**

**Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University**

**Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University**

**Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University**

**Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University**

**Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University**

**Prof.Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences**

**Prof.Dr. Chryssy POTSIOU, National Technical University of Athens**

**Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University**

**Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University**

**Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University**

**Language Editing/Yabancı Dil Editörü**

**Prof. Dr. Ali BERKTAY**

**Composition and Printing/Baskı ve Dizgi**

**Assist. Prof. Dr. İsmail KOC**

**Dr. Emel Zeray OZTURK**

**Res. Assist Emir Ali DINSEL**

**Res. Assist. Aybüke BABADAG**

**Correspondance Address/ Yazışma Adresi**

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı

42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18

Fax : 0 332 241 06 35

E-mail : [konjes@ktun.edu.tr](mailto:konjes@ktun.edu.tr)

Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

## **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

**KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**  
**Konya Journal of Engineering Sciences**  
**(KONJES)**

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

|        |    |          |      |       |   |
|--------|----|----------|------|-------|---|
| Cilt   | 10 | Aralık   | 2022 | Sayı  | 4 |
| Volume | 10 | December | 2022 | Issue | 4 |

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

**Araştırma Makalesi (Research Article)**

**ATMOSFERİK PARTİKÜL MADDELERİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ: BEŞİKTAŞ, İSTANBUL ÖRNEĞİ**

Prediction of Atmospheric Particulate Matter By Machine Learning: A Case Study of Beşiktaş, İstanbul

Ece YAĞMUR ..... 807-826

**HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 KATKILI SODYUM ALJİNAT HİBRİT MEMBRANLARIN PERVAPORATİF DESALİNASYONU**

Pervaporative Desalination by HKUST-1 and GrO@HKUST-1 Doped Sodium Alginate Hybrid Membrane

Derya ÜNLÜ..... 827-839

**PPP VE RADYOSONDA'DAN ELDE EDİLEN YOĞUŞABİLİR SU BUHARI (PWV) DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Precipitable Water Vapor (PWV) Values Obtained From PPP And Radiosonde

Sema Nur AĞAÇ, Salih ALÇAY ..... 840-849

**JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN (JES) PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN ANALİZ EDİLMESİ**

Analysis of Possible Risks in the Project of Geothermal Power Plants (GPP)

Eray CAN, Hülya KESKİN ÇİTİROĞLU, Deniz ARCA ..... 850-863

**EKSENL YÜK UYGULANAN DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ DEĞERLERİNİN KIYASLANMASI**

A Comparative Analysis on the Bearing Capacity of Axially Loaded Deep Mixing Columns

Kaveh DEGHANIAN, Hakan Murat SOYSAL ..... 864-877

**GENTAMİSİN YÜKLÜ POLİ(VİNİL ALKOL)/JELATİN NANOFİBERLERİN ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE YARA ÖRTÜSÜ MALZEMESİ OLARAK ÜRETİLMESİ**

Production of Gentamycin-Loaded Poly(Vinyl Alcohol)/Gelatin Nanofiber by Electrospinning Method as Wound Dressing Material

SümeYYe CESUR ..... 878-888

**CLUSTERING NEIGHBORHOODS ACCORDING TO URBAN FUNCTIONS AND DEVELOPMENT LEVELS BY DIFFERENT CLUSTERING ALGORITHMS: A CASE IN KONYA**  
Farklı Kümeleme Algoritmaları ile Kentsel Fonksiyonlara ve Gelişme Düzeylerine Göre Mahallelerin Kümeleneşmesi: Konya İli Örneği

Ali Utku AKAR, Sait Ali UYMAZ ..... (English) 889-902

**CONTACT METAMORPHISM OF LATE SILURIAN-EARLY CARBONIFEROUS METACARBONATES BY METAMAFIC DYKES AROUND LADIK AND ESIRAğIL AREA (KONYA, CENTRAL TURKEY)**

Ladik ve Esirağil Alanı (Konya, Orta Anadolu) Yöresindeki Geç Silüriyen Erken Karbonifer Yaşlı Metakarbonatların Metamafik Dayklarla Kontak Metamorfizması

Kerim KOÇAK, Adnan DÖYEN ..... (English) 903-911

**PUROLİTE CT169DR HETEROJEN KATALİZÖRÜ VARLIğINDA METANOL İLE OLEİK ASİDİN ESTERİFİKASYONU**

Oleic Acid Esterification with Methanol in the Presence of Purolite CT169DR Heterogeneous Catalyst  
Melike İmge ŞENOYMAK TARAKÇI, Oğuzhan İLGEN ..... 912-922

**BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERDE OPTİMAL KESİT VE DONATI ORANLARININ PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ**

Determination of Optimal Cross-Section and Reinforcement Ratios in RC Continuous Beams by Particle Swarm Optimization Algorithm

Mehmet Kevser DERDİMAN ..... 923-940

**POINT POSITIONING PERFORMANCE OF TRIMBLE-RTX IN DIFFERENT SATELLITE COMBINATIONS**

Trimble-RTX'in Farklı Uydu Kombinasyonlarında Nokta Konumlama Performansı

Burhaneddin BİLGEN, Cevat İNAL, Sercan BÜLBÜL ..... (English) 941-949

**BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE GALYUM FAZ DEğİŞTİREN MALZEMESİNİN KULLANIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Analysis of Gallium Phase Changing Material in a Thermal Energy Storage System

Cumhur YALÇINDERE, Tolga DEMİRCAN ..... 950-964

**Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> METALİK NANOALAŞIMLARIN HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU**

Synthesis and Characterization of Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Metallic Nanoalloys by Hydrothermal Method

Mehmet Şahin ATAS, Ozlem ALTINTAS YILDIRIM ..... 965-975

**KENTSEL DÖNÜŞÜM PLANLAMAVE UYGULAMA STRATEJİLERİNDE 5393 VE 6306 SAYILI KANUNLARIN KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Laws No. 5393 and 6306 in Urban Renewal Planning and Implementation Strategies  
Sıtkı Alper ÖZDEMİR, Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ, Mehmet Akif ARSLAN, Mehmet UZUN

..... 976-985

**TRANSFORMATÖR-TABANLI EVRİŞİMLİ SİNİR AğI MODELİ KULLANARAK TWITTER VERİSİNDE SALDIRGANLIK TESPİTİ**

Aggression Detection in Twitter Data Using Transformer-Based Convolutional Neural Network Model

Erdal ÖZBAY ..... 986-1001

**TEPEKENT (KONYA-ORTA ANADOLU) YÖRESİNDEKİ VOLKANİK KAYALARIN  
PETROGRAFİSİ, JEOKİMYASI VE PETROLOJİSİ**

Petrography, Geochemistry and Petrology of Volcanic Rocks in Tepekent Region (Konya- Central  
Anatolia)

**Büşra ERYİĞİT, Hüseyin KURT, Kürşad ASAN, Gülin GENÇOĞLU KORKMAZ ..... 1002-1018**

**APPLICATION OF THE BEES ALGORITHM UPON HYDRAULIC CYLINDER DESIGN AND  
OPTIMIZATION**

Hidrolik Silindir Tasarımı ve Optimizasyonunda Arı Algoritmasının Uygulanması

**Betül SÖZEN, Ömer Sinan ŞAHİN, Mete KALYONCU ..... (English) 1019-1034**

**SPECIFIC NET WORK AND MEAN EFFECTIVE PRESSURE BASED THERMODYNAMIC  
ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF IDEAL ATKINSON CYCLE**

İdeal Atkinson Çevriminin Özgül Net İş ve Ortalama Efektif Basınç Temelli Termodinamik Analizi  
ve Optimizasyonu

**Emre ARABACI, Bayram KILIÇ ..... (English) 1035-1047**

**ANALYSIS OF PERFORMANCE COEFFICIENTS IN MAXIMUM ELECTRICAL POWER  
EXTRACTION FROM STAND-ALONE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM**

Şebeke-Bağlantısız Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminden Maksimum Elektriksel Güç Eldesinde  
Performans Katsayılarının Analizi

**Emre Hasan DURSUN ..... (English) 1048-1060**

**SERAMİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE UYGULANAN ALIŞILMAMIŞ İMALAT  
YÖNTEMLERİ**

Unconventional Manufacturing Methods Applied in Machining of Ceramic Materials

**İsmail Aykut KARAMANLI, Mustafa GÜNAY ..... 1061-1082**



## ATMOSFERİK PARTİKÜL MADDELERİN MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE TAHMİNİ: BEŞİKTAŞ, İSTANBUL ÖRNEĞİ

Ece YAĞMUR

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya,  
TÜRKİYE*

[ecyagmur@ktun.edu.tr](mailto:ecyagmur@ktun.edu.tr)

**Geliş/Received: 04.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.08.2022**

**ÖZ:** Hava kirliliği, insan sağlığına ve çevreye olumsuz etkileri nedeniyle uzun yıllardır tartışılmakta olan bir problemdir. Bu problemi çözmek ve gereken önlemleri almak amacıyla hava kalitesinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Hava kalitesi değerlendirilirken kirletici konsantrasyonları analiz edilerek, toplum açısından herkesin anlayabileceği bir indeks sistemi kullanılmaktadır. Ulusal Hava Kalitesi İndeksi kapsamında kalite indeksi hesaplanan beş temel kirleticiden biri, ciddi solunum yolu hastalıklarına sebep olan atmosferik partikül maddelerdir. Bu çalışmada çapı 2,5 mikrondan küçük olan ve PM<sub>2,5</sub> olarak adlandırılan atmosferik partikül maddelerin oluşumunda trafik yoğunluğu, meteorolojik koşullar ve NOX, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> hava kirleticilerinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından farklı alanlarda verilerin paylaşıldığı açık veri portalından yararlanılarak Beşiktaş bölgesindeki hava kalitesi izleme istasyonu incelenmiştir. Atmosferik partikül maddelerin tahmininde Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR), Rassal Orman (RO), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır. Regresyon denkleminde farklı bağımsız değişkenlerin incelendiği farklı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller ve kullanılan makine öğrenme algoritmaları determinasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), düzeltilmiş R<sup>2</sup>, ortalama mutlak hata, ortalama hata karesi ve ortalama hata karesi kökü performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. Meteorolojik parametreler, trafik yoğunluğu, tarih ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonunun bağımsız değişken olarak kullanıldığı model, incelenen tüm performans ölçütlerine göre diğer modellere üstünlük sağlamıştır. Algoritmalar karşılaştırıldığında ise performans ölçütlerinin modellere göre değişiklik gösterdiği görülmüş ancak en iyi performans ortalamasına sahip teknik RO, en kötü performans ortalamasına sahip teknik ise ÇDR olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hava Kalitesi, Makine Öğrenmesi, Doğrusal Regresyon, Rassal Orman Algoritması, Destek Vektör Makineleri, Yapay Sinir Ağları

### **Prediction of Atmospheric Particulate Matter By Machine Learning: A Case Study of Beşiktaş, İstanbul**

**ABSTRACT:** Air pollution is a problem that has been discussed for many years due to its negative effects on human health and the environment. It is important to evaluate air quality to eliminate all these negative effects and take the necessary precautions. When evaluating air quality, pollutant concentrations are analyzed and an index system that can be understood by everyone in the society is used. One of the five main pollutants whose quality index is calculated within the scope of the National Air Quality Index is atmospheric particulate matter, which causes serious respiratory diseases. In the study, the effects of traffic density, meteorological conditions, and NOX, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> pollutants on the formation of atmospheric particulate matter, which is less than 2.5 microns in diameter and called PM<sub>2,5</sub> were investigated. For this purpose, the air quality monitoring station in Beşiktaş Region was examined by using the open data portal where data in different areas are shared by the Istanbul Metropolitan Municipality. Multiple Linear Regression (MLR), Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) and Artificial Neural Networks (ANN) were used in the prediction of atmospheric particulate matter. Different models have been

developed in which different independent variables were examined in the regression model. The developed models and the machine learning algorithms were compared according to coefficient of determination ( $R^2$ ), adjusted  $R^2$ , mean absolute error, mean squared error and root mean square error performance criteria. The model, in which meteorological parameters, traffic density, date and  $PM_{10}$  concentration were used as independent variables, outperformed other models in terms of all performance criteria examined. When the results obtained were examined, it was seen that the algorithm performances varied according to the models. However, according to all performance criteria, the technique with the best average performance was found to be RF, while the technique with the worst performance average was found to be MLR.

**Keywords:** Air Quality, Machine Learning, Linear Regression, Random Forest Algorithm, Support Vector Machines, Artificial Neural Networks

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava kirliliği tüm dünyayı ilgilendiren ve bu bağlamda ülkelerin, çevre ve insan sağlığını korumaya yönelik eylem planları geliştirmelerine sebep olan küresel bir çevre sorunudur. Sürdürülebilirliğin çevresel boyutu değerlendirildiğinde ise insanları en çok etkileyen, büyük yerleşim merkezleri ve sanayi bölgelerindeki hava kirliliğidir. Özellikle Sanayi Devriminden sonra makineleşmenin başlaması, şehirlerde fabrikaların kurulması ve buna bağlı olarak nüfusun büyük oranda kırsal bölgelerden kente yönelmesiyle bu problem daha da ciddi seviyelere ulaşmıştır.

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), kalp krizi, akciğer kanseri ve kronik solunum yolu hastalıkları nedeniyle yılda yaklaşık 4,2 milyon ölüm gerçekleştiğini ve Dünya nüfusunun yaklaşık %91'inin yaşadığı yerin hava kalitesi seviyesinin DSÖ tarafından belirlenen sınır değerinin altında kaldığını raporlamıştır (DSÖ, 2022). Bu durum günümüzde insanların ciddi oranda hava kirliliğine maruz kaldığını göstermektedir. Kentsel hava kirliliği Dünya nüfusunun karşı karşıya olduğu en temel çevresel risklerden birisidir ve asit yağmurları, ozon tabakasının incelmeye, küresel ısınma gibi büyük çapta olumsuz etkileri de beraberinde getirmektedir. Tüm bu olumsuz etkileri önlemek ve daha sağlıklı, sürdürülebilir yaşam alanları oluşturabilmek için hava kirliliğine neden olan faktörler incelenmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (2016) tarafından Akıllı ve Sürdürülebilir Şehirler için Çevresel Sürdürülebilirlik boyutu altında hava kalitesi,  $CO_2$  emisyonu, enerji, iç mekân kirliliği ve su, toprak ve gürültü kirliliği olmak üzere beş performans göstergesi tanımlanmıştır. Bu bağlamda T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı'nda belirtildiği gibi hava kalitesi izleme sistemleri (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sürekli İzleme Merkezi, [www.havaizleme.gov.tr](http://www.havaizleme.gov.tr), ziyaret tarihi:23.01.2021) ile hava kalitesine ilişkin verilerin toplanması, değerlendirilmesi, kirlilik analizlerinin yapılması, gerekli önlemlerin alınarak hava kirliliğinin önlenmesi ve hava kalitesinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2019), tarafından yayınlanan eylem planını hayata geçirmek amacıyla Türkiye genelinde birçok ilde (Ankara, Adana, Diyarbakır, Erzurum, İstanbul, İzmir, Konya ve Samsun) "Temiz Hava Merkezleri" kurulmuştur. Bunun dışında Şekil 1'de görülen mevcut hava kalitesi ölçüm istasyonlarıyla  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$  kirleticileri için istenilen bölgeye ait hava kalitesi raporlanabilmektedir.

Tüm dünyada yaygın olarak kullanılan, Hava Kalitesi İndeksi sistemine göre hava kalitesi, havadaki kirliticilerin konsantrasyonlarına göre iyi, orta, hassas, sağlıksız, kötü ve tehlikeli olarak sınıflandırılmakta ve her bir seviye farklı bir renkle temsil edilmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi ölçüm istasyonları Hava Kalitesi İndeksi değerlerine göre yeşil, sarı ve turuncu ile temsil edilmiştir. Buna göre yeşil renk hava kalitesinin iyi olduğunu, sarı renk ortalama düzeyde olup endişe yaratacak bir durum olmadığını, turuncu renk ise hava kalitesinin hassas düzeyde olduğunu bu nedenle solunum yolları ile ilgili problem yaşayan insanların olumsuz etkilenebileceğini ifade etmektedir.

Hava kirliliğinin, insan faktörü olmadan doğal yollarla (orman yangınları, çöl tozları, yanardağların çevresinde oluşan gaz bulutları vb.) oluşabildiği ancak bu oranın oldukça az olduğu bilinmektedir (Kampa ve Castanas 2008). Günümüzde hava kirliliğine sebep olan faktörlerin büyük çoğunluğu yapay



yollarla yani insanlar tarafından gerçekleştirilen faaliyetlerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Yerleşim merkezlerinde hava kirliliğinin ağırlıklı olarak ısınmadan, ulaşımdan ve sanayiden kaynaklandığı söylenebilir (Pénard-Morand ve Annesi-Maesano 2004). Bunun dışında sıcaklık, nem, yağış miktarı, rüzgâr hızı ve yönü gibi meteorolojik koşulların da hava kirliliği üzerinde etkili olduğu bilinmektedir (Pearce ve diğ. 2011). Ayrıca dizel partikül maddesinin kentsel alanlardaki çoğu küçük boyutlu partiküller maddeden sorumlu olduğu belirtilmiştir (Hsu ve diğ. 2019).



**Şekil 1.** Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonları ve Ulusal Hava İndeksi Verileri  
(Ziyaret tarihi: 11.01.2022 11:00:00)

*Figure 1. Air Quality Measurement Stations and National Air Index Data*

Ulusal Hava Kalitesi İndeksi kapsamında kalite indeksi hesaplanan beş temel kirleticiden biri, ciddi solunum yolu hastalıklarına sebep olan atmosferik partikül maddelerdir. Çapı 10 mikrondan ve 2,5 mikrondan küçük olan ve sırasıyla PM<sub>10</sub> ve PM<sub>2,5</sub> olarak adlandırılan bu partiküller, çok küçük ve hafif olduğundan uzun süre havada kalma eğilimindedir. Burun ve boğazdan rahatlıkla geçebilen bu partiküller ciğerlere nüfuz ederek ciddi solunum ve dolaşım sistemi rahatsızlıklarına neden olmaktadır (Kampa ve Castanas 2008). Literatürde atmosferik partikül maddeleri değerlendirmek ve tahmin etmek için pek çok çalışma yapılmıştır. Bozdağ ve diğ., (2020), 2009-2017 yılları arasında Ankara'da yer alan altı farklı istasyon verisiyle 2018 yılı için PM<sub>10</sub> konsantrasyonunu farklı makine öğrenme algoritmalarıyla tahmin etmiş en iyi sonuç R<sup>2</sup> değeri 0,58 olarak yapay sinir ağları ile elde edilmiştir. Zickus ve diğ., (2002) PM<sub>10</sub> konsantrasyonu tahmini için yağış, rüzgar hızı, nem ve bulut oranını değişkenlerini kullanmış ve farklı makine öğrenme algoritmalarını karşılaştırarak karar ağaçlarının performansını diğer yöntemlere göre yetersiz bulmuşlardır. Suleiman ve diğ., (2019) Londra'da 2007-2012 yılları arasında dokuz istasyondan elde ettikleri verilerle yapay sinir ağlarını kullanarak trafikten kaynaklı partikül madde konsantrasyonunu incelemiş ve araçların yakıt tüketimi ve türlerine göre farklı senaryoları karşılaştırmışlardır. Önerilen yöntem sonucunda, model tahminleri ile gözlem değerleri arasındaki korelasyonun 0,8 olduğu güçlü bir tahmin modeli elde edilmiştir. Chen ve diğ., (2018), meteoroloji ve arazi kullanım durumu bilgileriyle Çin'de 2005-2016 yılları arasındaki günlük PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonunu tahmin etmiş ve günlük modele ilişkin R<sup>2</sup> değerini 0,83 olarak bulmuşlardır. Aynı model için zaman periyodunu ay ve yıl olarak incelediklerinde ise R<sup>2</sup> değerinin arttığını vurgulamışlardır. Görüldüğü gibi özellikle son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik adına yapılan çalışmalar literatürde de karşılığını bulmuş ve Dünya'da farklı bölgelerde farklı hava kirleticilerine ilişkin tahmin çalışmaları yapılmış ve halen de yapılmaya devam etmektedir.

Türkiye'de hava kirleticilerine ait sınır değerler, AB standartlarına göre belirlenmekte olup PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonu için bu değer DSÖ tarafından belirlenen standardın iki katının üzerinde olduğu

bilinmektedir (Avrupa Çevre Ajansı, 2022). Ayrıca Sağlık ve Çevre Birliği (HEAL), Halk Sağlığı Uzmanları Derneği (HASUDER) ve Kocaeli Üniversitesi tarafından yürütülen Çevre İklim ve Sağlık için İş birliği Projesi (ÇİSİP) için yayınlanan bilgi notunda Türkiye genelinde hava kalitesi izleme istasyonlarının bazılarında donanım eksikliği nedeniyle PM<sub>2,5</sub> kirleticisinin izlenemediği belirtilmiştir (ÇİSİP Bilgi Notu, 2022). Tüm bu durumlar göz önünde bulundurularak hem PM<sub>2,5</sub> kirleticisine neden olan faktörlerin belirlenmesi hem de gerekli önlemlerin alınabilmesi için uzun vadede doğru tahminler sağlayan modellerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Ayrıca anlık ölçümlerden ziyade gerçeğe yakın tahminlerin yapılmasıyla toplumda özellikle kalp ve solunum yolu hastalıkları açısından risk altında olan bireylerin önceden önlem alması da kolaylaşacaktır. Vücudun filtre sistemi tarafından süzülmediği için akciğer bariyerini geçerek kana karışabilen bu partiküllerin, kardiyovasküler ve solunum yolu hastalıkları ile kanserlere neden olduğu düşünüldüğünde yine başarılı tahminler üreten modellerin geliştirilmesi insan sağlığı açısından hayati bir önem taşımaktadır.

Tüm bunların bir sonucu olarak bu çalışmada PM<sub>2,5</sub> madde konsantrasyonu için trafik yoğunluğu, meteorolojik koşullar ve NOX, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> hava kirleticileri konsantrasyonlarının kullanıldığı bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Tahmin gücü yüksek bir modelin elde edilmesini sağlamak için üç farklı veri seti kullanılmıştır. Hava kalitesi ölçüm istasyonlarından kirletici konsantrasyonları; meteoroloji ölçüm istasyonlarından sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve yağış bilgileri; saatlik trafik yoğunluk istasyonlarından ise ortalama hız ve araç sayısı bilgileri çekilmiştir. Veri setlerinin alınmış olduğu bu istasyonlar farklı lokasyonlarda yer aldığından trafik durumu ve meteorolojik koşulların değerlendirilebilmesi için aynı bölgede yer alan ölçüm istasyonlarının mümkün olduğunca birbirine yakın konumlanmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca eksik veriler açısından da analiz sonuçlarının etkilenmemesi adına kayıp veri oranının %10'u geçmemesine dikkat edilmiştir. Her iki koşulu da sağlaması nedeniyle pilot bölge olarak Beşiktaş Bölgesi seçilmiştir. Bunun yanı sıra trafik yoğunluğu açısından da Yıldız/Beşiktaş trafiğin en yoğun olduğu semtlerden birisi olması sebebiyle pilot bölge olarak seçilmeye uygun bulunmuştur. Bilindiği kadarıyla Türkiye'de PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonu tahmini için literatürde daha önce meteorolojik koşulların, trafik durumunun, zamanın ve hava kirleticilerinin eş zamanlı olarak ele alındığı başka bir çalışma bulunmamaktadır.

Tahmin modelleri geliştirilirken ÇDR, RO, DVM ve YSA yöntemleri kullanılmıştır. Geliştirilen modellerde test ve eğitim verisi ile çalışılıp modeller, determinasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), düzeltilmiş R<sup>2</sup>, ortalama mutlak hata, ortalama hata karesi ve kök ortalama hata karesi performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu şekildedir: Materyal ve Yöntem bölümünde makine öğrenme algoritmalarının genel işleyişi sırasıyla verilerin toplanması, veri ön işleme, modelin eğitilmesi, modelin değerlendirilmesi ve tahmin alt başlıklarıyla incelenmiştir. Sonuç ve Tartışma bölümünde ise genel bulgular ve geleceğe yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

## **MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)**

Makine Öğrenmesi (Machine Learning) bilgisayar sistemlerinin bir işlemi gerçekleştirmek için açıkça programlanmadan, istatistiksel modeller ve algoritmalar ile eğitildiği bir yapay zeka uygulamasıdır (Samuel, 1988). Kullanılan eğitim verileri aracılığıyla makine öğrenmesi algoritmaları verileri algılayarak yorumlayabilir ve bağımlı değişkene ilişkin tahminler yapabilir. Literatürde makine öğrenme algoritmalarının hem tahmin hem de sınıflandırma modellerinde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Büyük verilerin sınıflandırılmasına biyotıp (Ünlü ve diğ., 2022), sosyal medya (Öztürk ve diğ., 2020), pazarlama (Kaynar ve diğ., 2017) vb. gibi çok çeşitli alanlarda ihtiyaç duyulmaktadır. Tahmin modelleri ise gelecekte yaşanabilecek belirsizliklere karşı etkin bir planlama aracı olarak oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Enerji (Demolli ve diğ., 2019, Kuşkapan ve diğ., 2022), çevre (Gültepe 2019, Çelik ve Arıcı 2021), meteoroloji (Başakın ve diğ., 2019), finans (Namlı ve diğ., 2019, Özmaden ve Erdal 2020), kestirimci bakım (Dündar ve diğ., 2021) vb. gibi alanlarda, makine öğrenme algoritmalarıyla tahmin gücü yüksek modeller geliştirilerek geleceğe yönelik kararlar etkin bir şekilde alınabilmektedir. Bu

bölümde makine öğrenme algoritmalarının çalışma adımları sırasıyla açıklanarak ilgili veri setine nasıl uygulandığı detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Temel olarak makine öğrenme algoritmalarının uygulama adımları verilerin toplanması, veri ön işleme, modelin seçilmesi, modelin eğitilmesi, modelin değerlendirilmesi ve tahmin olmak üzere altı adımdan oluşmaktadır. Yapılan çalışmada bu adımlar uygulanırken içerisinde veri bilimi için faydalı olan kütüphanelerin yer aldığı Anaconda Navigator programı aracılığı ile Jupyter Notebook ve Python programlama dili ile Pandas, Matplotlib, Scikit-Learn ve Seaborn kütüphaneleri kullanılmıştır.

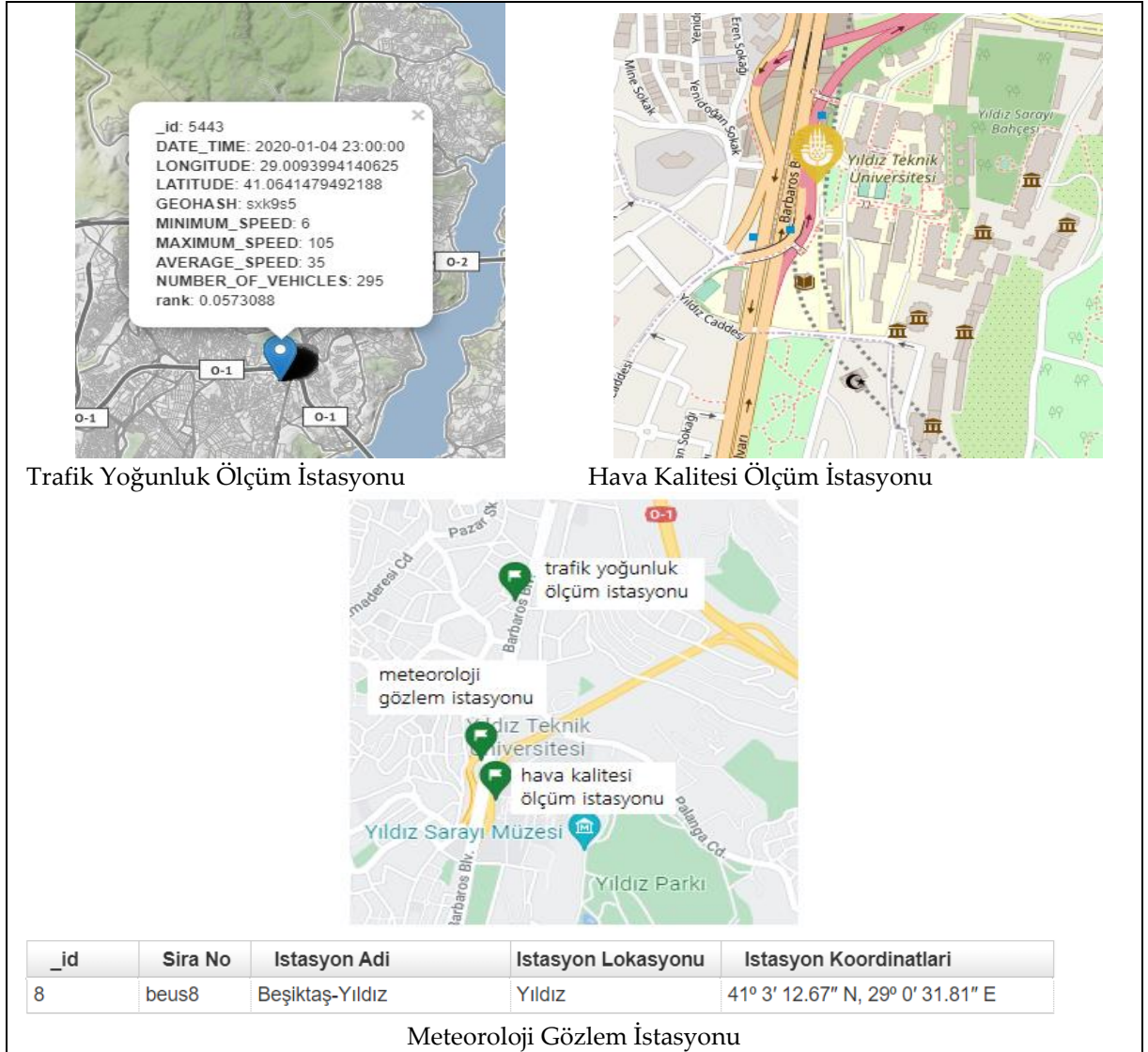
### i. Verilerin Toplanması (Data Collection)

Makine öğrenmesinin ilk aşaması olan verilerin toplanması aşaması geliştirilen modelin doğru sonuçlar üretmesi açısından oldukça önemlidir. Verilerin miktarı, kalitesi ve probleme özgü veri seçimi, makine öğrenmesi algoritmalarının başarısı için kritik önem taşımaktadır. Verilerin toplanması aşamasında İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2022) tarafından farklı alanlarda verilerin paylaşıldığı açık veri portalından yararlanılmış ve 01.01.2020-01.01.2021 dönemine ait Şekil 2’de konum bilgileri verilen istasyonlardan elde edilen veri setleri kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle hava kalitesi ölçüm istasyonları incelenmiştir (Sürekli İzleme Merkezi, 2022). Ölçümler İstanbul genelinde farklı bölgelerde yer alan 36 istasyon tarafından gerçekleştirilmektedir. Her bir istasyona ilişkin belirli bir dönem için saatlik, günlük, haftalık, aylık ve yıllık olmak üzere farklı periyotlarda veriler raporlanabilmektedir. Meteorolojik veriler için portalda yer alan Meteoroloji Gözlem İstasyonu Veri Seti (İBB Meteoroloji Gözlem İstasyonu Veri Seti, <https://data.ibb.gov.tr/dataset/meteorology-observation-station-data-set>, ziyaret tarihi: 11.01.2022), trafik yoğunluğuna ait veriler için ise Saatlik Trafik Yoğunluk Veri Seti (İBB Saatlik Trafik Yoğunluk Veri Seti, <https://data.ibb.gov.tr/dataset/hourly-traffic-density-data-set>, ziyaret tarihi: 11.01.2022) kullanılmıştır.

Veri setlerinin alınmış olduğu bu istasyonlar farklı lokasyonlarda yer aldığından trafik durumu ve meteorolojik koşulların değerlendirilebilmesi için aynı bölgede yer alan ölçüm istasyonlarının mümkün olduğunca birbirine yakın konumlanmasına dikkat edilerek pilot bölge olarak Beşiktaş bölgesi, veri periyodu olarak saatlik periyot seçilmiştir. Çizelge 1’de 01.01.2020- 31.12.2020 tarihleri arasında Beşiktaş Hava Kalitesi Ölçüm İstasyonu’ndan elde edilen saat bazındaki verilere (8784 adet) ait tanımlayıcı istatistikler verilmiştir. Her bir kirleniciye ait maksimum, minimum, ortalama ve standart sapma değerleri ile elde edilen veri yüzdeleri Çizelge 1’de görülmektedir. Buna göre olması gereken veri 1 yıl boyunca veri kaybı olmadığı durumda elde edilmesi gereken saatlik veri sayısını ifade ederken; gelen veri, ölçüm istasyonlarındaki problemlerden dolayı kayıp verilerin olduğu durumda elde edilen nihai veri sayısını ifade etmektedir. Bu durumda veri yüzdesi gelen verinin olması gereken veriye oranıyla hesaplanmaktadır.

### ii. Veri Ön İşleme (Data Preprocessing)

Bu adımda birinci adımda toplanan ham veri, modelde kullanılmak üzere işlenir. Ön işleme aşaması veri hazırlama ve veri indirgeme olmak üzere iki alt aşamadan oluşmaktadır. Ön işleme aşamasında süreci yönetmek için Çizelge 2’de verilen soru listesinden yararlanılır (García ve diğ., 2015).



Şekil 2. Beşiktaş Bölgesi Ölçüm İstasyonları Konum Bilgileri

Figure 2. Location Information of Measurement Stations in Beşiktaş

Çizelge 1. Hava kirleticilerine ilişkin tanımlayıcı istatistikler

Table 1. Descriptive Statistics for Air Pollutants ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

|                     | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2,5</sub> | SO <sub>2</sub> | NOX   |
|---------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------|
| Maksimum            | 144,5            | 91,9              | 314,8           | 918,5 |
| Minimum             | 0,6              | 0,4               | 0,2             | 5,4   |
| Ortalama            | 26,4             | 18,8              | 3,1             | 101,9 |
| Standart Sapma      | 16,8             | 10,8              | 4,3             | 82,6  |
| Gelen Veri          | 8203             | 8229              | 8769            | 7969  |
| Olması Gereken Veri | 8784             | 8784              | 8784            | 8784  |
| Veri Yüzdesi        | %93,4            | %93,7             | %99,8           | %90,7 |

**Çizelge 2. Veri Ön İşleme Aşaması**  
*Table 2. Data Preparation Phase*

| <b>Veri Hazırlama</b> | <b>Soru</b>  |
|-----------------------|--|
| Veri Temizleme        | Verileri nasıl temizlerim?   |
| Veri Dönüşümü         | Verileri belirli bir formata nasıl getirebilirim?  |
| Veri Entegrasyonu     | Verileri nasıl birleştiririm?  |
| Veri Normalleştirme   | Verileri nasıl ölçeklendiririm?  |
| Eksik Veri Tahmini    | Eksik verileri nasıl işleyebilirim?  |
| Gürültü Tanımlama     | Gürültüyü nasıl tespit eder ve yönetirim?  |
| <b>Veri İndirgeme</b> | <b>Soru</b>  |
| Öznitelik Seçimi      | Veri boyutunu nasıl azaltabilirim?   |
| Örnek Seçimi          | Gereksiz ve/veya çelişkili örnekleri nasıl kaldırabilirim?                                   |
| Ayrıklaştırma         | Bir özneliğin etki alanını nasıl basitleştirebilirim?  |
| Öznitelik çıkarma     | Ham veriyi özelliklerine göre indirgeyerek nasıl daha yönetilebilir gruplar oluşturabilirim? |

- Verilerin temizlenmesi: Hatalı verilerin düzeltilmesi, yanlış verilerin filtrelenmesi ve gereksiz veri ayrıntılarının azaltılması işlemlerinden oluşur. Meteorolojik veri seti incelendiğinde ölçümün normal olarak yapılamadığı durumlarda bazı değerlerin "-99" olarak girildiği görülmüş ve bu değerler veri setinden temizlenerek yanlış veriler filtrelenmiştir.

- Verilerin dönüştürülmesi: Veriler, modelin ihtiyaç duyacağı uygun formatlara dönüştürülür. Her üç veri dosyası virgülle ayrılmış değer (.csv) uzantılı dosya formatına dönüştürülmüştür.

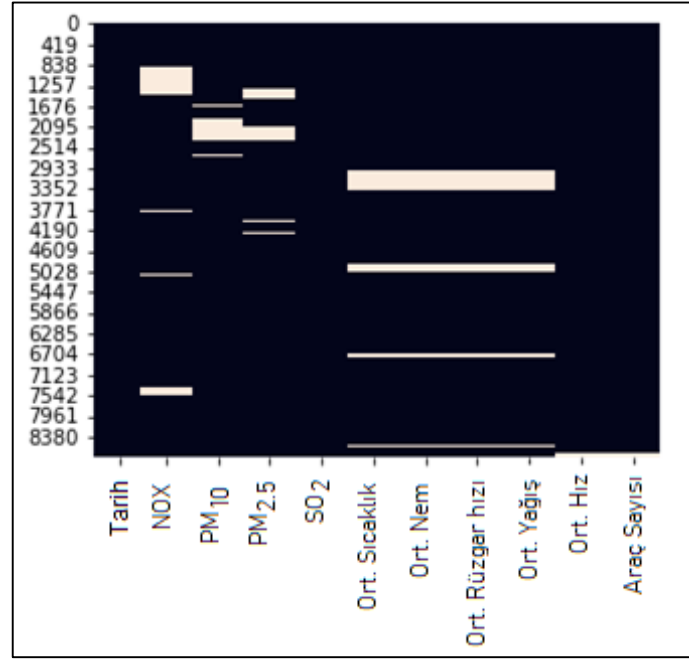
- Verilerin entegrasyonu: Farklı veri setlerinden elde edilen veriler birleştirilir. Bu aşamada hava kalitesi, meteorolojik durum ve trafik yoğunluğu için kullanılan üç veri dosyası, verinin elde edildiği tarih ortak sütun olacak şekilde birleştirilmiş ve veriler tarih sütununa göre sıralanmıştır. Pandas kütüphanesinde tarih formatı "yyyy-MM-dd hh:mm:ss" şeklinde kullanılmıştır. Formattaki ifadeler sırasıyla yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniyeyi ifade etmektedir.

- Verilerin normalleştirilmesi: Bu aşamada tüm verilerin aynı ölçüm biriminde incelenmesi için ortak bir ölçek veya aralık kullanılır. Yapılan çalışmada incelenen parametre birimleri birbirinden farklı olduğundan verilerin standart forma dönüştürülmesinde Sklearn kütüphanesindeki MinMaxScaler modülü kullanılmıştır.

$X_{min}$  ve  $X_{max}$  sırasıyla veri setindeki en küçük ve en büyük değeri;  $X'$  ise ölçeklendirilmiş veriyi ifade etmek üzere; Min-Max ölçekleme formülü Eşitlik (1)'de verilmiştir. Buna göre veri setindeki en küçük değer 0, en büyük değer 1 olacak şekilde veriler  $[0,1]$  aralığında ölçeklendirilmiştir.

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

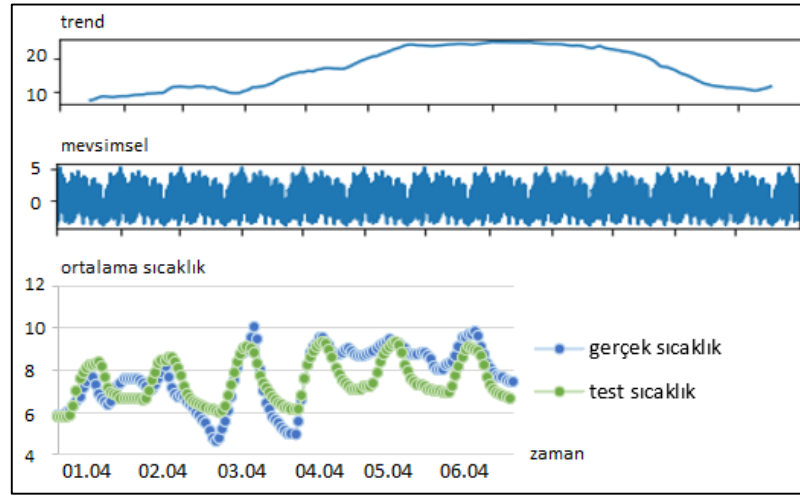
- Eksik veri tahmini: Veri setlerinde sıklıkla karşılaşılan problemlerden birisi olan eksik verilerin görselleştirilmesi için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlardan birisi ısı haritalarıdır. Şekil 3'te görüldüğü gibi açık renkli alanlar ilgili sütuna ait eksik verileri tasvir etmektedir. Schafer (1999), %5 ve altındaki eksik veri oranının ihmal edilebilir olduğunu; Bennett (2001) ise %10'dan fazla eksik verinin istatistiksel analizin yanlı olmasına sebep olacağını belirtmiştir. Bu değerlendirmeler göz önünde bulundurulduğunda eksik veri oranı çalışılan veri seti için ihmal edilebilir düzeydedir. Eksik veriler göz ardı edilerek ilgili satır silinebilir ancak bu şekilde veri yanlı hale gelerek kalitesiz sonuçlar üretilebilir (Little ve Rubin 2019). Eksik veriler incelendiğinde Şekil 3'te de görüldüğü gibi meteorolojik koşullara ait veriler için iki veri arasındaki boşluğun oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bu boşluğun büyüklüğü kayıp veri sayısı ile ölçülmektedir. Ortalama hız ve araç sayısına ilişkin ise böyle bir durum söz konusu değildir. Bu nedenle eksik verilerin doldurulması aşamasında farklı stratejiler uygulanmıştır.



Şekil 3. Isı haritası

Figure 3. Heat Map

Meteorolojik veriler için zaman serisinin özelliklerini incelemek amacıyla ilk aşamada mevsimsel ayrıştırma yapılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi ortalama sıcaklık değerlerine ilişkin trend grafiği incelendiğinde verilerin durağan olmadığı ve mevsimsel etkilerin görüldüğü söylenebilir. (Box ve Jenkins 1970) tarafından durağan olmayan zaman serileri için ARIMA modeli geliştirilmiştir. ARIMA modeline mevsimselliğin eklenmesiyle SARIMA (Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama) süreci geliştirilmiştir (Hyndman ve Athanasopoulos 2018). Böylece meteorolojik özelliklere ilişkin verilerin doldurulmasında SARIMA yöntemi kullanılmıştır. SARIMA yöntemi özellikle mevsimsel davranışlar gibi daha gerçekçi dinamiklerin tahmine dahil edildiği bir yöntem olup yalnızca komşu değerlerden bilgi almakla kalmaz aynı zamanda zaman periyodu boyunca değişim düzenliliğini de kontrol eder (Li ve diğ., 2018). Literatürde eksik verilerin doldurulmasında SARIMA yönteminin kullanıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır (Splawińska, 2015; Layanun ve diğ., 2017).  $SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s$  şeklinde ifade edilen modelde  $p$  otoregresyon seviyesini,  $d$  fark alma seviyesini,  $q$  hareketli ortalamalar seviyesini ifade ederken;  $P, D$  ve  $Q$  sırasıyla  $p, d, q$  parametrelerinin sezonsal seviyesini göstermektedir. Mevsimsel periyotun 24 saat olarak alındığı  $SARIMA(2,1,0)(1,0,1)_{24}$  modelinde parametreler pilot koşullara göre belirlenmiştir. Şekil 4'te 4-31 Mart tarihleri arasındaki dört haftalık sıcaklık değerleri eğitim verisi olarak kullanılarak 1-7 Nisan tarihleri arasındaki sıcaklık değerleri tahmin edilmiştir.



Şekil 4. SARIMA yöntemi ile eksik verilerin doldurulması

Figure 4. Imputing missing data by SARIMA

Ortalama hız ve araç sayısına ilişkin eksik verilerin doldurulmasında ise K-En Yakın Komşu Algoritması kullanılmıştır. Algoritmaya göre Öklid uzaklıklar aracılığıyla en yakın  $k$  adet eksik değer içermeyen komşu veri ile eksik değer arasındaki benzerlikler hesaplanarak eksik veri doldurulur (Pujiato ve diğ., 2019). Bu çalışmada K-En Yakın Komşu algoritması için Scikit-Learn (Sklearn) kütüphanesinden yararlanılmıştır. K-En Yakın Komşuluk algoritmasında komşu sayısı algoritma performansını etkileyen önemli bir parametredir.  $K$  değerinin çok düşük seçilmesi gürültü etkisini artırarak sonuçları daha az genellenebilir yaparken; çok yüksek seçilmesi yerel etkilerin önemi azalarak daha uzak tahminler yapılmasına sebep olmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurularak çalışmada  $K$  değeri pilot koşullara göre 5 olarak seçilmiştir.

- Öznitelik seçimi: Bu aşama modelin eğitim süresini etkileyeceğinden veri seti içerisindeki özniteliklerin yeterli sayıda ve doğru olarak belirlenmesi gerekir. Yapılan çalışmada veri seti içerisindeki gereksiz öznitelikler uzaklaştırılmıştır. Literatürde filtreleme ve sarmal yöntem olarak adlandırılan iki temel öznitelik seçim yöntemi vardır. Filtreleme yöntemlerinde istatistiksel analizlere başvurularak anlamlılık düzeylerine göre öznitelikler belirlenirken, sarmal yöntemlerde, iteratif bir arama süreci gerçekleştirilerek farklı alt kümeler ile denemeler yapılır ve en iyi öznitelik kümesi seçilir. Bu çalışmada filtreleme yöntemlerinden “korelasyon tabanlı öznitelik seçim yöntemi” kullanılmıştır. Yöntemin temel mantığı iyi bir öznitelik alt kümesindeki özelliklerin hedef değişkenle yüksek korelasyona sahip olması ancak mümkün olduğunca birbiriyle ilişkili olmamasıdır (Hall 1999). Buna göre her özellik ayrı ayrı değerlendirilerek önem düzeyine göre hangi özelliklerin nihai özellik alt kümesine dahil edilmesi gerektiğine karar verilmiştir (Koprinska ve diğ., 2015). Meteorolojik veri seti içerisindeki rüzgar yönü, hissedilen sıcaklık ve yol sıcaklığı parametrelerine ilişkin değerler; trafik yoğunluğu veri setinde ise minimum ve maksimum hız parametrelerine ilişkin değerler modelden uzaklaştırılmıştır.

- Örnek seçimi: Bu aşamada orijinal veri seti içerisinde gereksiz ve/veya çelişkili veriler kaldırılarak veri seti yönetilebilir bir boyuta indirgenir.

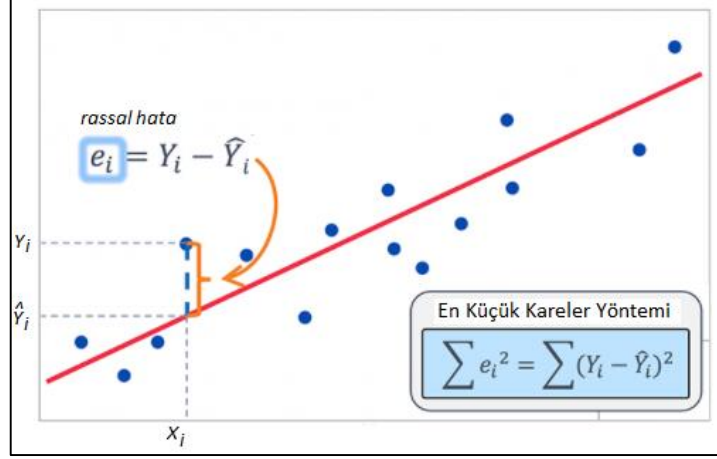
- Ayırıştırma: Bu süreçte sürekli değişkenler kesikli özniteliklere dönüştürülür. Yapılan çalışmada verinin alındığı tarihin etkisini gözlemlemek amacıyla tarih değişkeni ay gün ve saat olacak şekilde kategorik niteliklere dönüştürülmüştür.

### iii. Modelin Seçilmesi (Model Selection)

Makine öğrenmesinde kullanılan algoritmaların performansı her problem için aynı olmayıp veri boyutu, veri özellikleri ve problemin yapısına göre farklılıklar göstermektedir. Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

- Çoklu Doğrusal Regresyon: Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki matematiksel ilişkiyi

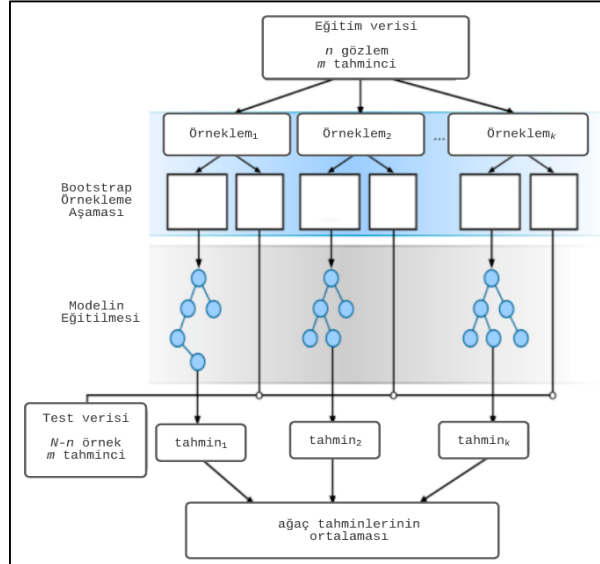
incelemek için kullanılan en basit makine öğrenme tekniğidir. Yapılan çalışmada ÇDR için Sıradan En Küçük Kareler (SEKK) yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5'te görüldüğü gibi SEKK yöntemi hata kareleri toplamını yani tahmin değerleri ile hedef değerler arasındaki uzaklıkların kareleri toplamını en küçük yapmayı amaçlayan bir yöntemdir.



Şekil 5. Sıradan En Küçük Kareler Yöntemi

Figure 5. Ordinary Least Squares (OLS) Method

- Rassel Orman: Breiman (2001)'in "bagging" fikrinin bir uzantısı olarak geliştirilmiştir. Birden fazla karar ağacının birlikte çalıştığı bir kolektif öğrenme algoritmasıdır. Hem veri seti hem de öznitelik setinden rassal olarak seçilen alt kümelerle modeller eğitilir (Cutler ve diğ., 2012). Şekil 6'da görüldüğü gibi birbiri arasında korelasyon olmayan modeller birlikte çalışarak sonuçlar birleştirilir. Düğümde bölünme yapılacak olan öznitelik kümesinin rassal olarak seçilmesi, ağaçlar arasındaki korelasyonun düşük olmasını sağlamaktadır. Hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerine uygulanabilir olması, diğer yöntemlere göre daha hızlı eğitilmesi ve tahmin hızının daha yüksek olması nedeniyle literatürde sıklıkla kullanılmaktadır.



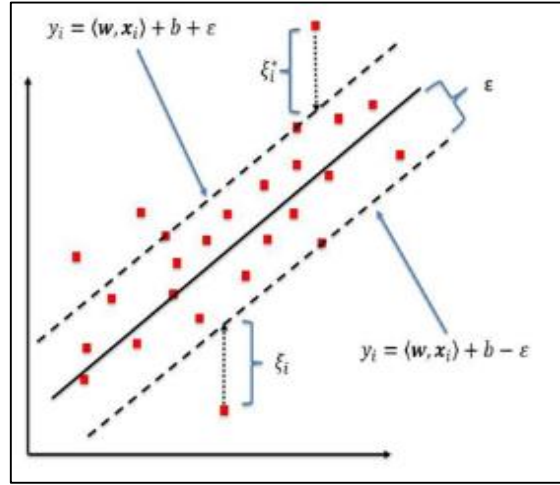
Şekil 6. Rassel Orman Algoritması (Rodriguez-Galiano ve diğ., 2016)

Figure 6. The Random Forest Algorithm

- Destek Vektör Makineleri: Genellikle sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır. Regresyon problemlerinde kullanılan versiyonu Destek Vektör Regresyonu olarak adlandırılmaktadır (Smola ve Schölkopf, 2004). Yöntemde veriler bir düzlemle iki bölüme ayrılmakta olup amaç oluşturulan bu düzlemin iki sınıfa da mümkün olduğunca eşit uzaklıkta olmasını sağlamaktır. Düzlemin genişliği Şekil



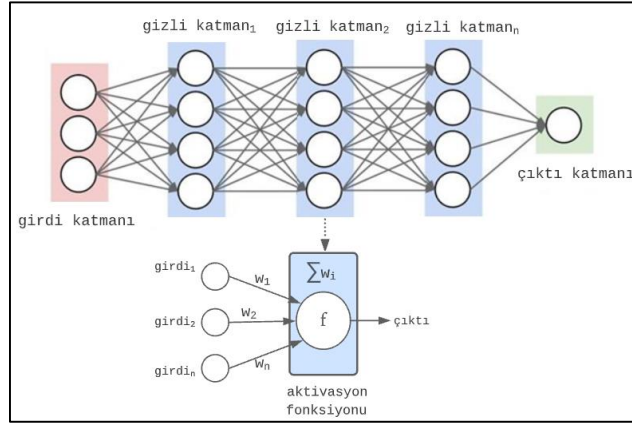
7'de görüldüğü gibi  $\varepsilon$  parametresiyle belirlenmektedir.



Şekil 7. Destek Vektör Regresyonu (Parbat ve Chakraborty, 2020)

Figure 7. Support vector regression

- Yapay Sinir Ağları: İnsan beyninde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik ilişki ile gerçekleşmektedir. YSA'nı oluşturan yapay sinir hücreleri çeşitli katmanlar içerisinde paralel bağlantılar kurarak beynin bir işlevi yerine getirme yöntemini taklit etmektedir. Bir YSA, bir girdi katmanı, bir çıktı katmanı ve en az bir gizli katmandan oluşmakta olup bu katmanlar birbirinden bağımsızdır yani belirli bir katman herhangi bir sayıda düğüme sahip olabilir (Abiodun ve diğ., 2018). Girdi katmanında bilgiler alınıp gizli katmana iletilir, gizli katmanda ise gelen bilgiler işlenerek çıktı katmanına aktarılır. Sinir ağlarında kaç tane gizli katman kullanılacağı ve her bir gizli katmanda kaç nöron olacağı problem yapısına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 8'de yapay sinir ağlarına ait genel mimari verilmiştir.



Şekil 8. Yapay Sinir Ağı Mimarisi

Figure 8. The Architecture of Artificial Neural Network

Yapılan çalışmada yapay sinir ağı modelini geliştirmek için bir sinir ağı kütüphanesi olan Keras Tensor Flow kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan yöntemlere ilişkin hiperparametre değerleri ise Çizelge 3'te verilmiştir. Hiperparametreler kullanılan yöntemlerin performansını önemli düzeyde etkilediğinden literatürde hiperparametre optimizasyonu alanında pek çok çalışmanın yapıldığı görülmüştür (Edali ve Yuçel 2018, Feurer ve Hutter 2019). Bu çalışma kapsamına hiperparametreler için bir optimizasyon çalışması dahil edilmemiş ancak pilot koşumlarla parametrelerin farklı seviyeleri değerlendirilerek Çizelge 3'teki parametreler belirlenmiştir.

**Çizelge 3.** Algoritmaların Hiperparametre Değerleri*Table 3. Hyperparameters of Algorithms*

| Algoritma                | Hiperparametre                     | Değer                                      |
|--------------------------|------------------------------------|--|
| Rassal Orman Algoritması | Ağaç sayısı                        | 100  |
|                          | Maksimum özellik                   | Auto                                       |
|                          | Maksimum derinlik                  | None                                       |
| Destek Vektör Regresyonu | $C$ (Ceza parametresi)             | 1  |
|                          | $\epsilon$ (Sapma için eşik değer) | 0,1  |
|                          | $\gamma$ (Yayıma parametresi)      | 0,1  |
|                          | Kernel fonksiyonu                  | "rbf" (Radyal tabanlı çekirdek fonksiyonu) |
| Yapay Sinir Ağları       | Küme boyutu                        | 10   |
|                          | Gizli katman sayısı                | 2  |
|                          | Gizli katmandaki düğüm sayısı      | 11   |
|                          | Girdi katmandaki düğüm sayısı      | 15   |
|                          | Çıktı katmandaki düğüm sayısı      | 1  |
|                          | Aktivasyon fonksiyonu              | ReLU (Doğrultulmuş doğrusal birimler)      |
|                          | Kayıp fonksiyonu                   | MSE (Ortalama hata karesi)                 |
|                          | Optimizör                          | "Adam" (Adaptif moment tahmini)            |
| Epochs                   | 100                                |  |

Çizelge 3'te görüldüğü gibi, RO' da ormandaki ağaç sayısı 100 olarak seçilmiştir. Bir düğümü ayırırken dikkate alınacak maksimum özellik sayısı Sklearn kütüphanesinde "Auto" olarak belirtilen modeldeki özellik sayısı kadar olacak şekilde belirlenmiştir. Düğümlerin bölünmesini durdurmak için kullanılan maksimum derinlik için Sklearn kütüphanesinin varsayılan değeri olan "None" seçeneği kullanılarak bir sınır değeri atanmamıştır. Bu durumda düğümler tüm yapraklar saf olana kadar genişletilmektedir. ÇDR' de eğitim setindeki tüm veriler dikkate alınırken, DVM' de dikkate alınacak verilerin oluşturulacak regresyon doğrusundan en az  $\epsilon$  uzaklıkta olması sağlanmaktadır. Düzenleştirme parametresi  $C$  ise hataların uyarlanması ile regresyon fonksiyonunun düzlüğü arasındaki dengeyi sağlayan bir parametredir. Bu çalışmada  $\epsilon$  değeri 0,1,  $C$  değeri ise 1 olarak alınmıştır. Kernel fonksiyonu olarak ise radyal tabanlı fonksiyon (rbf) kullanılmıştır. Yapay sinir ağı iki gizli katmandan oluşmakta olup, küme boyutu ve Epochs sırasıyla 10 ve 100 olarak belirlenmiştir. Optimize edici algoritma olarak Kingma ve Ba (2014) tarafından geliştirilen ve performansından dolayı literatürde de oldukça sık kullanılan "Adam" algoritması kullanılmıştır. YSA'da doğrusal olmayan durumların yorumlanabilmesi için yapılan işlemleri doğrusal olandan doğrusal olmayan yapıya dönüştürülmesini sağlayan aktivasyon fonksiyonu olarak "relu" kullanılmıştır. Kayıp fonksiyonu olarak ise tahmin modellerinde sıklıkla kullanılan fonksiyon olan ortalama hata karesi kullanılmıştır. Gizli katmandaki nöron sayısı belirlenirken ise Karsoliya (2012) tarafından önerilen durumlar dikkate alınmıştır. Buna göre gizli katmandaki nöronlarının sayısı, girdi katmanı boyutu ile çıktı katmanı boyutu arasında ve girdi katmanının yaklaşık 2/3'ü olmalıdır. Bunun sonucunda girdi katmanı 15, gizli katman 11 ve çıktı katmanı ise 1 nörondan oluşacak şekilde katmanlar düzenlenmiştir.

#### iv. Modelin Eğitilmesi (Model Training)

Modelin eğitilmesi aşaması makine öğrenmesindeki en önemli adımdır. Bu aşamada modelin kalıplar bularak tahminler yapması için veriler modele iletilir. Zaman ilerledikçe ve model eğitildikçe daha iyi hale gelir. Yapılan çalışmada her üç yöntem için verilerin %80'i modelin eğitilmesi için kalan %20'si ise test için kullanılmıştır. Bu oran literatürde de sıklıkla kullanılmaktadır (Joseph 2022).

#### v. Modelin Değerlendirilmesi (Model Evaluation)

Geliştirilen modeller determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), düzeltilmiş  $R^2$ , ortalama mutlak hata, ortalama hata karesi ve ortalama hata karesi kökü performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır.

- Determinasyon Katsayısı ( $R^2$ ): Korelasyon katsayısının karesi olan determinasyon katsayısı, bağımlı değişkendeki değişkenliğin ne kadarının bağımsız değişkenlerdeki değişkenlikle açıklanabildiğini ifade eder. İki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü belirleyen determinasyon katsayısı 0-1 aralığında değer almakta olup ilişkinin gücü 1'e yaklaştıkça artmaktadır.  $R^2$ 'nin 1'e eşit olması regresyon tahminlerinin gerçekleşen değerlere tam olarak uyduğu anlamına gelmektedir.

- Düzeltilmiş  $R^2$ : Modele yeni bir bağımsız değişken eklendiğinde  $R^2$  değeri genellikle artma eğiliminde olduğundan, modelde birden fazla bağımsız değişkenin olduğu durumda tek başına  $R^2$  değerini yorumlamak yeterli değildir. Böylece gereksiz eklenen bağımsız değişkenler cezalandırılarak düzeltilmiş  $R^2$  formülü oluşturulmuştur.

- Ortalama Mutlak Hata: Model tahmini ile hedef değer arasındaki mutlak farkın ortalamasını verir.

- Ortalama Hata Karesi: Model tahmini ile hedef değer arasındaki farkların karelerinin ortalamasını verir.

- Kök Ortalama Hata Karesi: Tahmin hatalarının standart sapmasıdır.

Çizelge 4 ve Çizelge 5'te sırasıyla performans ölçütlerinde kullanılan notasyonlar ve formüller verilmiştir.

Modeller oluşturulurken, bağımsız değişken sayısı çok fazla olduğundan tüm kombinasyonların denenmesi oldukça zaman alıcı bir süreçtir. Mitchell ve Beauchamp (1988) mümkün olan en az tahmin edici ile yorumlanabilir bir modele sahip olmak için değişken seçiminin yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Yanıt ve tahmin ediciler arasındaki ilişkiyi olabildiğince basit bir şekilde ifade etmek ve tahmin maliyetini azaltmak amacıyla değişken seçimi yapılarak Çizelge 6'da görüldüğü gibi yedi farklı model oluşturulmuştur. Öncelikle meteorolojik değişkenler, trafik yoğunluğu ve tarih değişkenleri için literatürde de sıklıkla kullanılan Aşamalı (Step-Wise) değişken seçim prosedürü uygulanarak Model1, Model2 ve Model3 oluşturulmuştur. Ardından meteorolojik değişkenler, trafik yoğunluğu ve tarih değişkenlerinin birlikte kullanıldığı Model3'e sırasıyla NOX, SO2 ve PM10 değişkenleri dahil edilerek Model4, Model5 ve Model6 oluşturulmuştur. Kirleticilerin bireysel olarak modele dahil edilmesinin nedeni bağımsız değişkenlerin mümkün olduğunca birbiriyle ilişkili olmaması ilkesini sağlayarak model yorumlanabilirliğini artırmaktır. Son olarak PM10 kirleticisi, NOX ve SO2'ye göre daha iyi bir tahminci olduğu için PM10'un bireysel olarak PM2,5 oluşumuna etkisini değerlendirmek amacıyla Model7 oluşturulmuştur.

**Çizelge 4:** Performans Ölçütlerinde Kullanılan Notasyonlar

*Table 4. Notations Used in Performance Criterion*

| Notasyon                | Açıklama                            |
|-------------------------|-------------------------------------|
| $y_i$ :                 | $i$ . gözlemin hedef değeri         |
| $\hat{y}_i$ :           | $i$ . gözlemin tahmin edilen değeri |
| $\bar{y}$ :             | Hedef değerlerin ortalaması         |
| $p$ :                   | Bağımsız değişken sayısı            |
| $n$ :                   | Örneklem büyüklüğü                  |
| $e_i = y_i - \hat{y}_i$ | $i$ . gözleme ilişkin hata          |

**Çizelge 5.** Performans Ölçütleri*Table 5. Performance Criterion*

| Performans Ölçütü | Formül  |
|-------------------|---|
| $R^2$             | $= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ |
| Düzeltilmiş $R^2$ | $= 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1}$                                      |
| MAE               | $= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  e_i $  |
| MSE               | $= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2$  |
| RMSE              | $= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$                                       |

**Çizelge 6.** PM<sub>2,5</sub> Konsantrasyonu için bağımsız değişkenler*Table 6. Independent Variables for PM<sub>2,5</sub>*

| Model              | Bağımsız Değişkenler  |
|--------------------|---|
| Model <sub>1</sub> | Ortalama sıcaklık, ortalama nem, ortalama rüzgar hızı, ortalama yağış miktarı |
| Model <sub>2</sub> | Model <sub>1</sub> + ortalama hız, araç sayısı                                |
| Model <sub>3</sub> | Model <sub>2</sub> + saat, gün, ay  |
| Model <sub>4</sub> | Model <sub>3</sub> + NOX konsantrasyonu                                       |
| Model <sub>5</sub> | Model <sub>3</sub> + SO <sub>2</sub> konsantrasyonu                           |
| Model <sub>6</sub> | Model <sub>3</sub> + PM <sub>10</sub> konsantrasyonu                          |
| Model <sub>7</sub> | PM <sub>10</sub>  |

Çizelge 7 ve Çizelge 8’de sırasıyla bir yıllık ve üç aylık modellere ilişkin performans ölçütleri raporlanmıştır. Model<sub>1</sub> için meteorolojik parametreler incelendiğinde ortalama yağış miktarı istatistiksel olarak anlamlı bulunmazken en fazla katsayı ortalama rüzgar hızına ait olup rüzgar hızı arttıkça PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonu azalmıştır. Trafik yoğunluğunun meteorolojik parametrelerin incelendiği modele dahil edilmesiyle modelin  $R^2$  değerinde bir artış gözlenmemiş olup PM<sub>2,5</sub> konsantrasyondaki değişimin sadece meteorolojik koşullar ve trafik yoğunluğu parametreleriyle açıklanamadığı görülmüştür. Kategorik veriler, sonlu bir seçim kümesinden bir veya daha fazla ögeyi temsil eden girdi özelliklerini ifade etmektedir. Verilerin elde edildiği saat, gün ve ay parametrelerinin kategorik olarak modele dahil edilmesiyle  $R^2$  değerinin arttığı gözlenmiştir. Son olarak PM<sub>2,5</sub> ile ilişkili olduğu düşünülen NOX, SO<sub>2</sub> ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonları incelenmiş ve en yüksek  $R^2$  değeri meteorolojik parametreler, trafik yoğunluğu, tarih ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonunun bağımsız değişken olarak kullanıldığı Model<sub>6</sub> için elde edilmiştir. Böylece performans ölçütleri karşılaştırıldığında gerçeğe en uygun model Model<sub>6</sub> olarak bulunmuştur. Doğrusal regresyon modelinin sonuçları incelendiğinde, Model<sub>6</sub> için PM<sub>2,5</sub> değerinin; sıcaklık, nem, yağış miktarı, ortalama hız, araç sayısı ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonu arttıkça arttığı görülmüştür. Ortalama rüzgar hızı, saat ve ay değişkenleri ise PM<sub>2,5</sub> ile negatif yönlü ilişkiye sahiptir. Çizelge 7’de verilen algoritma performansları değerlendirildiğinde özellikle Model<sub>3</sub> için RO diğer yöntemlere göre büyük üstünlük sağlamıştır. En yüksek  $R^2$  değerine sahip Model<sub>6</sub> için ise algoritma performanslarının sıralaması, RO, DVM, YSA ve ÇDR olarak bulunmuştur.

**Çizelge 7.** Geliştirilen modellerin karşılaştırılması (01.01.2020- 31.12.2020)*Table 7. Comparison of developed models (01.01.2020- 31.12.2020)*

|                                 | Performans Ölç.          | Model <sub>1</sub> | Model <sub>2</sub> | Model <sub>3</sub> | Model <sub>4</sub> | Model <sub>5</sub> | Model <sub>6</sub> | Model <sub>7</sub> |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <i>Doğrusal Regresyon</i>       | $R^2$                    | 0,047              | 0,044              | 0,094              | 0,214              | 0,101              | <b>0,504</b>       | 0,480              |
|                                 | <i>Düzeltilmiş</i> $R^2$ | 0,047              | 0,043              | 0,093              | 0,213              | 0,100              | <b>0,503</b>       | 0,480              |
|                                 | MAE                      | 0,088              | 0,085              | 0,087              | 0,074              | 0,080              | <b>0,064</b>       | 0,068              |
|                                 | MSE                      | 0,014              | 0,013              | 0,014              | 0,009              | 0,023              | <b>0,007</b>       | 0,008              |
|                                 | RMSE                     | 0,118              | 0,114              | 0,119              | 0,099              | 0,152              | <b>0,087</b>       | 0,093              |
| <i>Rassal Orman Algoritması</i> | $R^2$                    | 0,137              | 0,173              | 0,644              | 0,591              | 0,657              | <b>0,675</b>       | 0,395              |
|                                 | <i>Düzeltilmiş</i> $R^2$ | 0,137              | 0,173              | 0,643              | 0,591              | 0,657              | <b>0,674</b>       | 0,395              |
|                                 | MAE                      | 0,075              | 0,074              | 0,048              | 0,052              | 0,048              | <b>0,047</b>       | 0,064              |
|                                 | MSE                      | 0,011              | 0,010              | 0,004              | 0,005              | 0,004              | <b>0,004</b>       | 0,007              |
|                                 | RMSE                     | 0,105              | 0,103              | 0,067              | 0,072              | 0,066              | <b>0,064</b>       | 0,088              |
| <i>Destek Vektör Regresyonu</i> | $R^2$                    | 0,125              | 0,133              | 0,325              | 0,454              | 0,331              | <b>0,638</b>       | 0,488              |
|                                 | <i>Düzeltilmiş</i> $R^2$ | 0,125              | 0,132              | 0,324              | 0,453              | 0,330              | <b>0,637</b>       | 0,488              |
|                                 | MAE                      | 0,077              | 0,078              | 0,069              | 0,064              | 0,069              | <b>0,054</b>       | 0,062              |
|                                 | MSE                      | 0,011              | 0,011              | 0,008              | 0,006              | 0,008              | <b>0,005</b>       | 0,006              |
|                                 | RMSE                     | 0,106              | 0,103              | 0,092              | 0,084              | 0,092              | <b>0,068</b>       | 0,080              |
| <i>Yapay Sınır Ağları</i>       | $R^2$                    | 0,125              | 0,115              | 0,291              | 0,431              | 0,341              | <b>0,623</b>       | 0,500              |
|                                 | <i>Düzeltilmiş</i> $R^2$ | 0,125              | 0,115              | 0,290              | 0,430              | 0,341              | <b>0,622</b>       | 0,500              |
|                                 | MAE                      | 0,078              | 0,078              | 0,072              | 0,064              | 0,066              | <b>0,052</b>       | 0,059              |
|                                 | MSE                      | 0,011              | 0,011              | 0,009              | 0,007              | 0,008              | <b>0,005</b>       | 0,006              |
|                                 | RMSE                     | 0,106              | 0,106              | 0,095              | 0,085              | 0,091              | <b>0,069</b>       | 0,079              |

Bunun dışında veri boyutu azaltılarak 01.01.2020- 31.03.2020 tarihleri arasındaki üç aylık periyot incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 01.01.2020- 31.03.2020 tarihleri arasında Model<sub>6</sub> için  $R^2$  değeri DVM ile 0,769; RO ile de 0,765 olarak elde edilmiş olup bu değer PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonundaki değişimin yaklaşık olarak %76’sının modeldeki değişkenlerle açıklanabildiği anlamına gelmektedir.

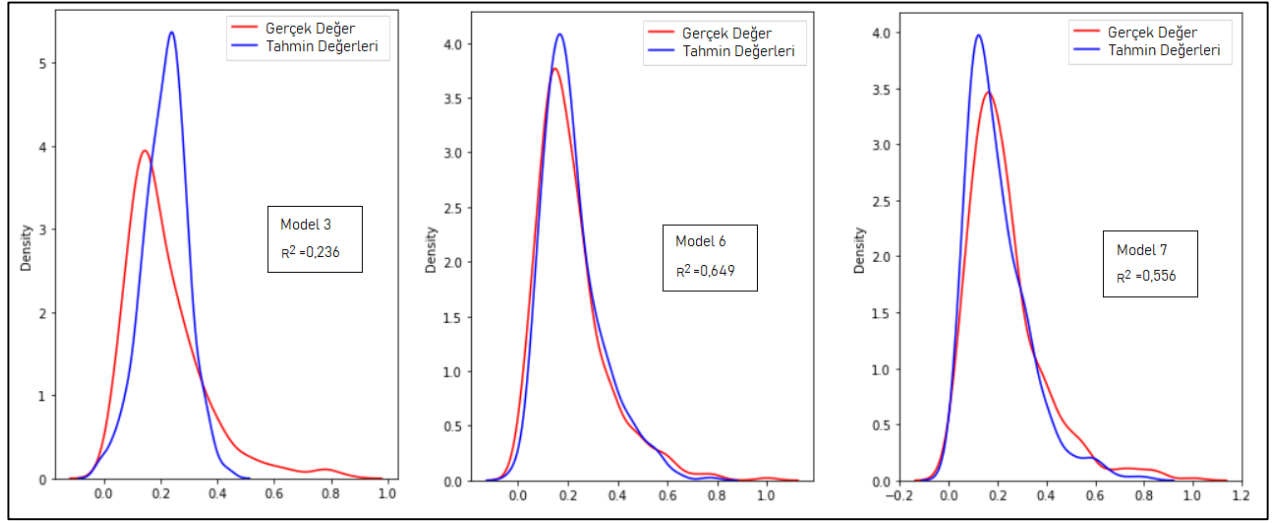
Çizelge 8. Geliştirilen modellerin karşılaştırılması (01.01.2020- 31.03.2020)

Table 8. Comparison of developed models (01.01.2020- 31.03.2020)

|                          | Performans Ölç.   | Model <sub>1</sub> | Model <sub>2</sub> | Model <sub>3</sub> | Model <sub>4</sub> | Model <sub>5</sub> | Model <sub>6</sub> | Model <sub>7</sub> |
|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Doğrusal Regresyon       | $R^2$             | 0,095              | 0,096              | 0,236              | 0,329              | 0,336              | <b>0,649</b>       | 0,556              |
|                          | Düzeltilmiş $R^2$ | 0,093              | 0,093              | 0,232              | 0,325              | 0,332              | <b>0,647</b>       | 0,556              |
|                          | MAE               | 0,109              | 0,103              | 0,094              | 0,090              | 0,089              | <b>0,069</b>       | 0,075              |
|                          | MSE               | 0,019              | 0,019              | 0,017              | 0,016              | 0,016              | <b>0,008</b>       | 0,011              |
|                          | RMSE              | 0,138              | 0,139              | 0,131              | 0,127              | 0,126              | <b>0,092</b>       | 0,108              |
| Rassal Orman Algoritması | $R^2$             | 0,217              | 0,163              | 0,575              | 0,672              | 0,740              | <b>0,765</b>       | 0,428              |
|                          | Düzeltilmiş $R^2$ | 0,216              | 0,160              | 0,573              | 0,670              | 0,739              | <b>0,764</b>       | 0,428              |
|                          | MAE               | 0,095              | 0,099              | 0,065              | 0,060              | 0,052              | <b>0,049</b>       | 0,077              |
|                          | MSE               | 0,018              | 0,019              | 0,009              | 0,007              | 0,006              | <b>0,005</b>       | 0,013              |
|                          | RMSE              | 0,134              | 0,139              | 0,099              | 0,087              | 0,077              | <b>0,074</b>       | 0,115              |
| Destek Vektör Regresyonu | $R^2$             | 0,177              | 0,186              | 0,434              | 0,598              | 0,596              | <b>0,769</b>       | 0,575              |
|                          | Düzeltilmiş $R^2$ | 0,175              | 0,184              | 0,432              | 0,596              | 0,594              | <b>0,768</b>       | 0,575              |
|                          | MAE               | 0,100              | 0,098              | 0,082              | 0,072              | 0,070              | <b>0,057</b>       | 0,072              |
|                          | MSE               | 0,019              | 0,019              | 0,013              | 0,009              | 0,009              | <b>0,005</b>       | 0,009              |
|                          | RMSE              | 0,138              | 0,137              | 0,114              | 0,096              | 0,097              | <b>0,073</b>       | 0,099              |
| Yapay Sinir Ağları       | $R^2$             | 0,192              | 0,180              | 0,457              | 0,580              | 0,542              | <b>0,756</b>       | 0,585              |
|                          | Düzeltilmiş $R^2$ | 0,190              | 0,178              | 0,454              | 0,578              | 0,540              | <b>0,755</b>       | 0,585              |
|                          | MAE               | 0,104              | 0,103              | 0,078              | 0,070              | 0,076              | <b>0,053</b>       | 0,071              |
|                          | MSE               | 0,018              | 0,019              | 0,013              | 0,009              | 0,010              | <b>0,005</b>       | 0,009              |
|                          | RMSE              | 0,137              | 0,138              | 0,112              | 0,098              | 0,103              | <b>0,076</b>       | 0,098              |

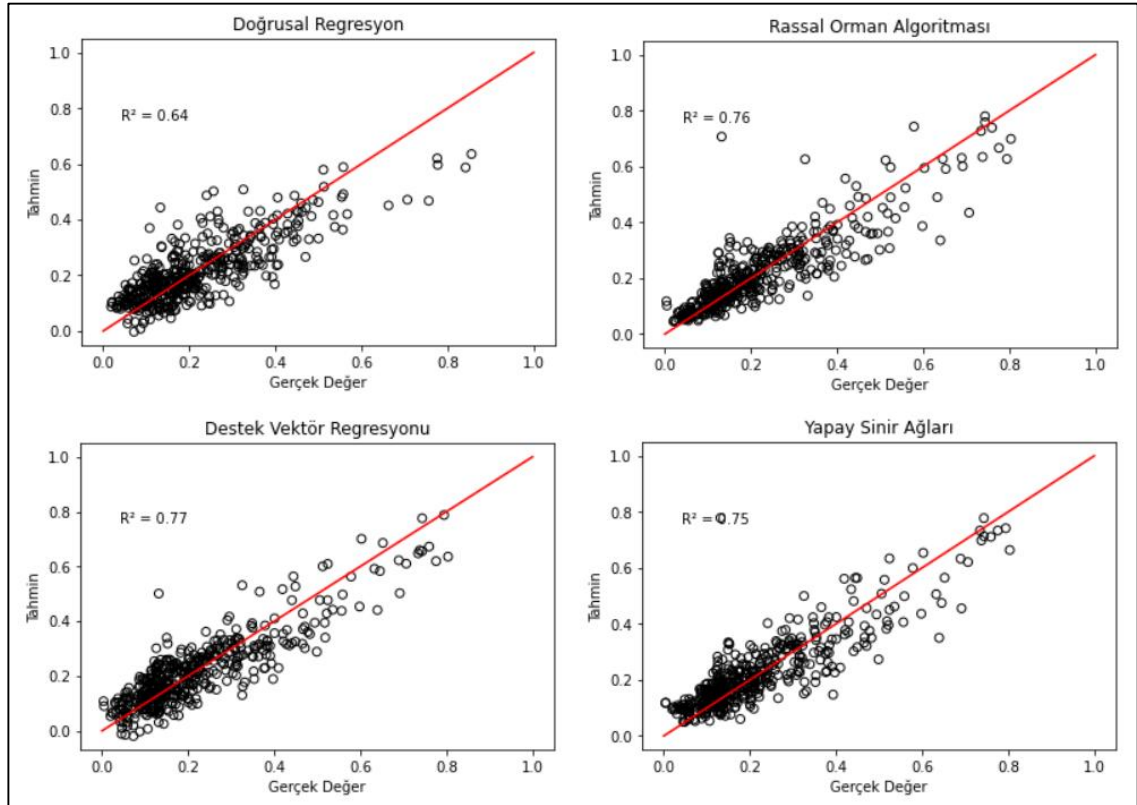
## vi. Tahmin (Prediction)

Çok değişkenli modeller için modelin uygunluğuna bakmanın bir yolu dağılım grafiğini değerlendirmektir. Bu şekilde modelin ürettiği tahmin değerlerinin dağılımı ile gerçek değerlerin dağılımı karşılaştırılır (Sadriev ve Kamanev, 2020). Şekil 9'da Çizelge 7'de  $R^2$  değerleri verilen doğrusal regresyona ait Model<sub>3</sub>, Model<sub>6</sub> ve Model<sub>7</sub> için dağılım grafikleri verilmiştir. Kırmızı eğri gerçek dağılımı ifade ederken mavi eğri modelin ürettiği tahmin değerlerinin dağılımını göstermektedir. Şekil 9 incelendiğinde meteoroloji, trafik yoğunluğu ve tarih parametrelerinin incelendiği Model<sub>3</sub>'te tahmin değerlerinin gerçek değerlerle çok örtüşmediği düşük  $R^2$  değerini de açıklamaktadır. PM<sub>10</sub> konsantrasyonunun modele eklenmesiyle oluşan Model<sub>6</sub>'da ise iki eğri birbiriyle oldukça örtüşmektedir.



Şekil 9. Dağılım Grafikleri  
Figure 9. Distribution Plots

Şekil 10'da ise kullanılan yöntemlerin performanslarını değerlendirmek amacıyla her bir algoritma için  $x$  ekseninde gerçek,  $y$  ekseninde ise tahmin değerlerinin olduğu grafik verilmiştir. Buna göre DVM, RO ve YSA yöntemlerinin performansları birbirine oldukça yakın bulunurken, ÇDR yöntemi diğer yöntemlere göre daha başarısız bulunmuştur.



Şekil 10. Tahmin Değerleri ve Gerçek Değerlerin Karşılaştırılması  
Figure 10. Comparison of Real and Predicted Values

## SONUÇ ve TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSIONS)

Yapılan çalışmada İstanbul Beşiktaş Bölgesindeki atmosferik partikül madde  $PM_{2.5}$  konsantrasyonu farklı makine öğrenme algoritmaları ile tahmin edilmiştir. Makine öğrenmesinin altı aşaması bireysel olarak ele alınmış ve her aşamada kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. İBB tarafından 01.01.2020- 31.12.2020 tarihleri arasında saat bazında paylaşılan verilerin (8784 adet) %80'i modelin eğitilmesinde %20'si ise modeli test etmek için kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında bağımsız değişkenler açısından öznitelik seçim sürecine bağlı olarak yedi farklı tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada performans ölçütleri incelendiğinde,  $PM_{2.5}$  konsantrasyondaki değişimin sadece meteorolojik koşullar ve trafik yoğunluğu parametreleriyle açıklanamadığı görülmüştür. Bu nedenle çalışma kapsamına zaman ve hava kirleticilerinin etkisi de dahil edilmiştir. Bilindiği kadarıyla Türkiye'de  $PM_{2.5}$  konsantrasyonu tahmini için literatürde daha önce meteorolojik koşulların, trafik durumunun, zamanın ve hava kirleticilerinin eş zamanlı olarak ele alındığı başka bir çalışma bulunmamaktadır. Verilerin elde edildiği saat, gün ve ay parametrelerinin kategorik olarak modele dahil edilmesiyle  $R^2$  değerinin arttığı gözlenmiştir. Son olarak  $PM_{2.5}$  ile ilişkili olduğu düşünülen NOX, SO<sub>2</sub> ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonları incelenmiş ve en yüksek  $R^2$  değeri meteorolojik parametreler, trafik yoğunluğu, tarih ve PM<sub>10</sub> konsantrasyonunun bağımsız değişken olarak kullanıldığı model için elde edilmiştir. Kullanılan makine öğrenme algoritmaları değerlendirildiğinde ise performans ölçütlerinin modellere göre değişiklik gösterdiği görülmüş ancak en iyi performans ortalamasına sahip teknik RO, en kötü performans ortalamasına sahip teknik ise ÇDR olarak bulunmuştur. Bunun dışında veri boyutu azaltılarak yöntemlerin performansları aynı modeller üzerinde yeniden denenmiştir. Veri boyutunun azalmasıyla algoritma performansları genel olarak artma eğilimi göstermiştir.

Sonuç olarak bu çalışma ile hem çevresel hem de insan sağlığı açısından büyük bir risk unsuru oluşturan partikül maddelerin farklı model ve yöntemlerle tahmin çalışması yapılarak  $R^2$  değeri 0,76 olan iyi bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Basit istatistiksel analizler, büyük veriler üzerinde kısıtlı performans göstereceğinden çalışmada makine öğrenmesi teknolojilerinden yararlanılarak hem güncel bir konu ele alınmış hem de gerçeğe yakın tahminlerin yapılması sağlanmıştır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda modelin seçimi aşamasında hiperparametrelerin seçimi üzerinde durularak algoritma parametreleri ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Ya da hibrit makine öğrenme teknikleri aynı probleme uygulanabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., Arshad, H., 2018, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey". *Heliyon*, Cilt 4, Sayı 11, e00938.
- Avrupa Çevre Ajansı, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/air-quality-standards-under-the-1>, ziyaret tarihi: 01.06.2022.
- Başakın, E. E., Ekmekcioğlu, Ö., Özger, M., 2019, "Makine öğrenmesi yöntemleri ile kuraklık analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 25, Sayı 8, ss. 985-991.
- Box, G., Jenkins, G., 1970, "Time series analysis: forecasting and control,(revised edition 1976) Holden-Day". *San Francisco*.
- Bozdağ, A., Dokuz, Y., Gökçek, Ö. B., 2020, "Spatial prediction of PM10 concentration using machine learning algorithms in Ankara, Turkey". *Environmental Pollution*, Cilt 263, 114635.
- Breiman, L., 2001, "Random forests". *Machine learning*, Cilt 45, Sayı 1, ss. 5-32.
- Chen, G., Li S., Knibbs, L. D., Hamm, N. A., Cao, W., Li, T., Guo, J., Ren, H., Abramson, M. J., Guo, Y., 2018, "A machine learning method to estimate PM2.5 concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information". *Science of the Total Environment*, Cilt 636, ss. 52-60.
- Cutler, A., Cutler, D. R., Stevens, J. R., 2012, Random forests. In: Ensemble machine learning. Eds: Springer, ss. 157-75.
- Çelik, B., Arici, N., 2021, "Covid-19 Salgın Sürecinde Hava Kalitesi Tahmini: Zonguldak Örneği". *Gazi*



- Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 3, ss. 222-232.
- ÇİSİP (Çevre İklim ve Sağlık için İş birliği Projesi) Bilgi Notu, [https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2022/03/Hava\\_Kirliligi\\_Bilgi\\_Notu.pdf](https://www.env-health.org/wp-content/uploads/2022/03/Hava_Kirliligi_Bilgi_Notu.pdf), ziyaret tarihi: 01.06.2022.
- Demolli, H., Dokuz, A., Gokcek, M., Ecemiş, A., 2019, "Makine Öğrenmesi Algoritmalarıyla Güneş Enerjisi Tahmini: Niğde İli Örneği", *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, ss. 783.
- Dündar, D., Sariçiçek, İ., Çinar, E., Yazici, A., 2021, "Kestirimci Bakımda Makine Öğrenmesi: Literatür Araştırması". *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 2, ss. 256-76.
- Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO), [www.who.int/health-topics/air-pollution](http://www.who.int/health-topics/air-pollution), ziyaret tarihi: 13.01.2022.
- Edali, M., Yucel, G., 2018, "Automated analysis of regularities between model parameters and output using support vector regression in conjunction with decision trees", *Jasss-The Journal Of Artificial Societies And Social Simulation*, Cilt 21, Sayı 4.
- Feurer, M., Hutter, F., 2019, Hyperparameter optimization. In: Automated machine learning. Eds: Springer, Cham, ss. 3-33.
- García, S., Luengo, J., Herrera F., 2015, Data preprocessing in data mining, Springer, p.
- Gültepe, Y., 2019, "Makine öğrenmesi algoritmaları ile hava kirliliği tahmini üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme". *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 16, ss. 8-15.
- Hall, M. A., 1999, "Correlation-based feature selection for machine learning".
- Hsu, Y-H, Chuang, H-C, Lee, Y-H, Lin, Y-F, Chen, Y-J, Hsiao, T-C, Wu, M-Y, Chiu, H-W, 2019, "Traffic-related particulate matter exposure induces nephrotoxicity in vitro and in vivo", *Free Radical Biology and Medicine*, Cilt 135, ss. 235-44.
- Hyndman, R. J., Athanasopoulos, G., 2018, Forecasting: principles and practice, OTexts, p.
- İBB Meteoroloji Gözlem İstasyonu Veri Seti, <https://data.ibb.gov.tr/dataset/meteorology-observation-station-data-set>, ziyaret tarihi: 11.01.2022.
- İBB Saatlik Trafik Yoğunluk Veri Seti, <https://data.ibb.gov.tr/dataset/hourly-traffic-density-data-set>, ziyaret tarihi: 11.01.2022.
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Veri setleri, <https://data.istanbul/dataset>, ziyaret tarihi: 11.01.2022.
- Joseph, V. R., 2022, "Optimal ratio for data splitting". *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*.
- Kampa, M., Castanas, E., 2008, "Human health effects of air pollution". *Environmental pollution*, Cilt 151, Sayı 2, ss. 362-7.
- Karsoliya, S., 2012, "Approximating number of hidden layer neurons in multiple hidden layer BPNN architecture". *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Cilt 3, Sayı 6, ss. 714-7.
- Kaynar, O., Tuna, M. F., Görmez, Y., Deveci, M. A., 2017, "Makine öğrenmesi yöntemleriyle müşteri kaybı analizi", *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, Cilt 18, Sayı 1, ss. 1-14.
- Kingma, D. P., Ba, J., 2014, "Adam: A method for stochastic optimization". *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- Koprinska, I., Rana, M., Agelidis, V. G., 2015, "Correlation and instance based feature selection for electricity load forecasting". *Knowledge-Based Systems*, Cilt 82, ss. 29-40.
- Kuşkapan, E., Çodur, M. K., Çodur, M. Y., 2022, "Türkiye'deki Demiryolu Enerji Tüketiminin Yapay Sinir Ağları İle Tahmin Edilmesi". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 72-84.
- Layanun, V., Suksamosorn, S., Songsiri, J., 2017, "Missing-data imputation for solar irradiance forecasting in Thailand", *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, ss. 1234-9
- Li, L., Zhang, J., Wang, Y., Ran, B., 2018, "Missing value imputation for traffic-related time series data based on a multi-view learning method". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Cilt 20, Sayı 8, ss. 2933-43.
- Little, R. J., Rubin, D. B., 2019, Statistical analysis with missing data, John Wiley & Sons, p.
- Mitchell, T. J., Beauchamp, J. J., 1988, "Bayesian variable selection in linear regression". *Journal of the American Statistical Association*, Cilt 83, Sayı 404, ss. 1023-32.

- Namlı, E., Ramazan, Ü., Ecem, G., 2019, "Fiyat Tahminlemede Makine Öğrenmesi Teknikleri Ve Doğrusal Regresyon Yöntemlerinin Kıyaslanması; Türkiye'de Satılan İkinci El Araç Fiyatlarının Tahminlenmesine Yönelik Bir Vaka Çalışması". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 4, ss. 806-21.
- Özmaden, M. Ş., Erdal, M., 2020, "Performance analysis of methods used in the cost estimation of residential buildings". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Öztürk, A., Durak, Ü., Badilli, F., 2020, "Twitter verilerinden doğal dil işleme ve makine öğrenmesi ile hastalık tespiti". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 8, Sayı 4, ss. 839-52.
- Parbat, D., Chakraborty M., 2020, "A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India". *Chaos, Solitons & Fractals*, Cilt 138, 109942.
- Pearce, J. L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R. J., Tapper, N. J., 2011, "Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models". *Atmospheric Environment*, Cilt 45, Sayı 6, ss. 1328-36.
- Pénard-Morand, C., Annesi-Maesano, I., 2004, "Air pollution: from sources of emissions to health effects". *Breathe*, Cilt 1, Sayı 2, ss. 108-19.
- Pujianto, U., Wibawa, A. P., Akbar, M. I., 2019, "K-nearest neighbor (k-NN) based missing data imputation", *2019 5th International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)*, ss. 83-8
- Sadriev, A. R., Kamaev, B. N., 2020, "Multivariate Prediction Model of Trade Diversity: Brics Countries". *SCMS Journal of Indian Management*, Cilt 17, Sayı 3.
- Samuel, A. L., 1988, "Some studies in machine learning using the game of checkers. II—recent progress". *Computer Games I*, ss. 366-400.
- Smola, A. J., Schölkopf B., 2004, "A tutorial on support vector regression". *Statistics and computing*, Cilt 14, Sayı 3, ss. 199-222.
- Splawińska, M., 2015, "The problem of imputation of the missing data from the continuous counts of road traffic". *Archives of civil engineering*, Cilt 61, Sayı 1.
- Suleiman, A., Tight M., Quinn A., 2019, "Applying machine learning methods in managing urban concentrations of traffic-related particulate matter (PM10 and PM2. 5)". *Atmospheric Pollution Research*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 134-44.
- Sürekli İzleme Merkezi (2022), <https://sim.csb.gov.tr/Services/AirQuality>, ziyaret tarihi: 11.01.2022.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2019), 2020-2023 Ulusal Akıllı Şehirler Stratejisi ve Eylem Planı, <https://www.akillisehirler.gov.tr/wp-content/uploads/EylemPlani.pdf>, ziyaret tarihi: 23.01.2021.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sürekli İzleme Merkezi, [www.havaizleme.gov.tr](http://www.havaizleme.gov.tr), ziyaret tarihi:23.01.2021.
- Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU), ITU Shaping smarter more sustainable cities, <https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/t-tut-smartcity-2016-1-pdf-e.pdf>, ziyaret tarihi:23.01.2021.
- Ünlü, O., Ünlü, H., Atay, Y., 2022, "Kalp Hastalığı Teşhisinde Yapay Zekâ Yöntemlerinin Kullanımı ve Karşılaştırılması". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 10, Sayı 2, ss. 396-411.
- Zickus, M., Greig, A., Niranjan, M., 2002, "Comparison of four machine learning methods for predicting PM10 concentrations in Helsinki, Finland". *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, Cilt 2, Sayı 5, ss. 717-29.



## HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 KATKILI SODYUM ALJİNAT HİBRİT MEMBRANLARIN PERVAPORATİF DESALİNASYONU

Derya ÜNLÜ 

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Bursa,  
TÜRKİYE  
[derya.unlu@btu.edu.tr](mailto:derya.unlu@btu.edu.tr)

(Geliş/Received: 14.05.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.08.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada HKUST-1 ve HKUST-1@GO metal organik kafes yapıları sentezlenmiş ve sodyum aljinat membrana eklenerek pervaporatif desalinasyon için hibrit membranlar üretilmiştir. Hibrit membranlar FTIR, XRD, SEM, TGA ve temas açısı kullanılarak karakterize edilmiştir. Sodyum aljinat membrana ilave edilen HKUST-1 ve HKUST-1@GO miktarının, besleme tuz konsantrasyonunun ve operasyon sıcaklığının akı ve tuz giderimine etkisi incelenmiştir. Pervaporatif desalinasyon uygulamalarında sodyum aljinat membrana HKUST-1 ve HKUST-1@GO ilavesi membranın saflaştırma performansını iyileştirmiştir. Optimum HKUST-1 ve HKUST-1@GO yükleme oranı ağırlıkça %3 olarak belirlenmiştir. Optimum operasyon parametreleri 60°C sıcaklık ve ağırlıkça %4 besleme tuz konsantrasyonu olarak her iki hibrit membran için belirlenmiştir. Hibrit membranlar mükemmel desalinasyon performansı sergilemiş ve en yüksek ayırma performansı HKUST-1@GO yüklü hibrit membran ile %99,99 tuz giderimi ve 6,59 kg/m<sup>2</sup>h su akısı olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Desalinasyon, Grafen Oksit, HKUST-1, Pervaporasyon, Su

### Pervaporative Desalination by HKUST-1 and GrO@HKUST-1 Doped Sodium Alginate Hybrid Membrane

**ABSTRACT:** In this study, HKUST-1 and GrO@HKUST-1 metal organic framework were synthesized and added to the sodium alginate membrane for the manufacture of hybrid membranes to use in pervaporative desalination. The hybrid membranes were characterized by using FTIR, XRD, SEM, TGA and contact angle. The effects of HKUST-1 and GrO@HKUST-1 content in the sodium alginate membrane, feed NaCl concentration, and operation temperature were assessed for the flux and salt rejection. The addition of HKUST-1 and GrO@HKUST-1 to the sodium alginate membrane improved the purification performance in pervaporative desalination applications. The optimal loading ratios for HKUST-1 and GrO@HKUST-1 were specified as 3 wt% HKUST-1 and 3 wt% HKUST-1@GO, respectively. Optimum operation parameters were achieved at 60°C of temperature and a 4 wt% of feed NaCl concentration for both hybrid membranes. Hybrid membranes (GrO@HKUST-1 doping) exhibited excellent desalination performance with salt rejections of 99,99% and water fluxes of 6,59 kg/m<sup>2</sup>h.

**Keywords:** Desalination, Graphene Oxide, HKUST-1, Pervaporation, Water

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su, canlıların hayatta kalabilmesi için gerekli olan temel ihtiyaçlardan biridir. Bununla birlikte son yıllarda dünya nüfusundaki hızlı artış, yükselen yaşam standardı, tüketim alışkanlıklarının değişimi, iklim değişikliği, sulu tarımın yaygınlaşması ve sanayileşme, su kıtlığına yol açmakta ve küresel temiz su

talebinin artması ile sonuçlanmaktadır. (Vörösmarty ve diğ., 2000; Erçin ve Hoekstra, 2014; Elimelech ve Phillip, 2011). 20. yüzyılda su arıtma süreçlerinin geliştirilmesiyle temiz su eksikliğinin giderilmesine yönelik çabalar gösterilmiştir. Ancak su kıtlığı günümüzde, öncesinden çok daha elzem bir problemdir. Dünya Su Konseyi (WWC), 2030 yılına kadar dünyada 3,9 milyar insanın su kıtlığı olan bölgelerde yaşayacağını ve 2,1 milyar insanın güvenli içme suyu kaynağından yoksun olacağını tahmin etmektedir (Li ve diğ., 2019, Prihatiningtyas ve Bruggen, 2020). Bu nedenle, temiz su temini kamu ve devletler için önemli bir sorun haline gelmiştir. Yeryüzündeki su kaynakları, geleneksel su kaynakları ve geleneksel olmayan su kaynaklarından oluşmaktadır. Geleneksel su kaynakları; yeraltı sularını, nehirleri ve gölleri içerirken, geleneksel olmayan su kaynakları ise kullanılmadan önce çok daha fazla arıtma gerektiren deniz suyu, acı suyu ve atık suyu içermektedir.

Yeryüzündeki toplam su kaynağı (tuzlu ve tatlı su) 1,4 milyar km<sup>3</sup> olup, bunun %97,5'i tuzlu sudur ve doğrudan insan tüketimi için kullanılamaz (Hameeteman, 2013). Bu nedenle, neredeyse sınırsız deniz suyu kaynağından tuzlu suyu tatlı suya dönüştüren desalinasyon, topluma temiz su sağlamak için ilgi çekici, alternatif bir çözüm haline gelmiştir. Desalinasyon için termal desalinasyon ve membran teknolojisi olmak üzere iki temel teknoloji vardır. Son yıllarda membran teknolojileri; yüksek ayırma verimliliği ve enerji tasarrufu (Semiat, 2008; Drioli ve diğ., 2011), yüksek operasyonel dayanımı, düşük işletme maliyeti, endüstriyel süreçlere kolay entegre edilmesi gibi avantajları nedeniyle desalinasyon için önemli bir alternatif olmuştur (Drioli ve diğ., 2011). Membran teknolojileri arasında ise pervaporasyon, desalinasyon için yenilikçi membran proseslerinden biridir.

Pervaporasyon sıvı-sıvı karışımları ayırmada kullanılan, sıvı karışım içerisindeki bir bileşenin yoğun membran arasından seçici geçtiği prosestir. Kimyasal potansiyel gradyenti ile yürütülür (Cannilla ve diğ., 2017; Slater ve diğ., 2006; Xue ve diğ., 2020). Pervaporasyon; düşük enerji tüketimi, yüksek tuz giderimi, sınırlı kirlenme etkileri ve yüksek tuzluluktaki besleme sularını işleme kabiliyeti gibi bazı avantajları nedeniyle potansiyel bir desalinasyon yöntemi olarak pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Prihatinintyas ve diğ., 2020b; Wang ve diğ., 2016). Pervaporatif desalinasyonda, su moleküllerinin buhar fazında taşınımı için hidrofilik membranların kullanılması gerekmektedir. Suyun membrandan taşınım mekanizması şu şekildedir: i) su moleküllerinin membran yüzeyine seçici absorpsiyonu ii) su buharı moleküllerinin konsantrasyon gradyenti sonucu olarak membran boyunca buhar fazına difüzyonu iii) geçen akım tarafında su buharı moleküllerinin desorpsiyonu.

Pervaporatif desalinasyon prosesinde ayırmayı verimli bir şekilde gerçekleştirmek için doğru membran malzemesini bulmak oldukça önemlidir. İdeal bir pervaporasyon membranı, yüksek su akısına ve seçiciliğe, iyi mekanik dayanım ve termal dirence ve uzun bir kullanım ömrü sağlayan iyi bir kirlenme direncine sahip olmalıdır. Pervaporasyonda kullanılan membranlar yoğun, homojen membranlardır; çoğunlukla polimerik malzemelerden elde edilirler (Wang ve diğ., 2016). Ancak polimerik membranlar düşük geçirgenlik, kirlenmeye karşı düşük direnç ve kısa ömür gibi bazı sınırlamalara sahiptir (Shahmirzadi ve Kargari, 2018). Bu nedenle, desalinasyon için istenen özelliklere sahip ve ekonomik bir pervaporasyon membranı elde etmek için yeni membran malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Araştırmacılar, mevcut polimerik pervaporasyon membranlarının olumsuzluklarının üstesinden gelmek için polimer matrisine katkı maddeleri eklemektedirler. Bu çalışmada da membranın özelliklerini iyileştirmek için polimerik matrisine metal organik kafes yapılar eklenmiştir. Metal organik kafes yapılar, yapılarında bulunan organik bileşenlerden dolayı polimerlerle uyum sorunu yaşamamaktadırlar.

Membrana katkı maddesi olarak kullanılacak olan metal organik kafes yapıda suya seçici özellikle HKUST-1 seçilmiştir. HKUST-1, yüksek hidrofilik yapıya sahip, iyi hidrotermal stabilite sergileyen bir metal organik kafes yapı olmasından dolayı su ve suya yakın polariteye sahip bileşenlerin pervaporasyon ile ayrılması için uygun bir tercihtir (Sorribas ve diğ., 2015). HKUST-1 aynı zamanda grafen oksit (GrO) ile modifiye edilerek de membranda katkı maddesi olarak kullanılmıştır. GrO'nin kullanılmasının nedeni ise su arıtma uygulamalarında yüksek su akısına ve kirlenme önleyici yapıya sahip olmasıdır. Ayrıca MOF'larla bir arada kullanımı hidrofilik yapısından dolayı suda aşırı şişme özelliğinin etkisini azaltarak performansının iyileştirilmesini sağlar (Dahanayaka ve diğ., 2020). Literatürde GrO@HKUST-1 kompozitleri farklı uygulamalar için sentezlenmiş ancak sodyum aljinat membranına ilavesi ve

desalinasyon uygulamasına rastlanmamıştır. Her iki katkı maddesinin ilavesi ile sodyum aljinat membranların suya olan ilgisi artırılarak ayırma performanslarının geliştirilmesi amaçlanmıştır (Wasewar ve diğ., 2009). Sentezlenen hibrit membranların desalinasyon performansına katkı miktarının, besleme tuz konsantrasyonunun ve operasyon sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membranların pervaporatif desalinasyon için iyi bir aday olduğunu göstermektedir.

## **MATERYAL ve METOT (MATERIAL AND METHOD)**

### **Malzemeler (Materials)**

Membran hazırlamada kullanılan aljinik asit sodyum tuzu Sigma Aldrich firmasından tedarik edilmiştir. Membranı çapraz bağlamak için gerekli olan kimyasallardan glutaraldehit Sigma Aldrich firmasından, 2-propanol ve hidroklorik asit ise Merck firmasından temin edilmiştir. HKUST-1 sentezinde kullanılan bakır (II) nitrat hemipentahidrat Acros firmasından, benzen-1,3,5-trikarboksilik asit ABCR firmasından ve dimetilformamid Isolab firmasından satın alınmıştır. Sulu grafen oksit çözeltisi Hazerfen Kimya'dan temin edilmiştir.

### **Metal Organik Kafes Yapı Sentezi (Synthesis of Metal Organic Framework)**

#### **HKUST-1 sentezi (Synthesis of HKUST-1)**

Ağırlıkça %4 bakır (II) nitrat hemipentahidrat ve ağırlıkça %2 benzen-1,3,5-trikarboksilik asit, dimetilformamid çözeltisinde karıştırılmıştır. Ardından 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda sonike edilmiştir. Elde edilen karışım Teflon hidrotermal reaktöre alınarak 75°C'de 24 saat reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon sonrası karışım santrifüj edilerek ürün toplanmıştır. Elde edilen ürün etanol ile yıkanarak vakum altında 100°C'de kurutulularak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Bhoria, ve diğ., 2020).

#### **GrO@HKUST-1 sentezi (Synthesis of GrO@HKUST-1)**

Hacimce %3,5 grafen oksit (GrO) ve ağırlıkça %8 bakır (II) nitrat hemipentahidrat deiyonize suda dağıtmak için 30 dakika sonike edilmiştir. Diğer yandan ağırlıkça %3,5 benzen-1,3,5-trikarboksilik asit etanolde çözülmüştür. Her iki karışım Teflon hidrotermal reaktöre alınarak 110°C'de 24 saat reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon sonrası karışım santrifüj edilerek ürün toplanmıştır. Elde edilen ürün kloroform ile yıkanarak vakum altında 100°C'de kurutulularak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Azizi ve diğ., 2021).

### **Membran Sentezi (Synthesis of Membrane)**

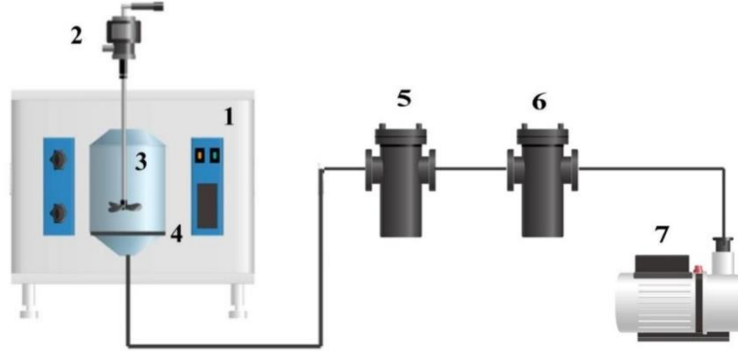
Ağırlıkça %3 aljinik asit sodyum tuzu deiyonize suda çözülerek homojen çözelti elde edilmiştir. Homojen çözelti elde edildikten sonra ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkıları membran çözeltisine ilave edilerek önce belirli bir süre karıştırılmış ardından sonikatöre konularak polimer çözeltisi içerisinde homojen dağılması sağlanmıştır. Homojen çözelti elde edildikten sonra hibrit çözelti polimetilmetakrilat yüzeye dökülerek oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Sodyum aljinat hidrofilik özellikte bir polimer olduğu için kuruyan membranın sulu ortamda çözünmesini engellemek için çapraz bağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Membran, 2 mL çapraz bağ ajanı glutaraldehit ve katalizör görevi gören 2 mL HCl içeren ağırlıkça %85 2-propanol -%15 su içeren karışım kullanılarak 3 saat çapraz bağlanarak kullanıma hazır hale getirilmiştir.

### Membran Karakterizasyonu (Membrane Characterization)

Sentezlenen membranlar XRD, FTIR, SEM, TGA ve temas açısı kullanılarak karakterize edilmiştir. Membranların kristalinitesi XRD ile belirlenmiştir. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membranların kimyasal bağ yapısı FTIR ile karakterize edilmiştir. Membranların morfolojileri, katkı ile polimer matrisin uyumluluğu SEM ile belirlenmiştir. Termal dayanımları TGA ile hidrofilitesi ise temas açısı ölçümleri ile analiz edilmiştir.

### Pervaporatif Desalinasyon (Pervaporative Desalination)

Desalinasyon testi Şekil 1'de verilen pervaporasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1.** Pervaporatif desalinasyon ünitesi (1) etüv, (2) mekanik karıştırıcı, (3) membran hücresi, (4) membran, (5, 6) soğuk tuzaklar, (7) vakum pompası

*Figure 1. Pervaporative desalination unit (1) oven, (2) mechanical stirrers, (3) membrane chamber, (4) membrane, (5, 6) cold traps, (7) vacuum pump*

Farklı konsantrasyonlarda tuz içeren sentetik tuzlu su çözeltileri hazırlanmıştır. Safılaştırılacak olan tuzlu su çözeltisi bir besleme pompası kullanılarak membran hücresine beslenmiştir. Mekanik karıştırıcı ile besleme akımı sürekli karıştırılmıştır. İstenilen sıcaklık koşullarının sağlanması için membran hücresi etüv içerisine yerleştirilmiştir. Ayırmada kullanılacak olan membranlar da membran hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Membran hücresinin üst akımı atmosfer basıncı altında iken, alt akımı vakum pompası yardımıyla 10 mbar da tutulmuştur. Alt akım ve üst akım arasındaki bu basınç farkı kütle taşınımı için itici güç oluşturmaktadır. Su hidrofilik karakterdeki membrandan sürekli çekilerek, alt akımda basınç farkı nedeni ile düşük basınçta buharlaşmış sonra sıvı azot ile soğutularak sıvı fazda elde edilmiştir. Soğutucu kaparlardan sıvı fazda alınan örneklerin tuz konsantrasyonu Dijital Tuzluluk Ölçer kullanılarak belirlenmiştir.

Membranın ayırma performansı akı ve tuz giderim yüzdesi ile belirlenmiştir. Akı değeri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$J = \frac{m}{A.t} \quad (1)$$

Bu eşitlikte m soğutucu kaparlarda toplanan numune miktarının ağırlığını, A membranın etkin kullanım yüzey alanını, t ise deney süresini ifade etmektedir.

Tuz giderim yüzdesi ise Eşitlik 2'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R(\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de R tuz giderim yüzdesini (%),  $C_f$  beslemedeki tuz konsantrasyonunu,  $C_p$  geçen akımdaki tuz konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Pervaporatif desalinasyon testinde ayırma performansına membrandaki metal organik kafes yapı katkı oranlarının, besleme tuz konsantrasyonunun ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Öncelikle membrana ilave edilen katkı oranlarının ayırma performansına etkisi incelenerek en iyi ayırma performansını sergileyen membranlar belirlenmiştir. En iyi ayırma performansını sergileyen membran belirlendikten sonra besleme tuz konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. En iyi ayırma performansının elde edildiği tuz konsantrasyonu belirlendikten sonra farklı sıcaklıklarda tuzun giderimi incelenmiştir. Çizelge 1'de deneysel çalışma koşulları verilmiştir.

**Çizelge 1.** Pervaporatif desalinasyon testi çalışma koşulları

*Table 1. Operation conditions in pervaporative desalination test*

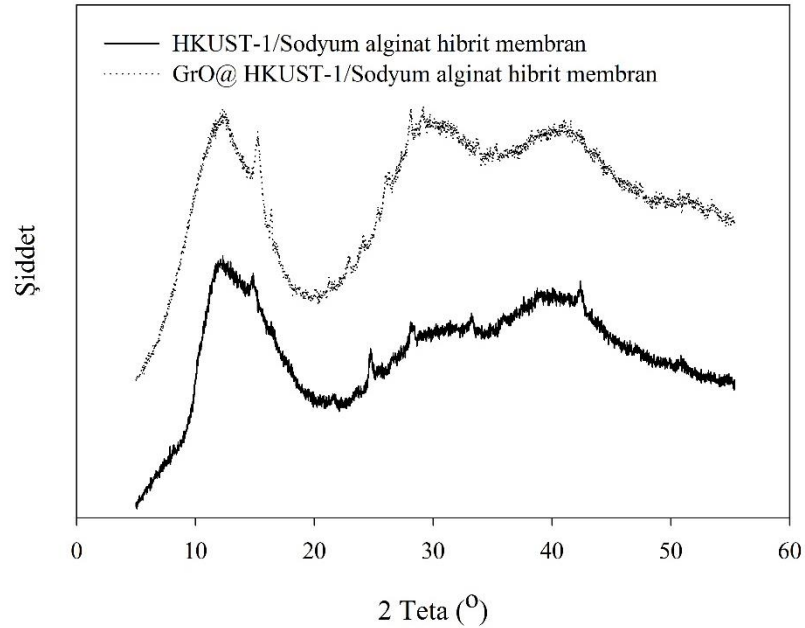
| Değişkenler                              | Değer Aralığı     |
|--|-------------------|
| MOF yükleme oranı (% ağırlıkça)          | %1, %2, %3, ve %4 |
| Besleme tuz konsantrasyonu (% ağırlıkça) | %2, %4, %6 ve %8  |
| Sıcaklık (°C)                            | 30, 40, 50 ve 60  |

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### Membran Karakterizasyonu (Membrane Characterization)

#### XRD (XRD)

HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı sodyum aljinat hibrit membranların yapısal kristalinitesini belirlemek için XRD analizi yapılmıştır. Şekil 2'de HKUST-1 ve GrO@ HKUST-1 katkılı sodyum aljinat hibrit membranın XRD analiz sonuçları görülmektedir.



**Şekil 2.** Hibrit membranların XRD paterni

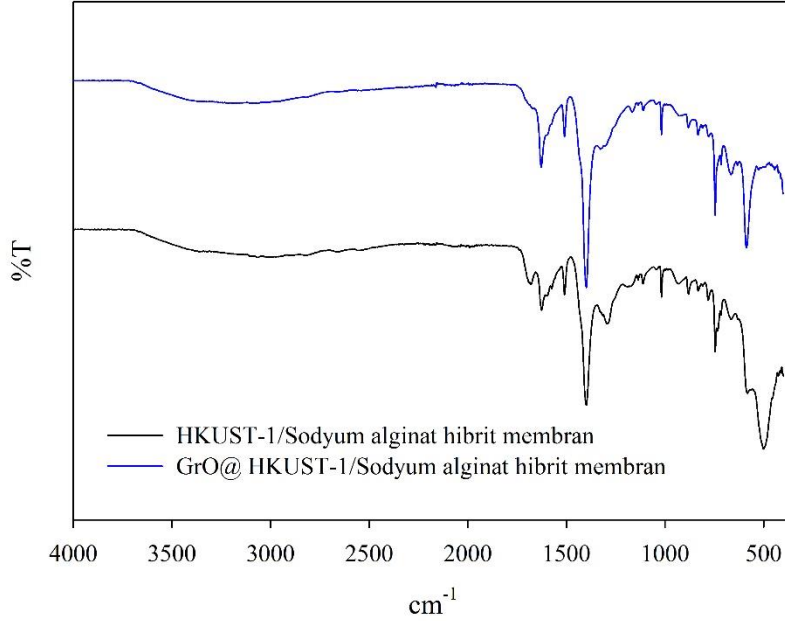
*Figure 2. XRD pattern of hybrid membranes*

$2\theta=11^\circ$ 'de görülen pik oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığını gösterir. Bu da grafen oksite ait difraksiyon pikini göstermektedir. GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membran da benzer yapı göstermektedir. Bu grafen oksit varlığının MOF yapısının oluşumunu engellemediğini göstermektedir (Lee ve diğ., 2020,

Zu ve diğ., 2014). Tek başına HKUST-1'in kristalin bir yapıya sahip olduğu literatürde belirtilmiştir (Jee ve diğ., 2015). Polimer ile bir araya getirildiğinde sentezlenen membranlar ise yarı kristalin bir yapı sergilemiştir (Lee ve diğ., 2020, Zu ve diğ., 2014).

### FTIR (FTIR)

HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı sodyum aljinat hibrit membranların FTIR spektrumları Şekil 3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Hibrit membranların FTIR analizi

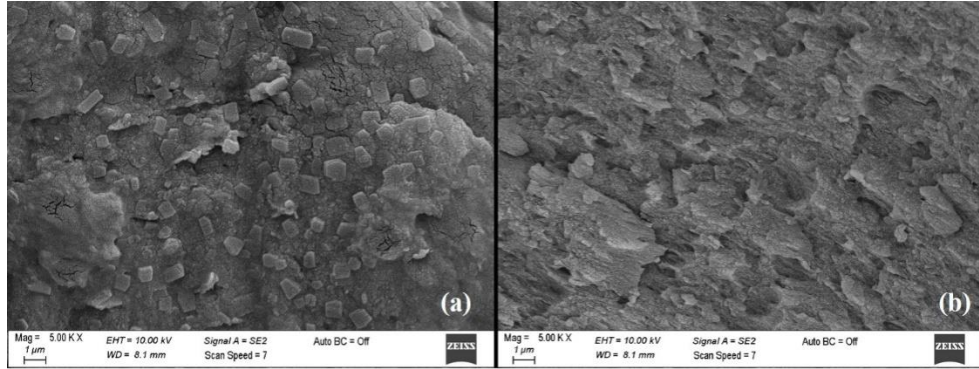
*Figure 3. FTIR analysis of hybrid membranes*

Güçlü asimetrik COO gerilme titreşimi ve zayıf simetrik COO gerilme titreşimi FTIR spektrumundaki en önemli karakteristik piklerdir. Temel titreşim pikleri 1020  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-O, 1120  $\text{cm}^{-1}$ 'de CO, 1400  $\text{cm}^{-1}$ 'de simetrik COO ve 1590  $\text{cm}^{-1}$ 'de asimetrik COO gerilme titreşimleridir. Bunların yanı sıra O-H bağları 3000–3400  $\text{cm}^{-1}$  aralığında, H-O-H bükülme modu 1620  $\text{cm}^{-1}$ 'de, C-O gerilme titreşimi 1100  $\text{cm}^{-1}$ 'de ve C=O asimetrik modu 1440  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlemlenir (Lee ve diğ., 2020). 500  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki pikler Cu-O gerilimini ifade eder, 700–1700  $\text{cm}^{-1}$  bölgesindeki piklerde HKUST-1'e atfedilir. 1720  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülen pik GrO'in yapısında bulunan oksijen içeren gruplara atfedilir (Sun ve diğ., 2015). GrO@ HKUST-1 katkılı membran ile HKUST-1 katkılı membran kıyaslandığında spektrumlar arasında belirgin bir fark olmadığı benzer kimyasal bağ yapısı sergilediği görülmüştür (Huang ve diğ., 2014).

### SEM (SEM)

Şekil 4'te HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı sodyum aljinat hibrit membranların kesit görüntüleri görülmektedir.





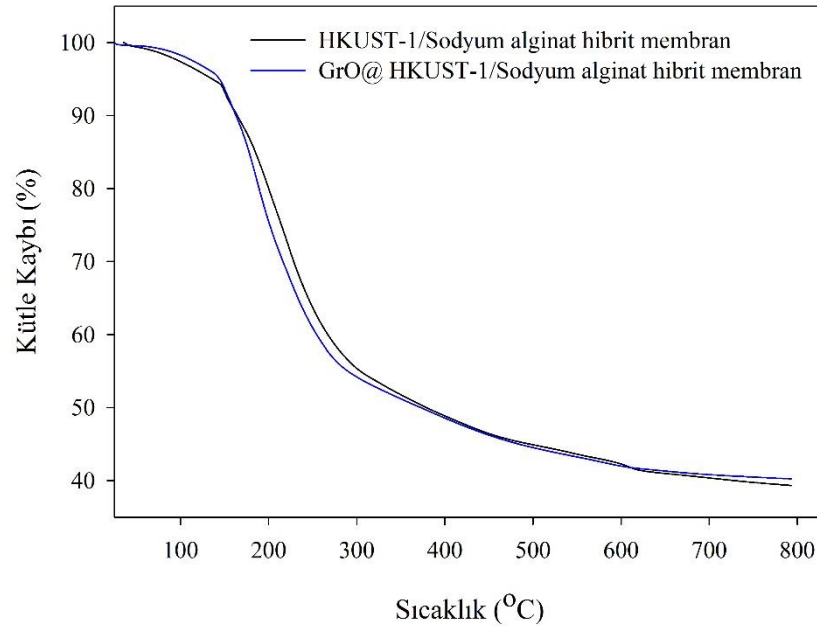
**Şekil 4.** Hibrit membranların SEM kesit görüntüleri (a)HKUST-1 katkıli sodyum aljinat membran (b)GrO@HKUST-1 katkıli sodyum aljinat membran

*Figure 4. SEM cross section images of hybrid membranes (a) HKUST-1 doped sodium alginate membrane (b) GrO@HKUST-1 doped sodium alginate membrane*

Hibrit membranların SEM kesit görüntülerine bakıldığında sodyum aljinat membrana ilave edilen HKUST-1 ve GrO@HKUST-1'un polimer matrisi içinde iyi dağıldığını ve polimer matris ile uyumlu olduğu görülmektedir. Pervaporatif desalinasyon için hedeflenen gözeneksiz, homojen membranların başarı ile sentezlendiği SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir.

#### TGA (TGA)

Hibrit membranların termal dayanımları TGA ile belirlenmiştir. Şekil 5'te TGA eğrisi gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Hibrit membranların TGA eğrisi

*Figure 5. TGA curve of hybrid membranes*

İlk iki ağırlık kaybı adımları 25°C-130°C ve 130°C-300°C arasında gerçekleşmiştir. Bu kütle kayıpları metal organik kafes yapı arasında ve membranda fiziksel ve kimyasal olarak absorplanmış su ile ilgilidir. 300°C-800°C arasındaki üçüncü adım ise metal organik kafes yapıdaki ligandın ve polimer ağ yapısının bozunması ile ilgilidir. Kalan malzeme ise CuO'e atfedilir (Sorribas ve diğ. 2015).

### Temas Açısı (Contact Angle)

Çizelge 2 katkısız sodyum aljinat membranın ve HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit sodyum aljinat membranların temas açısı ölçümlerini göstermektedir.

**Çizelge 2.** Membranların temas açısı değerleri

Table 2. Contact angle values of membranes

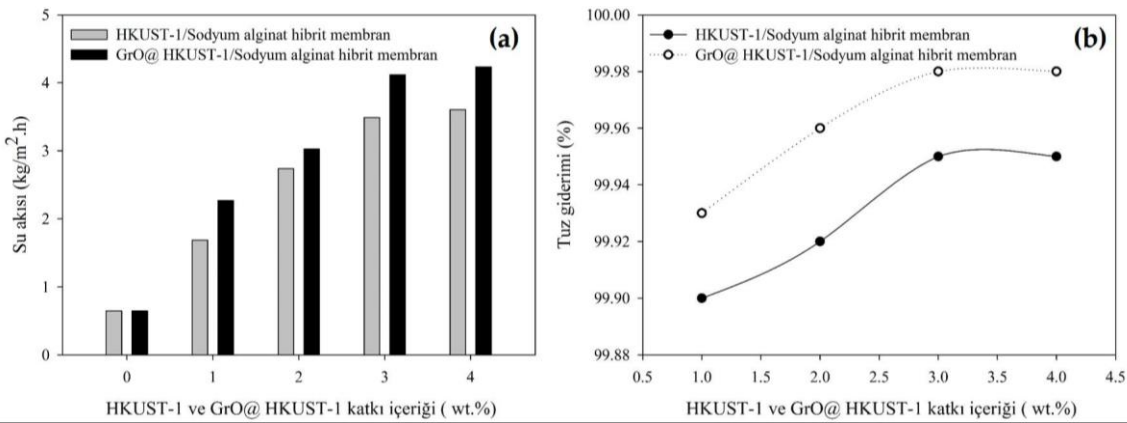
| Membran                                   | Temas açısı değeri |
|---|--------------------|
| Katkısız sodyum aljinat membran           | 66,5 ± 0,3         |
| HKUST-1/Sodyum aljinat hibrit membran     | 59,4 ± 0,3         |
| GrO@HKUST-1/Sodyum aljinat hibrit membran | 48,7 ± 0,3         |

Sodyum aljinat membranın temas açısı HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 ilavesi ile azalmaktadır. Bu durum membran yüzeyinin hidrofilitesinin artması ile ilgilidir. Hem HKUST-1 hem de GrO hidrofiliktir. Bu yüzden HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 ilavesi ile membran daha fazla su ile etkileşime girer ve temas açısında azalma ile sonuçlanır. Katkısız sodyum aljinat membranın temas açısı 66,5° iken, HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit sodyum aljinat membranın temas açısı değerleri sırasıyla 59,4° ve 48,7°'dir. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılarının membran hidrofilitesine etkisi ile ilgili olarak, su damlasının yüzey gerilimi, membran yüzeyi ile su moleküllerinin gelişmiş etkileşiminin sonucu olarak azalır. Bu da membranın yüzeyinin ıslanabilirliğini artırır (Yeang ve diğ.,2018).

### Desalinasyon Sonuçları (Results of Desalination)

#### HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 Katkı Oranının Etkisi (Effect of HKUST-1 ve GrO@ HKUST-1 Additive Ratio)

Membrana ilave edilen katkı oranlarının ayırma performansına etkisi ağırlıkça %4 tuz içeren besleme karışımı ile 30°C ortam sıcaklığında incelenmiştir. Su akışı ve tuz giderim değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Katkı oranının akı ve tuz giderimine etkisi

Figure 6. Effect of additive ratio on flux and salt rejection

HKUST-1, yüksek hidrofilik yapıya sahip bir metal organik kafes yapı olmasından dolayı su ve suya yakın polariteye sahip bileşenlerin pervaporasyon ile ayrılması için uygun bir tercihtir (Sorribas ve diğ.,2015). GrO temelli membranlar, su saflaştırma uygulamalarında yüksek su akışı performansı sergilerler. Bu çalışmada HKUST-1 yüklü membranlar ve HKUST-1 ile GrO'in avantajlarını birleştirmek için GrO@HKUST-1 yüklü membranların desalinasyon performansı incelenmiştir. Su akışı sodyum aljinat polimerine eklenen HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkı oranı arttıkça artmaktadır. Bunun sebebi HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılarının hidrofilik karakteridir. Polimer matrisi içerisindeki HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılarının varlığı suyun transferini kolaylaştırır. Özellikle GrO@HKUST-1 yüklü

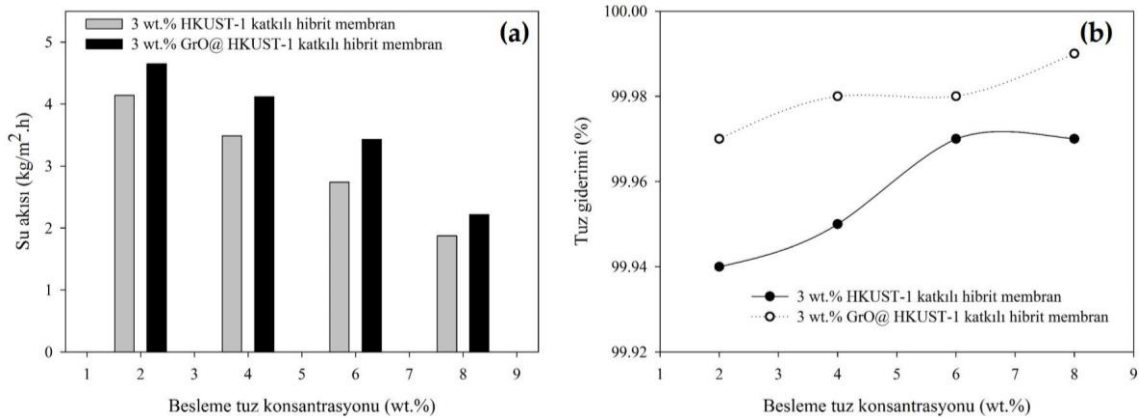
membran HKUST-1'a göre daha yüksek akıya sahiptir. Bunun sebebi hidrofilik karakterde olan HKUST-1'e yine hidrofilik karakterde olan GrO ilave edilerek daha hidrofilik bir yapının elde edilmesidir. Ağırlıkça %1 HKUST-1 yüklü membranda su akısı  $1,68 \text{ kg/m}^2\text{h}$  iken, ağırlıkça %4 HKUST-1 yüklü membranda  $3,60 \text{ kg/m}^2\text{h}$  su akısı elde edilmiştir. GrO@HKUST-1 yüklü membranda ise %1 yükleme oranında akı değeri  $2,26 \text{ kg/m}^2\text{h}$  iken, yükleme oranı %4'e çıkarıldığında akı değeri  $4,23 \text{ kg/m}^2\text{h}$  olmuştur. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yüklü hibrit membranlarda su akısındaki yükseliş, sodyum aljinat membranına hidrofilik katkıların ilavesi ile suyun difüze olabilecek hidrofilik difüzyon kanallarının artışı ile açıklanabilir.

Suda çözülmüş tuz iyonları pozitif katyonlar ve negatif anyonlar içermektedir. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 içeren hibrit sodyum aljinat membranlar negatif yüklü kimyasal fonksiyonel gruplar içermektedir. HKUST-1 katkılı hibrit membran karboksil ve hidroksil grupları içerirken, GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membran karbonil, karboksil, hidroksil ve epoksi gruplar içermektedir. Her iki hibrit membranda sahip olduğu fonksiyonel gruplardan dolayı negatif yüklüdür. Bu negatif yüklü gruplar  $\text{Cl}^-$  iyonlarını iterek membran yüzeyinden uzaklaştırır, böylece membran yüzeyinde birikmesini önleyerek, suyun transferini kolaylaştırır. Pozitif yüklü  $\text{Na}^+$  iyonları ise hibrit membranlar içerisinde bulunan negatif yüklü gruplar tarafından yakalanır ve bağlanır, böylece  $\text{Na}^+$  iyonlarının membrandan geçişi önlenir. Böylece sadece suyun membrandan geçişi sağlanarak desalinasyon işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir (Lee ve diğ.,2020).

Her iki katkı için ağırlıkça %3 ve %4 yüklü membranda akı ve tuz giderim değerleri arasında belirgin bir fark olmadığı için optimum yükleme oranı ağırlıkça %3 olarak belirlenmiştir. Hibrit membranların tuz giderim performansları da HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yükleme oranları ile artmıştır. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yükleme oranlı membranlarda tuz giderme oranları sırasıyla % 99,95 ve %99,98'dir.

#### Besleme Tuz Konsantrasyonunun Etkisi (Effect of Feed Salt Concentration)

Şekil 7, ağırlıkça %3 HKUST-1 ve ağırlıkça %3 GrO@HKUST-1 yüklü membranın,  $30^\circ\text{C}$ 'de pervaporatif desalinasyon performansını göstermektedir.



Şekil 7. Besleme tuz konsantrasyonunun akı ve tuz giderimine etkisi

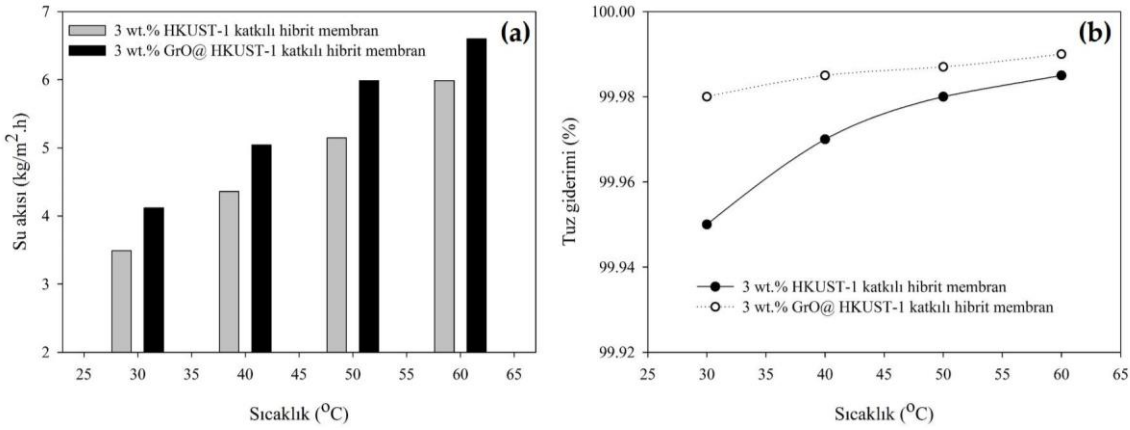
Figure 7. Effect of feed salt concentration on flux and salt rejection

Daha yüksek tuzluluk seviyelerinde, suyun transfer hızının değişmesi, iyon-su etkileşimleri ile su-su etkileşimleri arasındaki rekabetten kaynaklanmaktadır. Artan tuz konsantrasyonu ile su moleküllerinin kendi aralarındaki etkileşimleri azalmakta, su molekülü- $\text{Cl}^-$  etkileşimleri artmaktadır. Su-iyon etkileşimlerindeki artış, su molekülleri arasındaki bağların doğasını değiştirir ve su akısının azalmasına neden olur (Dahanayaka ve diğ., 2020). Besleme tuz konsantrasyonu arttıkça suyun mol fraksiyonu azalır. Su akısı belirgin bir düşüş gösterirken, tuz giderimi HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yüklü membranda %99,9 civarında kalmıştır. Tuz konsantrasyonu ağırlıkça %2'den %8'e arttıkça, HKUST-1 yüklü membranda su

akısı  $4,14 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'ten  $1,87 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'e düşerken, GrO@HKUST-1 yüklü membranda  $4,64 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'ten  $2,21 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'e düşmüştür.

### Sıcaklığın Etkisi (Effect of Temperature)

HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yüklü membranların ayırma performansına sıcaklığın etkisi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Operasyon sıcaklığının akı ve tuz giderimine etkisi

Figure 8. Effect of operation temperature on flux and salt rejection

Operasyon sıcaklığı arttıkça sodyum aljinat polimerinin zincirlerinin termal hareketliliği yoğunlaşır, serbest hacim artar. Suyun transferi kolaylaşır ve sıcaklık arttıkça suyun akısında artış gözlemlenir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça beslemenin buhar basıncı artış gösterir. Bu artış, membrandan kütle taşınımı için itici gücü arttırmaktır. Bu durumda her iki membran için akı değerinde artış ile sonuçlanmaktadır. HKUST-1 yüklü membranda  $30^{\circ}\text{C}$ 'de  $3,48 \text{ kg/m}^2\text{h}$  akı elde edilirken, sıcaklık  $60^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiğinde akı değeri de  $5,98 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'ye yükselmiştir. GrO@HKUST-1 yüklü membranda ise sıcaklık  $30^{\circ}\text{C}$ 'den  $60^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseldiğinde akı değeri  $4,11 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'ten  $6,59 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 'e yükselmiştir. Akı artarken tuz giderim değerleri HKUST-1 yüklü membranda  $30^{\circ}\text{C}$  ve  $60^{\circ}\text{C}$ 'de sırası ile %99,95 ve %99,98 iken, GrO@HKUST-1 yüklü membranda ise aynı koşullarda %99,98 ve %99,99 olarak elde edilmiştir. Sıcaklık artışının tuz giderim performansını çok fazla etkilemediği görülmüştür.

### Elde Edilen Sonuçların Literatür ile Karşılaştırılması (Comparison of the Obtained Results With Literature Studies)

HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı sodyum aljinat hibrit membranların pervaporatif desalinasyon işleminde sergiledikleri ayırma performansları literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında MOF yüklü polimerik membranların kullanıldığı pervaporatif desalinasyon ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı sodyum aljinat membranın pervaporatif desalinasyonda kullanıldığı çalışmaya ise rastlanılmamıştır. Bu sebeple Çizelge 3, literatürde yer alan sınırlı sayıda çalışma kullanılarak oluşturulmuştur.

**Çizelge 3.** Pervaporatif desalinasyon performanslarının literatür ile karşılaştırılması

Table 3. Comparison of pervaporative desalination performances with literature

| Membran               | MOF miktarı (wt.%) | Besleme Sıcaklığı (°C) | Besleme Tuz Kons. | Akı (kg/m <sup>2</sup> h) | Tuz Giderimi (%) | Referans                   |
|-----------------------|--------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|------------------|----------------------------|
| PVA/P(AA-AMPS)/UiO-66 | 30                 | 60                     | 3,5 (wt.%)        | 124,7                     | 99,9             | Xing ve diğ., 2022         |
| GO@CuBTC/PVDF         | 2                  | 75                     | 35 ppm            | 36,79                     | 99,68            | Kachhadiya ve Murthy, 2022 |
| MIL-53(Al)/PVA/PVDF   | 30                 | 80                     | 100 g/L           | 18,8                      | 99,99            | Liang ve diğ., 2018        |
| HKUST-1               | 3                  | 60                     | 4 (wt.%)          | 5,98                      | 99,98            | Bu çalışma                 |
| GrO@HKUST-1           | 3                  | 60                     | 4 (wt.%)          | 6,59                      | 99,99            | Bu çalışma                 |

Çizelge 3'teki sonuçlar karşılaştırıldığında düşük konsantrasyonlarda HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 ilavesi ile yüksek oranda tuz gideriminin elde edildiği görülmektedir. Literatür sonuçları incelendiğinde desalinasyon prosesi için pervaporasyon yöntemiyle yüksek oranda tuz gideriminin elde edildiği görülmüştür.

#### SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit sodyum aljinat membranlar pervaporatif desalinasyon için hazırlanmıştır. Sentezlenen membranların kimyasal bağ yapısı, kristalinitesi, morfolojisi, termal dayanımı ve hidrofilitesi karakterizasyon testleri ile belirlenmiştir. Membranlar, %99 ve üzeri tuz giderim performansı sergilemişlerdir. Sodyum aljinat polimerine farklı oranlarda HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 yüklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Artan HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 miktarıyla birlikte tuz giderimi artış göstermiştir. Su akışı ve tuz giderimi performansı değerlendirildiğinde optimum katkı miktarı ağırlıkça %3 olarak belirlenmiştir. Optimum operasyon koşulları ise %4 besleme tuz konsantrasyonu ve 60°C sıcaklık olarak belirlenmiştir. Bu optimum koşullar altında HKUST-1 katkılı hibrit membranlarla 5,98 kg/m<sup>2</sup>h su akışı ve %99,98 tuz giderimi elde edilirken; GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membranlarla 6,59kg/m<sup>2</sup>h su akışı ve %99,99 tuz giderimi elde edilmiştir. HKUST-1 ve GrO@HKUST-1 katkılı hibrit membranlar, yenilikçi membran malzemeleri olarak pervaporatif desalinasyon için önemli bir adaydır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 211N006 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Azizi, A., Feijani, E. A., Ghorbani, Z., Tavasoli, A., 2021, "Fabrication and characterization of highly efficient three component CuBTC/graphene oxide/PSF membrane for gas separation application", *International Journal of HydrogenEnergy*, Cilt 4, Sayı 2, ss. 2244-2254.
- Bhoria, N., Basina, G., Pokhrel, J., Kumar Reddy, K. S., Anastasiou, S., Balasubramanian, V., Karanikolos, G. N., 2020. "Functionalization Effects on HKUST-1 and HKUST-1/Graphene Oxide Hybrid Adsorbents for Hydrogen Sulfide Removal", *Journal of HazardousMaterials*, Cilt 394, ss.122565.
- Cannilla, C., Bonura, G., Frusteri, F., 2017, "Potential of Pervaporation and Vapor Separation with Water Selective Membranes for an Optimized Production of Biofuels—A Review", *Catalysts*, Cilt 7, ss. 187.

- Castro-Muñoz, R., 2020, "Breakthroughs on tailoring pervaporation membranes for water desalination: A review", *Water Research*, Cilt 187, 116428.
- Dahanayaka, M., Babicheva, R., Chen, Z., Wing-Keung Law, A., See Wu, M., Zhou, K., 2020, "Atomistic Simulation Study of GO/HKUST-1 MOF Membranes for Seawater Desalination via Pervaporation", *Applied Surface Science*, Cilt 503, ss. 144198.
- Drioli, E., Stankiewicz, A. I., Macedonio, F., 2011, "Membrane engineering in process intensification—an overview", *Journal of Membrane Science*, Cilt 380, ss.1–8.
- Elimelech, M., Phillip, W. A., 2011, "The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment", *Science*, Cilt 333, ss. 712-717.
- Erçin A. E., Hoekstra A. Y., 2014, "Water footprint scenarios for 2050: A global analysis", *Environment International*, Cilt 64, ss. 71-82.
- Hameeteman, E., 2013, "Future Water (in) Security: Facts, Figures, and Predictions", *Global Water Institute*, ss. 1–16.
- Huang, W., Zhou, X., Xia, Q., Peng, J., Wang, H., Li, Z., 2014, "Preparation and Adsorption Performance of GrO@Cu-BTC for Separation of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Cilt 53, Sayı 27, ss. 11176–11184.
- Jee, K. Y., Kim, J. S., Kim, J., & Lee, Y. T., 2015, "Effect of hydrophilic Cu<sub>3</sub>(BTC)<sub>2</sub> additives on the performance of PVDF membranes for water flux improvement", *Desalination and Water Treatment*, Cilt 57, Sayı 38, ss. 17637–17645.
- Kachhadiya, D. D., Murthy, Z. V. P., 2022, "Graphene oxide modified CuBTC incorporated PVDF membranes for saltwater desalination via pervaporation", *Separation and Purification Technology*, Cilt 290, 120888.
- Lee, S. J., Hann, T., & Park, S. H., 2020, "Seawater Desalination by Using MOF-Incorporated Cu-Based Alginate Beads without Energy Consumption", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Cilt 12, ss. 16319-16326.
- Li, X., Molelekwa, G.F., Khellouf, M., Van der Bruggen, B., Gonçalves, G.A.B., Marques, P. (Eds.), 2019. *Nanostructured Materials for Treating Aquatic Pollution*. Springer International Publishing, Cham, p. 243.
- Liang, W., Li, L., Hou, J., Shepherd, N. D., Bennett, T. D., D'Alessandro, D. M. and Chen, V., 2018, "Linking defects, hierarchical porosity generation and desalination performance in metal–organic frameworks", *Chemical Science*, Cilt 9, ss. 3508-3516.
- Prihatiningtyas, I., & Van der Bruggen, B. 2020, "Nanocomposite Pervaporation Membrane for Desalination", *Chemical Engineering Research and Design*, Cilt 164, ss. 147-161.
- Semiati R., 2008, "Energy issues in desalination processes", *Environmental Science & Technology*, Cilt 42, ss. 8193.
- Shahmirzadi, M. A. A., Kargari, A., 2018, "Nanocomposite membranes", in *Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Slater C. S., Schurmann, T., MacMillian J., Zimarowski, A. 2006, "Separation of diacetone alcohol-water mixtures by membrane pervaporation", *Separation Science and Technology*, Cilt 41 , Sayı 12, ss. 2733-2753.
- Sorribas, S., Kudasheva, A., Almendro, E., Zornoza, B., de la Iglesia, Ó., Téllez, C., Coronas, J., 2015. "Pervaporation and membrane reactor performance of polyimide based mixed matrix membranes containing MOF HKUST-1", *Chemical Engineering Science*, Cilt 124, ss.37–44.
- Sun, X.-F., Qin, J., Xia, P.-F., Guo, B.-B., Yang, C.-M., Song, C., & Wang, S.-G., 2015. "Graphene oxide–silver nanoparticle membrane for biofouling control and water purification", *Chemical Engineering Journal*, 281, 53–59.
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R. B., 2000. "Global water resources: vulnerability from climate change and population growth", *Science*, Cilt 289, Sayı 5477, ss. 284-288.
- Wang, Q., Li, N., Bolto, B., Hoang, M., Xie, Z., 2016. "Desalination by Pervaporation A review", *Desalination*, Cilt 387, ss. 46-60.

- Wasewar K., Patidar S., Agarwal V. K., 2009, "Esterification of lactic acid with ethanol in a pervaporatio nreactor: modeling and performance study", *Desalination*, Cilt 243, ss. 305–313.
- Xing, Y., Xue, Y., Qin, D., Zhao, P., Li, P., 2022, "Microwave-induced ultrafast crosslinking of Poly (vinyl alcohol) blended with nanoparticles as wave absorber for pervaporation desalination", *Journal of Membrane Science Letters*, Cilt 2, Sayı 1, 100021.
- Xue, Y. L., Huang, J., Lau, C. H., Cao, B., Li, P., 2020, "Tailoring the molecular structure of crosslinked polymers for pervaporation desalination", *Nature Communications*, Cilt 11, Sayı 1, ss. 1461.
- Yeang, Q. W., Sulong, A. B., & Tan, S. H., 2018, "Asymmetric membrane containing electrospun Cu-BTC/poly(vinylalcohol) for pervaporation dehydration of 1,4-dioxane", *Separation and Purification Technology*, Cilt 192, ss. 240–252.
- Zu, D.-D., Lu, L., Liu, X.-Q., Zhang, D.-Y., & Sun, L.-B., 2014, "Improving Hydrothermal Stability and Catalytic Activity of Metal–Organic Frameworks by Graphite Oxide Incorporation", *The Journal of Physical Chemistry C*, Cilt 118, Sayı 34, ss.19910–19917.



## PPP VE RADYOSONDA'DAN ELDE EDİLEN YOĞUŞABİLİR SU BUHARI (PWV) DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Sema Nur AĞAÇ , <sup>2</sup>Salih ALÇAY 

<sup>1</sup>Türk Telekom Genel Müdürlüğü, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>semaa.nuragac@gmail.com, <sup>2</sup>salcay@erbakan.edu.tr

**Geliş/Received: 30.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.08.2022**

**ÖZ:** Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) jeodezik ölçmeler, araç takip sistemleri, turizm, tarım, askeri, deformasyon ölçmeleri ve arama kurtarma çalışmaları gibi birçok farklı alana hizmet vermektedir. GNSS teknolojileri ayrıca güneş aktiviteleri, iyonosfer ve troposferin incelenmesine de olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP) yöntemi ile elde edilen troposferik gecikmelerden yararlanarak Yoğuşabilir Su Buharı (PWV:Precipitable Water Vapor) miktarının belirlenmesi ve elde edilen bu değerlerin günümüzde referans olarak kabul gören radyosondadan elde edilen PWV değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma kapsamında Türkiye’de bulunan Samsun, Erzurum, İstanbul ve İzmir radyosonda istasyonları ve yakın konumlarında bulunan SAM1, ERZR, ISTN ve IZMI CORS-TR istasyonlarının 2016-2020 yıllarına ait verileri kullanılmıştır. GNSS verilerinin değerlendirilmesinde CSRS-PPP servisinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde iki yöntemle elde edilen PWV değerlerinin uyum içerisinde olduğu ve çoğunlukla benzer trend gösterdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** PPP, Yoğuşabilir Su Buharı (PWV), Radyosonda

### Comparison of Precipitable Water Vapor (PWV) Values Obtained From PPP And Radiosonde

**ABSTRACT:** Global Navigation Satellite Systems (GNSS) serve many different fields such as geodetic measurements, vehicle tracking systems, tourism, agriculture, military, deformation measurements and search and rescue studies. GNSS technologies also allow the study of solar activities, ionosphere and troposphere. In this study, the amount of Precipitable Water Vapor (PWV) was determined by using the tropospheric delays obtained by the Precise Point Positioning (PPP) method and these values were compared with the PWV values obtained from the radiosonde, which is accepted as a reference today. Within the scope of the study, the data of Samsun, Erzurum, Istanbul and Izmir radiosonde stations in Turkey and SAM1, ERZR, ISTN and IZMI CORS-TR stations in their nearby locations for the years 2016-2020 were used. CSRS-PPP service was used to process GNSS data. When the results obtained were examined, it was seen that the PWV values obtained by the two methods were in harmony and mostly showed a similar trend.

**Keywords:** PPP, Precipitable Water Vapor (PWV), Radiosonde

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

GNSS ölçümlerinden türetilen troposferik gecikme, su buharı içeriğinin değişimini izlemek için önemli bir veri kaynağıdır. Doğru hava tahmini ve küresel iklim modelleri geliştirmek için su buharını mümkün olduğunca doğru bir şekilde belirlemek önemlidir. Meteorologlar tarafından, atmosferik su



buharı miktarını ifade etmek için en yaygın kullanılan terimlerden biri yoğuşabilir su buharıdır (Li ve diğ., 2003).

Su buharı, atmosferik olayların incelenmesinde anahtar parametrelerden biri olup küresel/bölgesel hava ve iklim değişikliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Şiddetli yağışlar, kuraklıklar, tayfunlar ve fırtınalar gibi birçok aşırı hava olayı, su buharındaki hızlı değişimlerle ilgilidir. Islak Zenit Gecikmesini (ZWD) doğru bir şekilde modellemek, hava durumu tahmini için çok önemlidir. Hava tahminlerinin ve hidrolojik izlemenin doğruluğunu belirlemek için önde gelen parametrelerden biri olan yoğuşabilir su buharı atmosferik nem içeriğinin değerlendirilmesinde etkindir.

Tunalı (2018), Gerçek Zaman Servisi (RTS) aracılığıyla sağlanan uydu yörünge ve saat düzeltmelerini kullanan Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) oturumlarının, atmosferdeki su buharı hareketlerini izlemek için yeterli hassasiyette sahip olup olmadığını belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. 5 Uluslararası GNSS Servisi (IGS) istasyonuna ait gözlemler ve IGS RTS düzeltmeleri kullanılarak ZWD değerleri gerçek zamanlı kestirilmiştir. Sonuçlar radyosonda verileri ile karşılaştırılmıştır. RT PPP oturumlarından ECMWF/VMF1 kullanılarak elde edilen sonuçlar ile radyosonda farklarının  $\pm 2$  mm (Karesel Ortalama Hata (KOH): 3.30 mm) aralığında değiştiği ve tüm çözümler için radyosonda ile olan farkların 4 mm'den küçük olduğu görülmüştür. Gürbüz ve diğ. (2021), GPS/GLONASS gözlemlerinden elde edilen ZWD/PWV sonuçlarını radyosonda ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre GPS ZWD'nin GLONASS ZWD ile uyumlu olduğu, ZWD farklarına ait KOH'nun 4.1–11.84 mm ve PWV'de ise 0.6–1.78 mm olduğu görülmüştür. Gratton ve diğ. (2021), dağlık alanlarda kinematik modda Zenit Troposferik Gecikme (ZTD) değerlerini belirlemek için GNSS-PPP yöntemini kullanmışlardır. GNSS-PPP'den türetilen ZWD ve VMF1 profilleri arasındaki KOH farkları, statik baz durumu için 4 mm ve analiz edilen iki kinematik profil için ise 9 ve 16 mm olarak belirlenmiştir. Mekik ve Deniz (2017), çalışmalarında 2011 yılı için Türkiye'deki 8 radyosonda istasyonunun verilerini kullanarak doğrusal bir  $T_m-T_s$  modeli oluşturmayı ve bu modeli kullanarak İstanbul ve Ankara radyosonda istasyonlarıyla aynı yerde bulunan iki GNSS istasyonunun PWV'sini tahmin etmeyi amaçlamıştır. Geliştirilen  $T_m$  modelinden 2013 ve 2014 yıllarında Ankara ve İstanbul istasyonlarındaki GNSS gözlemlerinden elde edilen PWV'nin doğrulukları sırasıyla  $\pm 1.7$  ve  $\pm 1.8$  mm olarak belirlenmiştir. Gürbüz ve Jin (2017) ise PVW'nin uzun süreli değişimini ve trendini incelemişlerdir. Bu amaçla GPS, MODIS ve Radyosonda verilerini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre Radyosonda PWV ile GPS-PWV farklarına ilişkin KOH'ların 1–3 mm ve MODIS PWV ile GPS PWV farklarına ilişkin KOH'ların ise 3–7 mm olduğu belirlenmiştir. Zhao ve diğ. (2018), IGS tarafından sağlanan gerçek zamanlı, yörünge ve saat ürünlerini kullanarak bağımsız olarak geliştirilen PPP yazılımına dayalı GPS ZTD değerinin doğruluğunu değerlendirmişlerdir. Çalışmada GPS' den türetilen ZTD değerleri, GAMIT, Bernese-PPP yazılımı ve VLBI'dan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar farklara ilişkin KOH'ların 8 mm'nin altında olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada ise PPP yöntemi ile elde edilen ZWD değerlerinden türetilen PWV değerlerinin doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla PPP yönteminden elde edilen PWV değerleri ile Radyosonda' dan elde edilen PWV değerleri karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### CSRS-PPP ile ZWD Değerlerinin Elde Edilmesi (Obtaining ZWD Values with CSRS-PPP)

NRCan (Natural Resources Canada) kuruluşunun sağladığı internet tabanlı GNSS değerlendirme servisi olan CSRS-PPP tek veya çift frekanslı alıcılarda toplanmış GPS/GLONASS gözlem verilerini değerlendirmektedir. Yazılımda statik ve kinematik seçenekleri olmakla birlikte NAD83 veya ITRF referansı seçenekleri de kullanıcıya sunulmaktadır. Sistem günümüzde yapılan akademik çalışmalarda sıkça kullanılan CSRS-PPP servisi 1 Hz ve daha yüksek frekanslı çözüme olanak sağlamaktadır. Uydu yörünge ve saat ürünleri dosyanın CSRS-PPP servisine yüklendiği zamana ve RINEX dosyasındaki en son toplanan epok zamanına göre belirlenmektedir. Ayrıca 2018 yılından itibaren faz başlangıç belirsizliğinin kesirli bir sayı olarak kestirilmesinden, PPP-AR algoritmasına geçiş yapılmıştır. Bu durum faz başlangıç

belirsizliğinin tam sayı olarak kestirilmesine olanak sağlamıştır. PPP-AR algoritması, RINEX v3 veri formatını desteklemekte olup, kod ve faz ölçüleri için geliştirilen tek frekanslı konum bilgisini de elde etmektedir (Bezcioğlu ve diğ., 2019). CSRS-PPP servisi VMF1 fonksiyonunu kullanarak ZHD'yi belirlemektedir. Ayrıca CSRS-PPP VMF1 fonksiyonunu ZWD için bir ön bilgi olarak kullanmaktadır (Gratton ve diğ., 2021).

RINEX formatındaki gözlem verileri yazılıma gönderildikten sonra yazılım tarafından kullanıcının mail adresine gelen dosya içerisinde .sum, .pos, .csv, .tro, .clk ve .pdf uzantılı çözüm dosyaları gönderilmektedir. .tro dosyası troposfer dosyası olup, kuru gecikme, ıslak gecikme ve troposferik gradyan verilerini içermektedir. Troposfer dosyasında bulunan TRODRY sütunu kuru bileşeni, TROWET sütunu ise ıslak bileşeni ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında Radyosonda verilerinin elde edildiği zamanlar (00.00 ve 12.00 UTC) dikkate alınarak TROWET sütununda bu sürelerle karşılık gelen değerler dikkate alınmıştır.

### Yoğuşabilir Su Buharı (PWV) Değerinin Elde Edilmesi (Obtaining the Precipitable Water Vapor (PWV) Value)

Atmosferdeki nem oranından dolayı zamansal ve mekânsal değişim gösteren, modellenmesi zor ve atmosferik olayların oluşum ve gelişim süreçlerinin yorumlanması için önemli bir parametre olan ZWD miktarını tahmin etmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, doğrudan yöntemler ve matematiksel modele dayalı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğrudan yöntemler arasında radyosonda, su buharı radyometrisi (WVR) ve uzaktan algılama uyduları bulunmakta olup sahip olduğu zamansal ve mekânsal değişkenlik göstermesinden dolayı doğrudan modellerde istenilen doğruluk elde edilememektedir. İkincisi ise doğrudan modellere alternatif olarak türetilen matematiksel modeller ve izdüşüm fonksiyonlarıdır (Pang ve diğ., 2021). Islak gecikme ile PWV arasındaki ilişki, Denklem (1)'de gösterildiği gibi, toplam gecikmeden hidrostatik gecikme çıkarılarak elde edilmektedir (Pang ve diğ., 2021).

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (1)$$

Yoğuşabilir su buharı miktarı (mm), doğrusal olarak PWV değeri ile orantılı olan ıslak zenit gecikmesi değeri temel alınan GNSS verileri ile elde edilebilmektedir (Bevis ve diğ., 1994). Denklem (2)'de  $T_m$  değeri ortalama atmosferik sıcaklık değerini ifade etmektedir (Davis ve diğ., 1985)

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} d\delta}{\int \frac{e}{T^2} d\delta} \quad (2)$$

Çalışma kapsamında Mekik ve Deniz (2017)'de detayları verilen Türkiye için geliştirilmiş modeli ( $T_m = 48.55 + 0.80T_s$ ) ile değerlendirme işlemleri yapılmış olup, modele ilişkin parametreler dikkate alınmıştır. Bağlantıda kullanılan  $T_m$  ağırlıklı ortalama sıcaklığı ve  $T_s$  yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.  $T_s$  yüzey sıcaklık değerleri İstanbul, İzmir, Samsun ve Erzurum istasyonları için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Değerler her istasyon için günde iki kez olmak üzere hesaplanmıştır.

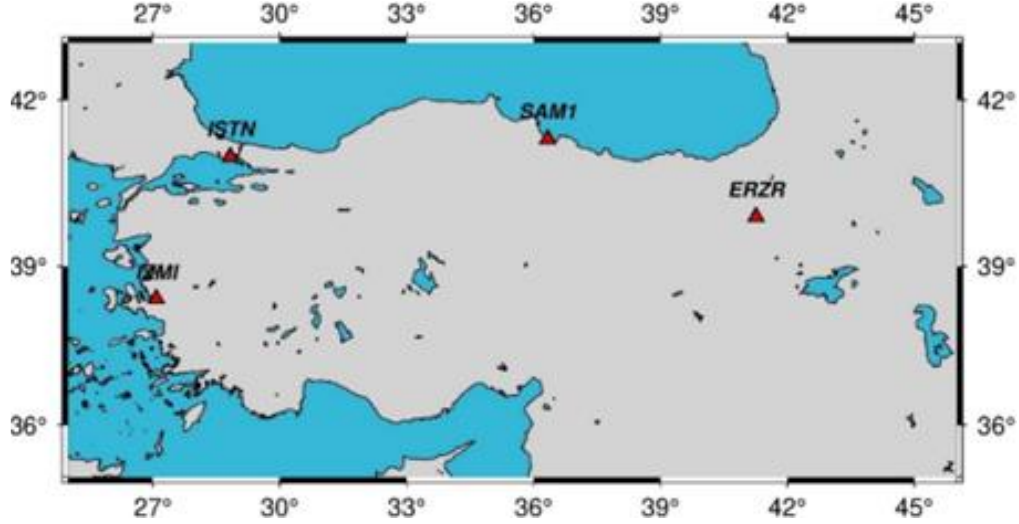
$$\pi(T_m) = [10^{-6} \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2 \right) \rho_v R_v]^{-1} \quad (3)$$

$$PWV_{GNSS} = \pi(T_m) * ZWD_{GNSS} \quad (4)$$

Hesaplanan  $T_m$  değerleri Denklem (4)'te kullanılarak  $\pi(T_m)$  değerleri elde edilmiştir. Denklem (4)'te kullanılan  $\pi(T_m)$  ile PWV değerleri hesaplanmıştır. Denklem (3) ve (4)'te kullanılan  $\Pi$ , su buharı dönüşüm faktörünü ifade etmektedir. Denklem (3)'te kullanılan  $\rho_v$  sıvı suyun yoğunluğunu ( $1000 \text{ kgm}^{-3}$ ),  $R_v$  orijinal gaz sabitini ( $461.524 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ )  $k_3 = 377 \text{ 600 K}^2\text{hPa}$  ve  $k_2 = 22.1 \text{ KhPa}^{-1}$  ifade etmektedir (Mekik ve Deniz, 2017).

### Çalışma Alanı (Study Area)

Bu çalışmada, Türkiye'de bulunan Samsun, Erzurum, İstanbul ve İzmir radyosonda istasyonları ve bu istasyonların yakın konumlarında bulunan SAM1, ERZR, ISTN ve IZMI CORS-TR istasyonları kullanılmıştır (Şekil 1). Seçilen istasyonlara ait bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan istasyonlara ait 2016-2020 yıllarındaki 24 saatlik 30 saniye kayıt aralıklı RINEX verileri temin edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan istasyonlar ve konumları

Figure 1. The stations and their locations used in the study

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan istasyonların enlem ve boylam değerleri

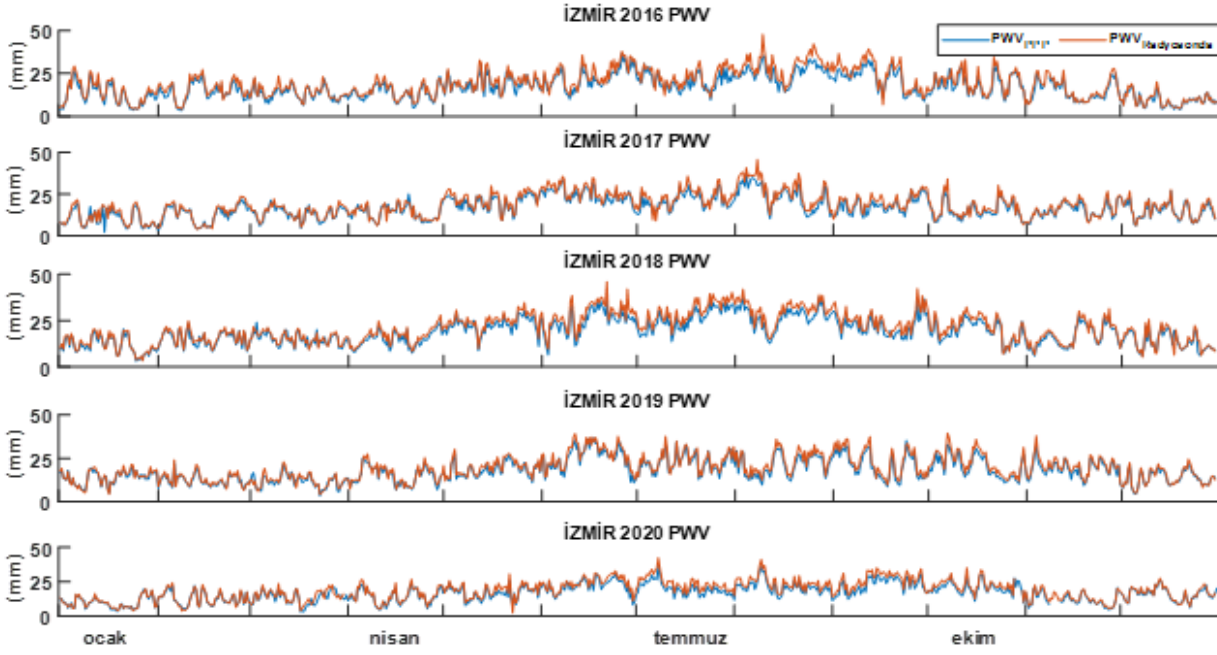
Table 1. Latitude and longitude values of the stations used in the study

|                         | İSTASYON         | ENLEM (°) | BOYLAM (°) |
|-------------------------|------------------|-----------|------------|
| Radyosonda İstasyonları | İzmir (17220)    | 38.39     | 27.08      |
|                         | Samsun (17030)   | 41.28     | 36.30      |
|                         | İstanbul (17064) | 40.91     | 29.16      |
|                         | Erzurum (17095)  | 39.91     | 41.25      |
| CORS-TR İstasyonları    | IZMI (İzmir)     | 38.39     | 27.08      |
|                         | SAM1 (Samsun)    | 41.31     | 36.33      |
|                         | ISTN (İstanbul)  | 40.99     | 28.83      |
|                         | ERZR (Erzurum)   | 39.91     | 41.26      |

### BULGULAR (RESULTS)

Çalışmada, Türkiye'de bulunan 4 radyosonda istasyonunun PWV verileri ile bu istasyonların yakın konumunda bulunan CORS-TR istasyonlarına ait gözlemler kullanılarak elde edilen PWV değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda CORS-TR istasyonlarına ait gözlem verileri CSRS-PPP yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen ZWD değerlerinden, yukarıda açıklandığı şekilde PWV değerleri kestirilmiştir. Radyosonda-PWV verileri Wyoming Üniversitesi Atmosfer Bilimleri Bölümü'ne ait web sitesinden elde edilmiştir. Böylece PPP yöntemi ile elde edilen troposferik gecikme değerlerinden türetilen PWV değerlerinin doğruluğu Radyosonda-PWV değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalı bir yaklaşımla incelenmiştir. Seçilen istasyonların 2016-2020 yılları için 00.00 UTC ve 12.00 UTC'de elde edilen PPP-PWV değerleri ve Radyosonda-PWV değerlerine ilişkin detaylar Şekil 2-5'te verilmiştir. Ayrıca farklara ilişkin mutlak minimum, mutlak maksimum, ortalama ve KOH gibi temel istatistiksel değerler

hesaplanmış olup, Çizelge 2-5'te verilmiştir.



Şekil 2. İzmir İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

Figure 2. PPP-PWV and Radiosonda-PWV values for 00.00 UTC and 12.00 UTC at for Izmir Station between 2016-2020

Şekil 2'de İzmir istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. İzmir istasyonuna ait tüm grafikler de görüldüğü gibi PWV'nin en yüksek değerlerine Haziran-Eylül döneminde ulaşılmış olup, en düşük değerlerine ise kış mevsimlerinde (Aralık-Ocak-Şubat) ulaşılmıştır. Tüm yıllardaki PPP ve Radyosondadan elde edilen PWV değerleri incelendiğinde benzer trend gösterdikleri görülmektedir. PWV değerleri öğle ve gece saatlerinde 0-50 mm arasında değişmiş olup, en yüksek değer 2018 yılı Ağustos ayında (37.47 mm), en düşük değere ise 2017 yılı Ocak ayında (2.08 mm) gözlenmiştir.

Çizelge 2. İzmir istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistikî değerler (mm)

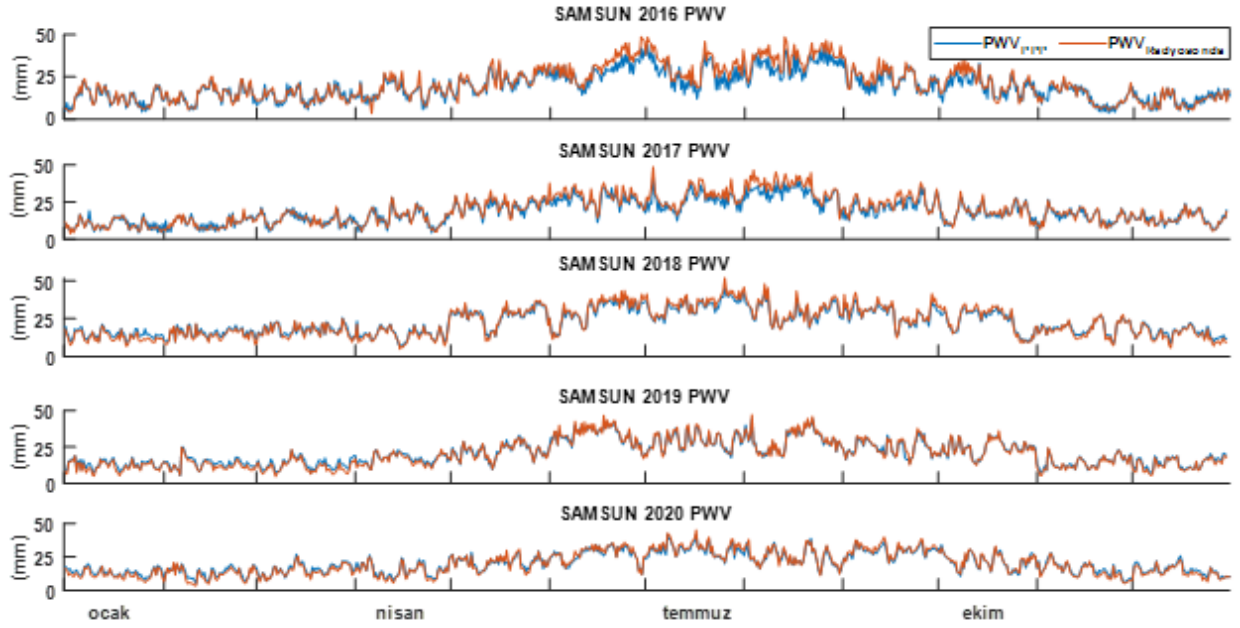
Table 2. Basic statistical values for 2016-2020 for Izmir station (mm)

| İZMİR | 2016   | 2017   | 2018   | 2019  | 2020  |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Min.  | 0.001  | 0.001  | 0.003  | 0.007 | 0.004 |
| Mak.  | 13.196 | 15.682 | 13.457 | 6.968 | 8.194 |
| Ort.  | 2.029  | 1.542  | 2.091  | 1.421 | 1.766 |
| KOH   | 3.112  | 2.589  | 2.817  | 2.226 | 2.522 |

İzmir istasyonuna ait Çizelge 2 incelendiğinde en düşük değer 2016 ve 2017 yıllarında (0.001 mm) görüldüğü, en yüksek değer ise 2017 yılında (15.682 mm) görülmüştür. En düşük KOH değerine 2017 yılında ( $\pm 2.226$  mm), en yüksek değere ise 2016 yılında ( $\pm 3.112$  mm) ulaşılmıştır. Farklara ilişkin ortalamalar incelendiğinde ise en düşük değer 2019 yılına (1.421 mm) ait olduğu, en yüksek değer ise 2016 yılına (2.029 mm) ait olduğu görülmüştür.

Şekil 3'te Samsun istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. Samsun istasyonuna ait tüm grafiklerde PWV'nin en yüksek değerlerinin yaz mevsimlerinde (Temmuz-Ağustos-Eylül) olduğu en düşük değerlerinin ise kış mevsimlerinde (Aralık-Ocak-Şubat) olduğu görülmüştür. En yüksek PWV değerine 2018 yılı Temmuz ayında (45.81 mm) ulaşılmış olup, en düşük değerine ise 2017 yılı Ocak ayında (4.01 mm) ulaşılmıştır. Grafikler incelendiğinde PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerlerinin 2016 yılı hariç çoğunlukla uyumlu

olduğu 2016 yılında ise yaz aylarında farkların diğer yıllara göre bir miktar fazla olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.** Samsun İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

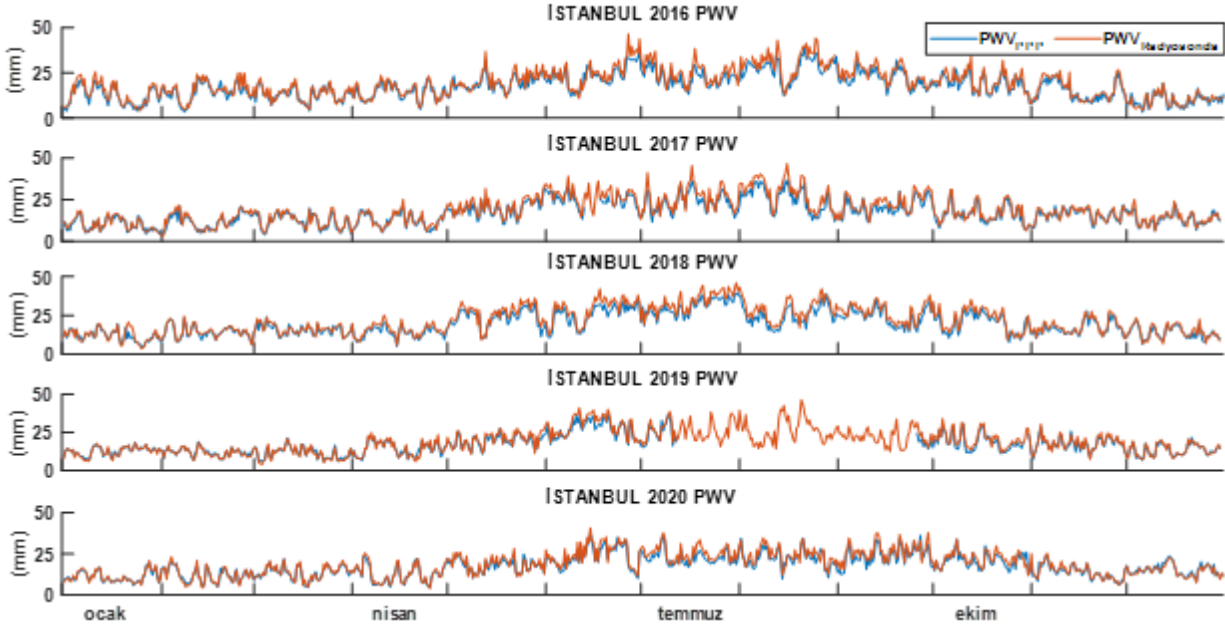
*Figure 3.* PPP-PWV and Radiosonda-PWV values for 00.00 UTC and 12.00 UTC at for Samsun Station between 2016-2020

**Çizelge 3.** Samsun istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler (mm)

*Table 3.* Basic statistical values for 2016-2020 for Samsun station (mm)

| Samsun | 2016   | 2017   | 2018  | 2019   | 2020   |
|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Min.   | 0.001  | 0.002  | 0.001 | 0.009  | 0.001  |
| Mak.   | 15.502 | 13.980 | 7.605 | 8.255  | 11.365 |
| Ort.   | 1.632  | 1.137  | 0.092 | -0.544 | -0.294 |
| KOH    | 3.827  | 3.206  | 1.986 | 1.765  | 1.886  |

Çizelge 3'te Samsun istasyonunun 2016-2017 yılları arasındaki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklara ilişkin minimum, maksimum, ortalama ve KOH değerleri verilmiştir. En düşük fark 0.001 mm ile 2016, 2018 ve 2020 yıllarında elde edilmiştir. En yüksek değer ise 15.502 mm ile 2016 yılına aittir. Farklara ilişkin ortalama değerler incelendiğinde (-0.294 ile 1.632 mm) aralığında değiştiği görülmektedir. En düşük KOH değerine 2019 yılında ( $\pm 1.765$  mm) ulaşılmış olup, en yüksek KOH değerine ise 2016 yılında ( $\pm 3.827$  mm) ulaşılmıştır.



**Şekil 4.** İstanbul İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

*Figure 4.* PPP-PWV and Radiosonda-PWV values for 00.00 UTC and 12.00 UTC at for İstanbul Station between 2016-2020

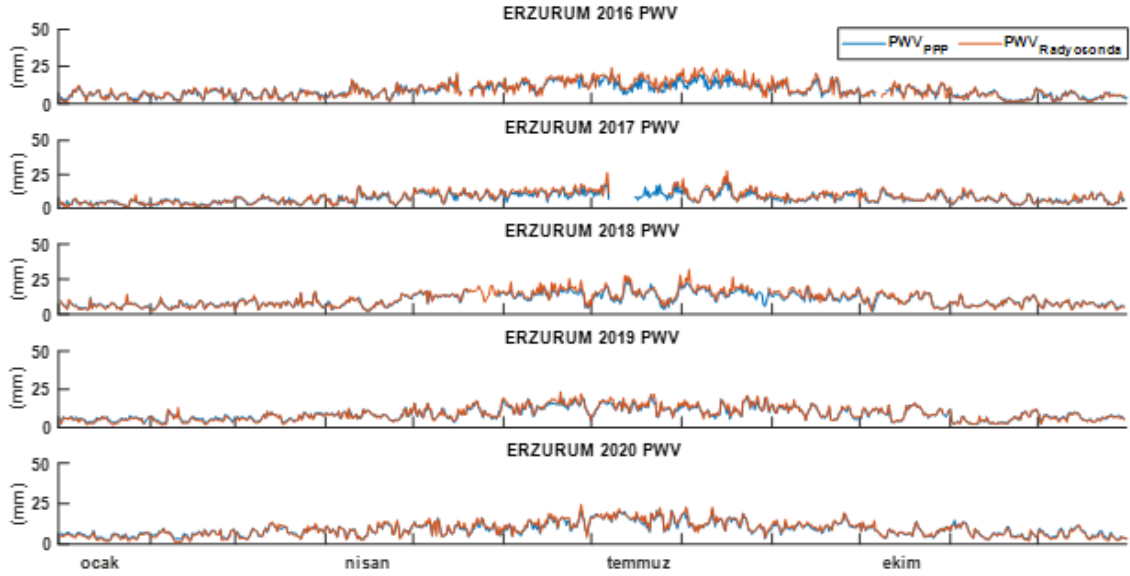
Şekil 4'te İstanbul istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. 14 Temmuz 2019 ile ve 26 Eylül 2019 tarihleri arasında RINEX verisi olmadığından PPP-PWV değerleri hesaplanamamıştır. İstanbul istasyonuna ait tüm grafiklerde görüldüğü gibi yaz mevsimlerinde (Temmuz-Ağustos-Eylül) PWV değerlerinin kış mevsimlerine (Aralık-Ocak-Şubat) göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İki yöntemle elde edilen PWV değerlerinin benzer trend gösterdiği söylenebilir. PWV değerleri öğle ve gece saatlerinde 0-50 mm arasında değişmiş olup, en yüksek değeri 2018 yılı Ağustos ayına (39.85 mm) en düşük değeri ise 2016 yılı Şubat ayına (3.37 mm) ait olduğu görülmüştür.

**Çizelge 4.** İstanbul istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler (mm)

*Table 4.* Basic statistical values for 2016-2020 for İstanbul station (mm)

| İSTANBUL | 2016   | 2017   | 2018   | 2019  | 2020  |
|----------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Min.     | 0.002  | 0.009  | 0.007  | 0.006 | 0.001 |
| Mak.     | 13.446 | 12.825 | 10.037 | 7.716 | 7.998 |
| Ort.     | 1.607  | 1.376  | 1.936  | 0.686 | 0.957 |
| KOH      | 2.936  | 2.653  | 2.954  | 2.008 | 2.191 |

İstanbul istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklara ilişkin temel istatistiki değerler hesaplanıp Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde en düşük farkın 0.001 mm ile 2020 yılına ait olduğu, en yüksek farkın ise 13.446 mm ile 2016 yılına ait olduğu görülmüştür. Farklara ilişkin ortalama değerler incelendiğinde 0.686 ile 1.936 mm aralığında değiştiği görülmektedir. KOH'lar incelendiğinde ise  $\pm 2.008$  mm ile  $\pm 2.954$  mm arasında değiştiği görülmüştür.



**Şekil 5.** Erzurum İstasyonu 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC için PPP-PWV ve Radyosonda-PWV Değerleri

*Figure 5.* PPP-PWV and Radiosonda-PWV values for 00.00 UTC and 12.00 UTC at for Erzurum Station between 2016-2020

Şekil 5'te Erzurum istasyonunun 2016-2020 yıllarına ait 00.00 UTC ve 12.00 UTC'deki PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri verilmiştir. Erzurum istasyonuna ait tüm grafikler de görüldüğü gibi tüm yıllarda PWV'nin en yüksek değerlerine Temmuz ve Ağustos aylarında ulaşılmış olup, en düşük değerlerine ise Aralık ve Ocak aylarında ulaşılmıştır. Erzurum istasyonu konumu itibariyle karasal bir iklim yapısına sahip olduğundan su buharını etkileyen nem değerlerine denize kıyısı olan istasyonlar (İstanbul, İzmir, Samsun) kadar maruz kalmamaktadır. Bu durum PWV değerlerine etki etmekte olup öğle ve gece saatlerindeki PWV değerleri 0-30 mm arasında değişim göstermiştir. Ayrıca mevsimler arası geçişlerde (Ör: Ocak ayından Temmuz ayına) PWV değerlerinin arasındaki farkların İzmir, İstanbul ve Samsun istasyonları arasındaki farklar kadar büyük olmadığı görülmüştür. En yüksek PWV değerinin 2018 yılı Temmuz ayına (26.35 mm) en düşük değeri ise 2017 yılı Ocak ayına (0.98 mm) ait olduğu görülmüştür.

**Çizelge 5.** Erzurum istasyonu için 2016-2020 yıllarına ait temel istatistiki değerler (mm)

*Table 5.* Basic statistical values for 2016-2020 for Erzurum station (mm)

| ERZURUM | 2016  | 2017  | 2018   | 2019  | 2020  |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Min.    | 0.002 | 0.001 | 0.001  | 0.000 | 0.005 |
| Mak.    | 9.669 | 9.905 | 11.480 | 6.211 | 8.808 |
| Ort.    | 0.596 | 0.611 | 0.499  | 0.123 | 0.119 |
| KOH     | 2.224 | 1.710 | 1.567  | 1.115 | 1.137 |

Erzurum istasyonu 2016-2020 yıllarına ait PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki farklara ilişkin temel istatistiki değerler Çizelge 5'te verilmiştir. Çizelge 5 incelendiğinde en düşük farkın 0.000 mm ile 2019 yılı Aralık ayına (Bu aydaki PPP-PWV değeri 12.059 olup, aynı güne ait Radyosonda-PWV değeri 12.06'dır) ait olduğu, en yüksek fark ise 9.669 mm ile 2016 yılında görülmüştür. Ortalama farklar incelendiğinde 0.119 mm ile 0.611 mm arasında değiştiği görülmektedir. KOH değerleri incelendiğinde en düşük değer 2019 yılında ( $\pm 1.115$  mm) olup, en yüksek değere ise 2016 yılında ( $\pm 2.224$  mm) ulaşılmıştır.

Tüm istasyonlara ait PPP-PWV ve Radyosonda-PWV arasındaki farklara ilişkin temel istatistik değerlerin (Maksimum, Minimum, Ortalama ve KOH) yanı sıra iki değer arasındaki farklı yıllara ait

korelasyon katsayıları da hesaplanarak Çizelge 6'da verilmiştir. Korelasyon katsayıları 0.921-0.989 arasında değişmektedir. Her bir istasyon için korelasyon katsayıları incelendiğinde iki yöntem arasında yüksek bir uyum olduğu görülmüştür.

**Çizelge 6.** İstasyonların 2016-2020 yıllarına ait korelasyon değerleri

*Table 6. Correlation values of stations for the years 2016-2020*

|          | Korelasyon |       |       |       |       |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|
|          | 2016       | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
| İzmir    | 0.962      | 0.962 | 0.978 | 0.974 | 0.973 |
| Samsun   | 0.947      | 0.954 | 0.989 | 0.986 | 0.983 |
| İstanbul | 0.957      | 0.965 | 0.973 | 0.972 | 0.967 |
| Erzurum  | 0.921      | 0.928 | 0.968 | 0.976 | 0.974 |

## SONUÇ VE TARTIŞMALAR (CONCLUSION and DISCUSSIONS)

Son yıllarda yaygın olarak kullanılan PPP tekniği ile yüksek doğrulukla konum bilgisi elde edilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen troposferik bilginin de doğruluğu önem arz etmektedir. Özellikle uydu bazlı tekniklerle yapılan çalışmalarda troposfer yapısının iyi bir şekilde analiz edilmesi ve modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla son yıllarda yaygın olarak kullanılan yüksek doğrulukta konum bilgisi veren PPP tekniği ile troposferik gecikme değerleri türetilmiştir. Bu çalışmada GNSS gözlem verileri kullanılarak, 30 saniye epok aralıklı CORS-TR verileri CSRS-PPP yazılımına gönderilerek ZWD değerleri elde edilmiştir. Hesaplama Mekik ve Deniz (2017)'de detayları verilen Türkiye için geliştirilmiş modeli ( $T_m=48.55+0.80T_s$ ) kullanılmış olup, PWV değerleri elde edilmiştir. Radyosonda-PWV değerleri Wyoming Üniversitesi web sitesinden alınarak PPP-PWV değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde iki yöntemle elde edilen PWV değerlerinin uyum içerisinde olduğu, çoğunlukla benzer trend gösterdiği görülmüştür. PPP-PWV ve Radyosonda-PWV farklarına ilişkin mutlak maksimum, mutlak minimum, ortalama ve KOH gibi temel istatistiksel değerleri hesaplanmıştır. Su buharını etkileyen nem değerlerinin denize kıyısı olan istasyonlarda (İstanbul, İzmir, Samsun) daha yüksek olduğu görülmüştür. Erzurum istasyonunun PWV değerlerinin 30 mm'ye kadar İstanbul, İzmir ve Samsun istasyonlarının PWV değerlerinin ise 50 mm'ye kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nemli ve denize kıyısı olan İstanbul, İzmir ve Samsun illerinin yaz ve kış mevsimlerinde hesaplanan PWV değerlerinin arasındaki farkların karasal bir iklim yapısına sahip Erzurum istasyonundaki yaz ve kış mevsimi arasındaki farklardan daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde PWV değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. KOH değerlerinin İzmir istasyonu için  $\pm 2.226 - \pm 3.112$  mm aralığında değiştiği, Samsun istasyonunda ise  $\pm 1.765 - \pm 3.827$  mm arasında değiştiği görülmüştür. İstanbul ve Erzurum istasyonları için ise sırasıyla  $\pm 2.008 - \pm 2.954$  mm ve  $\pm 1.115 - \pm 2.224$  mm arasında değişmiştir. PPP-PWV ve Radyosonda-PWV değerleri arasındaki korelasyon değerleri incelendiğinde tüm istasyonlara ait korelasyon değerlerinin 0.921-0.989 arasında değiştiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Gerçekleştirdiğimiz çalışmada sıcaklık verilerini sağladığı için Meteoroloji Genel Müdürlüğüne, CORS-TR RINEX verileri için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğüne, veri değerlendirmede kullanılan web tabanlı online CSRS-PPP için Natural Resources Canada (NRCAN)'a, çalışmada kullanılan  $T_m$  modeli için Prof. Dr. Çetin Mekik ve Dr. Öğr. Üyesi İlke Deniz'e ve radyosonda istasyonlarına ait verilere erişme imkânı sunan Wyoming Üniversitesi Atmosfer Bilimi Bölümüne teşekkür ederiz. Bu çalışma Sema Nur Ağa'ın "Türkiye için PPP ve Radyosonda'dan elde edilen yoğunlaşabilir su buharı değerlerinin karşılaştırılması" isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.



**ÇIKAR ÇATIŞMASI (DECLARATION OF CONFLICT INTEREST)**

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, A., Anthes, R., Rocken, C., Ware, R., 1994, "GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Cilt 33 , Sayı 3, ss. 379-386, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.CO;2)
- Bezicioğlu, M., Yiğit, C., & Bodur, M., 2019, "Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antartika Yarımadası Örneği", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 19, Sayı 1, ss. 162-169, <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers A., Elgered G., 1985, "Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length", *Radio Science*, <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>
- Gürbüz G. Akgül V. Görmüş K. S. Kutoğlu Ş. H., 2021, "Assessment of precipitable water vapor over Turkey using GLONASS and GPS", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Cilt 222 (105712), <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105712>
- Gürbüz G., Jin S., 2017, "Long-time variations of precipitable water vapour estimated from GPS, MODIS and radiosonde observations in Turkey", *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.5153>
- Gratton P., Banville S., Lachapelle G., O'Keefe K., 2021, "Kinematic Zenith Tropospheric Delay Estimation with GNSS PPP in Mountainous Areas", *Sensors*, Cilt 21, Sayı 17, <https://doi.org/10.3390/s21175709>
- Li, Z., Muller, J. P., Cross, P., 2003, "Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements", *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Cilt 108, 4651, <https://doi.org/10.1029/2003JD003372>
- Mekik, Ç., Deniz, İ., 2017, "Modelling and validation of the weighted mean temperature for Turkey", *Meteorological Applications*, Cilt 24, ss. 92-100, <https://doi.org/10.1002/met.1608>
- Pang, S., Yeh, T., Honh, J., Chen, C., 2021, "Variability and climatology of precipitable water vapor from 12-year GPS observations in Taiwan", *Advances in Space Research*, Cilt 67, Sayı 8, 2333-2346, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.021>
- Tunalı, E., 2018, "PPP ve IGS Gerçek Zaman Servisi ile Su Buharı Hareketlerinin İzlenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 18, 017101(343-356), <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/43824/538634>.
- Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W. Li, Z., 2018, "Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting", *Scientific Reports*, Cilt 8, 7939, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26299-3>



## JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN (JES) PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN ANALİZ EDİLMESİ

<sup>1</sup>Eray CAN , <sup>2</sup>Hülya KESKİN ÇİTİROĞLU , <sup>3</sup>Deniz ARCA 

<sup>1</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı, YİKOB, Aydın, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>1</sup>can.eray@hotmail.com, <sup>2</sup>keskinhc@yahoo.com, <sup>3</sup>deniz.arca@deu.edu.tr

**Geliş/Received: 29.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.08.2022**

**ÖZ:** Günümüz koşullarında fosil yakıtların hem hızla tükenmeye başlaması hem de maliyetlerinin yüksek olması ve çevresel kaygılar nedenleriyle, enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarına daha hızlı bir yönelim olmaktadır. İnsanoğlu, yirminci yüzyılın başlarından itibaren yenilenebilir enerji kaynaklarından güç üretme yeteneği kazanmış olup, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji günümüzde üzerine çaba harcanan enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olan jeotermal enerji santrallerinin (JES) projelendirilmesi yapılırken, karşılaşılabilecek olası risklerin belirlenmesi ve bu risklere karşı önlem alınması; planlanan santralin güvenliği, verimi, kullanım ömrü, proje maliyetinin belirlendiği düzeyde kalması ve elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması açılarından olumlu etkilere sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada JES kurulumunda veya projelendirilmesinde karşılaşılabilecek hata ve riskler, sırasıyla Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto ve Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) sistematğinde araştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Jeotermal enerjisi santrali (JES), Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto Analizi, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

### **Analysis of Possible Risks in the Project of Geothermal Power Plants (GPP)**

**ABSTRACT:** In today's conditions, there is a faster trend towards renewable energy sources in energy production owing to the quickly consuming of fossil combustibles, their high costs and environmental concerns. Mankind has gained the ability to generate power from sources of renewable energy until now the early of the twentieth century, and geothermal energy has become one of the energy sources on which efforts are made today. During the design of geothermal power plants (GPP), that is one of the sources of sustainable and renewable energy, determining the possible risks that may be encountered and taking precautions against these risks; It has positive effects in terms of safety, efficiency, useful life of the planned power plant, keeping the project cost at the determined level and ensuring sustainability in electrical energy production. Therefore, the failures that may be met in the installation or design of GPP; Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto and Analytical Hierarchy Process (AHP) systematics were searched and their outcomes were matched in this study.

**Keywords:** Geothermal Power Plant (GPP), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto Analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP)

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Jeotermal enerji hem doğrudan termal kullanım hem de elektrik enerjisi üretme olasılığı olduğundan stratejik bir kaynak olarak kabul edilir (Franco ve Donatini, 2017). Yenilenebilir enerji, düşük karbon ekonomisine geçişte ve güvenli bir enerji arzının sağlanmasında kilit rol oynamaktadır. Bu nedenle, jeotermal enerji, popüler talebi karşılayan bir yenilenebilir enerji biçimi olarak çok yönlü bir kaynaktır (Feili ve diğ., 2013). Jeotermal kullanım genel olarak elektrik enerjisi üretimi ve doğrudan kullanım olmak üzere iki kategoriye ayrılır (Gökçen ve diğ., 2004). Doğrudan kullanım uygulama alanları yüzme, banyo ve balneoloji, ısıtma ve soğutma, tarım uygulamaları, su ürünleri uygulamaları, endüstriyel işlemler ve ısı pompaları olarak sıralanabilir (Lund, 1997). Jeotermal enerji kullanılarak elektrik üreten jeotermal enerji santrallerinin (JES) tercih edilmesiyle ilgili olarak;

- Jeotermal yenilenebilir, sürdürülebilir ve tükenmeyen enerji olması,
- Jeotermal enerjinin temiz ve yanma teknolojisi kullanılmaması sebebiyle sığa yakın emisyon değeri sayesinde çevre dostu olması,
- Jeotermal enerjinin birden fazla amaçlı ve entegre uygulamalara (elektrik üretimi, endüstri, tarım, konut ve sera ısıtması vs) uygun olması,
- Meteorolojik şartlardan etkisinde olmaması,
- Diğer alternatif ve fosil enerji kaynaklarına kıyasla belirgin şekilde ucuz olması,
- Jeotermal arama kuyularının, hem üretim hem de reenjeksiyon amaçlı kullanıma yönelik dönüştürülebilir olması,
- JES ile elektrik üretiminde, üretim (yük) faktörünün %95'den fazla olması,
- JES'lerin alan ihtiyacının hidro, güneş gibi diğer alternatif enerji kaynaklarının aksine minimum olması,

JES tesislerinin çabuk ve kolay devreye alınması, uzun tesisat ömrüne sahip olmaları (TJD, 2021) başlıca sayılabilecek sebeplerin arasında gelmektedir. Dünya elektrik üretimi incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik üretiminin dünya toplam elektrik üretimi içinde %27,3 yer kapladığı görülürken, bu oranının sadece %0,4'ü JES'lerden sağlanmaktadır (REN21, 2020). Jeotermal enerjiden elektrik üreten santrallerin plan-proje, kurulum, devreye alma ve santralin işletilmesi aşamalarının tümünde, kurulum yapılacak sahanın santral projesi ile uyumu büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirlik de ayrıca önemli bir konudur. Yenilenebilir bir enerji kaynağı sürdürülebilirliği sağlanmadığı sürece tamamen faydalanılabilen bir enerji kaynağı olmayacağından dolayı elektrik enerjisi üretiminde de sürdürülebilirlik gerçekleştirilemeyecektir (Şimşek, 2014). Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının tümünde olduğu gibi jeotermal enerji kullanarak elektrik enerjisi üretiminde karşılaşılabilecek riskler, hatalar ve sorunlar net bir şekilde ortaya konulmalı, analiz edilmeli ve çözüm önerileri belirlenerek bu risk ve hataların oluşmadan önüne geçilmelidir. JES projelendirilmesi yapılırken, karşılaşılabilecek olası risklerin belirlenmesi ve bu risklere karşı önlem alınması; planlanan santralin güvenliği, verimi, kullanım ömrü, proje maliyetinin belirlendiği düzeyde kalması ve elektrik enerjisi üretiminde sürdürülebilirliğin sağlanması açılarından olumlu etkilere sahiptir. Ayrıca JES kurulumlarının artan karmaşıklığı ve daha yüksek güvenilirlik seviyeleri sağlanması için artan kamuoyu bilinci, güvenilirlik ve ekonomik olarak uygulanabilirlik sağlanması için yenilikçi çözümler bulmayı gerekli kılmaktadır (Nasruddin ve diğ., 2018). Bu nedenle bu çalışmada JES kurulumunda karşılaşılabilecek risk ve hataların araştırılması, Hata Türü ve Etkileri (HTEA) ile Pareto Analizleri ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) sistematüğünde yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Literatür çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üretimini amaçlayan projelerde oluşabilecek risklerin tespit edilmesi ve verimin arttırılmasına yönelik araştırmalar görülmektedir. Koeh ve arkadaşları risk öncelik sayısı (RÖS) ve HTEA tekniklerini kullanarak Kenya'da Olkaria 2 JES'de ekipman arıza durumlarının risk değerlendirmesini yaptıkları çalışmalarında sık arızalanan kritik alt sistemlerin neler olduğunu ve arıza maliyetlerini ortaya koymuşlardır (Koeh ve diğ., 2018). Feili ve arkadaşları JES'lerde potansiyel arızaları ortadan kaldırmak veya azaltmak için yaygın arızaları belirlemek, sınıflandırmak ve analiz etmek için uygun bir teknik olarak HTEA kullanılmasının uygun olduğunu vurgulamışlardır (Feili ve diğ., 2013). Zhang ve

arkadaşları risk faktörleri arasındaki etkileşimlerin dikkate alındığı risk önceliğini hesaplamak için HTEA yönteminin yanında, PROMETHEE-II methodunu, Bonferroni Ortalama Operatörü ve Dilsel Z Sayısı'na entegre ederek kullanmayı önermişlerdir (Zhang ve diğ., 2019). Karatop ve arkadaşları Türkiye'de yenilenebilir enerji sektöründe optimum yatırım kararlarının alınabilmesine yönelik çalışmalarında Bulanık AHP, Ortalama Çözümünden Uzaklığa Dayalı Değerlendirme (EDAS) ve Bulanık HTEA yöntemlerini kullanarak yenilenebilir enerji alternatiflerinin risklerini tespit etmişlerdir (Karatop ve diğ., 2021). Nasruddin ve arkadaşları ise HTEA ve RÖS'ü jeotermal buhar türbin sistemlerinin analizinde kullanmışlardır (Nasruddin ve diğ., 2018). Gökçen ve arkadaşları Türkiye, Denizli, Kızıldere jeotermal alanında enerji santralının kurulduğu alanı araştırdıkları çalışmalarında bu alanda karşılaşılan sorunlar ve geliştirilen araştırma projelerini sunmuşlardır (Gökçen ve diğ., 2004). Gürcün ve Petek Aydın şehri özelinde jeotermal enerji ile ilgili olarak yaptıkları çalışmada, SWOT Analizini kullanmışlar ve çalışma sonucunda jeotermal enerjiden, elektrik üretimi amacının yanında eş zamanlı şekilde konut ve sera ısıtmasında da yararlanılması gerektiğini vurgulamışlardır (Gürcün ve Petek, 2021). Bu çalışmada ise JES projelendirme aşamasında oluşması muhtemel risklerle birlikte bu muhtemel risklerin oluşmaması için alınabilecek önlemlerin neler olduğu bu konudaki uzman kişilerin ve akademisyenlerin görüşleri ile literatür araştırmaları dikkate alınarak HTEA sistematiğinde incelenmiştir. Ayrıca araştırılan bu risklerin Pareto analizi kapsamında önem sıralaması yapılarak grafik incelemeleri de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca AHP yöntemi ile bu riskler tekrar incelenmiş ve kullanılan yöntemlerden çıkan sonuçların karşılaştırılmaları yapılmıştır. Böylelikle bu konularla ilgili literatüre yeni bir katkı verilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bu çalışmayla, bu tür projelerin tasarımı sırasında oluşması muhtemel risklerin ortaya konulması ve bu risklerin meydana gelmeden önce önlemlerinin alınmasıyla birlikte yine bu tür projelerin tasarım aşamasında ekonomik kayıpların önüne geçilmesi hedeflenmiştir.

## GEREÇ ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

### Analizde Kullanılan Risk Parametreleri (Risk Parameters Used in Analysis)

Jeotermal santrallerin tasarlanmasında karşılaşılan hata ve risklerin belirlenmesinde Aksoy ve Şişman tarafından jeotermal santrallerin tasarlanabilmesi için tamamlanması gereken çalışma verileri (Aksoy ve Şişman, 2011) ve ayrıca konuyla alakalı uzman kişilerin de (Harita, Geomatik, Jeoloji, İnşaat, Jeofizik, Makine, Sondaj, Kimya, Hidrojeoloji, Saha ve Kontrol Mühendisleri vb.) görüşleri gözetilerek 10 adet risk tespit edilmiştir. Bu riskler;

- Proses No: J1-Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergâhın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J2-Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.),
- Proses No: J3-Kurulum yapılacak yöreye ait uzun yıllar meteorolojik verilerin (maksimum rüzgâr hızı, hâkim rüzgâr yönü, nem, sıcaklık gibi) belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J4-Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J5-Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata,
- Proses No: J6-Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J7-Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergâhın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma haritalarında yapılması muhtemel hata ve riskler,
- Proses No: J8-Çevresel etki parametrelerin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler,
- Proses No: J9-Projelendirme aşamasında santralin araziye aplikasyonu için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler,

- Proses No: J10-İzinlerin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler olarak tespit edilmiştir.

**Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Pareto Sistemi ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) (Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Pareto System and Analytical Hierarchy Process (AHP))**

JES kurulum projelerinde tespit edilen risklerin analizi için sağlıklı verilerin oluşturulması, standart karşılaştırma kriterlerinin belirlenmesi ve literatürde kabul görmüş ve uygulama sonucunda başarılı olmuş risk analizi yöntemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. JES kurulumunda beklenmeyen birçok etkenle karşılaşılabilceğinden dolayı risk analizi; JES kurulumunun zamanında bitirilebilmesi, projenin maliyetinin belirlenmiş düzeyde tutulması, çalışanların sağlıklı ortamda çalışması ve üretimin sürekliliğinin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

HTEA, risklerin projeye zararı olmadan tespit edilerek alınması gereken önlemlerin bir an önce hayata geçirilmesi için kullanılan sistematik bir yöntem (Li ve Chen, 2019; Liu ve diğ., 2013; Liu ve diğ., 2021; Akın, 1998) olup literatürde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Can, 2019; Liu ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2009; Chin ve diğ., 2009). HTEA, faktör sorunlarına odaklanmakta olup, sorunları faktörün önemine göre çözme prensibine sahiptir (Tsai ve diğ., 2018). HTEA yöntemi uygulandığı projelerde iş kalemlerinin öncelik sıralamasını, risklerin ve etkilerinin belirlemesini ve hataların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Yapılan bu çalışmada belirlenen risklerin değerlendirilmesinin yapılabilmesi için HTEA sistematığı içinde yine her bir risk için RÖS hesaplanmıştır. RÖS sayısı belirlenirken her bir riskin olasılığı, ağırlığı (şiddeti) ve tespit edilebilirliği hakkında sayısal değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde yine konunun uzmanlarından, akademisyenlerden ve literatür araştırmalarından faydalanılmıştır. Buna göre RÖS hesaplanırken her bir risk için olasılık parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin olasılığı için değerlendirme;

(Çok Yüksek): Kaçınılmaz Hata, 10-9; (Yüksek): Tekrar Eden Hata, 8-7; (Orta): Ara Sıra Olan Hata, 6-5; (Düşük): Nispeten Olan Hata, 4-3; (Pek az): Olası Olmayan Hata, 2-1 şeklinde olmaktadır (Akın, 1998; Su ve diğ., 2012; Xiao ve diğ., 2011).

Yine RÖS değeri hesaplanırken her bir risk için ağırlık (şiddet) parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin ağırlığı (şiddeti) için değerlendirme;

(Uyarısız Gelen Yüksek tehlike): Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata-10; (Uyarısız Gelen Tehlike): Yüksek hasara yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata-9; (Çok Yüksek): Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara sebep olabilecek hata türü-8; (Yüksek): Ekipmanın tamamen hasar görmesine neden olan ve ölüme, zehirlenme, 3. derece yanık, akut ölüm vb. etkiye sahip hata türü-7; (Orta): Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata-6; (Düşük): Kırık, kalıcı küçük iş göremezlik, 2. derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata-5; (Çok Düşük): İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata-4; (Küçük): Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata-3; (Çok Küçük): Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata-2; (Yok): Etki yok-1 şeklinde olmaktadır (Akın, 1998).

Ayrıca RÖS değeri hesaplanırken her bir risk için saptanabilirlik (tespit edilebilirlik) parametresi için 1 ile 10 arasında bir değer bulunmuştur. Riskin Saptanabilirliği için değerlendirme;

(Fark Edilemez): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği mümkün değil-10; (Çok Az): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok uzak-9; (Az): Potansiyel hatanın nedeni uzak-8; (Çok Düşük): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok düşük-7; (Düşük): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği düşük-6; (Orta): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği orta-5; (Yüksek Ortalama): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek ortalama-4; (Yüksek): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek-3; (Çok Yüksek): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok yüksek-2; (Hemen hemen kesin): Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği hemen hemen kesin-1; şeklinde yapılmıştır (Akın, 1998).

Bu parametrelere (Olasılık, Ağırlık (Şiddet), Saptanabilirlik) bağlı olarak Risk Öncelik sayısı (RÖS) hesaplanmıştır. RÖS değerleri için ise Denklem (1)'de görüldüğü şekilde yapılmıştır (Nasruddin ve diğ., 2018, Su ve diğ. 2012; Xiao ve diğ. 2011; Wang ve diğ. 2009; Akın, 1998).

$$RÖS = O(\text{olasılık}) * A(\text{ağırlık}) * S(\text{saptanabilirlik}) \quad (1)$$

RÖS sınıflandırması ise;

RÖS değeri <40 ise önlem almaya gerek yok; RÖS değeri  $40 \leq RÖS \leq 100$  ise Orta risk önlem alınabilir; RÖS değeri  $RÖS > 100$  ise Önlem alınması gereken yüksek risk şeklinde yapılmaktadır (Akın, 1998).

RÖS, karşılaşılabilecek hata ve risklerden hangisinin öncelikli olarak üzerinde durulması gerektiğini belirlemede yardımcı olmasının yanında projenin hata ve risklerden arındırılmasına da yol göstermektedir. Çalışmada İkinci analiz türü olarak Pareto analizi yöntemi kullanılmıştır. Pareto analizi oranlara bağlı olarak hata ve risklerin öncelik durumlarını ve önem derecelerini gösteren bir analiz türü olarak karşımıza çıkmaktadır. (Özcan, 2001). Bu analizde genel oran: %20 risk sayısı ile %80 sınır değeri =%100 oranı olmakla birlikte bu değerler, projedeki risklerin özelliğine ve projenin türüne bağlı olarak %30 risk sayısı ile %70 sınır değeri =%100 oranı, %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri =%100 oranları da olabilmektedir. Bu değerlerin anlamı risk sayısının %20'sinin, projedeki toplam risklerin %80'nini meydana getirdiğini ya da risk sayısının %40'ının, projedeki toplam risklerin %60'ını meydana getirdiğini belirtmektedir. Buradaki düşüncede önemli olan bu iki oran toplamının 100 sayısını vermesi olmaktadır. Örneğin bir projede oluşması muhtemel 10 tane riskten %80 değeri ilk 2 riskte oluşmakta ise bu oran %20 risk sayısı ile %80 sınır değeri=%100 oran şeklinde ifade edilmektedir. Yapılan çalışmada ilk olarak bu oranların, projenin ve risklerin türüne bağlı olarak hangisinin uygun olacağına (%20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100) karar verilmiş ve sonrasında bu oranlarda yapılan analiz ilk alternatif olarak düşünülmüştür. Pareto analizinde temel amaç, az sayıdaki risk faktörüyle problemlerin büyük çoğunluğunun temsil edilmesidir. Bu yöntemle, projelerdeki en önemli olan ve ayrıca bütün projedeki problemlerin büyük bir yüzdesini oluşturan birkaç risk için, az bir maliyetle önlemlerin alınması ve projenin ilerlemesinin zarar görmemesi amaçlanmaktadır. AHP ise belirlenen kriterlerin birbirleriyle kıyaslanmaları sayesinde her bir kriter ağırlığının tespit edilerek önem sıralamasının ortaya konmasında kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden biri olup, karmaşık karar problemlerinin çözümünde oldukça etkilidir. ÇKKV yöntemi olan AHP'yi Thomas L. Saaty 1980 yılında geliştirmiş (Sarıçalı ve Kundakçı, 2016) olup bu yöntemin, karar süreçlerini öznel ve nesnel yaklaşımlarla değerlendirebilmesi uygulayıcılar tarafından ilgi görmesine neden olmuştur. AHP, problemi ayrıntılı olarak analiz ederek hiyerarşik yapıyı oluşturduğu için bu yöntem diğer ÇKKV yöntemleri içinde daha avantajlı olmaktadır (Min, 1994). AHP'nin pek çok çalışmada, çeşitli amaçlarla kullanıldığı sıklıkla görülmekte olup bu amaçlar uygun seçeneğin belirlenmesi, plan yapma ve geliştirme, kaynakların değerlendirilmesi, en uygun sıralamayı yapabilme, karar verme, kestirim yapma şeklinde sıralanabilir (Vaidya ve Kumar, 2006). AHP'de ana hedef, hiyerarşik bir düzen içinde kriterlerin ve bu kriterlerin alt kriterlerinin ve alternatiflerinin hazırlanması ile başlar. Bunun için, ilk olarak amaç tespit edilerek, seçim üzerinde etken olan elemanlar belirlenir. Seçime tesir eden faktörlerin tespitinde konuda uzman kişilerin görüşlerinden ve/veya anketlerden yararlanılabilir. Tespit edilen tüm faktörler göz önüne alındığında da olası alternatifler ortaya konulur (Saaty, 1980). Belirlenen kriterler arasında kurulan hiyerarşik yapıdan sonra ikili karşılaştırma matrisi oluşturulması aşaması gelmektedir. Belirlenen kriterlerin ikili karşılaştırmalarının gerçekleştirilmesinde, Saaty tarafından önerilen ve 1'den 9'a kadar önem derecesi ile bu önem derecelerine karşılık gelen eşit derece önemden aşırı yüksek öneme uzanan bir ölçekten yararlanılmaktadır (Saaty, 1980). Daha sonra kriter ağırlıklarının tespit edilmesi ve Tutarlılık Oranı (CR) hesaplamasının yapılması aşaması gelmektedir (Mutlu ve Sarı, 2017). CR'nin hesaplanabilmesi için öncelikle Denklem (2)'de görülen Tutarlılık İndeksi (CI) değerinin bulunması gereklidir.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

CR'nin tespitinde kullanılan bir diğer parametre olan Rastgele İndeks (RI) ise karar alternatiflerinin sayısına karşılık gelen bir değer olup Çizelge 1'de görülmektedir (Saaty, 2013). CI'nin RI'ne bölünmesi ile de CR hesaplanmaktadır. Hesaplanan CR, 0,10 değerinden fazla olduğunda karşılaştırma matrisinin

tekrar ele alınması gereklidir. Hesaplanan CR, 0,10 değerinden düşük ise bu durum karar matrisinin doğruluğunu ispatlamaktadır (Saaty, 2000).

**Çizelge 1.** 15 eleman için RI sayıları (Saaty, 2013)

*Table 1. RI numbers for 15 elements (Saaty, 2013)*

| n  | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
|----|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,53 | 1,56 | 1,57 | 1,59 |

### 3. BULGULAR (RESULTS)

JES kurulumunun planlandığı alanın konumuna göre hava koşulları, hâkim rüzgâr yönü, reenjesiyon kuyuları ile üretim kuyularının lokasyonları, akış ve performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özellikleri gibi parametreler, kurulacak santralden elde edilecek enerjinin miktarını ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilediğinden dolayı en önemli kriterler arasında olmaktadır. Bununla birlikte, JES kurulumunda, projenin yerleşeceği arazinin güncel, detaylı ve hassas harita, plan ve kesitlerin bulunması, 3 boyutlu sayısal yükseklik modellerinin hazırlanması gereklidir. Bu nedenlerle de JES kurulumunun planlandığı arazinin eğim ve bakı yönüne göre simülasyonlarının yapılması da ayrıca önem arz etmektedir. Bu çalışmanın ilk aşamasında, JES tasarımı yürütülürken oluşabilecek risklerden doğacak olumsuzlukların önceden tanımlanması amacıyla jeotermal santraller konusunda bilgi sahiplerinin de (harita, geomatik, jeoloji, inşaat, jeofizik, makine, sondaj, kimya, hidrojeoloji, saha ve kontrol mühendisleri vb.) görüşleri gözetilerek, bu aşamada hangi hata ve risklerle karşılaşıldığı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda tespit edilen 10 adet risk (Proses No: J1-J10), HTEA sistematğinde incelenmiştir. Çalışmanın İkinci aşamasında ise hata ve risklerin belirlenmesinde olduğu gibi aynı şekilde JES kurulumu konusunda uzmanların önerileri ve fikirleri dikkate alınarak belirlenen bu hata ve risklerin oluşma olasılığı (O), şiddeti (ağırlığı) (A) ve saptanabilirliği (S) birlikte ele alınarak RÖS puanı belirlenmiştir. Daha sonra ise riskin hangi risk grubuna ait olduğu tespit edilmiştir. Oluşma olasılığı belirlenen hata ve risklerin meydana gelmemesi amacıyla da uygulanması gereken önlemler gözetilerek RÖS sayıları tekrar değerlendirilmiştir. Önlemlerin uygulanması ile bu hata ve risklerin, düşük risk grubuna dâhil olduğu görülmüştür (Çizelge 2).

Çalışmanın üçüncü aşamasında, belirlenmiş olan hata ve risklerin önem ve öncelik sıralarını belirleyebilmek için Pareto Analiz sistematığı uygulanmıştır. Çalışmada iki alternatif düşünülmüş olup ilk alternatif %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 Oranı ve İkinci alternatif ise %80 Sınır Değeri Projeledeki hangi riskte elde edildiği şeklindedir (Çizelge 3, Şekil 1). İlk alternatif olarak, Uygulanan Pareto Analizine göre %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından, %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı, (toplamın %100 olması önemsenmektedir.) bu projeye ve bu projedeki oluşması muhtemel risklerin RÖS sayılarına göre uygun bir oran olarak düşünülmüştür. Buna göre J4,J9,J2,J1 risklerinin JES kurulum projelerinde ön plana çıktığı görülmüştür. Bu birinci alternatif ile JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %40'ının, projedeki tüm problemlerin %60'ını oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. Toplam 10 adet riskten ilk 4 tane risk bu projedeki risklerin %60'ını oluşturmaktadır olup genel toplam oranı burada %100 olmaktadır. (Çizelge 3, Şekil 1). J4,J9,J2,J1 riskleri kendi içinde yine %60 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 4, Şekil 2).

**Çizelge 2. Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin HTEA sistematğinde incelenmesi**

*Table 2. Investigation of possible risks in project design of geothermal power plants in FMEA systematic*

| JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN SİSTEMATİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ |   |  |                 |                   |  |       |               |   |        | HTEA FORMU  |       |            |            |   |  |  |  |
|--|---|--|-----------------|-------------------|--|-------|---------------|---|--------|---|-------|------------|------------|---|--|--|--|
| Proses Adımları  | OLASILIK  |  | ŞİDDET          |                   | TESPİT EDİLEBİLİRLİK   |       |               |   |        | ROS DEĞERİ (Risk Öncelik Sayısı)  |       |            |            |   |  |  |  |
|  | 1-2 Pek az  | 1-2 Çok hafif  | 1 Kesin         | 2 Çok yüksek      | 1. Kesin 2. Çok yüksek 3. Yüksek 4. Yüksek Ortalama 5. Orta 6. Düşük seviye 7. Çok Düşük 8. Az Seviye 9. Çok az seviye 10. Fark edilemez |       |               |   |        | ROS < 40 Önem almaya gerek yok. DÜŞÜK RISK<br>40 < ROS ≤ 100 Önem alınabilir ORTA RISK<br>ROS > 100 Önem alınması gerektirir. YÜKSEK RISK |       |            |            |   |  |  |  |
|  | 3-4 Düşük   | 3-4 Hafif  | 3 Yüksek        | 4 Yüksek Ortalama |  |       |               |   |        |   |       |            |            |   |  |  |  |
|  | 5-6 Orta  | 5-6 Orta   | 5 Orta          | 6 Düşük           |  |       |               |   |        |   |       |            |            |   |  |  |  |
|  | 7-8 Yüksek  | 7-8 Ciddi  | 7 Çok Düşük     | 8 Az Seviye       |  |       |               |   |        |   |       |            |            |   |  |  |  |
|  | 9-10 Çok yüksek   | 9-10 Çok ciddi   | 9 Çok az seviye | 10 Fark edilemez  |  |       |               |   |        |   |       |            |            |   |  |  |  |
| HATANIN POTANSİYEL NEDENLERİ   |   | RISK DEĞERLENDİRMESİ   |                 |                   |  |       | KONTROL ÖNEMİ |   |        |   |       | SORUMLULUK |            |   |  |  |  |
| Hata   |   | Referans   | Olasılık        | Şiddet            | Tespit Edilebilirlik   | R.O.S | Önem          |   |        |   |       |            |            |   |  |  |  |
|  |   |  |                 |                   |  |       |               | Olasılık  | Şiddet | Tespit Edilebilirlik  | R.O.S | Önem       |            |   |  |  |  |
| J.1  | Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler   | Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği, Elektrik Tesisleri Proje Yönetmeliği, Jeoloji ve jeoteknik çalışmalar ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler  | 6               | 8                 | 5  | 240   | YÜKSEK RISK   | Santral yeri, belirlenen üretim ve reenjeksiyon kuyularının konularına göre belirlenmeli, birkaç seçeneği güzergah belirlenmesi yapılarak fayda-maliyet analizi ile karar verilmelidir. Uygun yer ve derinlikte seçilen reenjeksiyon kuyularında, önceden enjeksiyon testleri yapılmalı, acil durum havuzları yeterli kapasitede inşa edilmelidir. Güzergah tespitlerinde Coğrafi Bilgi Sistemleri Analizlerinden faydalanılmalıdır. Tespit edilen koordinat hataları hemen düzeltilmelidir.  | 3      | 4   | 2     | 24         | DÜŞÜK RISK | Jeoloji, Harita (Geomatik), Sondaj, Jeofizik, İnşaat ve Makine Mühendisleri                 |  |  |  |
| J.2  | Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)   | Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği   | 6               | 9                 | 5  | 270   | YÜKSEK RISK   | Kurulum yapılacak olan arazide haritalarda oluşacak olan hata ve eksiklikler yersel, hava fotoğrafı (fotogrametri) ya da uzaktan algılama sistemleri kullanılarak giderilmeli ve tamamlanmalıdır. Bu ölçümler Coğrafi Bilgi Sistemlerine uyumlu hale getirilmeli ve bir çok veriyi içeren haritasal veriler birleştirme analizleri kullanılarak bir bütün halinde değerlendirilmelidir. Topoğrafik Ölçümler hata sınırları dışında kalyorsa bu ölçümler arazide kontrol edilmeli ve tekrarlanmalıdır.   | 3      | 5   | 2     | 30         | DÜŞÜK RISK | Harita (Geomatik) ve Jeoloji Mühendisleri   |  |  |  |
| J.3  | Bölgenin uzun dönem ortalama sıcaklık, nem, hakim rüzgar yönü ve maksimum rüzgar hızı verilerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler   | Meteorolojik veri değerlendirilmesi ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler  | 5               | 7                 | 4  | 140   | YÜKSEK RISK   | Kurulum yapılacak bölgenin sıcaklık, nem, rüzgar hızı ve rüzgar yönü hesaplanmalı, uzun yıllar meteorolojik veriler sağlığı olarak elde edilmeli, ortalama atmosferik koşullar dikkate alınmalıdır.   | 2      | 3   | 2     | 12         | DÜŞÜK RISK | Meteoroloji ve Proje Yönetim Mühendisleri   |  |  |  |
| J.4  | Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sivilaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler | Jeolojik harita, Jeoloji ve jeofizik çalışmalar ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler  | 7               | 8                 | 6  | 336   | YÜKSEK RISK   | Santral alanı ve çevresinin stratigrafik, litolojik, jeolojik özellikleri açıklanmalı, harita ve kesitleri yapılmalı, araştırma çukuru ve jeofizik yöntemler kullanılarak gerekirse kuyu veya sondaj açılarak zemin ve yer altı durumu açıklanmalıdır. Laboratuvar testleri sonuçlarına göre zemin/toprak yapısı, özellikleri ve kimyasal yapısı ile yeraltı su seviyesi belirlenmelidir. Santral inşaatı esas mimari projeler, santrale ait soğutma kuleleri, jeneratör ve türbin ağırlıklarına ve zemin etüt parametrelerine göre statik projeleri hazırlanmalıdır. | 4      | 4   | 2     | 32         | DÜŞÜK RISK | Jeoloji, Jeofizik, İnşaat ve Saha Mühendisleri  |  |  |  |
| J.5  | Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler  | Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı mevzuatı, ilgili kimyasal analizlerle ilgili standartlar.  | 5               | 8                 | 5  | 200   | YÜKSEK RISK   | Üretim ve reenjeksiyon kuyularının kuyubası basıncı ve üretim/enjeksiyon debisi arasındaki ilişki, ortalama akış sıcaklığı ve kuyu akış performansı belirlenmelidir. Kaynak sıcaklığına uygun santral türü seçilmeli, santral devreye alınmasından önce, uygun inhibitör ve kullanım oranları belirlenmeli, su analizleri kuyubasında gerçekleştirilmelidir.  | 3      | 4   | 2     | 24         | DÜŞÜK RISK | Jeoloji, Geomatik, Sondaj, Kimya, Hidrojeoloji, Makine Mühendisleri                         |  |  |  |
| J.6  | Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler   | Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı ve Elektrik Piyasası ile ilgili yönetmelik ve düzenlemeler   | 6               | 8                 | 4  | 192   | YÜKSEK RISK   | Bağlantı noktasının türü, santral kurulu gücüne bağlı olarak belirlenmeli, buna bağlı olarak elektrik projeleri hazırlanmalıdır. Enerji iletim hattını ve bağlantı noktasını gösteren tek ve hat şemasıyla ilgili kurumlara başvuru yapılmalıdır. Projeler Coğrafi Bilgi sistemleri ortamında değerlendirilmelidir.   | 3      | 5   | 2     | 30         | DÜŞÜK RISK | Elektrik, Enerji, Makine ve Proje Yönetim Mühendisleri                                      |  |  |  |
| J.7  | Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma haritalarında yapılmış muhtemel hata ve riskler  | Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği Kamulaştırma ile ilgili kanun ve yönetmelikler  | 6               | 9                 | 4  | 216   | YÜKSEK RISK   | Kurulum yapılacak olan arazinin kadastral mülkiyet ve kamulaştırma haritalarında hatalı kısımların tekrar ölçümleri yapılmalı ve haritalara yansıtılmalıdır. Santral yeri ve güzergahı seçimlerinde Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında kamulaştırma analizleri yapılmalıdır.  | 3      | 6   | 2     | 36         | DÜŞÜK RISK | Harita (Geomatik), Yazılım, Saha ve Proje Yönetim Mühendisleri, CBS uzmanları Mali uzmanlar |  |  |  |
| J.8  | Çevresel etki parametrelerinin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler  | Çevresel Etki Değerlendirmesi ve Proje teknik ve idari şartnameleri ile ilgili mevzuat   | 6               | 6                 | 3  | 108   | YÜKSEK RISK   | Santralin çalışması sırasında gürültü ve koku engelleyici filtreler tasarlanmalı, baca yükseklik ve filtreleri projelendirilmeli, meteorolojik koşullar dikkate alınmalı düzenli olarak saha izlemesi ve analizler yapılmalıdır. Yoğunlaşmayan gaz miktarının hassas şekilde bilinmesi ve bertarafı gerekmektedir.  | 3      | 3   | 2     | 18         | DÜŞÜK RISK | Çevre, Kimya, Makine, İnşaat ve Saha Mühendisleri   |  |  |  |
| J.9  | Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler  | Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerinin Üretim Yönetmeliği   | 6               | 9                 | 6  | 324   | YÜKSEK RISK   | Santralin araziye uygulamasında hesaplanan koordinatlar için faydalanılan arazi ölçme ağındaki yer kontrol noktalarının koordinatları tekrar hesaplanmalı ve yeni hesaplanan bu koordinatlara göre santral uygulaması noktalarının koordinatları kontrol edilmeli ve tekrar hesaplanmalıdır.  | 2      | 4   | 4     | 32         | DÜŞÜK RISK | Harita (Geomatik) Mühendisleri  |  |  |  |
| J.10   | İzlinin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler   | Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımı, Enerji Piyasası Düzeltme Kurumu, Jeotermal Kaynaklar ve Doğal Minerali Sular ve Başvuruların Teknik Değerlendirilmesine ilişkin mevzuatlar ve ilgili Kamu Kurumlarının yönetmelikleri | 4               | 7                 | 4  | 112   | YÜKSEK RISK   | Başvurunun yapıldığı ilgili kamu kurum ve kuruluşlarından izinlerinin alınması, Projelendirilmesini yapıp onaylatılması, Kurulum ve kuyu bağlantılarının tanınanmasından sonra tesisin resmi kurumlara kabulünün yaptırılması gerekmektedir.  | 2      | 3   | 2     | 12         | DÜŞÜK RISK | Proje Yönetim Mühendisleri Kontrol Mühendisleri   |  |  |  |



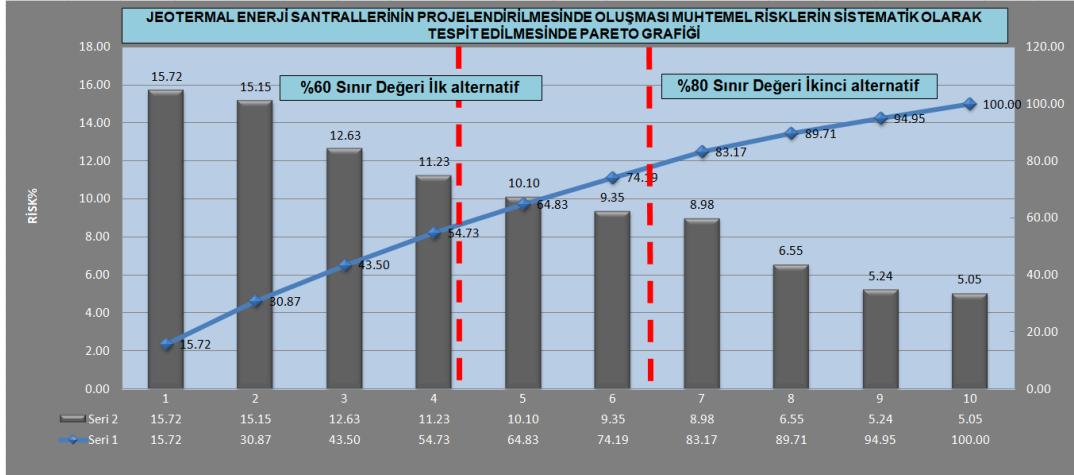
**Çizelge 3.** JES Projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin 1. aşama Pareto sistematğinde incelenmesi ((ilk alternatif %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri=%100 oranı) ve (ikinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) birlikte)

**Table 3.** Examining the possible risks to the GPP project design in the 1st stage Pareto systematic ((first alternative 40% risk number and 60% limit value=100% ratio) and (second alternative risk number where 80% limit value is obtained) together)

| JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN SİSTEMATİK OLARAK TESPİT EDİLMESİ (%40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 Oranı) VE (%80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) BİRLİKTE |   |           |            |         |                  |             |
|--|---|-----------|------------|---------|------------------|-------------|
| SIRA NO  | HATA ŞEKLİ  | PROSES NO | RÖS DEĞERİ | RISK(%) | KÜMÜLATİF RISK % | RISK        |
| 1  | Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler | J.4       | 336        | 15.72   | 15.72            | YÜKSEK RISK |
| 2  | Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler  | J.9       | 324        | 15.15   | 30.87            | YÜKSEK RISK |
| 3  | Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topografik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)   | J.2       | 270        | 12.63   | 43.50            | YÜKSEK RISK |
| 4  | Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler   | J.1       | 240        | 11.23   | 54.73            | YÜKSEK RISK |
| 5  | Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma ölçümlerinde yapılan hata ve riskler   | J.7       | 216        | 10.10   | 64.83            | YÜKSEK RISK |
| 6  | Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler  | J.5       | 200        | 9.35    | 74.19            | YÜKSEK RISK |
| 7  | Enerji bağlantı noktasının yeri ve bağlantı gücünün belirlenmesinde yapılan hata ve riskler   | J.6       | 192        | 8.98    | 83.17            | YÜKSEK RISK |
| 8  | Bölgenin uzun dönem ortalama sıcaklık, nem, hakim rüzgar yönü ve maksimum rüzgar hızı verilerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler   | J.3       | 140        | 6.55    | 89.71            | YÜKSEK RISK |
| 9  | İzinlerin alınmasında yaşanan gecikmelerden kaynaklanan hata ve riskler   | J.10      | 112        | 5.24    | 94.95            | YÜKSEK RISK |
| 10   | Çevresel etki parametrelerinin ölçümlerinde (gürültü, koku, emisyon sınır değerleri vb) ve yoğunlaşmayan gaz miktarı hesabında yapılan hata ve riskler yapılan hata ve riskler  | J.8       | 108        | 5.05    | 100.00           | YÜKSEK RISK |

(İlk alternatif %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri =%100 Oranı)

(İkinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı)



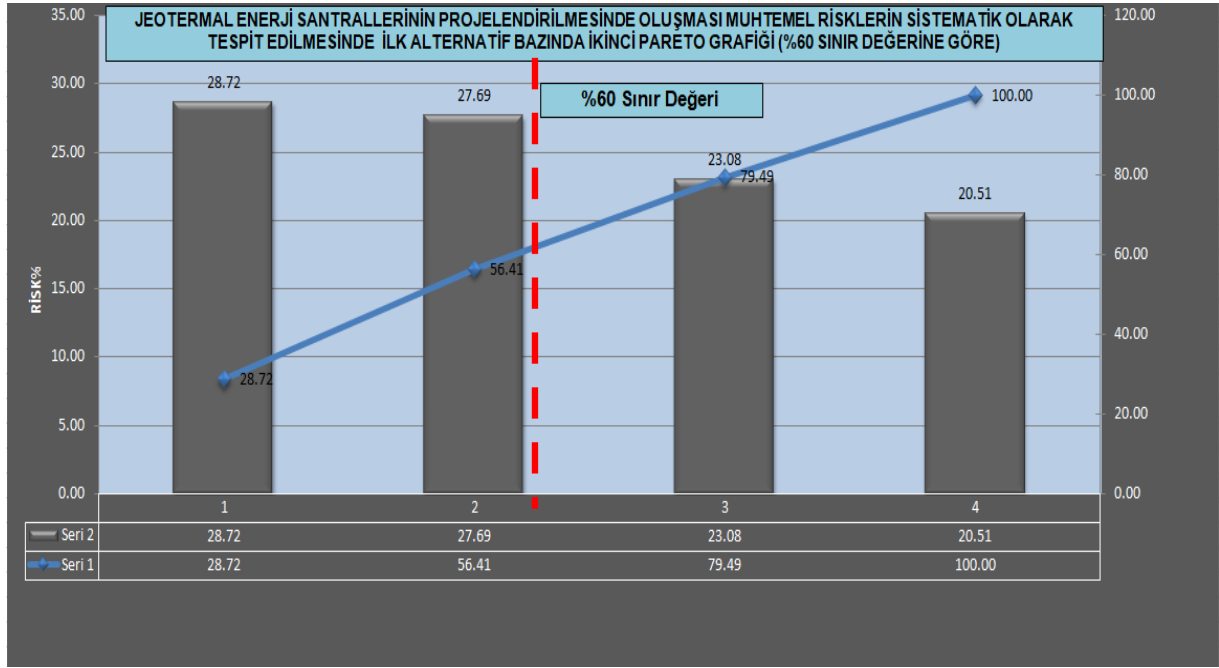
**Şekil 1.** Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin Pareto sistematiğindeki grafik gösterimin ((ilk alternatif %40 risk sayısı ile %60 sınır değeri=%100 oranı) ve (ikinci alternatif %80 sınır değerinin elde edildiği risk sayısı) birlikte)

**Figure 1.** Graphic display of possible risks in the project design of geothermal power plants in Pareto system ((first alternative 40% Risk number and 60% limit value=100% ratio) and (second alternative 80% limit value obtained risk number))

**Çizelge 4.** Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ilk alternatif bazında ikinci Pareto sistematiğinde incelenmesi (%60 sınır değeri)

**Table 4.** Examination of possible risks in the design of geothermal power plants in the second Pareto system based on the first alternative (60% limit value)

| JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN İLK ALTERNATİF BAZINDA İKİNCİ PARETO SİSTEMATİĞİNDE İNCELENMESİ (%60 Sınır Değeri) |   |           |            |         |                  |             |
|---|---|-----------|------------|---------|------------------|-------------|
| SIRA NO   | HATA ŞEKLİ  | 'ROSES Nı | RÖS DEğERİ | RİSK(%) | KÜMÜLATİF RİSK % | RİSK        |
| 1   | Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler | J.4       | 336        | 28.72   | 28.72            | YÜKSEK RİSK |
| 2   | Projelendirme aşamasında santralin araziye uygulaması için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler  | J9        | 324        | 27.69   | 56.41            | YÜKSEK RİSK |
| <b>(%60 Sınır Değerine Göre)</b>  |   |           |            |         |                  |             |
| 3   | Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)   | J.2       | 270        | 23.08   | 79.49            | YÜKSEK RİSK |
| 4   | Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler   | J.1       | 240        | 20.51   | 100.00           | YÜKSEK RİSK |



**Şekil 2.** Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ilk alternatif bazında ikinci Pareto sistematigindeki grafik gösterimi (%60 sınır değeri)

*Figure 2.* Graphic display of possible risks in the design of geothermal power plants in the second Pareto systemic based on the first alternative (60% limit value)

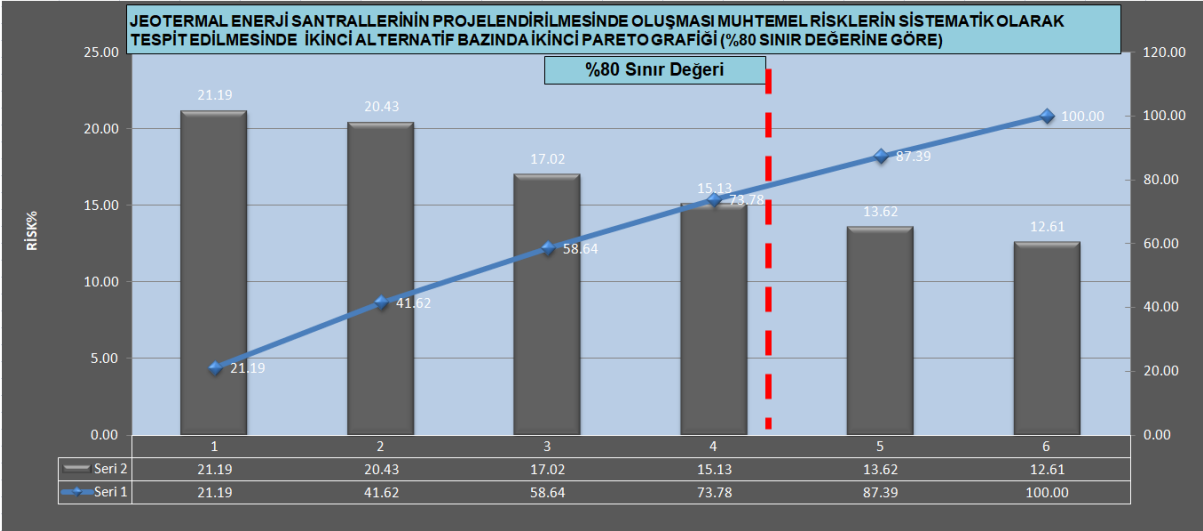
Yapılan bu çalışmada, pareto analizi için ek olarak ikinci bir alternatif düşünülmüştür. Bu projedeki ilk alternatifte, projedeki risklerin dağılımına göre %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı seçilerek toplamın %100 olması önemsenmiştir. Bu sefer ikinci alternatifte ise %20-%80=%100 kuralına göre %80 risk sınır değerinin projedeki hangi risk sayısına denk geldiği araştırılmıştır. Burada %20 Risk Sayısı ile %80 Sınır Değeri=%100 oranlarında %80 Sınır Değeri oranı önemsenmiştir. Buna göre ikinci alternatif araştırmada projedeki %80 sınır değeri ilk 6 risk sayısına denk geldiği görülmüştür. Bu alternatifte önemli olan faktör ise %80 sınır değerinin yakalanması olarak düşünüldüğünde ise JES projeleri için J4,J9,J2,J1,J7,J5 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 3, Şekil 1). Bu alternatif ile de JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %60'ının, projedeki tüm problemlerin %80'nini oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. J4,J9,J2,J1,J7,J5 riskleri kendi içinde yine %80 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9,J2,J1 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir (Çizelge 5, Şekil 3). Bu iki alternatifte de amaç projelerdeki en önemli olan ve ayrıca bütün projedeki problemlerin büyük bir yüzdesini oluşturan az sayıda risk için, az bir maliyetle önlemlerin alınması ve projenin ilerlemesinin zarar görmemesi olmaktadır. JES projeleri için her iki alternatifte de iki kere pareto analizi uygulanarak mümkün olduğunca problemin çoğunu oluşturan az sayıda riskin bulunması amaçlanmıştır. Bu şekilde JES projelerinin ilerlemesinde, az sayıda riskin çözümlenerek projedeki problemlerin çoğunun çözümlenmesi olanaklı hale getirilmiştir.

**Çizelge 5.** Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ikinci alternatif bazında ikinci Pareto sistematüğinde incelenmesi (%80 sınır değeri)

**Table 5.** Investigation of possible risks in the design of geothermal power plants in the second pareto system based on the second alternative (80% limit value)

| JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİNİN PROJELENDİRİLMESİNDE OLUŞMASI MUHTEMEL RİSKLERİN İKİNCİ ALTERNATİF BAZINDA İKİNCİ PARETO SİSTEMATİĞİNDE İNCELENMESİ (%80 Sınır Değeri) |   |           |            |         |                  |             |
|--|---|-----------|------------|---------|------------------|-------------|
| SIRA NO  | HATA ŞEKLİ  | PROSES NO | RÖS DEĞERİ | RİSK(%) | KÜMÜLATİF RİSK % | RİSK        |
| 1  | Jeolojik, jeofizik, jeoteknik, araştırmalarda (zemin koşulları, sıvılaşma, aktif fay konumları, karstik boşluk, vb.), statik analizlerinde, depremsellik, heyelan riski ve zemin parametrelerinin belirlenmesinde yapılan hata ve riskler | J.4       | 336        | 21.19   | 21.19            | YÜKSEK RİSK |
| 2  | Projelendirme aşamasında santralin araziye aplikasyonu için gerekli olan koordinatların yanlış hesaplanmasından kaynaklanan hata ve riskler   | J9        | 324        | 20.43   | 41.62            | YÜKSEK RİSK |
| 3  | Kurulum yapılacak arazinin haritalarının olmaması veya haritalarda eksiklik ve/veya yanlışlık bulunmasından kaynaklanan hata ve riskler (topoğrafik, yerleşim, bitki örtüsü, jeoloji vb.)   | J.2       | 270        | 17.02   | 58.64            | YÜKSEK RİSK |
| 4  | Kuyuların, santral ve acil durum havuzlarının yeri ve boru hatlarının geçeceği güzergahın koordinat ve kotlarının hesabında yapılan hata ve riskler   | J.1       | 240        | 15.13   | 73.78            | YÜKSEK RİSK |
| 5  | Kurulum yapılacak arazinin ve boru hatlarının geçeceği güzergahın kadastral ölçüm, mülkiyet/kamulaştırma ölçümlerinde yapılan hata ve riskler   | J.7       | 216        | 13.62   | 87.39            | YÜKSEK RİSK |
| 6  | Üretim ve reenjeksiyon kuyularının akış performans ilişkisi, üretim sıcaklığı, kabuklaşma-korozyon ve jeotermal suların kimyasal özelliklerinin açıklanmasında yapılan hata ve riskler  | J.5       | 200        | 12.61   | 100.00           | YÜKSEK RİSK |

(%80 Sınır Değeri Göre)



**Şekil 3.** Jeotermal enerji santrallerinin projelendirilme ve ölçümlendirilmesinde oluşması muhtemel risklerin ikinci alternatif bazında ikinci Pareto sistematüğindeki grafik gösterimi (%80 sınır değeri)

**Figure 3.** Graphic display of possible risks in the design and measurement of geothermal power plants in the second Pareto systemic based on the second alternative (80% limit value)

Çalışmanın dördüncü aşamasında ise JES tasarımı aşamasında olası risklerin her birinin, AHP kullanılarak oluşturulan karşılaştırma matrisi ile kriter ağırlığı hesaplanmıştır (Çizelge 6). AHP analizi sonucu elde edilen en yüksek ağırlığa sahip faktör J4 olarak belirlenmiştir. Bu parametreyi sırasıyla J9,J2,J1,J7,J5,J6,J3,J8 ve J10 takip etmektedir. Karşılaştırma matrisi ve ağırlıkların tutarlılık durumlarının tespiti için hesaplanan CR değerinin 0,05 olduğu belirlenmiştir. Bu değer, Saaty tarafından önerilmiş

olan 0,10 değerinden küçük olması bu çalışmada oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduklarını göstermektedir (Saaty, 2000).

**Çizelge 6.** İkili karşılaştırma ve ağırlık matrisi

*Table 6. Pairwise comparison and weight matrix*

| Parametre  | J1  | J2  | J3  | J4  | J5  | J6  | J7  | J8 | J9  | J10 | Ağırlık |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|---------|
| J1   | 1   |     |     |     |     |     |     |    |     |     | 0,11    |
| J2   | 3   | 1   |     |     |     |     |     |    |     |     | 0,19    |
| J3   | 1/5 | 1/5 | 1   |     |     |     |     |    |     |     | 0,03    |
| J4   | 5   | 2   | 5   | 1   |     |     |     |    |     |     | 0,26    |
| J5   | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1   |     |     |    |     |     | 0,05    |
| J6   | 1/3 | 1/7 | 3   | 1/7 | 1   | 1   |     |    |     |     | 0,04    |
| J7   | 1/3 | 1/5 | 5   | 1/3 | 1   | 1   | 1   |    |     |     | 0,06    |
| J8   | 1/5 | 1/9 | 1/3 | 1/9 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1  |     |     | 0,02    |
| J9   | 3   | 2   | 6   | 1/2 | 3   | 9   | 7   | 9  | 1   |     | 0,22    |
| J10  | 1/7 | 1/7 | 1/3 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1  | 1/7 | 1   | 0,02    |
| λmax:10,75 CI: 0,083333 RI: 1,49 CR: 0,05<0,1 Σ=1.00 |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     |         |

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

JES tasarım aşamasında, kurulum yapılacak arazinin konumu, geometrisi ile jeolojik ve jeofiziksel koşullarının da belirlenmesi önemli bir konu olmaktadır. Bu projelerde, harita, kesit ve jeolojik kesitlerin oluşturulmasında, kurulum yapılacak sahada ve yakın çevresinde gerçekleştirilen arazi gözlem ve çalışmaları, sondaj faaliyetleri, mühendislik ölçmeleri ve tüm bu çalışmaların önceki çalışmalarla birlikte değerlendirilmesinin payı oldukça büyük olmaktadır. Bu çalışmada, JES tasarımının uygulanması sırasında oluşabilecek hata ve riskler HTEA, Pareto ve AHP sistematğinde araştırılmış ve ayrıca oluşan bu hata ve risklere karşı alınması gereken tedbirler, konu ile ilgili uzman kişilerin de görüşleri alınarak belirlenmiştir. Yapılan HTEA sistematik analizinin incelenmesi sonucunda yüksek risk grubunda yer alan hata ve riskler ve risklerin önlemleri belirlenmiş, sonrasında ise Pareto analizi yapılmıştır.

Pareto analizinde ilk alternatif olarak %20-%80=%100, %30-%70=%100, %40-%60=%100 oranlarından, %40 Risk Sayısı ile %60 Sınır Değeri=%100 oranı (toplamın %100 olması önemsenmektedir), bu projedeki oluşması muhtemel risklerin RÖS sayılarına göre uygun bir oran olarak düşünülmüştür. Buna göre; J4,J9,J2,J1 risklerinin JES kurulum projelerinde ön plana çıktığı görülmektedir. Bu alternatif ile JES kurulum aşamasında belirlenen risklerin %40'ının, projedeki tüm problemlerin %60'ını oluşturduğu şeklinde yorum yapılabilir. J4,J9,J2,J1 riskleri kendi içinde yine %60 sınır değerine göre ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir.

Çalışmada ikinci alternatif olan pareto analizi ile %20-%80=%100 kuralına göre bu defa %80 Sınır Değerinin hangi risklerde oluştuğunu görebilmek amaçlanmıştır. İkinci alternatifte önemli olan husus ise %80 oranının hangi risklere denk geldiğinin bulunması olarak düşünülmüştür. Buna göre düşünüldüğünde ise J4,J9,J2,J1,J7,J5 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir. J4,J9,J2,J1,J7,J5 riskleri kendi içinde yine %80 sınır değerine göre yine ikinci bir pareto analizinde incelendiğinde ise J4,J9,J2,J1 risklerinin ön plana çıktığı görülmektedir. JES projeleri için her iki alternatifte de iki kere pareto analizi uygulanarak mümkün olduğunca problemin çoğunu oluşturan az sayıda riskin bulunması amaçlanmıştır. Bu şekilde JES projelerinin ilerlemesinde, az sayıda riskin çözümlenerek projedeki problemlerin çoğunun çözümlenmesi olanaklı hale getirilmiştir.

AHP ile yapılan analiz sonucunda ise hata ve risklerin J4,J9,J2,J1,J7,J5,J6,J3,J8 ve J10 sırasıyla dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır. JES kurulum aşaması yürütülürken oluşabilecek olan ve konu ile ilgili uzman kişilerin görüşleri ile belirlenen hata ve risklerin HTEA, Pareto ve AHP yöntemleriyle analizlerinin gerçekleştirilmesi ile bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında, J4,J9,J2 ve J1 proses numaralı

hata ve risklerin uygulanan 3 yöntemde de dikkate alınması gerekliliği hatta bu riskler arasında da J4 ve J9 nolu risklerin daha da önem arz ettiği tespit edilmiştir. Bu durum çalışmada belirlenen bulguların birbirleriyle örtüştüğünü göstermektedir. Çalışmada uygulanan yöntemlerin birbiriyle uyumlu sonuçlar üretmesi, uzman kişilerin görüşlerinin güvenilirliğini göstermesi açısından da önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile JES standart risk analizi inceleme listelerinde asgari düzeyde bulunması gereken risk kriterlerinin oluşturulmasına katkı sağlanmakla birlikte HTEA, Pareto analizi ve AHP yöntemlerinin JES kurulumu risk analizlerinin yapılmasında oldukça güçlü yöntemler olduğu da vurgulanmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akın, B., 1998, *ISO 9000 Uygulamasında ve İşletmelerde Hata Türü ve Etkileri Analizi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, ss.182.
- Aksoy, N., Şişman, M., 2011, "Jeotermal elektrik santralleri proje yönetimi", *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, ss.291-298, 13-16 Nisan 2011.
- Can, E., 2019, "Analysis of risks that are based on the aerial photography used in photogrammetric monitoring maps for environmental wind power energy plant projects", *Environmental Monitoring and Assessment*, Cilt 191, 746, <http://doi.org/10.1007/s10661-019-7944-8>
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon Gary Ka, K., Yang, J. B., 2009, "Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach", *Computers & Operations Research*, Cilt 36, ss. 1768–1779, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.05.002>
- Feili, H. R., Akar, N., Lotfizadeh, H., Bairampour, M., Nasiri, S., 2013, "Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique", *Energy Conversion and Management*, Cilt 72, ss. 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.027>
- Franco, A., Donatini, F., 2017, "Methods for the estimation of the energy stored in geothermal reservoirs", *J. Phys.: Conf. Ser.* 796 012025, ss 11, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/796/1/012025>
- Gökçen, G., Öztürk, H. K., Hepbaşlı, A., 2004, "Geothermal fields suitable for power generation", *Energy Sources*, Cilt 26, Sayı 5, ss. 441-451, <http://doi.org/10.1080/00908310490429722>
- Gürcün, D., Petek, A., 2021, "Jeotermal enerji potansiyelinin SWOT analizi ile değerlendirilmesi: Aydın ili örneği", *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 14, Sayı 2, ss. 349–364. <http://doi.org/10.25287/ohuibf.695276>.
- Karatop, B., Taşkan, B., Adar, E., Kubat, C., 2021, "Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach", *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 151, 106958, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106958>
- Koeh, D. C., Muchiri, P., Chemweno, P., 2018, "Risk assessment of critical equipment failure mode. A case study of Olkaria 2 geothermal power plant in Kenya", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X*, Cilt 15, Sayı 5 Ver. II (Sep.-Oct. 2018), ss. 63-73, <http://doi.org/10.9790/1684-1505026373>
- Li, Z., Chen, L., 2019, "A novel evidential FMEA method by integrating fuzzy belief structure and grey relational projection method", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Cilt 77, ss. 136-147, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.10.005>
- Liu, H.-C., Liu, L., Liu, N., 2013, "Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review", *Expert Systems with Applications*, Cilt 40, ss. 828-838, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Liu, H.-C., Chen X.-Q., You J.-X., Li, Z., 2021, "A new integrated approach for risk evaluation and classification with dynamic expert weights", *IEEE Transactions on Reliability*, Cilt 70, Sayı 1, ss. 163-174, <https://doi.org/10.1109/TR.2020.2973403>.
- Lund, J. W., 1997, "Direct heat utilization of geothermal resources", *Renewable Energy*, Cilt 10, ss. 403–408. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)00097-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)00097-3)
- Min, H., 1994, "Location analysis of international consolidation terminal using the AHP", *Journal of Business Logistics*, Cilt 15, Sayı 2, ss. 25-44,

- [https://search.library.northwestern.edu/permalink/01NWU\\_INST/6rv399/cdi\\_proquest\\_journals\\_212603598](https://search.library.northwestern.edu/permalink/01NWU_INST/6rv399/cdi_proquest_journals_212603598)
- Mutlu, M., Sarı, M., 2017, "Çok kriterli karar verme yöntemleri ve madencilik sektöründe kullanımı", *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt 56, Sayı 4, ss. 181-196, <http://www.mining.org.tr/pub/issue/35230/391953>
- Nasruddin, N., Kurniawan, N., Prasetyadi, D., Sherly, 2018, "Critical analysis using FMEA fuzzy logic on geothermal steam turbine system", *AIP Conference Proceedings* 1983, 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5046227>
- Özcan, S., 2001, "İstatiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama", *Cumhuriyet Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, Cilt 2, Sayı 2, ss. 151-174,
- REN21, 2020, "Renewables 2019 global status report", Renewable Enerji Policy Network for the 21st century Paris, France, ss. 336. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf), ziyaret tarihi:02 Ağustos 2021.
- Saaty, T. L., 1980, *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill, International, Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised, Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty, T. L., 2000, *Fundamentals of decision making and priority theory*. 2. Edition, RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T. L., 2013, *Mathematical principles of decision making: the complete theory of the analytic hierarchy process*, USA: RWS Publications.
- Sarıçalı, G., Kundakçı, N., 2016, "AHP ve Copras yöntemleri ile otel alternatiflerinin değerlendirilmesi", *International Review of Economics and Management*, Cilt 4, Sayı 1, ss. 45-66, <https://doi.org/10.18825/irem.00736>
- Su, X., Deng, Y., Mahadevan, S., Bao, Q., 2012, "An improved method for risk evaluation in failure modes and effects analysis of aircraft engine rotor blades", *Engineering Failure Analysis*, Cilt 26, ss. 164-174, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.07.009>
- Şimşek, Y., 2014, *Risk Management Approach And Risk Analysis İn Solar Thermal Energy Projects*, M.Sc Thesis, ITU Energy Institute Department of Energy Science and Technology, ss. 106.
- TJD, 2021, "Jeotermal enerji nedir", Türkiye Jeotermal Derneği <http://www.jeotermalderneği.org.tr/sayfalar-Jeotermal-Enerji-Nedir->, ziyaret tarihi:02 Ağustos 2021.
- Tsai, S.-B., Yu, J., Ma, L., Luo, F., Zhou, J., Chen, Q., Xu, L., 2018, "A study on solving the production process problems of the photovoltaic cell industry", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 82, ss. 3546-3553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.105>
- Vaidya, O. S., Kumar, S., 2006, "Analytic hierarchy process: an overview of applications", *European Journal of Operational Research*, Cilt 169, ss. 1-29, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>
- Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon Gary Ka, K., Yang, J. B., 2009, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean", *Expert Systems with Applications*, Cilt 36, ss. 1195-1207, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028>
- Xiao, N., Huang, H. Z., Li, Y., He, L., Jin, T., 2011, "Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA", *Engineering Failure Analysis*, Cilt 18, ss. 1162-1170, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004>
- Zhang, H.-J., Zhou, Y., Gan, Q.-H., 2019, "An extended PROMETHEE-II-based risk prioritization method for equipment failures in the geothermal power plant", *International Journal of Fuzzy Systems*, Cilt 21, ss. 2490-2509, <https://doi.org/10.1007/s40815-019-00679-x>



## EKSENEL YÜK UYGULANAN DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARININ TAŞIMA GÜCÜ DEĞERLERİNİN KIYASLANMASI

<sup>1</sup>Kaveh DEGHANIAN , <sup>2</sup>Hakan Murat SOYSAL 

*İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE*  
<sup>1</sup>kavehdeghanian@aydin.edu.tr, <sup>2</sup>hakansoyosal@aydin.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.08.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada, aksenal yükleme testi yapılan beş farklı projeye ait derin karıştırma kolonlarının taşıma gücünün grafiksel ve analitik yöntemler ile belirlenmesi ve sonuçların birbiri ile kıyaslanması olarak amaçlanmıştır. Yükleme deneylerinin sonuçlarının yorumlanmasında literatürde sıkça kullanılan üç yöntem kullanılmıştır. Bunlar Decourt, De Beer ve Chin-Kondner yöntemleridir. Sahada oluşturulan derin karıştırma kolonlarına aksenal yükleme testleri uygulanmıştır. Her proje için daha önceden belirlenen proje yükü değeri baz alınarak yükleme gerçekleştirilmiştir. Yük artışı ile deformasyonlar arasındaki ilişkiden yola çıkılarak yapılan hesaplamalarda Decourt ve Chin-Kondner yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerlerinin beş proje için birbirine yakın sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. De Beer yöntemi ile hesaplanan taşıma gücü değerleri diğer yöntemlere oranla nispeten daha düşük çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin İyileştirme, Derin Karıştırma, Taşıma Gücü, Statik Aksenal Yükleme Testi

### A Comparative Analysis on the Bearing Capacity of Axially Loaded Deep Mixing Columns

**ABSTRACT:** In this study, it is aimed to determine the bearing capacity of the deep mixing columns belonging to five different projects, for which axial loading tests were carried out, by graphical and analytical methods and the results have been compared with each other. Three methods which are frequently used in the literature, were used to interpret the results of the loading experiments. These methods are: The Decourt, De Beer and Chin-Kondner. Axial loading tests were applied to the deep mixing columns in the field. For each project, loading was carried out based on the previously determined project load value. In the calculations based on the relationship between the load increase and the deformations, it was found that the bearing capacity values calculated with the Decourt and Chin-Kondner methods gave close results for the five projects. The bearing capacity values calculated with the De Beer method were relatively lower than the other methods.

**Keywords:** Soil Improvement, Deep Soil Mixing, Bearing Capacity, Static Axial Loading Test

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışma kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden derin karıştırma yöntemi ele alınmıştır. Derin karıştırma yöntemi; kireç, çimento veya her ikisini de içeren bağlayıcılarla ortası delik burgular veya kanatlı karıştırıcılar aracılığıyla zeminin, yerinde karıştırılmasıyla uygulanan derin bir iyileştirme yöntemidir.

Derin karıştırma kolonlarının aksenal yükler altındaki davranışları Uşak Yurt ve Sosyal Tesis Projesi, Gazi Anadolu Lisesi Eğitim Yerleşkesi, Elazığ Konut Projesi, Amasya Konut Projesi ve Amasya Hastane Projesi Kapsamındaki projelerde uygulanan statik yükleme deney sonuçları dikkate alınarak incelenmiştir. Söz konusu deney sonuçlarının seçilen üç farklı yöntemle yorumlamaları yapılmış olup, bu yorumlardan elde edilen taşıma gücü ile hesaplanan taşıma gücü değeri ve geoteknik raporda verilen değerler ile karşılaştırılarak hesapların doğruluk ve güvenilirlikleri irdelenmiştir.



## LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LİTERATURE RESEARCH)

Derin karıştırma kolonları 1960'lı yıllardan beri birçok ülkede sıklıkla kullanılan bir Zemin iyileştirme yöntemi olmakla beraber, 2006 yılından itibaren ülkemizde de tercih edilen bir zemin iyileştirme yöntemi olmuştur.

Derin karıştırma kolonları 1960'lı yılların başlarından beri Japonya'nın liderliğinde araştırılmış ve geliştirilmiştir. PHRI (Port and Harbour Research Institute) önderliğinde yapılan araştırmaların ilk aşamalarında kireç kolonları olarak geliştirilmiştir (Kaya, 2016).

Japonya'da geliştirilmeye ve uygulanmaya başlanan derin karıştırma kolonları 1970'li yılların sonlarından itibaren Japonya ile paralel olarak Çin'de de uygulanmaya başlanmış ve 1978 yılında hemen hemen çoğu yapıda uygulanabilir duruma getirilmiştir. Avrupa ülkelerinde ise, derin karıştırma yönteminin araştırmalarına İsveç ve Finlandiya ülkeleri liderlik etmiştir. 1967 yılında İsveç Geoteknik Enstitüsü tarafından İsveç Kireç Kolonları geliştirilmiştir. 1974 yılında Finlandiya'da zemin taşıma kapasitesi üzerinde kolon uzunluğunun etkisini araştırmak amacıyla 8 ve 6 m uzunluğunda kireç kolonları uygulanmıştır (Kaya, 2016).

1980 yılında Japonya'daki derin karıştırma yöntemindeki gelişmeler ve başarılı uygulamaları, Amerika'da da derin karıştırma yöntemi uygulamasına dikkatleri çekmiş, derin karıştırma kolonları deprem sırasında zeminde oluşabilecek sıvılaşmadan korunmak amacıyla bir projede uygulanmıştır. Daha sonrasında derin karıştırma yöntemi Amerika'da baraj yapılarında uygulanmıştır. Amerika derin karıştırma yöntemlerinin baraj yapılarındaki uygulamalarının geliştirilmesiyle ilgili öncülük etmiştir (Kaya, 2016).

Ohio'daki Lockington barajı Wyoming'de Jackson Baraj gölü ve Washington'daki Cushman dolu savak projelerinin yenilenme projelerinde ve sayısız birçok projede uygulanmıştır. Amerika'da günümüzde hala yaygın olarak derin karıştırma yönteminin sayısız uygulamaları mevcuttur. Derin karıştırma yöntemi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Baraj projesi kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden kum sıkıştırma kazıkları, taş kolonlar, zemin sıkıştırma yöntemleri, jet grout kolonları ve derin karıştırma kolonları gibi derin zemin iyileştirme yöntemlerinin birçoğu dikkate alınmıştır. Fakat uygulama kolaylığı, sebebiyle derin karıştırma yönteminin bu proje için en uygunu olduğunu saptamışlardır. Bu proje kapsamında derin karıştırma yöntemi hem cut-off duvarı uygulamalarında, hem de temel zemini iyileştirmesi amacıyla uygulanmıştır (Kaya, 2016).

Ülkemizde derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılan birçok konut, hastane ve eğitim projeleri yer almakta olup, bu makale kapsamında incelenen 5 proje örnek olarak gösterilebilir. Ancak Çanakkale Köprüsü gibi daha büyük projelerde de bu yöntem uygulanmıştır.

Rashid ve diğ. (2015) tarafından rijit ve esnek temeller için derin karıştırma yöntemi ile göçme davranışını araştırmıştır. Bu çalışmada, farklı uzunluk ve çapta kolonlar deneysel olarak analiz edilmiş ve daha sonra sayısal olarak modellenmiştir. Sonuç olarak sayısal ve deneysel modeller arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir.

Liu ve Rowe (2015) geosistetik ile güçlendirilmiş derin karıştırma kolonlar üzerinde araştırma yapmış olup; geosentetiklerin viskos davranışının temellerin kayma dayanımını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Nakao ve diğ. (2021) zemin iyileştirme yöntemlerinden birinin bilgisayarda üç boyutlu olarak modellendiği derin çimento stabilizasyon yöntemi (DCS yöntemi) ile çalkalanarak kazı yapma işlemi sunulmakta ve hedef zemin içindeki davranış ve zemine etkisi anlatılmaktadır. Çevreleyen zemin MPS-CAE analizi ile görselleştirilir. Bu işlemin amacı, hedef zemin içindeki koşulları doğrularken DCS yöntemiyle kazı ve çalkalamayı değerlendirmektir. DCS yöntemiyle kazı ve çalkalama sırasındaki koşulları deneysel ve görsel olarak doğrulamak amacıyla, çeşitli renkli topraklar kullanılarak DCS yöntemiyle bir kazı ve çalkalama modeli deneyi gerçekleştirilir.

Suksiripattanapong ve diğ. (2022) uçucu kül ve polimer ile güçlendirilmiş derin karıştırma kolonları üzerinde yapıtıkları çalışmada; çimentonun artışı ile beraber tek eksenli kayma mukavemetin artışı ortaya koymuş olup, %5 çimento- polimer karışımında, derin karıştırma kolonlar için gereken minimum tek-eksenli dayanımını sağladığı sonucuna vardılar.

Chompoorat ve diğ. (2022) sıradan Portland çimentosu (OPC) ve uçucu kül (FA) ile muamele edilmiş yumuşak Bangkok killerinin işlem sonrası mekanik özelliklerini ve büzülme ile çatlama özelliklerini araştırmaktır. 7 ve 28 günlük karışım küründen sonra serbest basınç dayanımı, elastisite modülü ve büzülme çatlama ölçülmüştür. Islak/kuru çevrimin karışımların dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşlem görmüş yumuşak killerin mikro yapıları, enerji dağılımlı x-ışını analizi (SEM/EDX) teknikleri ile taramalı elektron mikroskopu kullanılarak incelenmiştir. Test sonuçları, stabilize edilmiş yumuşak killerin dayanım ve rijitlik iyileştirmelerinin OPC içeriği ile arttığını ancak FA içeriği ile azaldığını, artan FA içeriği ile numune büzülme derecesinin azaldığını göstermiştir. Akademik olarak derin karıştırma kolonlarının taşıma gücü tayinine yönelik hazırlanmış ve yayınlanmış tez çalışmaları mevcuttur. Erbeyoğlu (2019), Kaya (2016), Tuğçe (2016) tarafından hazırlanmış tezlerde, derin karıştırma ile zemin iyileştirme yapılmış çalışmalar mevcuttur.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

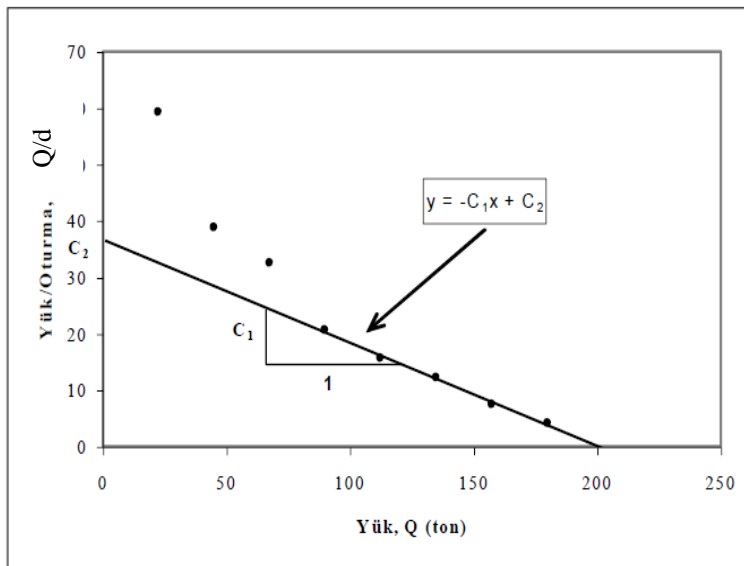
Derin karıştırma yöntemi birçok ülkede tercih edilen bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem diğer ülkelerde farklı şekilde isimlendirilmiş olsalar bile ana prensip ve tekniğin uygulanış şekli bakımından aynıdır.

Derin karıştırma kolonlarında derin temellerdeki şekli ile taşıma gücü hesapları çeşitli bilimsel araştırmalardaki kabul görmüş katsayı ve kabullerden faydalanılarak yapılmaktadır. Çalışmada derin karıştırma kolonlarının uygulandığı yapılarda aksel statik yüklemeye deneyleri tatbik edilmiştir. Bu çalışma kapsamında incelenen beş farklı projede derin karıştırma kolonları üzerinde statik aksel basınç yüklemeye deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yüklemeye deneyi sonucunda oturma-zaman, yük-zaman ve yük-oturma grafikleri oluşturulur. Bu grafiklerden yük-oturma eğrisi ile çeşitli araştırmacıların yöntemleri kullanılarak nihai taşıma gücü belirlenerek yorumlanır.

### Decourt Yöntemi (Decourt Method)

Her yük değeri kendisine karşılık gelen yer değiştirme değerine bölünerek elde edilen değerler ile yük/yer değiştirme-yük grafiği çizilir. Eğilim çizgisi doğrusunun y eksenini kesiştiği noktaya karşılık gelen yük değeri Decourt limit değeridir. Bu değer bir güvenlik sayısına bölünerek o kolona ait taşıma gücü değeri elde edilir.



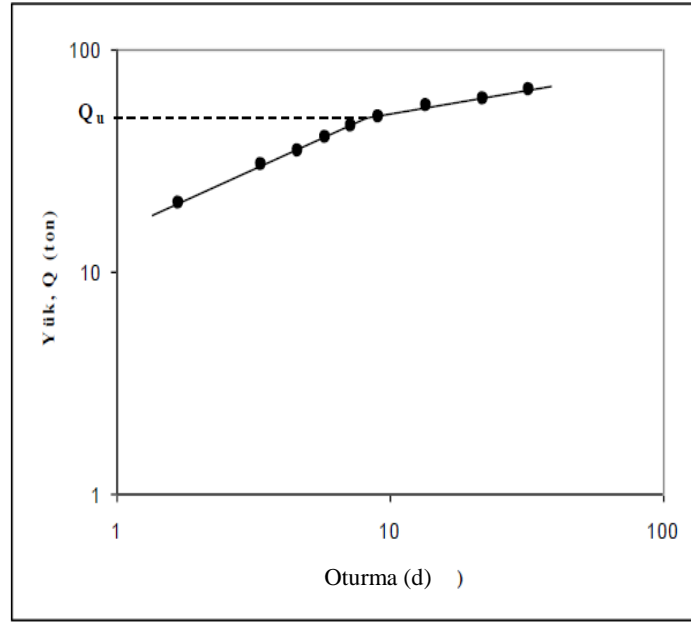
Şekil 1: Decourt Grafiği (Decourt, 1999)

Figure 1: Decourt Graphic (Decourt, 1999)

Eğilim çizgisinin düşey eksen kestiği değerin ( $C_2$ ), doğrunun eğimine ( $C_1$ ) oranı göçme yükünü ( $Q_u$ ) vermektedir.

#### Debeer Yöntemi (De Beer Method)

De Beer yönteminde yük-oturma grafiği her iki eksen de logaritmik ölçekte çizilir. Grafikteki noktalar farklı eğimlerdeki doğrular etrafında yer alır. Bu doğruların kesiştiği nokta, yapılan deneyde kazığın uygulanan yüke olan reaksiyon verdiği noktadır. Ve bu noktaya karşılık gelen yük değeri göçme yüküdür.

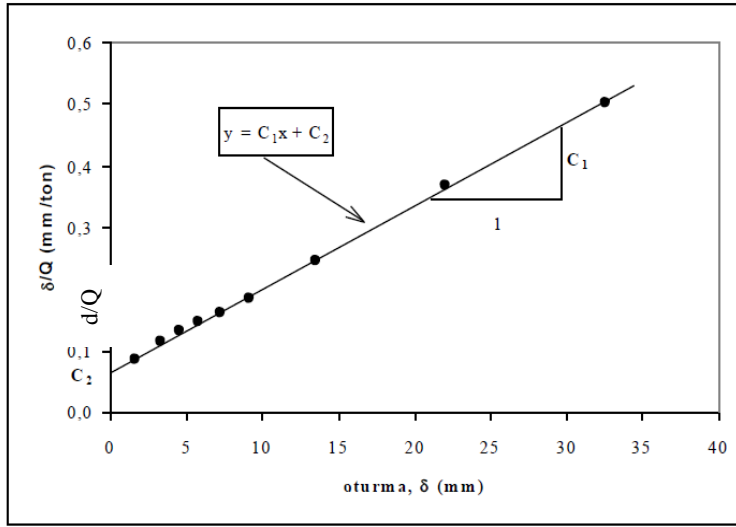


Şekil 2: De Beer Grafiği (De Beer, 1989)

Figure 2: De Beer Graphic (De Beer, 1989)

#### Chin Kondner Yöntemi (Chin Kondner Method)

Her yük değeri karşılık gelen yerdeğiştirme değerine bölünerek yerdeğiştirme/yük - yerdeğiştirme grafiği çizilir. Bu noktaların oluşturduğu doğrunun eğiminin tersi ( $1/C_1$ ) Chin Kondner yönteminin göçme yükünü verir.  $Q_u =$  Göçme yükü  $= 1/C_1$ ; Burada  $C_1$ : Chin Kondner grafiğinde doğrunun eğim değeridir.



**Şekil 3:** Chin Kondner Grafiği (Chin, 1970)

*Figure 3: Chin Kondner Graphic (Chin, 1970)*

Grafiğin doğrusal kısmındaki noktaların bir kısmının doğru dışına çıkması yükleme deneyinde beklenmedik bir test olumsuzluğunun gidişatına işaretler. Deney ile eş zamanlı olarak Chin- Kondner grafiği oluşturularak deney sürecinin kontrol edilmesi, beklenmeyen bir durum ile karşılaşıldığında anında müdahale imkan vermesi bu yöntemin uygulanmasında avantaj olarak değerlendirilebilir. Bu yöntemin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için yük arttırım kademelerindeki süre aralarının aynı olması gerekir. Ayrıca oturmaların elastik kısmı geçmediği, kazıktaki plastik oturmaların tam olarak başlamadığı deneylerde doğru sonuçlara ulaşılamaz. Ayrıca, yük arttırım kademelerinin az olduğu deneylerde  $\Delta/Q - \Delta$  grafiğini oluşturan nokta sayısının yeterli olmaması nedeniyle kullanılması uygun değildir. Chin - Kondner yönteminin diğer yöntemlere kıyasla çok daha büyük taşıma kapasiteleri verdiği bilinmektedir. Bu makale kapsamında uygulanan test nokta sayıları yeterli sayıdadır. Ayrıca deney sonuçları tek bir yöntem ile değerlendirilmemeli, mutlaka genel kabul görmüş diğer yöntemler ile kıyaslanarak yorum yapılmalıdır.

Çalışma kapsamında açıklanan her üç yöntem için seçilen proje yüklerinin zemin özellikleri incelendiğinde gerek hem kohezyonlu gerekse hem kohezyonsuz zeminler için uygulanabilir olması nedeni ile tek bir yöntem öne çıkmamaktadır. Ancak hesaplanan taşıma gücü değerleri arasında De Beer yönteminin diğer yöntemlere nazaran nispeten daha düşük değerler vermesinin nedeninin, yöntemin uygulanış şekline kaynaklandığı literatür çalışmalarından anlaşılmaktadır (Dalkılıç, 2020)

## BULGULAR (RESULTS)

Makale kapsamında derin karıştırma yöntemi ile zemin iyileştirmesi yapılan farklı projelere ait DKK'ların yükleme testi sonuçları incelenmiştir. Bu projelerin isimleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1:** İncelenen Projelerin İsimleri ve Konumu

*Table 1: Names and Location of Examined Projects*

| Proje Adı                             | Zemin Türü | Lokasyon |
|---------------------------------------|------------|----------|
| Uşak Yurt ve Sosyal Tesis Projeleri   | Siltli Kil | Uşak     |
| Gazi Anadolu Lisesi Eğitim Yerleşkesi | Kil        | Ankara   |
| Elazığ Konut Projesi                  | Siltli Kil | Elazığ   |
| Amasya Konut Projesi                  | Siltli Kum | Amasya   |
| Amasya Hastane Projesi                | Siltli Kum | Amasya   |

Yurt Binası ve Sosyal Tesisler Zemin Bilgileri Çizelge 2'de verilmiştir. Derin karıştırma kolonu

özellikleri Çizelge 3’de verilmektedir.

**Çizelge 2:** Yurt Binası ve Sosyal Tesisleri Zemin Değerleri (Özarslan, 2018)

*Table 2: Idealised Soil Informations for Usak Dormitory and Social Buildings (Özarslan, 2018)*

| Yapı türü       | Derinlik   | Zemin Değerleri             |                 |            |
|-----------------|------------|-----------------------------|-----------------|------------|
|                 |            | Zemin Sınıfı                | N <sub>60</sub> | Plastisite |
| Yurt Binası     | 0,00-7,00  | Kohezyonlu<br>(siltli kil ) | 10              | <20        |
|                 | 7,00-30,00 |                             | 20              |            |
| Sosyal Tesisler | 0,00-7,00  |                             | 10              |            |
|                 | 7,00-15,00 |                             | 20              |            |

**Çizelge 3:** Yurt Binası ve Sosyal Tesislerin DKK Özellikleri (Can, 2019)

*Table 3: Deep Mixing Columns Values for Uşak Dormitory /Social Project (Can, 2019)*

| Yapı türü       | Kolon Boyu (m) | Kolon Karışımı Su/Çimento Oranı | Karışımın Dozajı (kg/m <sup>3</sup> ) | Kolon Çapı (m) | Kolon Çevresi (m) |
|-----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------|
| Yurt Binası     | 29             | 0,80                            | 450                                   | 1              | 3,14              |
| Sosyal Tesisler | 22             | 0,80                            | 450                                   | 1              | 3,14              |

Çizelge 4 incelendiğinde; Uşak Yurt Projesine ait Yurt binası için Decourt yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü değeri, hesaplanan ve geoteknik raporda verilen taşıma gücü değerine çok yakın çıkmıştır.

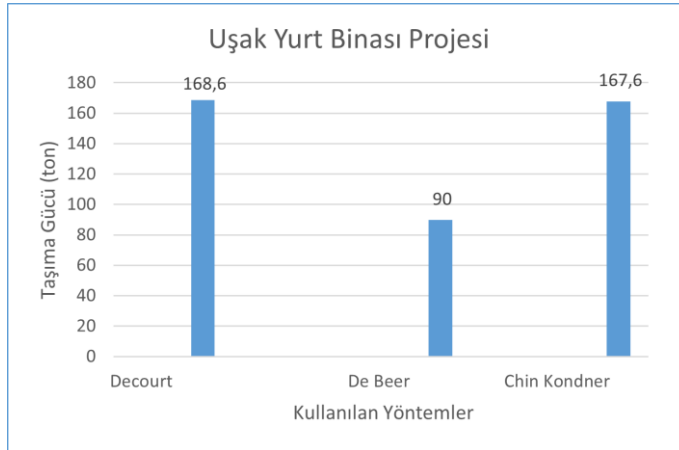
**Çizelge 4:** Uşak Yurt Binası İçin Taşıma Gücü Değerleri (Can, 2019)

*Table 4: Bearing Capacity Values for Uşak Dormitory Project (Can, 2019)*

| Uşak Yurt Projesi Yurt Binası İçin Elde Edilen Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                                 |                                      |                                 |   |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| (Q <sub>gf</sub> )<br>(Decourt )   | (Q <sub>gf</sub> )<br>(De Beer) | (Q <sub>gf</sub> )<br>(Chin Kondner) | Hesaplanan<br>(Q <sub>h</sub> ) | Geoteknik Rapor<br>(Q <sub>r</sub> ) (Proje Yüğü) |
| 168,6  | 90                              | 167,6                                | 166                             | 165   |

Çizelge 4`te gösterildiği gibi, hesaplanan taşıma gücü ile proje yükündeki taşıma gücü arasındaki fark, hesaplanan yöntemin ampirik olmasından kaynaklanmaktadır. Bu konu daha önce bazı literatürlerde tartışılmıştır (Örn. (Król ve Rybak, 2013).

Şekil 4’de Uşak yurt binası grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında Decourt ve Chin Kondner yöntemleri ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak De Beer yöntem ile hesaplanan değerler daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4 Uşak Yurt Binası taşıma gücü değerleri  
Figure 4: Bearing Capacity Values for Uşak Dormitory Project

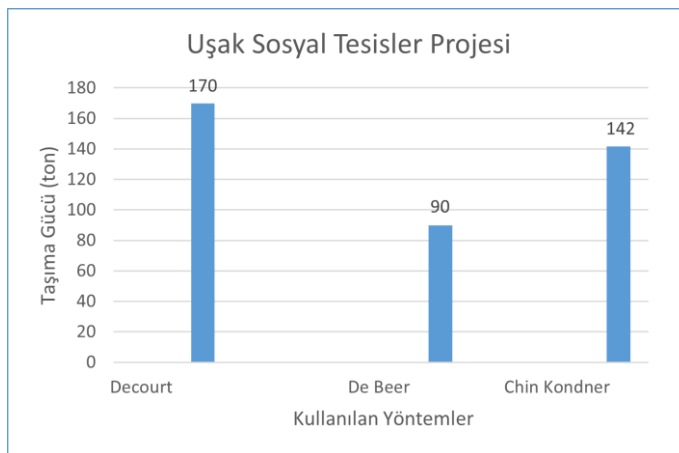
Çizelge 5 incelendiğinde; Uşak Sosyal tesis binasına ait Decourt yöntemi ile grafikten ölçülen taşıma gücü değeri, hesaplanan ve geoteknik rapor ile bulunan taşıma gücü değerinden yüksek çıkmıştır.

Çizelge 5: Uşak Sosyal Tesis Binası Taşıma Gücü Değerleri (Can, 2019)

Table 5: Bearing Capacity Values for Uşak Social Project (Can, 2019)

| Uşak Sosyal Tesis Projesi Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                         |                              |                       |   |
|---|-------------------------|------------------------------|-----------------------|---|
| $(Q_{gf})$<br>(Decourt)                               | $(Q_{gf})$<br>(De Beer) | $(Q_{gf})$<br>(Chin Kondner) | Hesaplanan<br>$(Q_h)$ | Geoteknik Rapor<br>$(Q_r)$ (Proje Yüğü) |
| 170   | 90                      | 142                          | 131                   | 128                                     |

Şekil 5’de Uşak sosyal tesisler projesi için grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında Decourt ve Chin Kondner yöntemleri ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak De Beer yöntem ile hesaplanan değerler daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5: Uşak Sosyal Tesisler Projesi Taşıma gücü Değerleri (Can, 2019)

Figure 5: Bearing Capacity Values for Uşak Social Project (Can, 2019)

Gazi Anadolu Lisesi kampüs yerleşkesi sahasına ait zemin profili Çizelge 6’da verilmiştir.

**Çizelge 6:** Gazi Anadolu Lisesi Projesine Ait Zemin Değerleri (Yaşar, 2019 )**Table 6:** Idealised Soil Informations for Gazi High School Project (Yaşar, 2019)

| Yapı Türü | Derinlik (m) | Zemin Değerleri        |                |                             |   |                          |
|-----------|--------------|------------------------|----------------|-----------------------------|---|--------------------------|
|           |              | Zemin Türü             | Kohezyon (kPa) | Zemin Sınıfı                | Birim Hacim Ağırlık (kN/ m <sup>3</sup> ) | İçsel Sürt. Açısı $\phi$ |
| Gazi AL   | 0,00-2,00    | Dolgu                  | 0              | -                           | 18  | 9                        |
|           | 2,00-9,50    | Kahverengi Çakıllı Kil | 30             | CL (Düşük Plastisiteli kil) | 18  | -                        |
|           | 9,50-15,00   | Ayrışmış Rezüdiel Marn | 100            | M (Silt)                    | 18  | -                        |

Gazi Anadolu Lisesi yerleşkesindeki yapıya ait Derin karıştırma kolonunun (DKK) özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir.

**Çizelge 7:** Gazi Anadolu Lisesi Projesine Ait (DKK) özellikleri (Yardımcı, 2019)**Table 7:** Deep Mixing Columns Values for Gazi High School Project (Yardımcı, 2019)

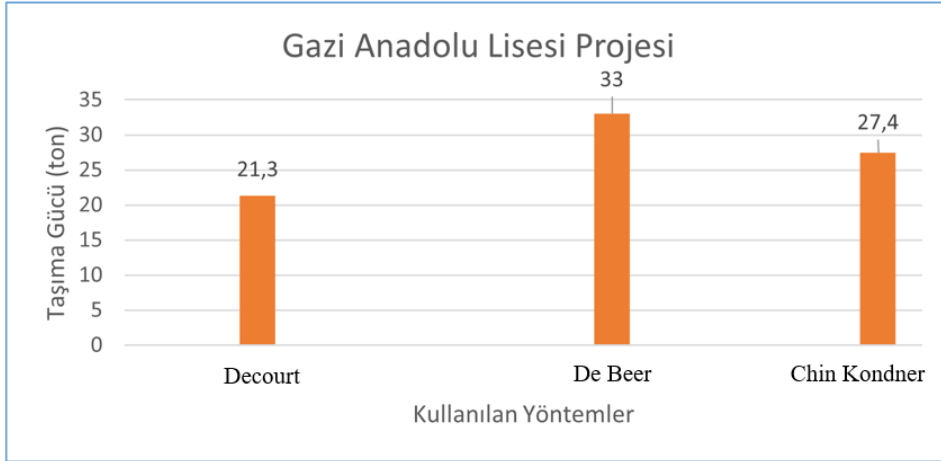
| Kolon Çapı (m) | Kolon Boyu (m) | Kolon Karışımı Su/Çimento Oranı | Karışımın Dozajı (kg/m <sup>3</sup> ) | Kolon Kesit Alanı (m <sup>2</sup> ) | Kolon Çevresi (m) |
|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 0,80           | 10             | 1                               | 400                                   | 0,5024                              | 2,512             |

Gazi Anadolu Lisesi binaları statik eksenel basınç yükleme deneyi sonucu okunan oturma değerleri dikkate alınarak Decourt yöntemine uygun hesaplanan taşıma gücü değerleri Çizelge 8'de sunulmuştur. Çizelge 8 incelendiğinde; Gazi Anadolu Lisesi Projesine ait Decourt yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü değeri ile hesaplanan taşıma gücü değeri birbirine yakın değerler vermiştir.

**Çizelge 8:** Gazi Anadolu Lisesi Projesi Taşıma Gücü Değerleri**Table 8:** Bearing Capacity Values for Gazi High School Project

| Gazi Anadolu Lisesi Projesi Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                        |                             |                      |  |
|---|------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| ( $Q_{gt}$ ) (Decourt )                                 | ( $Q_{gt}$ ) (De Beer) | ( $Q_{gt}$ ) (Chin Kondner) | Hesaplanan ( $Q_n$ ) | Geoteknik Rapor ( $Q_r$ ) (Proje Yüğü) |
| 21,3  | 33                     | 27,4                        | 25                   | 33                                     |

Şekil 6'da Gazi Anadolu Lisesi projesi için grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında her üç yöntem ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 6: Gazi Anadolu Lisesi Projesi Taşıma gücü Değerleri

Figure 6: Bearing Capacity Values for Uşak Social Project

Elazığ konut projesine ait zemin profili Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9: Elazığ Konut Projesine Ait Zemin Değerleri (Nemli, 2020)

Table 9: Idealised Soil Informations for Elazığ Building Project (Nemli, 2020)

| Yapı Türü    | Derinlik (m) | Zemin Değerleri |                  |                |   |
|--------------|--------------|-----------------|------------------|----------------|---|
|              |              | Tabaka          | Zemin Türü       | Kohezyon (kPa) | Zemin Sınıfı                              |
| Elazığ Konut | 1,50-8,00    | 1.tabaka        | Siltli kumlu kil | 77             | Kil                                       |
|              | 8,00-10,50   | 2.tabaka        | Siltli kumlu kil | 231            |   |
|              | 10,50-11,50  | 3.tabaka        | Çakıllı Kil      | 170            |   |
|              |              |                 |                  |                | Birim Hacim Ağırlık (kN/ m <sup>3</sup> ) |
|              |              |                 |                  |                | 19  |

Elazığ konut projesi kapsamındaki yapıya ait Derin karıştırma kolonunun (DKK) özellikleri Çizelge 10 da verilmiştir.

Çizelge 10: Elazığ Konut Projesine Ait DKK Özellikleri (Yardımcı, 2019)

Table 10: Deep Mixing Columns Values for Elazığ Building Project (Yardımcı, 2019)

| Kolon Çapı (m) | Kolon Boyu (m) | Kolon Karışımı Su/Çimento Oranı | Karışımın Dozajı (kg/m <sup>3</sup> ) | Kolon Kesit Alanı (m <sup>2</sup> ) | Kolon Çevresi (m) |
|----------------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 0,80           | 11,5           | 1                               | 450                                   | 0,5024                              | 2,512             |

Elazığ Konut Projesi binaları statik eksenel basınç yükleme deneyi sonucu okunan oturma değerleri dikkate alınarak Decourt yöntemine uygun hesaplanan taşıma gücü değerleri Çizelge 11’de sunulmuştur.

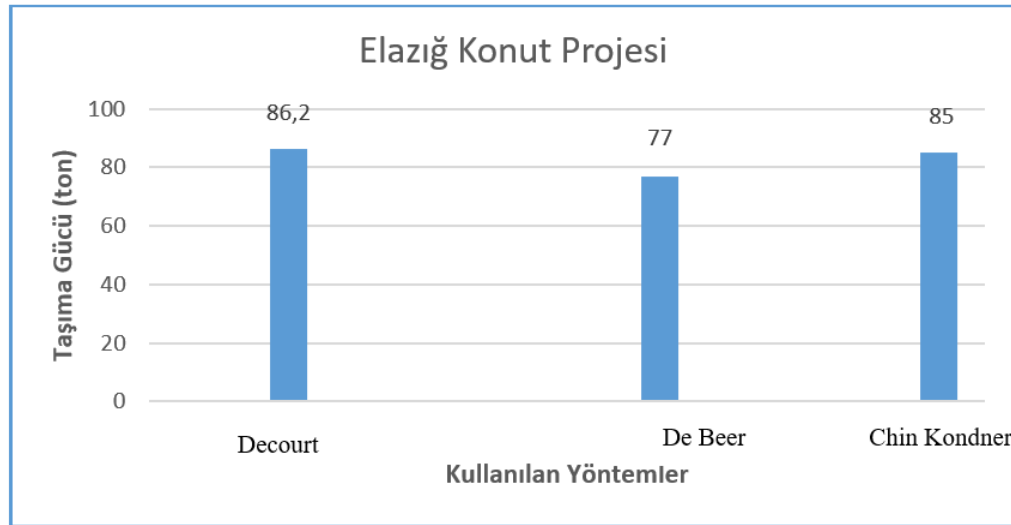
Çizelge 11 incelendiğinde; Elazığ Konut Projesine ait Decourt yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü değeri ile hesaplanan ve geoteknik raporda verilen taşıma gücü değerleri birbirine yakın değerler olarak çıkmıştır.



**Çizelge 11: Elazığ Konut Projesi İçin Decourt Yöntemi İle Elde Edilen Taşıma Gücü Değerleri***Table 11: Bearing Capacity Values for Elazığ Building Project*

| Elazığ Konut Projesi Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                           |                                |                         |   |
|--|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|
| ( $Q_{gf}$ )<br>(Decourt)                        | ( $Q_{gf}$ )<br>(De Beer) | ( $Q_{gf}$ )<br>(Chin Kondner) | Hesaplanan<br>( $Q_h$ ) | Geoteknik Rapor<br>( $Q_r$ ) (Proje Yüğü) |
| 86,2   | 77                        | 85                             | 82,5                    | 72  |

Şekil 7’de Elazığ konut projesi için grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında her üç yöntem ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7: Elazığ Konut Projesi Taşıma gücü Değerleri

*Figure 7: Bearing Capacity Values for Elazığ Building Project*

Amasya konut projesine yönelik jeolojik ve jeoteknik araştırma çalışmalarından oluşan idealize zemin profili Çizelge 12 de sunulmuştur.

**Çizelge 12: Amasya Konut Projesine Ait Zemin Değerleri (Durmuş, 2019)***Table 12: Idealised Soil Informations for Amasya Building Project (Durmuş, 2019)*

| Yapı Türü    | Derinlik (m) | Tabaka   | Zemin Değerleri |                     |                             |
|--------------|--------------|----------|-----------------|---------------------|-----------------------------|
|              |              |          | Zemin Türü      | Birim Hacim Ağırlık | İçsel Sürtünme Açısı $\phi$ |
| Amasya Konut | 4,00-12,00   | 1.tabaka | Siltli Kum      | 18                  | 25                          |
|              | 12,00-15,00  | 2.tabaka | Siltli Kum      | 18                  | 28                          |
|              | 15,00-21,00  | 3.tabaka | Siltli Kum      | 18                  | 32                          |

Amasya konut projesi kapsamındaki yapıya ait Derin karıştırma kolonunun (DKK) özellikleri Çizelge 13’de verilmiştir.

**Çizelge 13 :Amasya Konut Projesine Ait DKK özellikleri (Can, 2020)***Table 23 : Deep Mixing Columns Values for Amasya Building Project (Can, 2020)*

| Kolon Çapı (m) | Kolon Boyu (m) | Kolon Su/Çimento Oranı | Karışımın Dozajı ( $kg/m^3$ ) | Kolon Kesit Alanı ( $m^2$ ) | Kolon Çevresi (m) |
|----------------|----------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1              | 17             | 1                      | 400                           | 0,785                       | 3,14              |

Amasya Konut Projesi binaları statik eksenel basınç yükleme deneyi sonucu okunan oturma değerleri dikkate alınarak Decourt yöntemine uygun çizilen grafik Şekil 8’de gösterilmiştir.

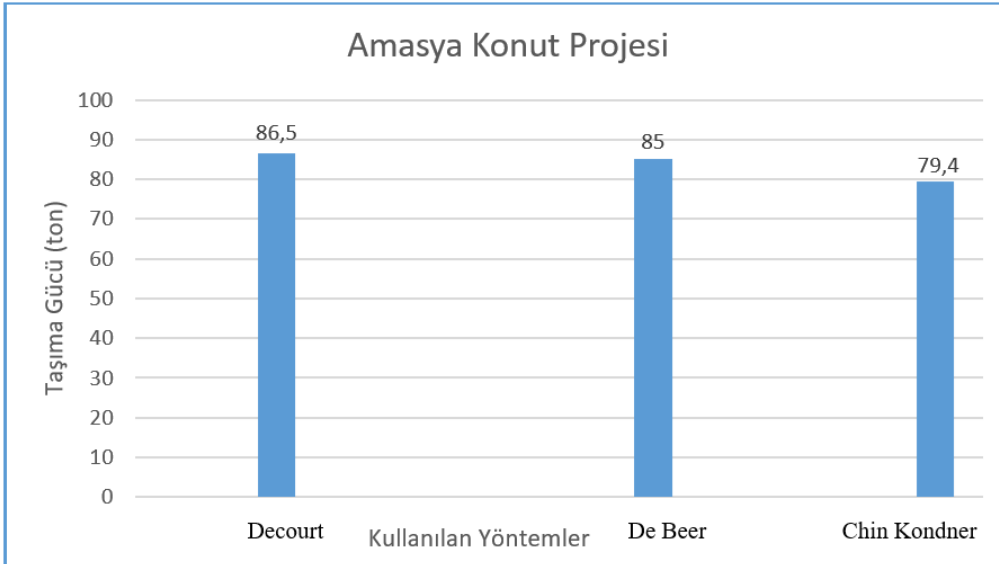
Çizelge 14 incelendiğinde; Amasya Konut Projesine ait Decourt yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü değeri ile hesaplanan taşıma gücü değeri birbirine yakın değerler olarak çıkmıştır.

**Çizelge 14:** Amasya Konut Projesi Taşıma Gücü Değerleri

*Table 14: Bearing Capacity Values for Amasya Building Project*

| Amasya Konut Projesi Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                           |                                |                         |   |
|--|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|---|
| ( $Q_{gf}$ )<br>(Decourt)                        | ( $Q_{gf}$ )<br>(De Beer) | ( $Q_{gf}$ )<br>(Chin Kondner) | Hesaplanan<br>( $Q_h$ ) | Geoteknik Rapor<br>( $Q_r$ ) (Proje Yüğü) |
| 86,5   | 85                        | 79,4                           | 76                      | 83,4                                      |

Şekil 8’de Amasya konut projesi için grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında her üç yöntem ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



**Şekil 8:** Amasya Konut Projesi Taşıma gücü Değerleri

*Figure 8: Bearing Capacity Values for Amasya Building Project*

Amasya Hastane projesine ait zeminin mühendislik değerleri Çizelge 15’de verilmiştir.

**Çizelge 15:** Amasya Hastane Projesi Zemin Değerleri (Durmuş, 2019)

*Table 15: Idealised Soil Informations for Amasya Hospital Project (Durmuş, 2019)*

| Yapı Türü      | Derinlik (m) | Zemin Değerleri |                                  |                                 |                                 |
|----------------|--------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                |              | Zemin           | Birim Hacim Ağırlık ( $kN/m^3$ ) | İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) | İçsel Sürtünme Açısı ( $\phi$ ) |
| Hastane Binası | 0,00-27,00   | SM (Siltli kum) | 17                               | 34                              | 25                              |

Amasya Hastane projesi kapsamındaki yapıya ait Derin karıştırma kolonunun (DKK) özellikleri Çizelge 16 da verilmiştir.

**Çizelge 36** : Amasya Hastane Projesine Ait DKK özellikleri (Can, 2020)*Table 46: Deep Mixing Columns Values for Amasya Hospital Project (Can, 2020)*

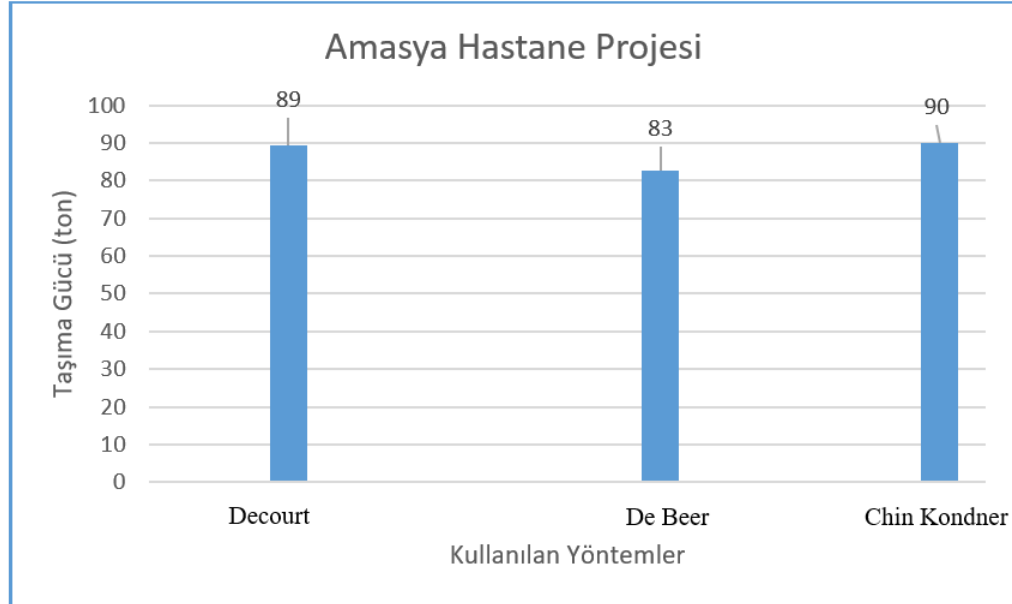
| Kolon Çapı (m) | Kolon Boyu (m) | Kolon Su/Çimento Oranı | Karışımın Dozajı Kg/m <sup>3</sup> | Kolon Kesit Alanı (m <sup>2</sup> ) | Kolon Çevresi (m) |
|----------------|----------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 0,80           | 15             | 1,0                    | 300                                | 0,5024                              | 2,512             |

Amasya Hastane Projesi binaları statik eksenel basınç yükleme deneyi sonucu okunan oturma değerleri dikkate alınarak Decourt yöntemine uygun çizilen grafik Şekil 9'da gösterilmiştir. Çizelge 17 incelendiğinde; Amasya Hastane Projesine ait Decourt yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü değeri ile hesaplanan taşıma gücü değeri birbirine yakın değerler olarak çıkmıştır.

**Çizelge 17:** Amasya Hastane Projesi Taşıma Gücü Değerleri (Özyürek, 2015).*Table 17: Bearing Capacity Values for Amasya Hospital Project*

| Amasya Hastane Projesi Taşıma Gücü Değerleri (ton) |                              |                                   |                              |  |
|--|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--|
| (Q <sub>gf</sub> ) (Decourt)                       | (Q <sub>gf</sub> ) (De Beer) | (Q <sub>gf</sub> ) (Chin Kondner) | Hesaplanan (Q <sub>h</sub> ) | Geoteknik Rapor (Q <sub>r</sub> ) (Proje Yüğü) |
| 89,3   | 83                           | 90                                | 75,5                         | 97   |

Şekil 9'da Amasya hastane projesi için grafik yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri çubuk diyagram olarak gösterilmiştir. Çubuk diyagram incelendiğinde; farklı yöntemlerle hesaplanan taşıma gücü değerleri açısından bakıldığında her üç yöntem ile hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

**Şekil 9:** Amasya Hastane Projesi Taşıma gücü Değerleri*Figure 9: Bearing Capacity Values for Amasya Hospital Project*

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmada zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan ve son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlanan derin karıştırma yöntemi ile oluşturulan derin karıştırma kolonlarının (DKK) kolonlarının yük-oturma ilişkisi üzerinden taşıma gücü değerleri incelenmiştir. Makale kapsamında Uşak İli Yurt Projesi ve Sosyal Tesisler projesi, Gazi Anadolu Lisesi Eğitim Yerleşkesi Projesi, Elazığ Konut Projesi, Amasya

Konut Projesi ve Amasya Hastane Projelerine ait sahada uygulanan Derin Karıştırma Kolonu çalışma verileri irdelenmiştir. Belirtilen sahalarda imal edilen DKK kolonlarına tam ölçekli yükleme deneyleri tatbik edilmiş ve her bir yük değerine karşılık gelen oturma verileri grafiksel olarak çizildikten sonra, literatürde kullanılan kapasite tahmin yöntemleri kullanılarak kolonun taşıma gücü değeri bulunup sonuçlar değerlendirilmiştir. Eksenel yükleme deneyleri tüm projelerde test yöntemi gereği hesaplanan yükün %25-50-75 ve % 100 ü ne karşılık gelecek şekilde uygulanmıştır. Uygulamada seçilen yöntemler ile göçme yükü belirlemek için grafik üzerinde uygulama biçimi açısından herhangi harici bir işlem yapılmamaktadır, bu nedenle bulunan değerler analitik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlara yakın değerler elde edilmesine neden olmuştur. Uşak yurt projesi için Decourt ve Chin Kondner yöntemleri ile hesaplanan taşıma gücü değerleri birbirine yakın değerler vermiş olmakla beraber, en yüksek taşıma gücü değeri 168,6 ton ile Decourt yöntemine aittir. Gazi Anadolu Lisesi Eğitim Yerleşkesi projesi her üç yöntem içinde en yüksek taşıma gücü değeri 33 ton ile De Beer yöntemi vermiştir. Elazığ konut projesi için her üç yöntem içinde tahmin edilen taşıma gücü değerleri birbirine yakın olup, en yüksek taşıma gücü değeri 86,2 ton ile Decourt yöntemine aittir. Amasya konut projesi için her üç yöntem içinde bulunan taşıma gücü değerleri birbirine yakın olup, en yüksek taşıma gücü değeri 86,5 ton ile Decourt yöntemi vermiştir. Amasya Hastane projesi her üç yöntem içinde bulunan değerler birbirine çok yakın olup, en yüksek taşıma gücü değeri 90 ton ile Chin Kondner yöntemi vermiştir. Bu yöntemlerden elde edilen göçme yükü değerlerine bakıldığında şunlar söylenebilir; uygulanan yöntemlerin içinden en büyük göçme yüklerini genelde Chin Kondner ve Decourt yöntemleri, en küçüklerini ise De Beer yöntemleri vermektedir. Beş farklı proje arasında Decourt ve Chin Kondner yöntemi ile grafikten okunan taşıma gücü ile hesaplanan taşıma gücü değerleri arasındaki yakınlık nedeni ile başarılı bir tahmin ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Debeer yöntemi ile uşak yurt ve sosyal tesisler projeleri için grafiksel olarak bulunan DKK kolon taşıma gücü değeri diğer yöntemlere oranla düşük çıkmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, derin karıştırma kolonlarının taşıma gücü hesap tasarımında geleneksel yöntemler ile yapılan analizlerin yanı sıra saha deneyleri sonucu elde edilen verilerin Decourt Yöntemi, De Beer Yöntemi ve Chin Kondner Yöntemleri ile sonuçların karşılaştırılması olarak detaylı bir şekilde irdelenmesi başarılı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Bir başka çalışmada De beer yöntemi diğer geleneksel yöntemlerle birlikte değerlendirilmiş ve De beer yöntemi taşıma gücü değerleri ve istatistiki veriler, bu yöntemin diğer yöntemler arasında daha düşük sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur (Dalkılıç, 2020).

Sahada taşıma gücü tayinini belirlemek fiziksel ve ekonomik olarak güç olabilmektedir. Bu yöntemlerin fiziksel olarak uygulanmasının zor olduğu projelerde, seçilen bu ampirik yöntemler sahaya çalışmalara rehber olması açısından ışık tutabilmektedir. Bazı durumlarda sahada deneysel olarak uygulanabilen projeler olabilirken ampirik yöntemler pratikliği ve sonuç elde edilmesi açısından mühendisler için yardımcı olabilmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Can, A., 2019, Şubat, Uşak İli Yurt Binası ve Sosyal Tesis Yapım İşine Ait Derin Karıştırma Kolonu Yükleme Testi Raporu, İksa Mühendislik A.Ş.
- Can, A., 2020, Temmuz Amasya Merkez Hastane Projesi Derin Karıştırma Kolonu Yükleme Testi Raporu, İksa Mühendislik A.Ş.
- Chin, F. K., 1970, "Estimation of Pile Not Carried to Failure", *Proceedings 2nd Souteast Asian Conference on Soil Engineering*, Singapore, ss. 81-90.
- Chompoorat, T., Thepumong, T., Khamplo, A., Likitlersuang, S., 2022, "Improving mechanical properties and shrinkage cracking characteristics of soft clay in deep soil mixing", *Construction and Building Materials*, Cilt 316.
- Dalkılıç, B., 2020, *Göçme Durumuna Ulaşmamış Kazık Yükleme Deneylerinde Nihai Kazık Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- De Beer, E. E., Wallays, M., 1989, "Franki Piles with Over expanded Bases", *La Technique des Travaux*, Sayı 333, ss. 48.

- Decourt, L., 1999, "Behaviour of Foundations Under Working Load Conditions", *Proc. of the 11th Pan-American Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Dolguassu, Brasil, Cilt 4, ss. 453-488.
- Durmuş, S., 2019, Haziran, Amasya Merkez Konut İnşaatı Projesi Zemin ve Temel Etüd Veri Raporu, İksa Mühendislik A.Ş.
- Erbeyoğlu, E., 2019, *Derin Zemin Karıştırma Yöntemi İle İyileştirme Yapılan Zeminlerde Taşıma Gücü Dağılımının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta
- Kaya, Z., 2016, *Derin Karıştırma Kolonlarının Ölçülen ve Hesaplanan Kapasitelerinin Tam Ölçekli Yükleme Deneyleri İle İncelemesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Król, M., Rybak, J., 2013, "Accuracy of extrapolation methods for non-failed static load tests", *Vplyv vody na geotechnické konštrukcie*, 03.- 04. júna 2013, Bratislava, Slovakia: ss. 285-294.
- Liu, K-W., Rowe R. K., 2015, "Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns", *Geotextiles and Geomembranes*, Cilt 43, ss. 567-578.
- Nakao, K., Inazumi, S., Takaue, T., Tanaka, S., Shinoi, T., 2021, "Visual evaluation of relative deep mixing method type of ground-improvement method", *Results in Engineering*, Cilt 10.
- Nemli, S., 2020, Mart, Elazığ Merkez İlçesi Konut İnşaatı Projesi Geoteknik Değerlendirme Hesap Raporu, İksa Mühendislik A.Ş.
- Özarslan, M., 2018, Ekim Uşak İli Kaşbelen Mahallesi Yurt Binası ve Sosyal Tesis Yapım İşine Ait revize Geoteknik Rapor ve Zemin İyileştirme Projesi, İksa Mühendislik A.Ş.
- Özyürek, Y. E., 2015, Aralık Amasya Merkez Hastane Projesi Geoteknik Tasarım Raporu. İksa Müh. A.Ş.
- Rashid, A. S. A., Black, J. A., Kueh, A. B. H., Noor, N. M., 2015, "Behaviour of weak soils reinforced with soil cement columns formed by the deep mixing method: Rigid and flexible footings", *Measurement*, Cilt 68, ss. 262-279.
- Suksiripattanapong, C., Sakdinakorn, R., Tiyasangthong, S., Wonglakorn, N., Phetchuay, C., Tabyang, W., 2022, "Properties of soft Bangkok clay stabilized with cement and fly ash geopolymer for deep mixing application", *Case Studies in Construction Materials*, Cilt 16.
- Tuğçe, F., 2016, *Derin Karıştırma Yönteminde İyileştirme Seviyesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Yardımcı, Z., 2019, Aralık Gazi Anadolu Lisesi Projesi Derin Karıştırma Kolonu Yükleme Testi Raporu. İksa Mühendislik A.Ş.
- Yardımcı, Z., 2020, Temmuz, Elazığ Merkez İlçesi Konut İnşaatı Projesi Derin Karıştırma Kolonu Yükleme Testi Raporu. İksa Mühendislik A.Ş.
- Yardımcı, Z., 2020, Ağustos, Amasya Merkez Konut İnşaatı Projesi Derin Karıştırma Kolonu Yükleme Testi Raporu. İksa Mühendislik A.Ş.
- Yaşar, Y., 2019, Ekim, Gazi Anadolu Lisesi Projesi Geoteknik Değerlendirme Raporu. İksa Mühendislik A.Ş.



## GENTAMİSİN YÜKLÜ POLİ(VİNİL ALKOL)/JELATİN NANOFİBERLERİN ELEKTROEĞİRME YÖNTEMİYLE YARA ÖRTÜSÜ MALZEMESİ OLARAK ÜRETİLMESİ

Sümeyye CESUR

Marmara Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Biyomalzeme Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul, TÜRKİYE  
[sumeyye.cesur@marmara.edu.tr](mailto:sumeyye.cesur@marmara.edu.tr)

Geliş/Received: 02.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.09.2022

**ÖZ:** İyi antimikrobiyal performansa ve cilt yenileme kabiliyetine sahip nanofiber polimer yapı iskelelerine dayalı yara örtüleri, yara enfeksiyonunu önlemek ve yara iyileşmesini hızlandırmak için umut verici seçeneklerdir. Bu çalışmada, yara örtüsü uygulamaları için Gentamisin (GEN) yüklü polivinil alkol ve jelatin (PVA/JEL) nanofiberleri elektroegirme yöntemi ile başarıyla üretilmiştir. Üretilen nanofiberlerin mekanik mukavemetini arttırmak ve hızlı bozulmalarını önlemek için glutaraldehit (GA) buharı ile çapraz bağlama yapılmıştır. Nanofiberlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri incelendiğinde, boncuksuz düzgün bir yapıya sahip oldukları ve yüzeyde ilaç kristalleri ve kümeleri görülmediği gözlemlendi. Ayrıca PVA/JEL, PVA/JEL/0.25GEN ve PVA/JEL/0.5GEN nanofiberlerinin ortalama çapları sırasıyla  $278 \pm 40$  nm,  $373 \pm 68$  nm ve  $493 \pm 105$  nm olarak ölçüldü. Nanofiber içerisindeki ilaç miktarındaki artış fiber çaplarında az bir artışa neden olsa da fiber morfolojilerini olumsuz etkilememiştir. Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile PVA, JEL ve GEN arasındaki etkileşim kanıtlanmıştır. Çekme testine göre, PVA/JEL nanofiberi,  $6.31 \pm 0.23$  MPa'lık bir gerilme mukavemetine sahiptir. Ağırlıkça %0.25 ve %0.5 GEN, bu PVA/JEL nanofiberlerine ayrı ayrı yüklendiğinde, gerilme mukavemetleri sırasıyla  $4.30 \pm 0.58$  ve  $3.95 \pm 0.24$  MPa idi. GEN miktarı arttıkça mekanik mukavemetinin saf nanofibere göre zayıfladığı gözlemlenmiştir. Antimikrobiyal aktivite sonuçlarına bakıldığında, PVA/JEL/0.25GEN nanofiberinde herhangi bir antibakteriyel etki görülmezken PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinde antibakteriyel etki görülmüştür. Antibakteriyel etki görülen PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinde ilaç salım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlaç salım sonuçlarına göre, GEN' in nanofiberden 264 saate kadar uzayan bir salım profili sergilediği gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, GEN içeren nanofiberler, doku mühendisliği ve yara örtüsü uygulamalarında umut verici bir potansiyele sahip olabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Yara örtüsü, Nanofiber, Polimerler, Elektroegirme, Gentamisin

### Production of Gentamycin-Loaded Poly(Vinyl Alcohol)/Gelatin Nanofiber by Electrospinning Method as Wound Dressing Material

**ABSTRACT:** Wound dressings based on nanofiber polymer scaffolds with good antimicrobial capacity and skin regeneration ability are hopeful alternatives for hindering wound infection and speeding wound healing. In this study, Gentamicin (GEN) loaded polyvinyl alcohol and gelatin (PVA/GEL) nanofibers were successfully produced by electrospinning for wound dressing applications. In order to increase the mechanical strength of the produced nanofibers and to prevent their rapid deterioration, crosslinking was done with glutaraldehyde (GA) vapor. When the scanning electron microscopy (SEM) images of the nanofibers were examined, it was observed that they had a smooth structure without beads and no drug crystals and clusters were observed on the surface. In addition, the mean diameters of PVA/JEL, PVA/JEL/0.25GEN and PVA/JEL/0.5GEN nanofibers were measured as  $278 \pm 40$  nm,  $373 \pm 68$  nm and  $493 \pm 105$  nm, respectively. Although the increase in the amount of drug in the nanofiber caused a slight increase in the fiber diameters, it did not adversely affect the fiber morphologies. The interaction between Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and PVA, GEL, and GEN has been proven. According to the tensile

test, the PVA/JEL nanofiber has a tensile strength of  $6.31 \pm 0.23$  MPa. When 0.25% and 0.5% by weight GEN were loaded into these PVA/JEL nanofibers separately, their tensile strengths were  $4.30 \pm 0.58$  and  $3.95 \pm 0.24$  MPa, respectively. It was observed that as the amount of GEN increased, its mechanical strength weakened compared to the pure nanofiber. Considering the antimicrobial activity results, no antibacterial effect was observed in the PVA/GEL/0.25GEN nanofiber, while the antibacterial effect was observed in the PVA/GEL/0.5GEN nanofiber. Drug release studies have been carried out on PVA/GEL/0.5GEN nanofibers with antibacterial effects. Based on the drug release results, it was observed that GEN exhibited a release profile extending from nanofiber up to 264 hours per hour. Considering all the results, GEN-containing nanofibers may have promising potential in tissue engineering and wound dressing applications.

**Keywords:** Wound dressing, Nanofiber, Polymers, Electrospinning, Gentamicin

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deri, yumuşak doku olarak sınıflandırılan vücudun en büyük organıdır. Nemi korumaktan, vücut ısısını düzenlemekten, mikroplara ve yara, yanık, travma gibi zararlı dış etkenlere karşı korumaktan ve duyuları aktarmaktan sorumludur (Foroutan Koudehi ve Zibaseresht, 2020; Konop ve diğ., 2018). Kendini yenileme özelliği gösterir ancak ağır, yoğun yaralanmalarda ve derin yaralarda iyileşme süreci zordur (Ahlawat ve diğ., 2019). Yara örtüleri, belirli türdeki yaraların iyileşmesini desteklemede önemli bir işleve sahiptir (Bakhsheshi-Rad ve diğ., 2020). İdeal bir yara örtüsü nemli bir ortamı destekleme, gaz alışverişine izin verme, mikroorganizmalara engel olma, aşırı eksüdalara ortadan kaldırma ve geniş spektrumlu bir antimikrobiyal ajan ekleyerek düşük bakteri maruziyeti sağlama gibi belirli özelliklere sahip olmalıdır (Xi ve diğ., 2018). Ayrıca yaraya yapışmamalıdır, böylece pansuman değişiminde granülasyon dokusuna zarar vermezler. Deri yaralarının acil bakımının da mikrobiyal enfeksiyon ve trans-epidermal su kaybının önlenmesi için önemli olduğu iddia edilmektedir (Sikareepaisan ve diğ., 2011). Birincil pansumanların çok sınırlı kullanıma sahip olması ve ideal bir yara örtüsü özelliklerinin çok azını yerine getirmesi, yeni interaktif pansumanların iyileşme sürecini hızlandırabilir (Pásztor ve diğ., 2017). Şu anda polimerik malzemelerden hazırlanan nanofiberler mevcut yara tedavilerine ilgi çekici alternatiflerdir. Ultra ince, lifli yapı, yüksek yüzey alanı ve nano gözeneklilik ile karakterize edilen bu fiberler, yara iyileştirme uygulamaları için araştırılmakta ve kullanılmaktadır (Abrigo ve diğ., 2014). Nano yapıları üretmek için dondurarak kurutma, elektroçirime ve 3D baskı gibi birçok yöntem vardır. Tüm bu yöntemler arasında elektro çirime, en kolay ve uygun maliyetli yöntemdir (Kumar ve diğ., 2018).

Elektroçirime, polimer çözeltilerinden veya eriyiklerden birkaç mikrometre ile birkaç yüz nanometre aralığında çaplara sahip fiberler üretmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Abrigo ve diğ., 2014). Bir jetten püskürtülen polimer solüsyonunu elektrik alanı altında nanofibere dönüştürür (Reneker ve diğ., 2007). Nanofiber oluşumu, voltaj, akış hızı, kollektör tipi, iğne ile kollektör arasındaki mesafe ve çözeltili özelliklerine bağlıdır (Angammana ve Jayaram, 2016). Yara örtüleri olarak kullanım için fiberlerin göze çarpan yönleri, ilaç moleküllerinin sürekli olarak yayılmasını sağlayan yüksek yüzey-hacim oranına sahip birbirine bağlı gözenekli yapılarıdır. İlaçların sürekli salımı, taşıyıcı olarak fiberler kullanılarak sağlanabilir. Nanofiberlere dayalı ilaç dağıtım sistemleri, terapötik etkinliği, biyoyararlanımı iyileştirebilir, toksisiteyi azaltabilir ve ilaçları belirli bir süre boyunca etki alanına kontrollü bir oranda vererek hasta uyumunu artırabilir (Wutticharoenmongkol ve Samanmak, 2021). Doğal ve sentetik polimerlerden üretilen nanoliflerin, ilaç taşıma sistemleri olarak yara iyileştirme tedavilerinde umut verici olduğu bulunmuştur.

Doğal ve sentetik polimerler arasında polivinil alkol (PVA) ve jelatin (JEL) gibi polimerler ve bunların karışımları yara örtüleri ve doku mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. PVA, uygun kimyasal ve termal stabiliteye sahip yarı kristalize hidrofilik bir polimerdir. Fizyolojik ortamlarda biyolojik olarak parçalanabilirliği, PVA'nın en büyük avantajlarından biridir (Koudehi ve Pourmortazavi, 2018). Ayrıca toksik olmayışı, iyi oksijen geçirgenliği ve ilaç yükleme etkinliği nedeniyle de tercih edilmektedir (Cesur ve diğ., 2022). Cilt ile temasında herhangi bir hasara neden olmaz. Bu nedenle, doku mühendisliği ve yara örtüsü alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aadil ve diğ., 2018). PVA'nın

çapraz bağlanması, kullanım sırasında fiziksel stabiliteyi iyileştirmek ve şişme derecesini kontrol etmek için borik asit, diizosiyanat, glioksal ve glutaraldehit kullanılarak gerçekleştirilebilir (Wutticharoenmongko ve diğ., 2021). JEL, toksik olmaması, biyolojik uyumluluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği ve hücre dışı bir doku matrisi olan kollajene benzer yapısı nedeniyle doku mühendisliği, hedefe yönelik ilaç dağıtımı ve yara örtüsü gibi biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ohyabu ve diğ., 2014). JEL, literatürde özellikle inflamatuvar ilaçlar, antineoplastik bileşikler, antibakteriyel ajanlar, nükleik asitler ve hidrofobik materyaller için bir ilaç taşıyıcı sistem olarak kullanılmaktadır.

Polimerlerin üstün sitouyumluluğu olmasına rağmen, antibakteriyel özellikleri yaralardaki enfeksiyonları önleme açısından yetersizdir (Bakhsheshi-Rad ve diğ., 2019). Bu nedenle, yara iyileşme süresini kısaltmak için yara örtüsü malzemeleri için ek bir temel gereksinim, ilaçların yara bölgesine hedefli olarak verilmesidir (Lv ve diğ., 2018). Polimerler, enfeksiyonların önlenmesi için sürekli ve kontrollü antibiyotik salım sistemleri oluşturmak için ilaç taşıyıcıları olarak uygulanmıştır (Tao ve diğ., 2019). Bu bağlamda, gentamisin (GEN), çok çeşitli (Gram-pozitif ve Gram-negatif) bakterilere karşı etkili olduğu için çok sayıda bakteriyel enfeksiyonun tedavisinde güçlü bir antibiyotik olarak kullanılmaktadır. Kondaveeti ve diğ. PVA bazlı bir yara örtüsüne GEN eklenmesinin, GEN'in olası etkisinden dolayı geleneksel ürünlere kıyasla yara iyileşmesini arttırdığını ve ardından yaranın enfeksiyonunu azalttığını göstermektedir (Kondaveeti ve diğ., 2018).

Bu çalışmada, yara örtüsü uygulamalarında geleneksel yöntemlerin dezavantajlarını baskılayarak yara kapanmasını hızlandıran, GEN ilacı ile yüklenmiş PVA/JEL nanofiberleri elektroçirme yöntemi ile üretilmiştir. Nanofiberlerin taramalı elektron mikroskopu (SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), mekanik özellikleri, salım davranışları ve antibakteriyel aktivitesi incelenmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Polivinil alkol (PVA, Molekül ağırlığı = 89.000–98.000, %99 hidrolize), jelatin (JEL, sığır derisinden, B tipi), fosfat tamponlu tuzlu su (PBS, pH=7.4), glutaraldehit (GA) solüsyonu (H<sub>2</sub>O içinde ağırlıkça %25, Mw~100.12) ve gentamisin (GEN) solüsyonu Sigma Aldrich (Saint Louis, MO, ABD) firmasından satın alındı. Tween 80, Merck'ten (Merck KGaA, 64271, Almanya) satın alındı.

### Çözeltinin Hazırlaması ve Karakterizasyonu (Preparation and Characterization of Solution)

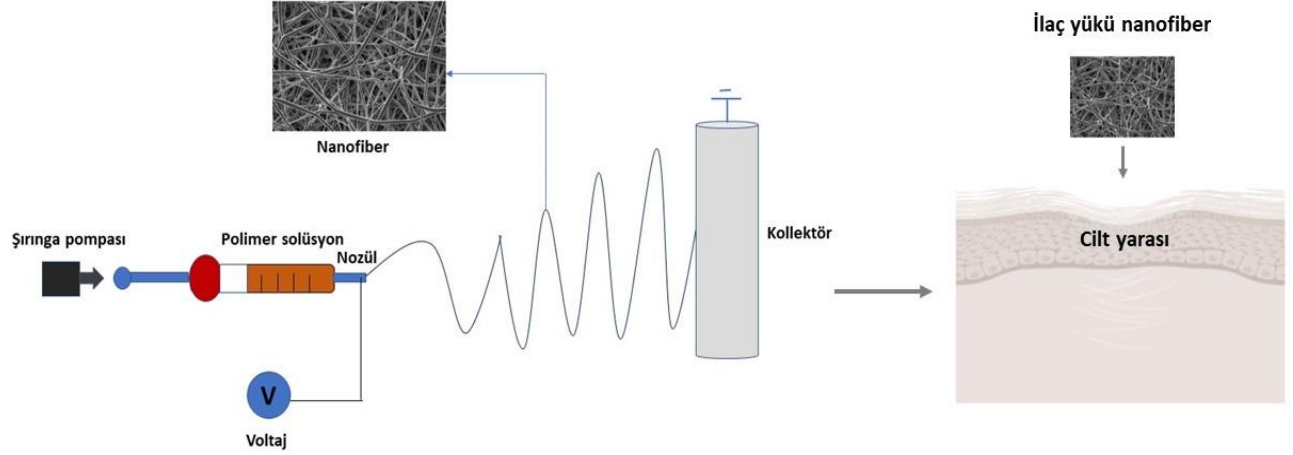
%13 PVA (w/v) tozu 20 ml saf su içinde 90°C'de ve yaklaşık 1 saat manyetik karıştırıcıda (Wise Stir®, MSH-20 A, Almanya) karıştırılarak çözüldürüldü. Yüzey gerilimini azaltmak için, PVA çözeltisine damla damla ağırlıkça %3 Tween 80 ilave edildi ve çözelti, 15 dakika daha karıştırıldı. Bunu takiben çözeltiye sığır derisinden elde edilen ağırlıkça %0.5 JEL eklendi ve çözelti 60 °C'de 15 dakika karıştırıldı. Son olarak iki farklı oranda ağırlıkça %0.25 ve %0.5 GEN çözeltilere ayrı ayrı eklenmiş ve 1 saat karıştırıcıda karıştırılmıştır. Çapraz bağlama malzemesi olarak GA kullanılmıştır. Hazırlanan elektroçirme çözeltilerinin fiziksel karakterizasyonunu belirlemek için yoğunluk, elektriksel iletkenlik, yüzey gerilimi ve viskozite değerleri ölçülmüştür. Yoğunluk standart 10 ml'lik bir şişe kullanılarak ölçüldü. Elektrik iletkenliği Cond 3110 SET 1, WTW, Almanya kullanılarak ölçüldü. Yüzey gerilimi, bir kuvvet gerilim ölçer Sigma 703D, Attention, Almanya kullanılarak ölçülmüştür. Viskozite, bir DV-E, Brookfield AMETEK, ABD cihazı kullanılarak belirlendi. Tüm deneyler, ortam koşulunda (23 °C) gerçekleştirilmiştir.

### Elektroçirme Prosesi (Electrospinning Process)

Çalışmada, elektroçirme cihazı kullanılarak nanofiber üretim süreci Şekil 1'de gösterilmektedir. Elektroçirme işlemi için laboratuvar ölçekli bir elektroçirme cihazı (NS24, Inovenso Co., Türkiye) kullanıldı. Elektroçirme işlemine başlamadan önce hazırlanan solüsyon şırıngaya aktarıldı. Çözeltinin akış hızını kontrol altında tutmak için şırınga pompası kullanıldı. Elektriksel potansiyel farkını sağlamak için iğnenin ucuna ve kollektöre yüksek voltajlı bir güç kaynağı bağlanmıştır. Nanofiberlerin toplanması



için zeminden 12 cm yüksekte konumlandırılan silindirik kollektörün etrafına yağlı kâğıt sarılmıştır. Şırınga pompasından gönderilen solüsyon 0.5 ml/saat akış hızında ve 25 kV voltaj değerindedir.



Şekil 1. Elektroğirme cihazının şematik gösterimi ve yara örtüsü uygulaması

Figure 1. Schematic presentation of the electrospinning device and wound dressing application

#### Nanofiberlerin Karakterizasyonu (Characterization of the Nanofibers)

Üretilen nanofiberlerin özelliklerini incelemek için karakterizasyon testleri yapılmıştır. Nanofiberlerin morfolojisini karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM, EVO LS 10, Zeiss) kullanıldı. Numunelerin yüzeyleri, analizden önce Quorum SC7620 püskürtme cihazı ile 120 saniye boyunca altın-paladyum ile kaplandı. Ortalama fiber çapları ve dağılımları, her numuneden rastgele seçilen 100 fiberin ölçümü kullanılarak görüntüleme yazılımı Olympus AnalySIS, ABD) kullanılarak hesaplandı.

Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi, bir Jasco FT/IR-4700 model makine ile gerçekleştirilmiştir. Tüm spektrumlar, 4000–400  $\text{cm}^{-1}$  tarama aralığında iletim modunda kaydedildi ve 4  $\text{cm}^{-1}$  çözünürlükte 32 taramanın ortalaması alındı.

Nanofiberlerin mekanik özelliklerini belirlemek için bir çekme testi cihazı kullanıldı (Shimadzu Corporation, EZ-LX, Kyoto, Japonya). Bunun için nanofiberler 10 × 50 mm dikdörtgen boyutunda kesildi. Teste başlamadan önce nanofiberlerin kalınlığı bir dijital mikrometre (Mitutoyo MTI Corp., ABD) kullanılarak ölçüldü. Test hızı 5 mm/dk olarak ayarlandı ve test sırasında 0.1 N' luk kuvvet uygulandı. Her bir grup için ölçüm 3 kez tekrarlanmıştır.

GEN içeren nanofiberlerin antimikrobiyal aktivitesi, iki patojenik bakteriye (Staphylococcus aureus ATCC 29213 ve P. aeruginosa ATCC 27853) karşı agar disk difüzyon yöntemi kullanılarak belirlendi. Gece boyunca Mueller Hinton broth (Sigma Aldrich, ABD) içinde bekletilen bakteri kültürleri, aynı broth içindeki bakteriyel süspansiyonları hazırlamak için kullanıldı ve 0.5 McFarland türbidite standartına (1-2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL) ayarlandı. Elde edilen bakteriyel süspansiyonlar, otomatik inokülatör cihazı (Retro c80, AB Biodisk, Sweden) kullanılarak Mueller-Hinton agar plakalarına ekildi. Çapı 5 mm olacak şekilde fiberlerden kesilen diskler sterilizasyon için 1 saat UV ışığına (254 nm) maruz bırakıldı. Sterilize diskler, bakteri ile inoküle edilmiş Mueller-Hinton agar plakalarının yüzeyine yerleştirildi. Ampisilin içeren diskler (2 ug ve 10 ug), S. aureus ATCC 29213 ve E. coli ATCC 25922 için pozitif kontrol olarak kullanıldı. Plakalar 37 °C'de 18-20 saat inkübe edildi. İnkübasyondan sonra, disk etrafındaki büyüme inhibisyonunun zon çapı mm olarak ölçülmüştür.

İlaç yüklü nanofiberlerin *in vitro* salım çalışması, pH 7.4'te PBS içinde gerçekleştirilmiştir. İlaç salım testinin ilk adımı, GEN'in doğrusal kalibrasyon eğrisini elde etmektir. Beş farklı ilaç miktarı kullanılmış ve UV spektroskopisi (Shimadzu UV-3600, Kyoto, Japonya) kullanılarak 190-300 nm'de absorbans değerleri tespit edilmiştir. İlaç salım testini başlatmak için, PVA/ JEL nanofiberlerine yüklenen ~5 mg GEN yüklü

nanofiber tartıldı ve 1 mL PBS (pH 7.4) ile eppendorf tüplerine yerleştirildi. Ölçümler farklı zaman aralıklarında yapıldı. Test sırasında taze PBS kullanıldı.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

### Polimer Çözeltilerinin Fiziksel Karakterizasyonları (Physical Characterizations of Polymer Solutions)

Elektroegirme çözeltilerinin yoğunluk, yüzey gerilimi, elektriksel iletkenlik ve viskozite gibi fiziksel özellikleri, eğirme sürecini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu parametrelerin nanofiber oluşumunu ve elektrospun polimer lif homojenliğini etkilediği bulunmuştur. Eelektriksel iletkenlik ve viskozite, fiber çaplarını en çok etkileyen parametrelerdir. Elektriksel iletkenlik, üretilen fiberlerin yapısı için çok önemlidir. Çünkü yüksek elektriksel iletkenliğe sahip çözeltilerin fiber çapları üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Cesur ve diğ., 2020). Elektroegirmede kullanılan çözeltilerin fiziksel özellikleri çizelge 1'de gösterilmiştir. PVA/JEL çözeltisinin yüzey gerilimi ve viskozitesi sırasıyla 30.2 (mN/m) ve 5.30 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )'dir Yang ve diğ., 2007). PVA/JEL çözeltisine farklı miktarlarda GEN ilavesi çözeltinin viskozitesini arttırmış elektiriksel iletkenliğini azaltmıştır.

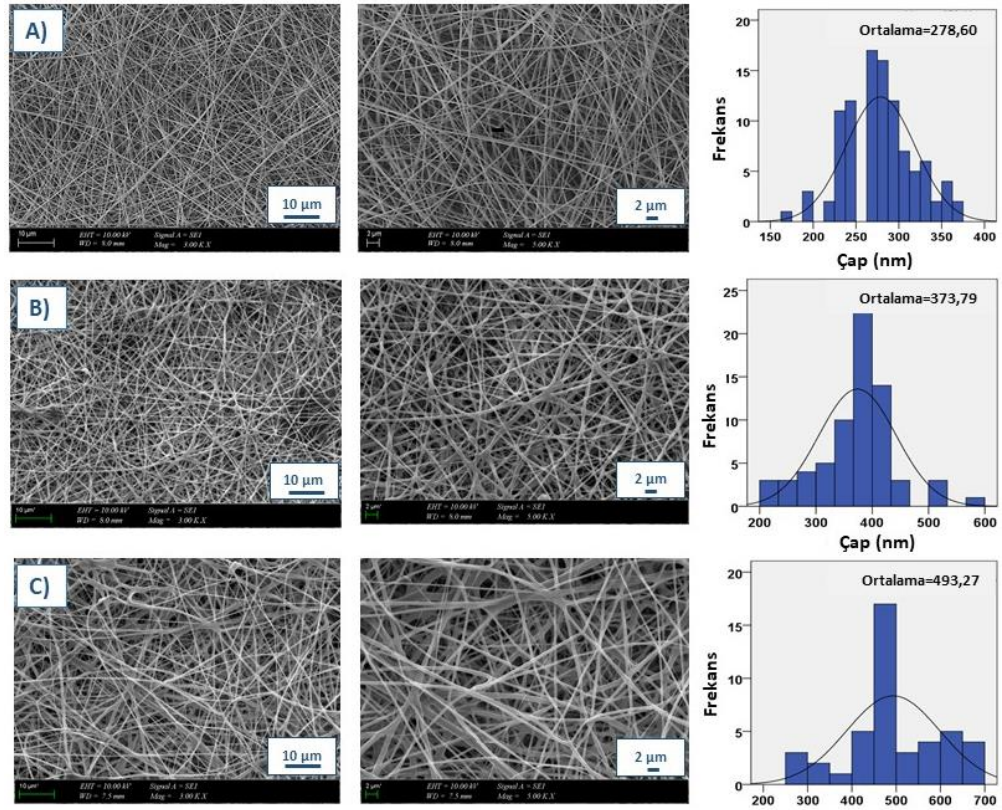
**Çizelge 1.** Solüsyonların Fiziksel Karakterizasyonları

*Table 1. Physical characterization of solutions*

| Çözeltiler      | Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | Yüzey gerilimi (mN/m) | Viskozite (mPa.s) | Elektriksel iletkenlik ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--|
| PVA/JEL         | 1.4                           | 30.2                  | 780               | 5.30   |
| PVA/JEL/0.25GEN | 1.5                           | 31.5                  | 784               | 5.20   |
| PVA/JEL/0.5GEN  | 1.6                           | 33.4                  | 790               | 5.01   |

### Nanofiberlerin Morfolojik Karakterizasyonu (Morphological Characterization of Nanofibers)

Üretilen nanofiberlerin yüzey morfolojileri SEM kullanılarak analiz edildi. Nanofiberlerin SEM görüntüleri ve çap dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir. İlaç yüklü olmayan ve ilaç yüklü nanofiberler için herhangi bir boncuk olmadan oldukça homojen ve pürüzsüz nanofiberler elde edilmiştir. PVA/JEL, PVA/JEL/0.25GEN ve PVA/JEL/0.5GEN nanofiberlerinin ortalama çapları sırasıyla  $278 \pm 40$  nm,  $373 \pm 68$  nm ve  $493 \pm 105$  nm olarak ölçüldü. İlaç yüklü nanofiberlerin çaplarında saf nanofiberlere göre artış olduğu gözlemlendi. Bu, elektroegirme çözeltisine, GEN yüklemenin elektriksel iletkenliği ve viskoziteyi artırarak daha büyük çaplı nanofiberlerin oluşumuna yol açacağı gerçeğine bağlanabilir. Araştırmalar, saf nanofiberlere yüklenen ilacın çaplarında artışa neden olmasının bu durumu desteklediğini göstermiştir (Cam ve diğ., 2021). Bunun yanısıra Ceylan ve diğ. farklı oranlarda (%2.5 ve %10) GEN yüklü PCL nanofiberlerin çaplarında, GEN yüklü olmayan PCL nanofiberine kıyasla daha yüksek bir artış gözlemlenmiştir (Ceylan ve diğ., 2017). Bu muhtemelen GEN konsantrasyonu arttıkça çözeltilerin viskozitesindeki artıştan kaynaklanabilir.

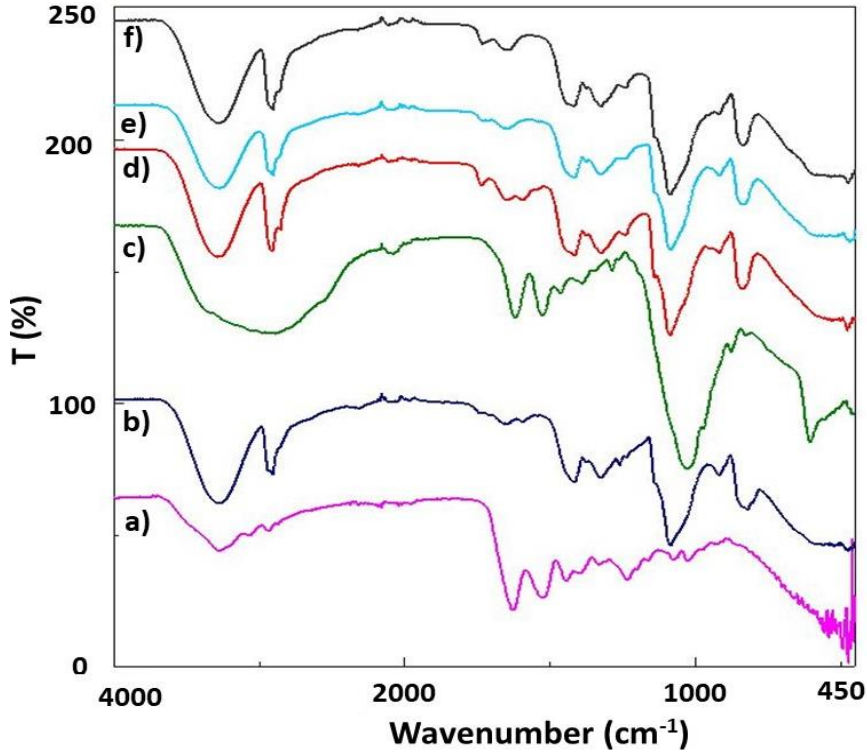


**Şekil 2.** Nanofiberlerin SEM görüntüleri ve çap dağılımları; (a) PVA/JEL, (b) PVA/JEL/0.25GEN ve (c) PVA/JEL/0.5GEN

*Figure 2.* SEM images and diameter distributions of nanofibers; (a) PVA/GEL, (b) PVA/JEL/0.25GEN, and (c) PVA/JEL/0.5GEN

### FTIR Analizi (FTIR Analysis)

Nanofiberlerin fonksiyonel gruplarını araştırmak için FTIR analizi yapıldı (Şekil 3). Saf JEL için (Şekil 3(a)),  $3277\text{ cm}^{-1}$ 'de N-H uzanan,  $2933\text{ cm}^{-1}$ 'de C-H uzanan,  $1525\text{ cm}^{-1}$ 'de N-H bükülen ve  $1626\text{ cm}^{-1}$ 'de C-O uzanan karakteristik absorpsiyon bantları gözlemlendi (Ahlawat ve diğ., 2019). Saf PVA için (Şekil 3 (b)),  $\sim 3268.75\text{ cm}^{-1}$  (O-H grubu, N-H amino grubu),  $\sim 2910\text{ cm}^{-1}$  (C-H germe titreşimi),  $\sim 1646.91\text{ cm}^{-1}$ ,  $\sim 1417.42\text{ cm}^{-1}$  (C-O),  $\sim 1326.79\text{ cm}^{-1}$  (C-H bükme),  $\sim 1261.22\text{ cm}^{-1}$  (C=O titreşimi),  $\sim 1085.73\text{ cm}^{-1}$  (C-O grubu),  $\sim 917.95\text{ cm}^{-1}$  (C-C germe) ve  $\sim 821.53\text{ cm}^{-1}$  (C-O germe)'de keskin bantlar gözlemlendi (Cesur ve diğ., 2021). (Şekil 3 (c))'de GEN,  $1619\text{ cm}^{-1}$  ve  $1519\text{ cm}^{-1}$ 'de (birincil aromatik aminlerin NH bükülme titreşimleri) ana tepe noktalarına sahipti.  $1031$  ve  $605\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen diğer tepe noktaları, S-O eğilme titreşimi ve S-O gerilmesi şeklindeki kükürt içeriğinden kaynaklanmaktadır (Mosselhy ve diğ., 2018). Şekil 3(d)'de, PVA/JEL'in FTIR spektrumu, saf PVA'nın tepesini belirleyen  $1261\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepesinin yanı sıra saf PVA ile hemen hemen eşit bir spektruma sahipti.  $3270\text{ cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon bandının JEL ilavesi ile  $3278\text{ cm}^{-1}$ 'e kaydığı görülmektedir. Şekil 3 (e, f), PVA/JEL'e iki farklı oranda GEN ilavesini gösteren absorptans spektrumudur. Spektrumda GEN ilavesi ile çok az kaymalar meydana gelmiş ve PVA/JEL'in absorptans spektrumunu etkilemiştir.



Şekil 3. (a) Saf JEL, (b) saf PVA, (c) GEN (d) PVA/JEL, (e) PVA/JEL/0.25GEN, (f) PVA/JEL/0.5GEN 'in FTIR spektrumları

Figure 3. FTIR spectra of (a) pure GEL, (b) pure PVA, (c) GEN, (d) PVA/GEL, (e) PVA/GEL/0.25GEN, (f) PVA/GEL/0.5GEN

### Nanofiberlerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Nanofibers)

Üretilen nanofiberlerin hem gerilme mukavemeti hem de kopma uzaması araştırıldı ve sonuçlar çizelge 2'de gösterildi. Sonuçlar incelendiğinde PVA/JEL nanofiberinin,  $6.31 \pm 0.23$  MPa'lık bir gerilme mukavemetine ve  $11.00 \pm 4.48$ 'lik bir kopma uzama değerine sahip olduğu görüldü. Ağırlıkça %0.25 ve %0.5 GEN, bu PVA/JEL nanofiberlerine ayrı ayrı yüklendiğinde, gerilme mukavemetleri sırasıyla  $4.30 \pm 0.58$  ve  $3.95 \pm 0.24$  MPa idi. Kopmadaki uzama ise sırasıyla  $7.58 \pm 0.16$ , ve  $6.61 \pm 3.07$ 'dir. GEN' in PVA/JEL nanofiberlerine yüklenmesinin gerilme mukavemetini ve uzama miktarını azalttığı görülüyor. Cam ve diğ., ilacı nanofiberlere yüklediklerinde mekanik özelliklerin azaldığını gözlemlediler (Cam ve diğ., 2021). Sonuç olarak farklı miktardaki GEN, PVA/JEL nanofiberine yüklendikçe, fiber çapında ve dispersiyonunda artış gözlemlendi.

Çizelge 2. Nanofiberlerin Çekme Özellikleri

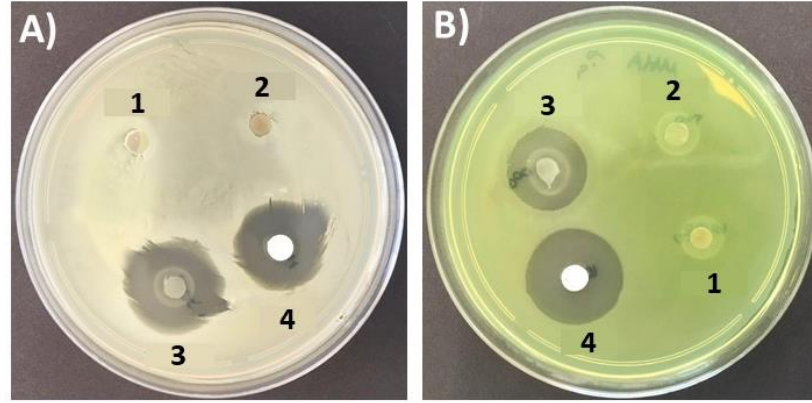
Table 2. Tensile properties of the nanofibers

| Nanofiber       | Çekme Dayanımı (MPa) | Kopma uzaması(%) |
|-----------------|----------------------|------------------|
| PVA/JEL         | $6.31 \pm 0.23$      | $11.00 \pm 4.48$ |
| PVA/JEL/0.25GEN | $4.30 \pm 0.58$      | $7.58 \pm 0.16$  |
| PVA/JEL/0.5GEN  | $3.95 \pm 0.24$      | $6.61 \pm 3.07$  |

### Nanofiberlerin Antimikrobiyal Özellikleri (Antimicrobial Properties of the Nanofibers)

Numunelerin antimikrobiyal aktivitesi, yara iyileşme performansında önemli bir unsurdur. Yara yüzeyindeki bakteriyel aktivite, iltihaplanma ve enfeksiyona neden olur ve iyileşmeyi geciktiren toksik metabolitler üretir (Hajikhani ve diğ., 2021). Nanofiberlerin antimikrobiyal aktivite sonuçları Şekil 4 ve

Çizelge 3'de verilmiştir. Nanofiberler *P. aeruginosa* (ATCC 27853), *S. aureus* (ATCC 29213)'e karşı test edildi. Sonuçlar incelendiğinde PVA/JEL/0.25GEN nanofiberlerin *P. aeruginosa* ve *S. aureus*'a karşı antibakteriyel aktiviteye sahip olmadığı görülmüştür. Öte yandan PVA/JEL/0.5GEN nanofiberlerinin, *P. aeruginosa* ve *S. aureus*'a karşı inhibisyon zonu oluşturduğu gözlemlendi ve *S. aureus*'a ve *P. aeruginosa* karşı antibakteriyel aktivitesi sırasıyla  $23 \pm 2$  mm ve  $17 \pm 2$  mm'dir. Sonuç olarak, GEN konsantrasyonunun artması ile nanofiberlerin antibakteriyel özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği bulunmuştur (Ceylan ve diğ., 2017).



**Şekil 4.** Nanofiberlerin antimikrobiyal aktivitesinin, (A) *S. aureus* ve (B) *Pseudomonas* 'a karşı sonucudur. (1) PVA/JEL, (2) PVA/JEL/0.25GEN, (3) PVA/JEL/0.5GEN ve (4) GEN (kontrol)

**Figure 4.** It is the result of the antimicrobial activity of the nanofiber against (A) *S. aureus* and (B) *P. aeruginosa*. (1) PVA/JEL, (2) PVA/JEL/0.25GEN, (3) PVA/JEL/0.5GEN, and (4) GEN (control).

**Çizelge 3.** Örneklerin inhibisyon zonu değerleri

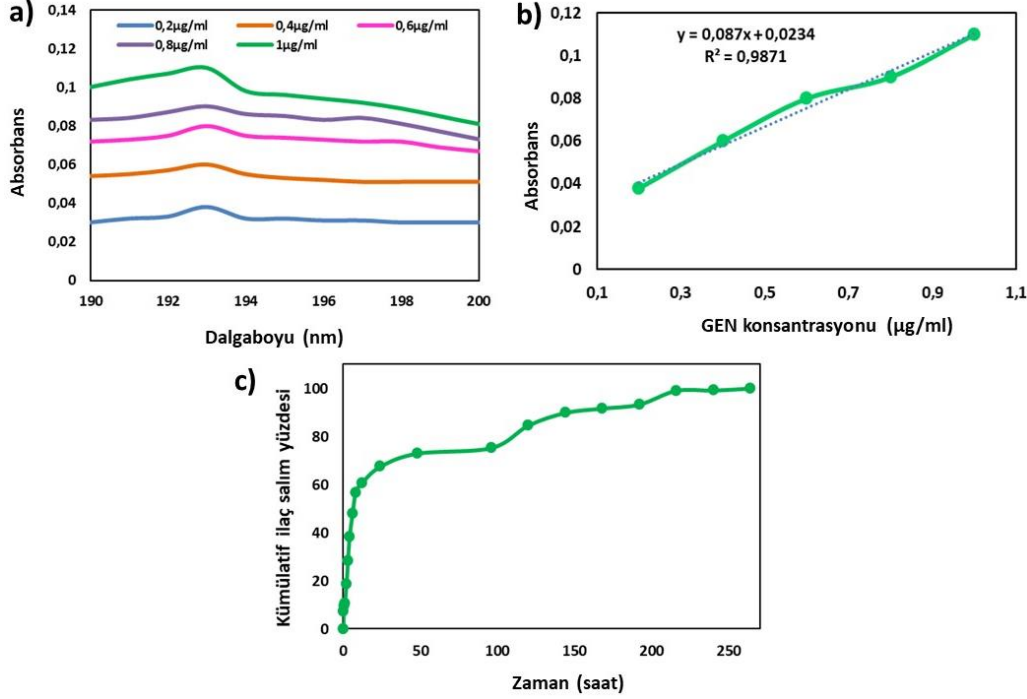
**Table 3.** The inhibition zone values of the samples

| Örnekler        | <i>Staphylococcus aureus</i><br>İnhibisyon zonu (mm) | <i>Pseudomonas</i><br>İnhibisyon zonu (mm) |
|-----------------|--|--|
| PVA/JEL         | 0  | 0  |
| PVA/JEL/0.25GEN | 0  | 0  |
| PVA/JEL/0.5GEN  | $23 \pm 2$   | $17 \pm 2$                                 |
| GEN (kontrol)   | $22 \pm 1$   | $21 \pm 2$                                 |

#### **In Vitro İlaç Salım Çalışması (In Vitro Drug Release Study)**

PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinin *P. aeruginosa* ve *S. aureus*'a karşı antibakteriyel aktiviteye sahip olduğu görülmüştür. Bu yüzden ilaç salım çalışmaları bu grupta gerçekleştirilmiştir. GEN'in nanofiberden salım özelliklerini araştırmak için *in vitro*, ilaç salım testleri yapılmıştır. PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinden GEN'in salım profili 37°C'lik bir çalkalayıcıda incelendi ve sonuçlar Şekil 5'te verildi. Şekil 5a, beş farklı solüsyonla (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1 µg/mL) belirlenen kalibrasyon eğrisini temsil ediyor. Şekil 5b ise, GEN için 196 nm'de kalibrasyon eğrisinden elde edilen absorbans grafiğini göstermektedir. Şekil 5c, GEN'in nanofiberlerden kümülatif salım grafiğini göstermektedir. Grafiğe göre ilk 1 saatte salım yüzdesi %10.76'e ulaştı. Daha sonra ilacın %67.5'inin ilk 24 saat içinde, % 75.26'sının ise 96 saatte salındığı görülmektedir. Toplam kümülatif salım grafiği incelendiğinde, PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinden ilaç salımının %100'e tamamlanması 264. saate kadar uzayan bir salım profili sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak GEN yüklü nanofiberlerde 11 güne kadar süren kontrollü salım sağlandığı söylenebilir. Elde edilen sonuçlara göre suda çözünür ve hidrofilik olan GEN ilk 24 saatte fiberden hızlı salım profili sergilemiştir. GEN'in hidrofilik doğası ve suda çözünürlüğünün, PVA/JEL nanofiberleri içinde daha iyi entegrasyona neden olduğu ve çapraz bağlamanın etkisiyle salınımı uzattığı fark edilebilir. PVA nanofiberlerin GA buharı ile çapraz bağlandığında, GA'nın uçları ile nanofiberlerin hidroksil grupları

arasında suda çözünürlüklerini azaltan asetil köprüleri oluşur. Bu çalışmada, PVA/JEL/0.5GEN nanofiberi 3 saat boyunca GA buharı ile çapraz bağlanmıştır ve bu, ilacın daha kontrollü bir salımı ile sonuçlanmıştır (Cui ve diğ., 2018).



**Şekil 5.** PVA/JEL/0.5GEN nanofiberlerinin in vitro ilaç salım profilleri: (a) GEN' in farklı konsantrasyonlarda absorpsiyon spektrumları, (b) GEN kalibrasyon eğrisi, (c) PVA/JEL/0.5GEN nanofiberden ilaç salım profilleri. Tüm ölçümler üç kez tekrarlandı ve hatalar %5'ten azdı.

**Figure 5.** In vitro drug release profiles of PVA/JEL/0.5GEN nanofibers: (a) Absorption spectra of GEN at different concentrations, (b) GEN calibration curve, (c) drug release profiles from the PVA/JEL/0.5GEN nanofiber. All the measurements were repeated three times, and the errors were less than 5%.

## SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yara örtüsü uygulamaları için PVA/JEL, PVA/JEL/0.25GEN, ve PVA/JEL/0.5GEN nanofiberleri elektroçizme yöntemi ile başarıyla üretilmiştir. Üretilen nanofiberlerin mekanik mukavemetini arttırmak ve hızlı bozulmalarını önlemek için GA buharı ile çapraz bağlama yapılmıştır. Nanofiberlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, boncuksuz düzgün bir yapıya oldukları ve yüzeyde ilaç kristalleri ve kümeleri görülmediği gözlemlendi. Ayrıca nanofiber içerisindeki ilaç miktarındaki artış fiber çaplarında az bir artışa neden olsa da lif morfolojilerini olumsuz etkilememiştir. FTIR ile PVA, JEL ve GEN arasındaki etkileşim kanıtlanmıştır. Çekme testine göre, GEN miktarı arttıkça mekanik mukavemetinin saf nanofibere göre zayıfladığı gözlemlenmiştir. Antimikrobiyal aktivite sonuçlarına bakıldığında, PVA/JEL/0.25GEN nanofiberinde herhangi bir antibakteriyel etki görülmezken, PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinde *P. aeruginosa* ve *S. aureus*'a karşı inhibisyon zonu oluşturduğu gözlemlendi ve *S. aureus*'a ve *P. aeruginosa* karşı antibakteriyel aktivitesi sırasıyla  $23 \pm 2$  mm ve  $17 \pm 2$  mm'dir. Sonuç olarak, GEN konsantrasyonunun artması ile nanofiberlerin antibakteriyel özelliklerinin önemli ölçüde iyileştiği bulunmuştur. Antibakteriyel etki görülen PVA/JEL/0.5GEN nanofiberinde ilaç salım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlaç salım sonuçlarına göre, GEN' in nanofiberden 264 saate kadar uzayan bir salım profili sergilediği gözlemlenmiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, GEN içeren nanofiberler, doku mühendisliği ve yara örtüsü uygulamalarında umut verici bir potansiyele sahip olabilir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Aadil, K. R., Mussatto, S. I., Jha, H., 2018, "Synthesis and characterization of silver nanoparticles loaded poly (vinyl alcohol)-lignin electrospun nanofibers and their antimicrobial activity" *International journal of biological macromolecules*, Cilt 120, ss. 763-767.
- Abrigo, M., McArthur, S. L., Kingshott, P., 2014, "Electrospun nanofibers as dressings for chronic wound care: advances, challenges, and future prospects", *Macromolecular bioscience*, Cilt 14, Sayı 6, ss. 772-792.
- Ahlawat, J., Kumar, V., Gopinath, P., 2019, "Carica papaya loaded poly (vinyl alcohol)-gelatin nanofibrous scaffold for potential application in wound dressing", *Materials Science and Engineering: C*, Cilt 103, ss. 109834.
- Angamma, C. J., Jayaram, S. H., 2016, "Fundamentals of electrospinning and processing technologies", *Particulate Science and Technology*, Cilt 34, Sayı 1, 72-82.
- Bakhsheshi-Rad, H. R., Ismail, A. F., Aziz, M., Hadisi, Z., Omidi, M., Chen, X., 2019, "Antibacterial activity and corrosion resistance of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film and electrospun PCL/MgO-Ag nanofiber coatings on biodegradable Mg alloy implants", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 9, ss. 11883-11892.
- Bakhsheshi-Rad, H. R., Hadisi, Z., Ismail, A. F., Aziz, M., Akbari, M., Berto, F., Chen, X. B., 2020, "In vitro and in vivo evaluation of chitosan-alginate/gentamicin wound dressing nanofibrous with high antibacterial performance", *Polymer Testing*, Cilt 82, ss. 106298.
- Cam, M. E., Ertas, B., Alenezi, H., Hazar-Yavuz, A. N., Cesur, S., Ozcan, G. S., ..., Edirisinghe, M., 2021, "Accelerated diabetic wound healing by topical application of combination oral antidiabetic agents-loaded nanofibrous scaffolds: An in vitro and in vivo evaluation study", *Materials Science and Engineering: C*, Cilt 119, ss. 111586.
- Cesur, S., Ulag, S., Ozak, L., Gumussoy, A., Arslan, S., Yilmaz, B. K., ..., Gunduz, O., 2020, "Production and characterization of elastomeric cardiac tissue-like patches for Myocardial Tissue Engineering", *Polymer Testing*, Cilt 90, ss. 106613.
- Cesur, S., Cam, M. E., Sayin, F. S., Su, S., Harker, A., Edirisinghe, M., Gunduz, O., 2021, "Metformin-Loaded Polymer-Based Microbubbles/Nanoparticles Generated for the Treatment of Type 2 Diabetes Mellitus", *Langmuir*. Cilt 38, Sayı 17, ss. 5040-5051.
- Cesur, S., Cam, M. E., Sayin, F. S., Gunduz, O., 2022, "Electrically controlled drug release of donepezil and BiFeO<sub>3</sub> magnetic nanoparticle-loaded PVA microbubbles/nanoparticles for the treatment of Alzheimer's disease", *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Cilt 67, ss. 102977.
- Ceylan, M., Yang, S. Y., Asmatulu, R., 2017, "Effects of gentamicin-loaded PCL nanofibers on growth of Gram positive and Gram negative bacteria", *Cilt 5*, ss. 40-51.
- Cui, Z., Zheng, Z., Lin, L., Si, J., Wang, Q., Peng, X., Chen, W., 2018, "Electrospinning and crosslinking of polyvinyl alcohol/chitosan composite nanofiber for transdermal drug delivery", *Advances in Polymer Technology*, Cilt 37, Sayı 6, ss. 1917-1928.
- Foroutan Koudehi, M., Zibaseresht, R., 2020, "Synthesis of molecularly imprinted polymer nanoparticles containing gentamicin drug as wound dressing based polyvinyl alcohol/gelatin nanofiber", *Materials Technology*, Cilt 35, sayı 1, ss. 21-30.
- Hajikhani, M., Emam-Djomeh, Z., Askari, G., 2021, "Fabrication and characterization of mucoadhesive bioplastic patch via coaxial polylactic acid (PLA) based electrospun nanofibers with antimicrobial and wound healing application", *International Journal of Biological Macromolecules*, Cilt 172, ss. 143-153.
- Kondaveeti, S., de Assis Bueno, P. V., Carmona-Ribeiro, A. M., Esposito, F., Lincopan, N., Sierakowski, M. R., Petri, D. F. S., 2018, "Microbicidal gentamicin-alginate hydrogels", *Carbohydrate polymers*, Cilt 186, ss. 159-167.
- Konop, M., Czuwara, J., Kłodzińska, E., Laskowska, A. K., Zielenkiewicz, U., Brzozowska, I., ..., Rudnicka, L., 2018, "Development of a novel keratin dressing which accelerates full-thickness skin wound healing in diabetic mice: In vitro and in vivo studies", *Journal of Biomaterials Applications*, Cilt 33, Sayı 4, ss. 527-540.

- Koudehi, M. F., Pourmortazavi, S. M., 2018, "Polyvinyl alcohol/polypyrrole/molecularly imprinted polymer nanocomposite as highly selective chemiresistor sensor for 2, 4-DNT vapor recognition", *Electroanalysis*, Cilt 30, Sayı 10, ss. 2302-2310.
- Kumar, V., Naqvi, S., Gopinath, P., 2018, "Applications of nanofibers in tissue engineering", In *Applications of nanomaterials*, Woodhead Publishing, ss. 179-203.
- Lv, X., Zhang, W., Liu, Y., Zhao, Y., Zhang, J., Hou, M., 2018, "Hygroscopicity modulation of hydrogels based on carboxymethyl chitosan/Alginate polyelectrolyte complexes and its application as pH-sensitive delivery system", *Carbohydrate polymers*, Cilt 198, ss. 86-93.
- Mosselhy, D. A., He, W., Hynönen, U., Meng, Y., Mohammadi, P., Palva, A., ..., Linder, M. B., 2018, "Silica-gentamicin nanohybrids: combating antibiotic resistance, bacterial biofilms, and in vivo toxicity", *International journal of nanomedicine*, Cilt 13, ss. 7939.
- Ohyabu, Y., Hatayama, H., Yunoki, S., 2014, "Evaluation of gelatin hydrogel as a potential carrier for cell transportation", *Journal of bioscience and bioengineering*, Cilt 118, Sayı 1, ss. 112-115.
- Pásztor, N., Rédei, E., Szabó, Z. I., Sipos, E., 2017, "Preparation and characterization of levofloxacin-loaded nanofibers as potential wound dressings", *Acta Marisiensis-Seria Medica*, Cilt 63, Sayı 2, ss. 66-69.
- Reneker, D. H., Yarin, A. L., Zussman, E., Xu, H., 2007, "Electrospinning of nanofibers from polymer solutions and melts" *Advances in applied mechanics*, Cilt 41, ss. 43-346.
- Sikareepaisan, P., Ruktanonchai, U., Supaphol, P., 2011, "Preparation and characterization of asiaticoside-loaded alginate films and their potential for use as effectual wound dressings", *Carbohydrate Polymers*, Cilt 83, Sayı 4, ss. 1457-1469.
- Tao, G., Wang, Y., Cai, R., Chang, H., Song, K., Zuo, H., ..., He, H., 2019, "Design and performance of sericin/poly (vinyl alcohol) hydrogel as a drug delivery carrier for potential wound dressing application", *Materials Science and Engineering: C*, Cilt 101, ss. 341-351.
- Wutticharoenmongkol, P., Samanmak, V., 2021, "Electrospun centella asiatica leaf extract-loaded poly (vinyl alcohol)/gelatin fiber mats as potential wound dressings", *Interdisciplinary Research Review*, Cilt 16, Sayı 6, ss. 38-46.
- Yang, D., Li, Y., Nie, J., 2007, "Preparation of gelatin/PVA nanofibers and their potential application in controlled release of drugs", *Carbohydrate Polymers*, Cilt 69, Sayı 3, ss. 538-543.





## CLUSTERING NEIGHBORHOODS ACCORDING TO URBAN FUNCTIONS AND DEVELOPMENT LEVELS BY DIFFERENT CLUSTERING ALGORITHMS: A CASE IN KONYA

<sup>1</sup>Ali Utku AKAR , <sup>2</sup>Sait Ali UYMAZ 

<sup>1</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geomatics Engineering, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>auakar@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>sauymaz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 05.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.09.2022)

**ABSTRACT:** Urban functions/activities, which emerged under the influence of the human factor and are in the process of development over time, play a crucial role in the development of neighborhoods. To ensure balanced development status among the neighborhoods, it is necessary to know the development levels of the neighborhoods in advance. This study focuses on the clustering of the 167 central neighborhoods in Konya in terms of urban functions and reveals the similarities or differences in the development status of these neighborhoods. K-means, Hierarchical (agglomerative) and OPTICS clustering analyzes were used to cluster central neighborhoods. 18 features related to urban functions were determined as input parameters in the clustering analyzes. Results showed that cluster analysis can be used in urban studies and determine the development status of cities. It is important to carry out clustering studies to make urban planning by revealing the development differences between the neighborhoods and to provide more appropriate service delivery.

**Keywords:** Urban function, K-Means Clustering, Hierarchical Clustering, OPTICS Clustering, Urban Development

### Farklı Kümeleme Algoritmaları ile Kentsel Fonksiyonlara ve Gelişme Düzeylerine Göre Mahallelerin Kümelenmesi: Konya İli Örneği

**ÖZ:** İnsan faktörünün etkisi altında ortaya çıkan ve zaman içinde gelişim sürecinde olan kentsel fonksiyonlar/faaliyetler, mahallelerin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Mahalleler arasında dengeli bir gelişme durumu sağlamak için mahallelerin gelişmişlik düzeylerinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışma, Konya'daki 167 merkez mahallenin kentsel donatılar açısından kümelenmesine odaklanmaktadır ve bu mahallelerin gelişmişlik durumlarındaki benzerlikleri veya farklılıkları ortaya koymaktadır. Merkez mahalleleri kümelemek için K-ortalamlar, Hiyerarşik ve OPTICS kümeleme analizleri kullanılmıştır. Kümeleme analizlerinde kentsel fonksiyonlara ilişkin 18 özellik girdi parametresi olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, kümeleme analizinin kentsel çalışmalarda kullanılabilirliğini ve kentlerin gelişmişlik durumunu belirleyebileceğini göstermiştir. Mahalleler arasındaki gelişmişlik farklılıklarını ortaya çıkararak kentsel planlama yapmak ve daha uygun hizmet sunumu sağlamak için kümelenme çalışmaları yapılması önemlidir.

**Anahtar Kelimeler:** Kentsel Fonksiyon, K-Means Kümeleme, Hiyerarşik Kümeleme, OPTICS Kümeleme, Kentsel Gelişim

## 1. INTRODUCTION

Nowadays, cities are residential areas where various life conditions come together with social, demographic, economic, security and political services. Activities in cities are closely related to the diversity, planning and design of settlements (Sisman and Aydinoglu, 2020). Urban functions that are moving, lively, and in constant development and change can be separated into two pieces. The first piece is the factors that meet the needs of people such as housing, education, health, transportation and industry. The second piece is the other factors where social activities that increase the urban comfort and quality of life such as recreation areas and green areas that enrich human life are carried out (Gündüz, 2019). Urban functions, which are indicators of environmental quality, sustainable cities, livable society and level of development, are considered as criteria in the evaluation of the satisfaction, education, culture, consciousness and life conditions of the citizens with their use and regional distribution (Buffel and Phillipson, 2016). The effective and continuous use of these functions is directly related to the cultural level of the society, education and average age of the citizens. It is also an indicator of socio-economic development.

Socio-economic development is synonymous with economic development. The way to improve the quality of life is through economic development (Çetin and Sevüktekin, 2016). However, the quality of life is not always sufficient level everywhere. Because there are differences in development or life quality between provinces/neighborhoods. While some neighborhoods in a province are more developed than others, it is observed that others cannot show the same performance. To ensure balanced socio-economic development among the neighborhoods, first of all, it is necessary to determine the development levels of the neighborhoods with measurable and relatively comparable socio-economic indicators. Determining the level of development provides information on how much and in which area investment should be made in which region or neighborhood (Artmann *et al.*, 2019). In addition, revealing the development in terms of regions and neighborhoods is extremely important in terms of determining the success of the policies implemented so far, identifying and correcting inappropriate policies. There are many studies in the literature on the level of socio-economic development. In the studies carried out, the socio-economic development order of the settlements at different levels is revealed together with the reasons, and it is aimed to develop appropriate regional development policies in this way (Snieska and Šimkūnaitė, 2009; Sakarya and İbişoğlu, 2015; Fuseini and Kemp, 2015).

The identification of urban clusters is a topic on which only limited research has been performed (Zhang *et al.*, 2012). Overall, boundaries of urban clusters are approved by setting the thresholds for the determinant criteria based on socio-economic statistical data. Uysal *et al.* (2017) aimed to reveal the provinces that show differences or similarities in terms of life index values in Turkey. Life index values; housing, working life, income and wealth, health, education, environment, security, civic participation, access to infrastructure services, social life and life satisfaction. To achieve this aim, K-means, which is one of the multivariate statistical methods, were examined by cluster analysis and the results obtained were supported by discriminant analysis. Fragkias and Seto (2009) applied the Hoshen-Kopelman algorithm to detect urban clusters in the Pearl River Delta, China, but the objective of that study was to detect the metropolitan area, including the core city and its suburbs, rather than collections of multiple cities. Karabulut *et al.* (2004) tried to determine the position of the provinces among themselves by determining the socio-economic development status of the provinces according to the "Hierarchical Cluster Analysis" method using the demographic, social and economic data of the year 2000 belonging to 81 provinces of Turkey. In other studies, the socio-economic development status of the provinces in Turkey has been examined over economic, social and cultural indicators with principal component analysis, fuzzy clustering and multidimensional scaling analysis (Arı and Hüyüktepe, 2019; Servi and Erişoğlu, 2020). In many of the existing clustering techniques, relevant clusters are detected directly over the various attribute values contained in the datasets. Namely, spatial information is ignored and similarities are only measured according to the attribute values of the data. Except those, the status can be evaluated by producing clustering maps with different data clustering techniques in determining spatial distributions. There are geographical analysis techniques that carry the clustering maps further and examine the value

of any criterion simultaneously with its neighbors in the world related to the location (ESRI, 2021). The OPTICS clustering/algorithm is one of the examples that can be given to them. With OPTICS, it is possible to detect similar clusters that are spatially adjacent by considering a set of attribute values and locations of the data (URL1).

The aim of this study is to cluster the central neighborhoods in Konya in terms of urban functions/reinforcement and to reveal the regional similarities or differences of these neighborhoods. The application covers 167 central neighborhoods in Konya. Population density, education level, favorite neighborhood, building density, development potential, geological status, average unit price, green areas, noise pollution, medical, education and public institutions, security units, shopping centers, entertainment centers, industrial zones, city center and transportation datasets were used for this study. After obtaining neighborhood-scale datasets through GIS-based analyzes, K-means, Hierarchical (agglomerative) and OPTICS clustering analyzes were realized to cluster central neighborhoods with similar urban functions.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Study area

Konya province, which is located in the Central Anatolia Region, which is one of the 7 regions of Turkey, neighbors the provinces of Ankara, Afyonkarahisar, Antalya, Eskişehir, Karaman, Mersin, Isparta, Niğde and Aksaray. Konya, which has 31 districts in total, consists of three central districts, namely Selçuklu, Meram and Karatay. The location where the borders of these districts intersect is described as the city center. When examined in terms of population and area, Konya province is the largest province of Turkey with an area of 38.257 and is the 7<sup>th</sup> most populous province of Turkey with a total population of 2.277.017 (TÜİK, 2022).

For clustering studies, 167 central neighborhoods of Meram, Selçuklu and Karatay were selected as the study area. In determining the study area, education (university, primary and high school, etc.), medical (health center, hospital, etc.) and public institutions (municipality, service building, etc.), shopping and entertainment/cultural centers, industrial zones, security units, green areas and transportation networks were taken into account (Fig. 1).

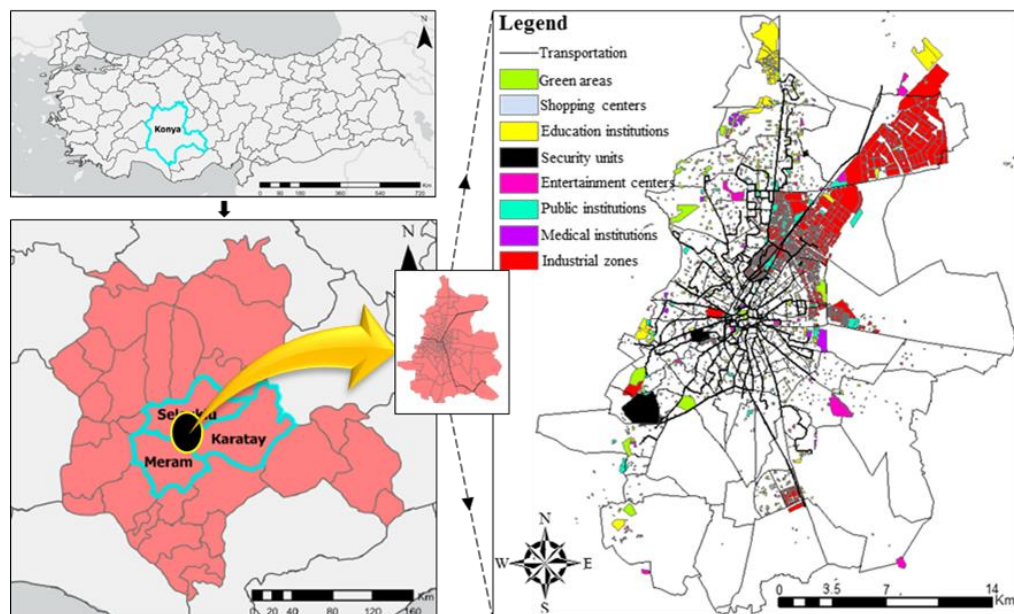


Figure 1. Determining the study area

## 2.2. Determination of features

Researches in the field of development levels of neighborhoods depending on urban functions are especially important in terms of increasing the speed of socio-economic development and increasing-disseminating social welfare. For regional development to take place, in addition to the macroeconomic policies being made to cover the whole, projections that determine the geographical or spatial distribution of development within the region are also needed. The discussion of which features/factors will be used in evaluating neighborhoods in terms of urban activities is constantly made in the literature. It has brought along the search for features that affected in the development of neighborhoods in line with urban reinforcement.

As a result of research and literature review, criteria affecting the development level of neighborhoods were determined. 18 features (population density, education level, favorite neighborhood, building density, development potential, geological status, average unit price, green areas, noise pollution, medical, education and public institutions, security units, shopping centers, entertainment centers, industrial zones, city center and transportation) were used in this study (Fig. 2). The descriptions of the features, units and the maximum and minimum scale values of the features are given in Table 1.

**Table 1.** Features, description of the features, units and scale value (min-max) of the features

| Features               | Description                        | Units             | Scale value (min-max) |
|------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Population density     | <i>Population/neigh. area</i>      | %                 | 0.35 - 303.08         |
| Education level        | <i>Literacy rate</i>               | %                 | 0.13 - 1.00           |
| Favorite neighborhood  | <i>Development score</i>           | score             | 1.00 - 5.00           |
| Building density       | <i>Total building/neigh. area</i>  | %                 | 0.14 - 153.74         |
| Development potential  | <i>Advancement potential</i>       | score             | 22.00 - 91.00         |
| Geological status      | <i>Ground condition</i>            | score             | 2.50 - 5.00           |
| Average unit price     | <i>Average unit price</i>          | TL/m <sup>2</sup> | 1.515 - 7.403         |
| Green areas            | <i>Park etc.</i>                   | number            | 0 - 11+               |
| Noise pollution        | <i>Noise level</i>                 | score             | 0.00 - 4.00           |
| Medical institutions   | <i>Healthcare center</i>           | number            | 0 - 11+               |
| Education institutions | <i>Education center</i>            | number            | 0 - 61+               |
| Public institutions    | <i>Government agencies</i>         | number            | 0 - 27+               |
| Security units         | <i>Security units</i>              | number            | 0 - 7+                |
| Shopping centers       | <i>Shopping center</i>             | number            | 0 - 7+                |
| Entertainment centers  | <i>Activity center</i>             | number            | 0 - 33+               |
| Industrial zones       | <i>Industrial areas</i>            | m <sup>2</sup>    | 0 - 626               |
| City center            | <i>Distance to city center</i>     | meter             | 459 - 16661           |
| Transportation         | <i>Transportation line (stops)</i> | number            | 0 - 43                |

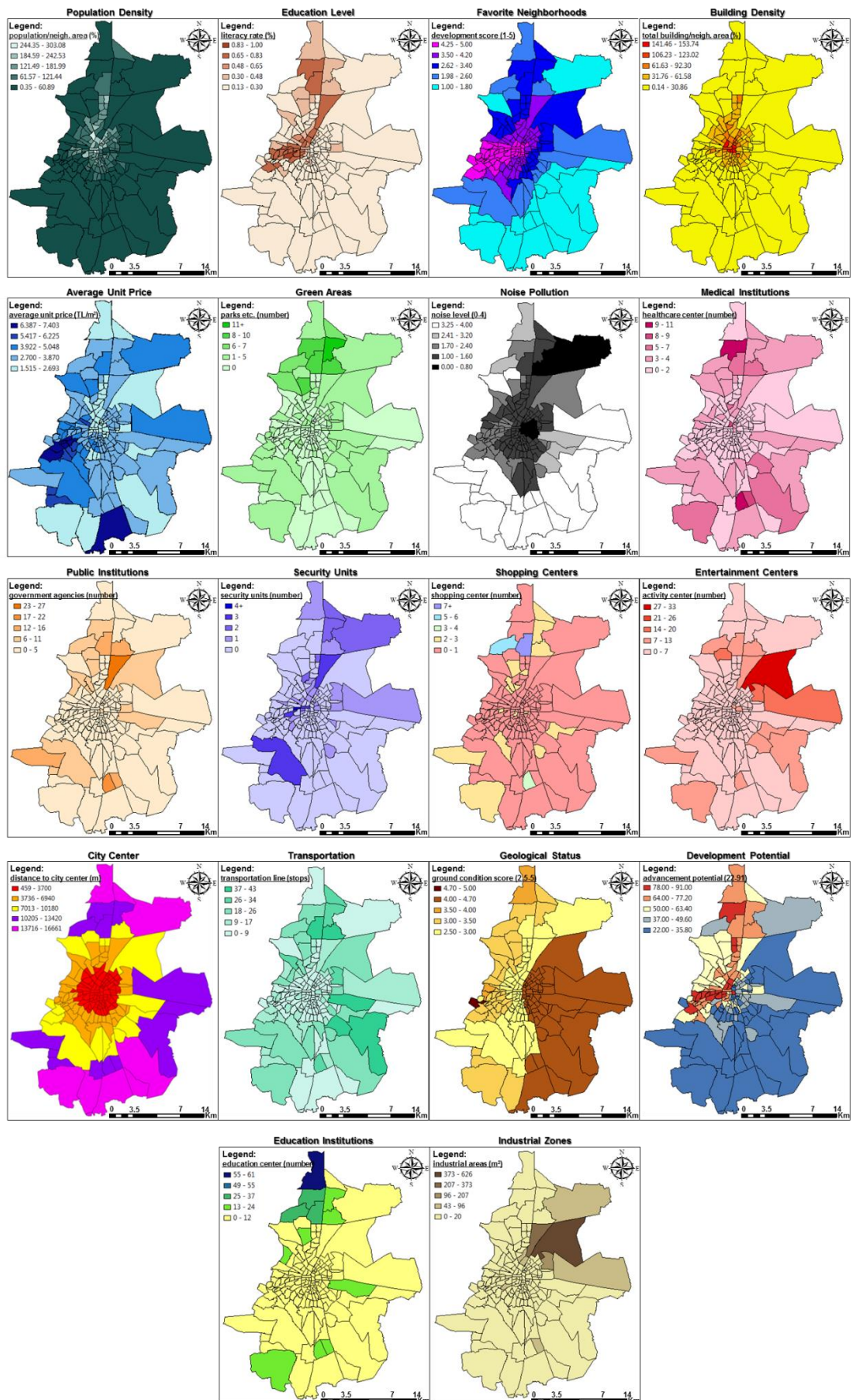


Figure 2. Features used for the study

### 2.3. Cluster Analysis

Cluster analysis, which is among the multivariate statistical methods, used to group data in a large number of complex datasets and to compare the groups formed, is a method that is frequently used because it is easy to apply and the results are understandable (Everitt *et al.*, 2001). Nowadays, there are many clustering algorithms with different structures. The main purpose of cluster analysis is to classify and make sense of a group of data whose cluster is unknown. Briefly, cluster analysis is used to classify variables according to their basic features. Within the scope of this study, K-Means, Hierarchical and OPTICS clustering are discussed.

#### 2.3.1. K-Means Clustering

K-means algorithm is one of the unsupervised learning and data-clustering model developed by J. B. MacQueen (1967). The purpose of the algorithm is to ensure that the clusters obtained at the end of the clustering process have maximum similarities within clusters and minimum similarities between clusters. The application process begins with grouping the features according to a predetermined number of clusters. K-means treats the mean vectors of the features as the cluster center and the clustering process is shaped around it (Aldino *et al.*, 2021). It aims to divide the features into the dataset into  $k$  clusters in a way that minimizes the sum of squares within the cluster. A distinctive observation is then selected to represent each cluster itself, and similar features are clustered around the distinctive observation. The process of placing features into clusters is done iteratively. Variables are assigned to different clusters at each iteration, and the optimal solution is determined in a way similar to the permutation approach. Given a series of variables  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , where each variable is an  $a$ -dimensional actual vector, k-means algorithm purposes to division the  $n$  variables into  $k$  ( $\leq n$ ) series  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  to reduce the Within-Cluster Sum of Squares (WCSS). Consequently, the purpose is to calculate (Kriegel *et al.*, 2017) (1):

$$\operatorname{argmin} \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^k |S_i| \operatorname{Var} S_i \quad (1)$$

Where  $\mu_i$  is the average of points in  $S_i$ . This is equation to decreasing the pairwise squared deviations of points in the same cluster (2):

$$\operatorname{argmin} \sum_{i=1}^k \frac{1}{|S_i|} \sum_{x, y \in S_i} \|x - y\|^2 \quad (2)$$

In addition to the easy use and evaluation of the k-means, it is more preferred in datasets with continuous structure. However, the algorithm has some restrictions of its own. If the observations in the dataset to exhibit an asymmetric structure or contain many outliers, a suitable mean position parameter cannot be found. Therefore, cluster centers cannot accurately represent their members, and also a homogeneous structure may not be formed even if clusters due to the smallest differences are formed.

#### 2.3.2. Hierarchical Clustering

The main idea of the hierarchical clustering algorithms is based on the combination of similar objects or vice versa. According to this case, there are two basic structures in application: agglomerative and divisive approaches. Agglomerative clustering algorithm start the analysis by assuming that all objects in the data set form a different cluster. In this method,  $n$  objects in the dataset are hierarchically, respectively; it aims to place  $x$  clusters,  $x-2$  clusters, ...,  $x-r$  clusters, ..., 3 clusters, 2 clusters, and 1 cluster. In practice, each object is initially considered as a separate set. Two objects that are highly similar to each other form a cluster. Then, other features with different similarity levels are added to this cluster and they are

connected with each other in such a way that all the objects are collected in a cluster (Davidson and Ravi, 2005). Contrary to the agglomerative approach, a discriminatory strategy is dominant in the divisive approach. In this approach, there is only one cluster at the beginning. The objects are separated from the top-cluster according to the euclidean distance, and different sub-clusters are formed. As a result of the process, each data becomes a cluster. Hierarchical clustering algorithms are a clustering approach that is widely used in shaping the clusters formed by the objects, in terms of showing at what stage and at what level of similarity they form clusters with common objects (Fernández and Gómez, 2008).

### 2.3.3. OPTICS Clustering

OPTICS (Ordering Points to Identify the Clustering Structure) is a clustering algorithm for identifying clusters of varying density, including spatial data. It was proposed by Ankerst *et al.* (1999) at the SIGMOD'99 conference. OPTICS can be considered as an enhancement of the DBSCAN algorithm rather than an algorithm on its own. OPTICS can save the  $\epsilon$  (Eps) value, which is the biggest weakness of DBSCAN, from being entered by the user, and can change this value dynamically while the algorithm is running. In this way, the algorithm can find and display one extra distance parameter of the DBSCAN algorithm in a single run. OPTICS searches two parameters: The first of these is the parameter  $\epsilon$ , which defines the maximum radius. The other is the *MinPts* parameter, which defines the number of points required to create a cluster (Campello *et al.*, 2020). A point  $p$  is a core point if at least *MinPts* points are found within its  $\epsilon$ -neighborhood  $N_\epsilon(p)$ . Since OPTICS also considers points that are part of a denser set, it takes two more terms into account for each point. These are core distance and reachability distance. Each point is assigned a core-distance that defines the distance to the *MinPts*<sup>th</sup> closest point (URL2) (3):

$$\text{Core\_dist}_{\epsilon, \text{MinPts}}(p) = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } |N_\epsilon(p)| < \text{MinPts} \\ \text{MinPts}^{\text{th}} \text{ smallest distance in } N_\epsilon(p) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

The reachability-distance of another point  $o$  from a point  $p$  is either the distance between  $o$  and  $p$ , or the core distance of  $p$ , whichever is bigger (4):

$$\text{Reachability\_dist}_{\epsilon, \text{MinPts}}(o, p) = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } |N_\epsilon(p)| < \text{MinPts} \\ \max(\text{core\_dist}_{\epsilon, \text{MinPts}}(p), \text{dist}(p, o)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

If  $o$  and  $p$  are nearest neighbors, this is the  $\epsilon$ -prime  $< \epsilon$  we need to assume to have  $p$  and  $o$  belong to the same cluster. Both core-distance and reachability-distance are undefined if no sufficiently dense cluster is available (Breunig *et al.*, 1999). In other words, while the algorithm will find all the clusters with the density determined by the chosen values for  $\epsilon$  and *MinPts*, it may miss higher-density clusters that are contained in these clusters. These higher-density clusters become visible only at some  $\epsilon$ -prime  $< \epsilon$ . The problem is that there is no way of knowing these  $\epsilon$ -prime values in advance, so all one can do is run DBSCAN for as many  $\epsilon$ -prime values as feasible. OPTICS solves this problem by ordering the points in the dataset and by associating with each point two values (URL3).

## 3. RESULTS

In this study, clustering algorithms belonging to different structures were used to group central neighborhoods (167 neighborhoods) in Konya in terms of urban functions/reinforcement and to reveal the regional similarity or differences of these neighborhoods (Fig. 3). After obtaining neighborhood-scale datasets through GIS-based analyzes, K-means, Hierarchical (agglomerative) and OPTICS clustering analyzes were realized to cluster central neighborhoods with similar urban functions. 18 features related to urban functions were considered as input parameters in the clustering analysis. Clustering processes were applied for the study area, taking into account various features according to the urban development status of the neighborhoods.

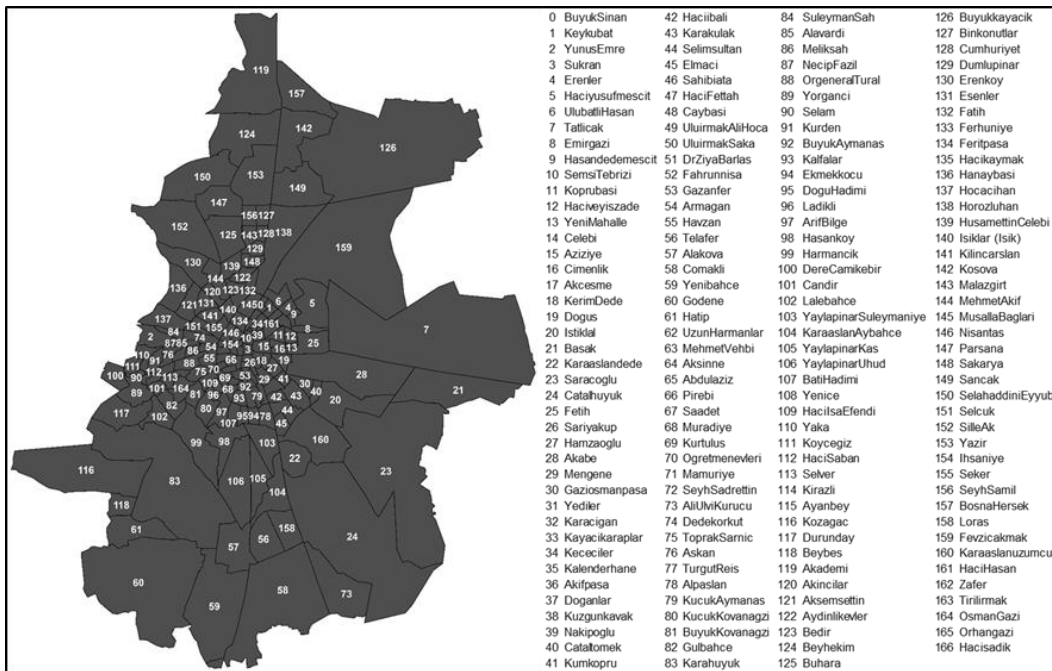


Figure 3. The numbering of 167 central neighborhoods in Konya

### 3.1. Clustering of neighborhoods with the K-Means algorithm

The K-Means clustering was performed for the determination of central neighborhoods with similar development functions and urban features. A clustering process was carried out with the features showing the development level of neighborhoods and the results of the analysis were interpreted. An open-source software, Python v3.8 program language, was preferred to perform the clustering analysis. Firstly, python libraries were imported for K-means clustering and datasets (18 features) belonging to 167 neighborhoods were included in the application. To cluster the data, the optimal K value must be found. Here, the Elbow Method was used to find the optimal K value. WCSS value was calculated for each K value. Then WCSS was shown on the graph together with the K value (Fig. 4).

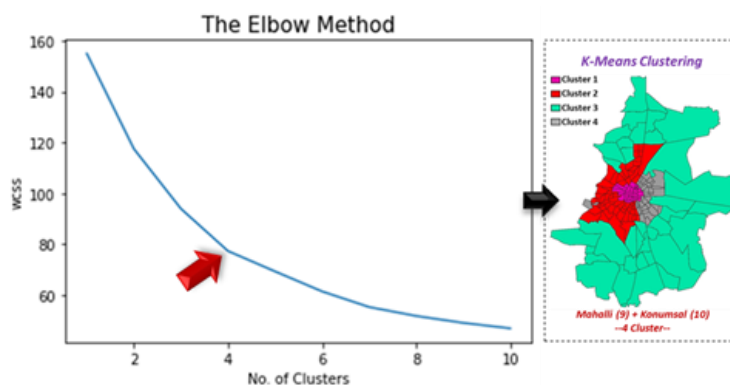


Figure 4. The optimal number of clusters according to the Elbow Method

The point at which the elbow shape is created is 4, that is, our K value or an optimal number of clusters is 4. As a result of the analysis, the number of 4 clusters determined by the elbow method was not used, since the optimal number of clusters could not reflect the diversity in the urban structure of Konya. In the study, it is purposed to determine a common number of clusters to be able to compare the clusters that



will be formed with different clustering algorithms. Therefore, the number of 5 clusters that could reveal different socio-development for the study area was decided. In addition, it was concluded that this number of clusters (5) could be used as a standard in other clustering analyses in the study. The purpose is also to display the effect of different clustering analyzes. Neighborhood clusters formed as a result of K-Means clustering are shown in Fig. 5.

It was observed that there were 25 neighborhoods in Cluster-1 (red), 21 neighborhoods in Cluster-2 (yellow), 50 neighborhoods in Cluster-3 (grey), 52 neighborhoods in Cluster-4 (green), and 19 neighborhoods in Cluster-5 (blue). In the regions close to the city center in Konya, three different clusters have been observed and these are divided as Cluster-1, Cluster-3 and Cluster-4. Cluster-2 and Cluster-5 are located in the north and south of the study area, respectively.

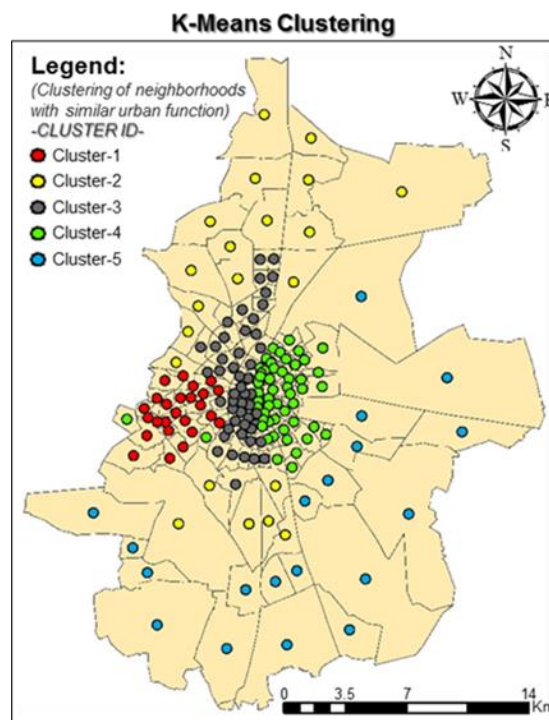


Figure 5. Clustering of neighborhoods with similar urban function (K-means)

### 3.2. Clustering of neighborhoods with the Hierarchical method

Within the scope of the study, the clustering was performed using the hierarchical (agglomerative) algorithm. At first, NumPy, Pandas and Matplotlib libraries in Python v3.8 were imported for the application. In addition, the Scikit-Learn library was used for agglomerative hierarchical clustering analysis, and the SciPy library was used for Dendrogram. In hierarchical clustering analyses, dendrograms were preferred to determine the number of clusters or to easily interpret the results obtained.

While generating the dendrogram for the related dataset, "the linkage method of Ward" was used to cluster. The euclidean distance between the clusters is seen on the y-axis of the produced dendrogram. On the x-axis, there are the ID (label) numbers of the data points that form the clusters (Fig. 6). When the y-axis is examined, there are 4 dashed lines. Threshold was applied because we wanted the distance between our final clusters to be at least 4. As can be seen, this lower border crosses 4 vertical columns. This actually says that there are 4 clusters representing our dataset.

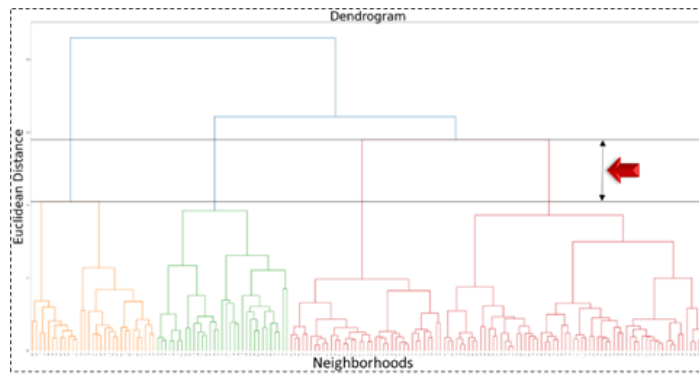


Figure 6. Dendrogram representation

As in K-Means algorithm, the optimum number of clusters was determined as 5 in this clustering analysis. Already at least 4 clusters were found through dendrograms. For this reason, the neighborhoods are divided into 5 clusters (Fig. 7). It was observed that there were 25 neighborhoods in Cluster-1 (red), 18 neighborhoods in Cluster-2 (yellow), 51 neighborhoods in Cluster-3 (grey), 53 neighborhoods in Cluster-4 (green), and 20 neighborhoods in Cluster-5 (blue). In the regions close to the city center in Konya, three different clusters have been observed and these are divided as Cluster-1, Cluster-3 and Cluster-4. Cluster-2 and Cluster-5 are located in the north and south of the study area, respectively.

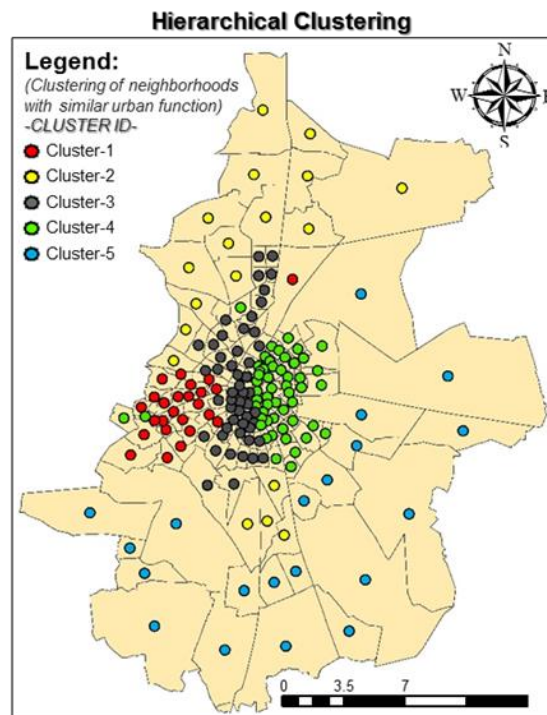
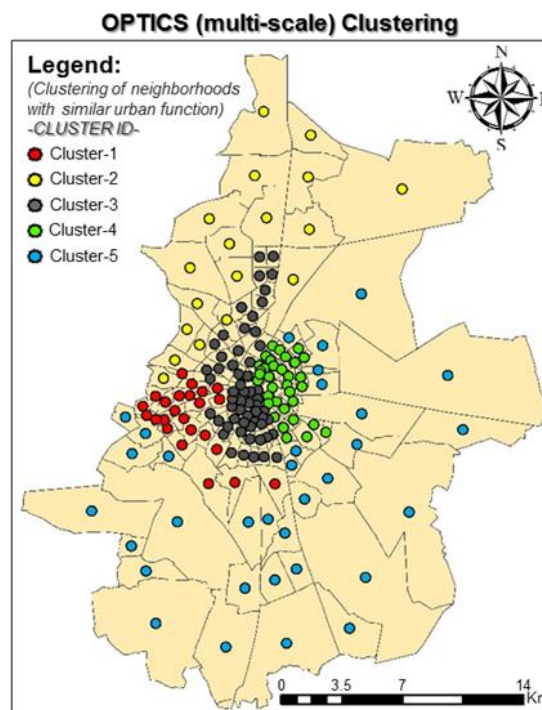


Figure 7. Clustering of neighborhoods with similar urban function (Hierarchical)

Similar results were obtained from K-Means and Hierarchical clustering. In both clusters (Cluster-2 and Cluster-4), there are neighborhoods with similar features in different regions. Therefore, neighborhoods that are not spatially dependent on each other can coexist as a result of similar features (depending on attributes).

### 3.3. Clustering of neighborhoods with the OPTICS algorithm

In this study, ArcGIS Pro 2.8 was used to implement the OPTICS algorithm. The distance between neighbors and reachability values were determined to separate clusters of varying densities from noise. OPTICS offers the most flexibility in fine-tuning the clusters that are detected, though it is computationally intensive, particularly with a large search distance. The `max_search_dist` parameter was preferred as the `search_dist` for the OPTICS option in this study. `Min_features_cluster` to be considered as a cluster was chosen as 10 according to the distinguishability of neighborhood features. As selected in K-means and Hierarchical clustering, the optimum number of clusters was determined as 5 and, the OPTICS clustering results were given in Fig. 8.



**Figure 8.** Clustering of neighborhoods with similar urban function (OPTICS)

It was shown that there were 24 neighborhoods in Cluster-1 (red), 18 neighborhoods in Cluster-2 (yellow), 58 neighborhoods in Cluster-3 (grey), 34 neighborhoods in Cluster-4 (green), and 33 neighborhoods in Cluster-5 (blue). Compared to other clustering methods, different neighborhoods have come together in OPTICS. The reason is that: while there are similarities between spatial and non-spatial (such as K-means and Agglomerative method) statistics in terms of concepts and objectives, spatial statistics are unique in that they were developed specifically for use with geographic data. Unlike non-spatial statistical methods, they incorporate space (proximity, area, connection or other spatial relationships) directly into their mathematics.

### 3.4. Evaluation of different clustering algorithms

In this study, the clustering results were obtained with three different methods. It has been examined whether the central districts are in the same cluster (according to different methods) in terms of urban functions. When each clustering technique was evaluated individually, the optimal number of clusters found differed (4 for k-means clustering, 4 for hierarchical clustering, and 5 for OPTICS clustering). However, it was noticed that the number of clusters found decreased the cluster score. Therefore, optimal cluster numbers determined as a result of clustering were not used as they could not reflect the diversity

in Konya's urban structure. So, the number of 5 clusters that could reveal different socio-development for the study area was decided. Clustering results of neighborhoods whose number order was determined before (as seen in Fig. 3) are shown symbolically in Fig. 9.

In the hierarchical clustering, a total of 6 central neighborhoods (81, 83, 90, 99, 138 and 139) are located in different clusters according to k-means, while other neighborhoods are located in the same clusters. In these methods, neighborhood relations (spatial relations of neighborhoods with each other) were not taken into account, and clustering was carried out only on attribute data. For the OPTICS, more different neighborhood clusters appeared in the study area. The reason is that, as expressed earlier, spatial clustering methods incorporate proximity, area, connection, and/or other spatial relationships directly into their mathematics. Therefore, neighborhood relations of neighborhoods were also taken into account in clustering analyses. The most important criteria that distinguish OPTICS from k-means and hierarchical methods are that it is involved in its spatial dimension.

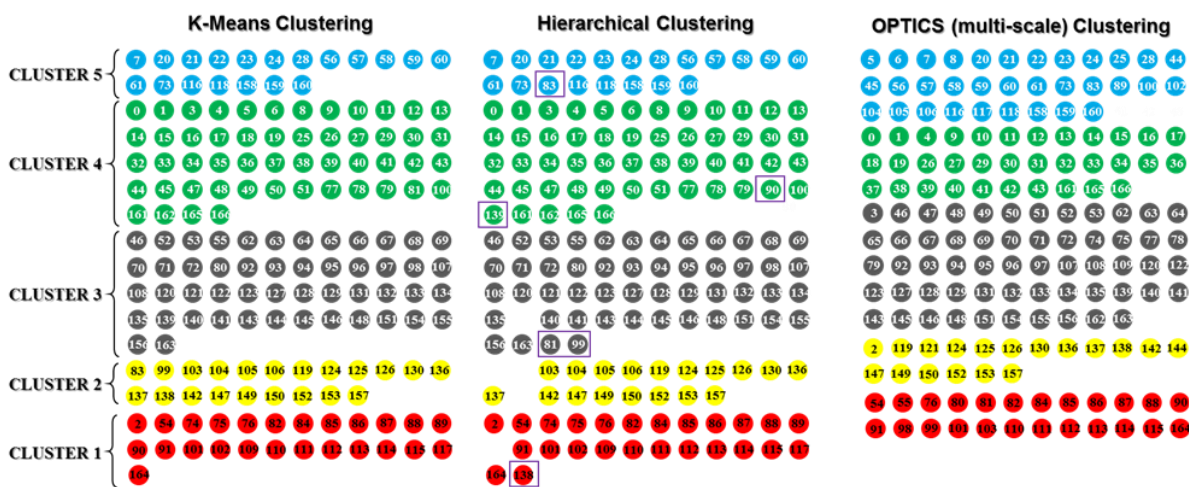


Figure 9. Clustering results (Each number corresponds to a Neighborhoods-ID)

Finally, the cluster score was calculated for each cluster to interpret the degree of discrimination of the clusters and the extent to which the neighborhoods were separated according to urban functions. The following procedure was followed while calculating the cluster scores. In the first stage, each of the 18 features was scored between 0 and 100 according to the degree of influence in the neighborhood. In other words, if a feature has a sufficient level in a neighborhood, it is scored as 100 or 0 if it does not exist. There is, but if it is not at a sufficient level, it has taken the corresponding value in the range of 0-100. The total score for each neighborhood was obtained by adding the scores from each feature. Then, the total scores of the neighborhoods within the same cluster were added and averaged, and an average score was found for Clusters 1, 2, 3, 4 and 5 (Table 2).

Table 2. Average score calculated for each cluster

| Methods      | C-1          | C-2          | C-3          | C-4          | C-5          |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|              | Score (Avg.) | Score (Avg.) | Score (Avg.) | Score (Avg.) | Score (Avg.) |
| K-Means      | 80.50        | 76.64        | 74.54        | 73.36        | 70.22        |
| Hierarchical | 81.52        | 76.26        | 73.68        | 73.28        | 69.66        |
| OPTICS       | 84.50        | 82.72        | 74.40        | 73.36        | 68.48        |

Note: C: Cluster; Avg: Average

It was concluded that the most distinctive clustering was obtained with OPTICS. While deciding on this result, it was examined whether each neighborhood was in the right cluster. In addition, the fact that

the highest and lowest cluster scores and differences are in OPTICS clustering indicates that neighborhoods are better grouped according to urban functions.

#### 4. CONCLUSION

In cities that grow and develop with population growth, there has been a development level that differs in settlement areas depending on the proximity to existing urban function and socio-economic structure. This process has developed in line with the changing policies and investment trends over time, not depending on direct planning. However, it is not correct to move the population in one direction only towards regions with high development levels. Because, depending on the population, the current needs may not be met and segregation among citizens in regions with different levels of development has a negative effect. Therefore, it is necessary to determine the adequacy of urban functions by making the distribution within the framework of population needs. The situation of the regions/neighborhoods relative to each other in terms of urban functions should be known beforehand.

In this study, clustering analyzes belonging to different structures were used to group 167 central neighborhoods in Konya in terms of urban functions and to reveal the regional similarity or differences of these neighborhoods. After obtaining neighborhood-scale datasets through GIS-based analyzes, K-means, Hierarchical (agglomerative) and OPTICS clustering analyzes were realized to cluster central neighborhoods with similar urban functions. 18 features related to urban functions were considered as input parameters in the clustering analysis. Clustering processes were applied for the study area, taking into account various features according to the urban development status of the neighborhoods. Results showed that cluster analysis can be used in such studies. It is recommended to determine the economic, social and technological changes experienced in the society and the service demands that develop / may develop in parallel with this. It is important to carry out such clustering studies to eliminate the socio-economic development differences in the neighborhoods and to target more fair-egalitarian service delivery.

#### REFERENCES

- Arı, E., Hüyüktepe, B., 2019, "Sosyo-ekonomik göstergeler için çok değişkenli veri analizi: Türkiye için ampirik bir uygulama", *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11, 7-20.
- Aldino, A. A., Darwis, D., Prastowo, A. T., Sujana, C., 2021, Implementation of K-means algorithm for clustering corn planting feasibility area in south lampung regency, *In Journal of Physics: Conference Series*, 1751, 1, 012038, IOP Publishing.
- Ankerst, M., Breunig, M. M., Kriegel, H. P., Sander, J., 1999, OPTICS: Ordering points to identify the clustering structure, *ACM SIGMOD record*, 28(2), 49-60.
- Artmann, M., Inostroza, L., Fan, P. 2019, Urban sprawl, compact urban development and green cities, How much do we know, how much do we agree?, *Ecological indicators*, 96, 3-9.
- Breunig, M. M., Kriegel, H. P., Ng, R. T., Sander, J. 1999, Optics-of: Identifying local outliers, *In European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, 262-270, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Buffel, T., Phillipson, C., 2016, Can global cities be 'age-friendly cities'? Urban development and ageing populations, *Cities*, 55, 94-100.
- Campello, R. J., Kröger, P., Sander, J., Zimek, A., 2020, Density-based clustering, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(2), e1343.
- Çetin, İ., Sevüktekin, M., 2016, Türkiye'de gelişmişlik düzeyi farklılıklarının analizi, *Uluslararası Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 39-61.
- Davidson, I., Ravi, S. S., 2005, Agglomerative hierarchical clustering with constraints: Theoretical and empirical results, *In European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery*, 59-70. Springer, Berlin, Heidelberg.

- ESRI, 2021, Data classification methods (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.html>).
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., 2001, Cluster analysis arnold, *A member of the Hodder Headline Group*, London, 429-438.
- Fernández, A., Gómez, S., 2008, Solving non-uniqueness in agglomerative hierarchical clustering using multidendrograms, *Journal of Classification*, 25(1), 43-65.
- Fragkias, M., Seto, K. C., 2009, Evolving rank-size distributions of intra-metropolitan urban clusters in South China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(3), 189-199.
- Fuseini, I., Kemp, J., 2015, A review of spatial planning in Ghana's socio-economic development trajectory: A sustainable development perspective, *Land use policy*, 47, 309-320.
- Gündüz, M. Y., 2019, Ataköy Ve Şirinevler Mahallelerinin Kentsel Donatı Elemanlarının Kent Kimliği Açısından Değerlendirilmesi, *The Journal of Turk & Islam World Social Studies*, 23, 255-281.
- Karabulut, M., Gürbüz, M., Sandal, E. K., 2004, Hiyerarşik Kluster (Küme) Tekniği Kullanılarak Türkiye'de İllerin Sosyo-Ekonomik Benzerliklerinin Analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 65-78.
- Kriegel, H. P., Schubert, E., Zimek, A., 2017, The (black) art of runtime evaluation: Are we comparing algorithms or implementations?, *Knowledge and Information Systems*, 52(2), 341-378.
- MacQueen J. B., 1967, Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, 1:281-297.
- Sakarya, Â., İbişoğlu, Ç., 2015, Türkiye'de İllerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Endeksinin Coğrafi Ağırlıklı Regresyon Modeli İle Analizi, *Marmara Coğrafya Dergisi*, 32, 211-238.
- Servi, T., Erişoğlu, Ü., 2020, Türkiye'deki şehirlerin sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeylerinin istatistiksel analizi. *Al Farabi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 174-186.
- Sisman, S., Aydinoglu, A. C., 2020, Using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques in the smart cities, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Snieška, V., Šimkūnaitė, I., 2009, Socio-economic impact of infrastructure investments, *Inžinerinė ekonomika*, 3, 16-25.
- TÜİK, 2022, Türkiye İstatistik Kurumu, Nüfus ve Demografi İstatistikleri, 2022 Yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, <https://cip.tuik.gov.tr/#>.
- Uysal, F. N., Ersöz, T., Ersöz, F., 2017, Türkiye'deki illerin yaşam endeksinin çok değişkenli istatistik yöntemlerle incelenmesi. *Ekonomi Bilimleri Dergisi*, 9(1), 49-65.
- Zhang, Q., Hu, Y., Liu, J., Liu, Y., Ren, W., Li, J., 2012, A quantitative assessment of the distribution and extent of urban clusters in China. *Journal of Geographical Sciences*, 22(1), 137-151.
- <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/>, (09.09.2022), URL1.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/OPTICS\\_algorithm#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/OPTICS_algorithm#cite_note-1) , (27.04.2022), URL2.
- <https://nodepit.com/node/org.knime.base.node.mine.optics.compute.OPTICSComputeNodeFactory> , (26.04.2022), URL3.



## CONTACT METAMORPHISM OF LATE SILURIAN-EARLY CARBONIFEROUS METACARBONATES BY METAMAFIC DYKES AROUND LADIK AND ESIRAĞIL AREA (KONYA, CENTRAL TURKEY)

<sup>1</sup>Kerim KOÇAK , <sup>2</sup>Adnan DÖYEN 

*Konya Teknik Üniversitesi, Engineering and Natural Sciences Faculty, Geological Engineering Department, Konya, TÜRKİYE*

<sup>1</sup>[kkocak@ktun.edu.tr](mailto:kkocak@ktun.edu.tr), <sup>2</sup>[adoyen@ktun.edu.tr](mailto:adoyen@ktun.edu.tr)

**ABSTRACT:** In NNW Konya, mafic rocks form as dyke swarm or isolated linear dykes, which are cut by a series of normal faults that developed possibly by emplacement of the dyke-forming magma. Some anhydrous oxidized calcic skarn zones have ever been found out in Silurian-Early Carboniferous metacarbonates next to the Triassic metamafic dykes faulted, and in roof pendants within the intrusion. The metamafic rocks are suggested to have a low temperature and a small amount (or even absence) of the heat of crystallization, which causes the development of a restricted skarn zone. Mineralogical studies show that the skarn contains garnet, magnetite/hematite, chlorite, and sericite. The magnetite/hematite minerals form mostly as large euhedral crystals, up to 0.5 cm in length, which may be resorbed by chlorite and felsic minerals or rimmed by goethite. The garnet typically forms as spectacular euhedral large crystals, up to ~1.5 mm in size. The existence of chlorite and sericite, and the lack of hornblende, biotite and wollastonite in the region indicate that contact metamorphism took place under low pressure, relatively low temperatures (albite-epidote hornfels) and/or high CO<sub>2</sub> conditions in the area.

*Keywords: Skarn, Dyke Swarm, Garnet, Konya*

### Ladik ve Esirağıl Alanı (Konya, Orta Anadolu) Yöresindeki Geç Silüriyen Erken Karbonifer Yaşlı Metakarbonatların Metamafik Dayklarla Kontakt Metamorfizması

**ÖZ:** Konya'nın KKB'da dayk topluluğu veya muhtemelen dayk oluşturan magmanın yerleşimi ile gelişen bir dizi normal faylar tarafından kesilmiş izole çizgisel dayklar şeklinde mafik kayalar oluşur. Faylanmış Triyas yaşlı metamafik dayklara komşu Silüriyen-Erken Karbonifer yaşlı metakarbonatlar ve sokulumdaki çatı askıları içerisinde, ilk kez su içermiyen oksitlenmiş Ca'ca zengin bazı skarn zonları belirlenmiştir. Metamafik kayaların, sınırlı skarn zonunun gelişimine neden olan düşük sıcaklığa ve az miktarda (veya yok) kristalleşme sıcaklığına sahip olduğu ileri sürülmüştür. Mineralojik çalışmalar, skarnın granat, manyetit/hematit, klorit ve serisitten oluştuğunu gösterir. Manyetit/hematit mineralleri, klorit ve açık renkli mineraller tarafında kemirilebilen veya götöt tarafından çevrilen, çoğunlukla 0.5 cm uzunluğa kadar gelişmiş özşekilli kristaller şeklinde oluşur. Granat tipik olarak ~1.5 mm boyuta kadar ulaşan harikulade özşekilli iri kristaller şeklinde oluşur. Bölgede klorit ve serisit varlığı ve hornblend, biyotit ve vollastonitin yokluğu kontakt metamorfizmanın düşük basınç, nispeten düşük sıcaklık (albit-epidot hornfels) ve/veya yüksek CO<sub>2</sub> şartlarında yer aldığına işaret eder.

*Anahtar Kelimeler: Skarn, Dayk Topluluğu, Granat, Konya*

## 1. INTRODUCTION&GEOLOGICAL SETTING

The intrusion of igneous rocks into colder or to some extent heated country rocks at relatively shallow depths in the upper crust induces a sharp increase in temperature so that the geothermal gradient exceeds ~90 °C/km at contact with intruding magma, and results in contact metamorphism (Kerrick, 1991;

Reverdatto *et al.*, 2019). In comparison with regional metamorphism, contact metamorphism is typified by shorter heating and cooling time scales.

The term “contact metamorphism” was used first by (Delesse, 1857). Karl H. F. Rosenbusch defined first a zonal contact aureole in slates near the Barr-Andlau granite pluton (Rosenbusch, 1877). One of the earliest examples of contact metamorphism to be recognized was the pyroxene granulite facies metamorphism of basaltic rocks by Tertiary gabbros of Scotland (Geikie, 1889).

In Turkey, various contact metamorphic occurrences with various mineral assemblages have also been reported; e.g., the assemblage of wollastonite + garnet + An73 plagioclase + orthoclase + corundum + hercynite + hedenbergite-diopside ± scapolite in calcareous next to granitoids (Ortakoy-Aksaray; Kocak, 1993; Kocak and Leake, 1994), that of muscovite + biotite + garnet and forsterite+calcite around the Ahiçay-Elmalıçay granitoid in the Kastamonu granitoid belt (Boztuğ and Yılmaz, 1995), andalusite + corundum + K-feldspar assemblage around granodiorite in Eastern Pontides (Topuz, 2006), dio+gar±ep±qtz around Karadoru granitoid (Çanakkale, Aysal *et al.*, 2006), and Spurrite + rustumite + hillebrandite + tilleyite + cuspidine + vesuvianite + monticellite + gehlenite one around tonalite Eastern Black Sea (Taner *et al.*, 2013).

The study area is located in Afyon-Bolkardağı Zone (Okay, 1986) or Konya complex (Robertson and Ustaomer, 2009; Lowen *et al.*, 2019) in the NNW part of Konya. The oldest formation in the region is Silurian–Early Carboniferous (Figure 1; Eren and Kurt, 2000) mostly massive shelf carbonate, with grey to bluish grey in colours (Bozdağ formation). The carbonate contains low-grade metamorphosed limestone, dolomitic limestone, and dolomite, with metachert band and lenses (Hekimbaşı, 1996; Kurt, 1997). It is aged as Late Silurian–Early Devonian (Göncüoğlu *et al.*, 2000), Middle-Late Devonian and Early Carboniferous age (Eren, 1993; Kurt, 1994) based on fusulinids, crinoids, corals, and trilobites. It hosts various calcite and barite veins emplaced through their joints, with thickness ranging from 10 to 40 cm.

The carbonates rocks were cut by various metaigneous rocks (Kadinhani metamagmatics) with sharp contacts around Bagrikurt and Sızma villages, which have various compositions ranging from basaltic to rhyolitic ones (Kurt, 1996, Özcan *et al.*, 1990; Kurt and Asan, 1999). The age of metaigneous rock is constrained to be Silurian-Lower Permian (Eren, 1993) and Early Triassic (Akal *et al.*, 2012) on the basis of stratigraphical characteristics and zircon geochronology, respectively.

The carbonates rocks intruded by metamafic dykes, are found out first time that has skarn zone development. This study aims to deal with geological and mineralogical characteristics of the skarn zone developed within the metacarbonates by metamafic dyke, around Ladik and Esirağıl area (Konya, Turkey).

## 2. METHODS

Thirty-two samples were collected from the skarn zone, metamafic and metacarbonates during field studies. Some samples are cut to see mineral structure. From fresh and representative samples, their thin sections were made to study under the polarizing microscope at the Department of Geological Eng., Konya Technical University.

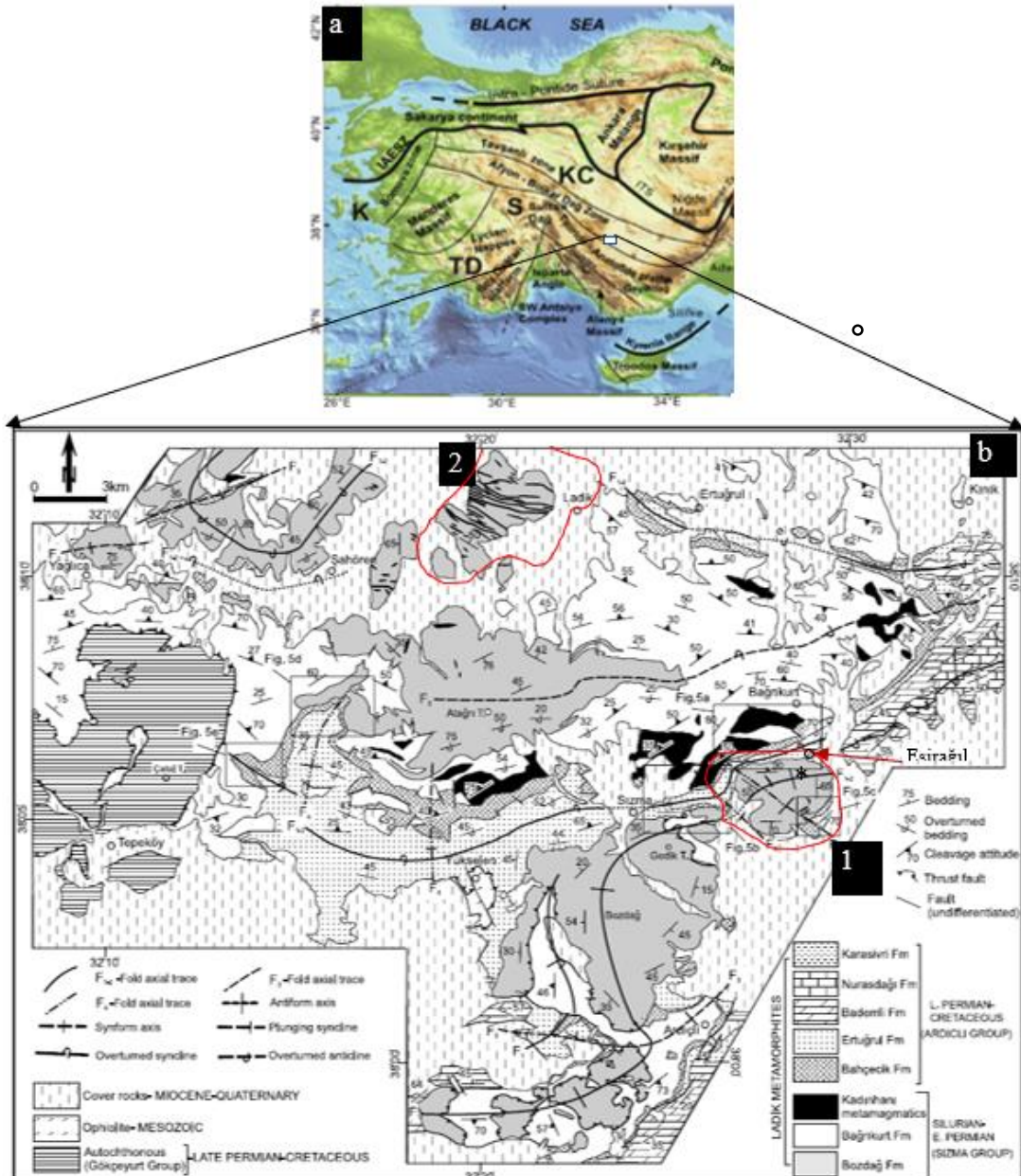
### 2.1. Contact Metamorphism

Metamafic rocks occur as parallel dyke swarm around Ladik (Figure 1), with light-dark green colour. In the field, it is generally covered by its alteration products with dark colour and plants. Dyke assemblages of different thicknesses are observed, which generally strike in two directions; the dykes have trending in (I) ~E-W (older) and (ii) ~N-S (younger) directions, with a maximum length of 3078 m (i), and thickness of 73.11m (Koçak, 2020). The metamafic dyke also occurs as isolated dykes with a length of ~800 m around SSW of Bahçecik village (Figure 1, 2), which is cut by strike-slip faults.

Two skarn zones have ever been found out during field studies (Figure 1, 2); (a) In a road cutting around Ladik town, a typical skarn zone developed in metacarbonates in relation with the intrusion of dyke swarms. A chilly zone with thickness up to 25 cm, developed at the border of dyke and FeO mineralizations as pockets within the carbonates (Figure 3, 4) by contact metamorphism. (b) In the south



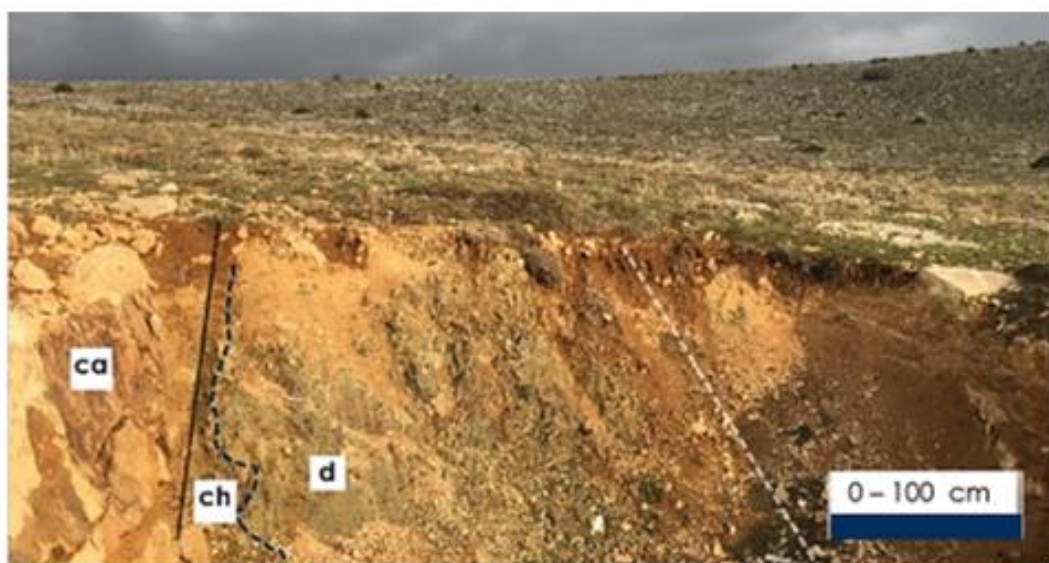
of Bahçecik village, the skarn zone has been found out metacarbonates next to the isolated metamafic dykes, but mostly within metacarbonates as exoskarn (Figure 5, 6.) There is a linear dyke development with a length of ~790 m (Figure 5), where fresh specimens can be obtained especially on the hill in the south of Bahçecik village. The dykes are located perpendicular to the direction of the metacarbonates and were cut by some strike-slip faults. The location is characterized by existence of carbonate/calcsilicate xenoliths as blocks with FeO enrichment. Crystal size of the calcite in the metacarbonates next to the intrusion may increases towards to the dyke, which may have slight foliations parallel to the margins of intrusion. The carbonates may have been dissolved and consequently formed irregular space/pockets by hydrothermal solutions and were undergone brecciation producing a boudinage structure.



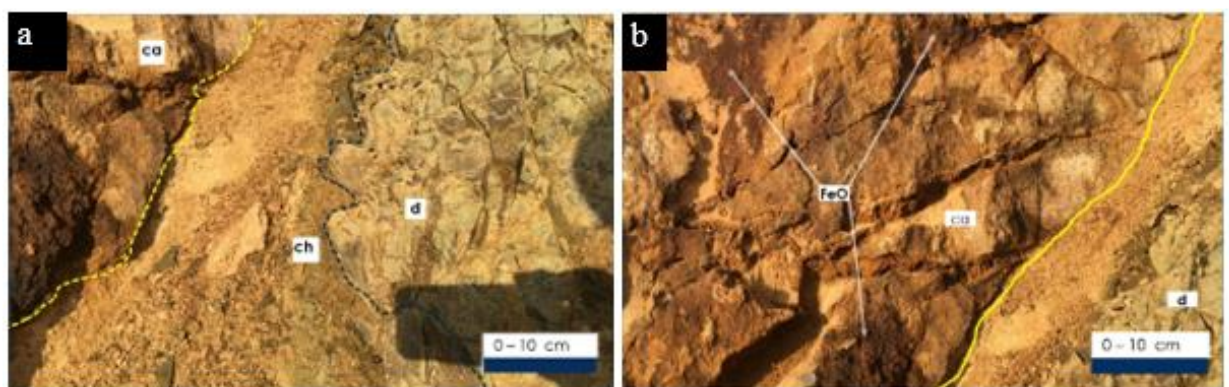
**Figure 1:** a) Outline tectonic map of Turkey (Robertson *et al.*, 2021). b) A geological map of the area (Eren, 1993) 1: Dyke swarms, 2: Isolated dykes. KC: Konya Complex, S: Sultandağı volcanics&tuffs (Tauride autochton), TD: Teke dere unit (Lycian nappes), K: Karaburun melange, Karaburun Peninsula



**Figure 2:** A Google Earth image of isolated dykes developing in SW(1) and SSW(2) of Bahçecik village. Scale bar 500 m.



**Figure 3:** A subvertical mafic dyke(d) with the chilly zone (ch) cutting metacarbonates(ca) in a road cutting.



**Figure 4:** a) A close view of the chilly zone(ch) between the dyke and carbonates b)FeO mineralizations developed in the carbonates (ca) intruded by dyke (d).

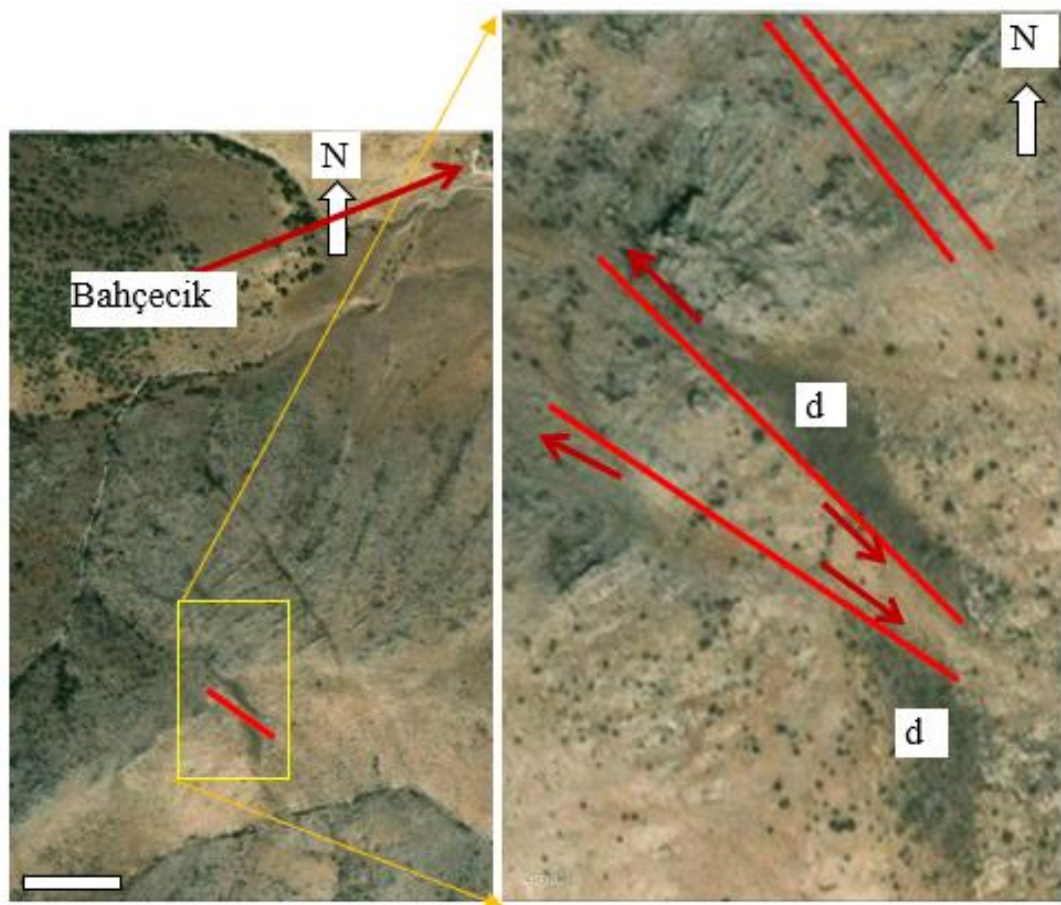


Figure 5: Google-Earth image of the dykes in the SSW of Bahçecik village. Scale bar is 250m.

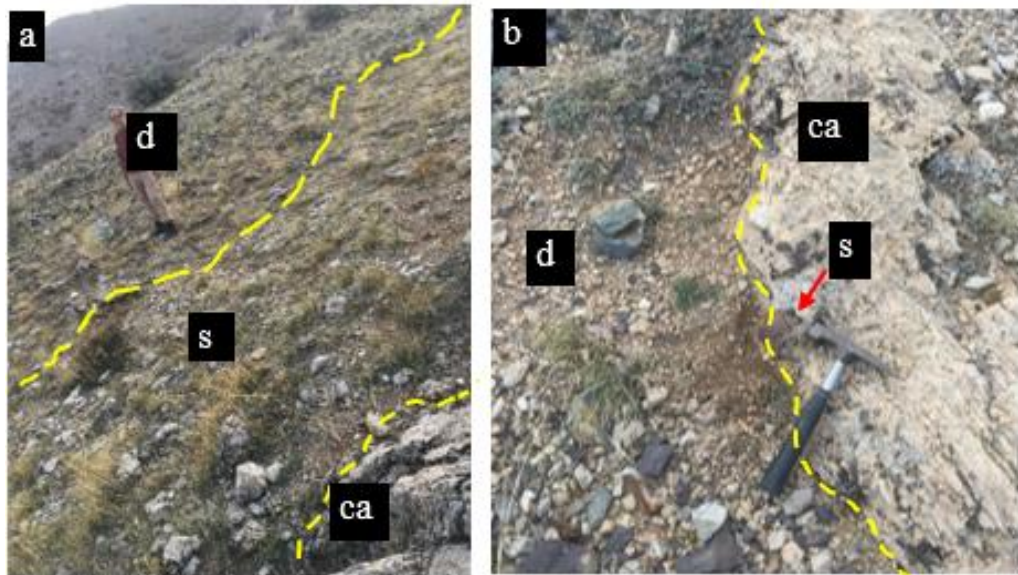


Figure 6: Skarn(s) ve metamafic(d) and wavy contact of metacarbonate (ca)

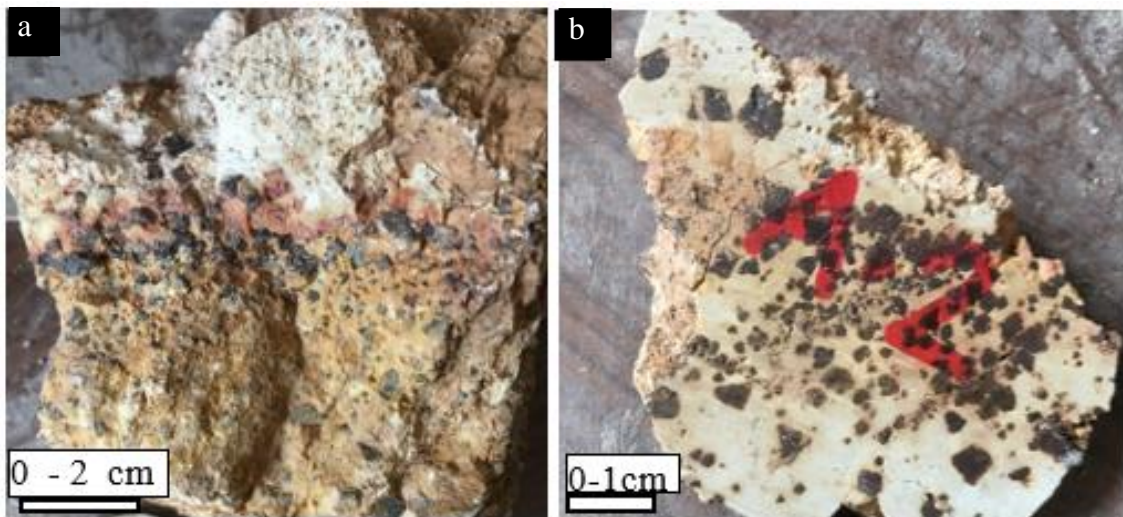
## 2.2. Mineralogy

The metamafic rocks can be classified as metadiabase/metagabbro. Mineralogical studies show that

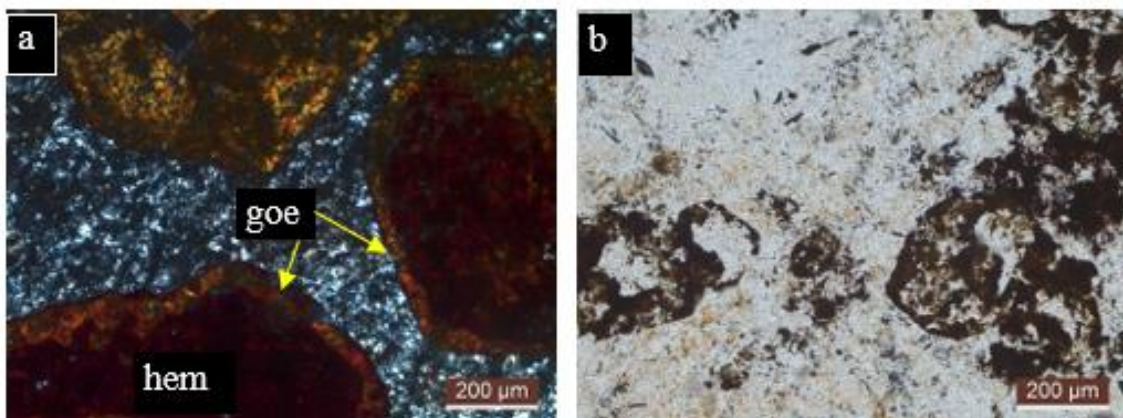
the primary components in the samples are quartz (5-20%), plagioclase (15-55%), orthoclase (0-5%), hornblende (5-40%), and pyroxene (0-18%). With alteration and metamorphism, glaucophane (0-8%), actinolite (0-36%), chlorite (20-60%), epidote (2-5%) and calcite (0-30%) have developed. The opaque minerals (magnetite/hematite, 0.1-0.3 mm, 4-30%) in the samples are mostly anhedral but sometimes prismatic and their amount varies between 10-30%.

Most of the iron mineralizations form as black euhedral crystals with three to six edges depending on section direction. The size ranges from less than 1 mm to 8 mm (Figure 7) in dispersed to laminated crystals, with occasional inclusions. The alteration process results in the development of red-brown coloured FeO coating from the euhedral opaque crystals (Figure 7).

The magnetite/hematite crystals may be rimmed by goethite (Figure 8a), or partially replaced by limonite/chlorite which is found as pseudomorph crystals with euhedral shape (Figure 8b). The opaque mineral is also rimmed and replaced by chlorite and quartz crystals (Figure 10a). The euhedral garnet may occur as large crystals, up to ~1.5 mm in size (Figure 9), and may contain some quartz inclusions, which exhibit parallel alignment to its edge and thus may form during its growth (Figure 10b).



**Figure 7:** a) Skarn sample with Fe mineralization b) Close view of the skarn sample



**Figure 8:** Microphotographs showing (a) central hematite, margins goethite (goe), and b) highly altered euhedral opaque minerals.



Figure 9: Large euhedral garnet crystals (gar) in the skarn zone.

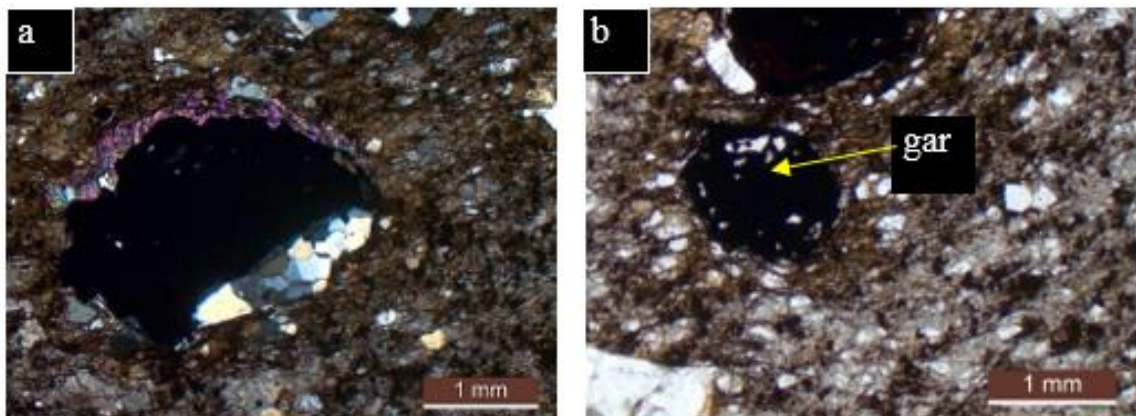


Figure 10: a) Felsic mineral and chlorite development from the edge of the opaque mineral (b) quartz inclusion in the euhedral garnet(gar).

### 3. DISCUSSION&RESULTS

Mafic dyke swarms are vertical dyke swarms in the similar orientation, representing the system of pre-formed stretched crustal fracture swarms in which the mafic magma is located (Ernst *et al.*, 1995; Hou *et al.*, 2006). A series of normal faults display small offsets of 1 m. or less, may indicate synemplacement extension, and can be formed in relation with emplacement of mafic magma. Existence of weak foliations parallel to the margins of intrusions suggest that the mafic magma was emplaced completely by magmatic flow (Paterson *et al.*, 2018).

The contact metamorphism can be observed only around the contacts of the dykes with carbonates, in where some normal faults developed. Crack networks may form in rocks to adjust strain, as microcracks are widespread in rocks that have undergone deformation at fairly low P and T (Bell and Wilson, 1981;

Denbrok and Spiers, 1991; Vernon, 1975).

The contact metamorphism in the region could be developed by a mixture of the coarsening, neocrystallization and metasomatism processes. The skarn formation can be classified as an oxidized Fe-rich calcic skarn, which contains the gar+mag/hem+chl+ser assemblage developed by metasomatic alterations in metacarbonates due to infiltration of fluids from the mafic magma, with iron, alumina and silica.

The size of the contact metamorphism zone is rather narrow, a few meters in thickness though maximum thicknesses in the dyke swarms and isolated dykes reach 70 m and ~200 m, respectively. The mafic magma has been partly or nearly completely solidified. Thus it may have a low temperature and a small amount (or even absence) of heat of crystallization, such as Alpine-type peridotite massifs (Turner and Verhoogen, 1960), Ayı-Dağı gabbro-diorite laccolith of Crimea (Anan'ev, 1999). The existence of chlorite and sericite, and the lack of hornblende, biotite and wollastonite may also indicate low pressure, relatively low temperatures (albite-epidote hornfels) (<500°C) and high PCO<sub>2</sub> conditions for the contact metamorphism.

#### 4. REFERENCES

- Akal, C., Candan, O., Koralay, O.E., Oberhansli, R., Chen, F.K.Prelevic, D., 2012, "Early Triassic potassic volcanism in the Afyon Zone of the Anatolides/Turkey: implications for the rifting of the Neo-Tethys", *International Journal of Earth Sciences*, 101, 1, 177-194.
- Anan'ev, V.A., 1999. Kontaktoviy metamorfizm Ayu-Daga (Contact metamorphism on the Ayu-Dagh mountain). . Candidate of Science Dissertation Thesis, Novosibirsk.
- Aysal, N., Öngen, S.Hanilçı, N., 2006, "Petrography Of The Contact Zone Rocks And Features Of The Skarn Formation Of Karadoru Granitoid Pluton, Yenice", *Çanakkale İstanbul Üniv. Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, 19, 183-194, .
- Bell, I.A.Wilson, C.J.L., 1981, "Deformation of Biotite and Muscovite - Tem Microstructure and Deformation Model", *Tectonophysics*, 78, 1-4, 201-228.
- Boztuğ, D.Yılmaz, O., 1995, "Daday-Devrekani masifi metamorfizması ve jeolojik evrimi, Kastamonu bölgesi, Batı Pontidler, Türkiye", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 38, 33-52.
- Delesse, A., 1857, "Etudes sur le metamorphisme des roches.", *Annales des Mines*, 5a:12, 89-288.
- Denbrok, S.W.J.Spiers, C.J., 1991, "Experimental-Evidence for Water Weakening of Quartzite by Microcracking Plus Solution Precipitation Creep", *Journal of the Geological Society*, 148, 541-548.
- Eren, Y., 1993, "Konya kuzeybatısında Bozdağlar Masifinin otokton ve örtü birimlerinin stratigrafisi (in Turkish)", *Geol Bull Turk*, 36, 7-23.
- Eren, Y., Kurt, H., 2000, "The stratigraphical, geochemical and geodynamical modelling of the northeast margin of Menderes-Taurus block", *J Fac Eng Arch Selcuk Univ*, 15, 25-41.
- Ernst, R. E., Buchan, K. L., Palmer, H. C., 1995, "Giant dyke swarms: Characteristics, distribution and geotectonic applications", *Physics and Chemistry of Dykes*, 3-21.
- Geikie, A., 1889, "II.—The History of Volcanic Action during the Tertiary Period in the British Isles", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 35, 1, 21-184.
- Göncüoğlu, M.C., Kozur, H.W., Turhan, N.Göncüoğlu, Y., 2000, "Stratigraphy of the Silurian-Lower Carboniferous rock units in Konya area, VIII International Meeting of IGCP 421 in 1st Congresso Iberico de Paleontologia, Evora, 227-228.
- Hou, G. T., Li, J. H., Liu, Y. L., Qian, X. L., 2006, "The late paleoproterozoic extension event: aulacogens and dyke swarms in the North China craton", *Progress in Natural Science*, 16, 2, 201-208.
- Kerrick, D. M., 1991, "Overview of Contact-Metamorphism", *Contact Metamorphism*, 26, 1-12.
- Kocak, K., 1993. The Petrology and geochemistry of the Ortaköy area, Central Turkey. PhD thesis Thesis, Glasgow U., Glasgow, 280
- Kocak, K., Leake, B. E., 1994, "The Petrology of the Ortakoy District and Its Ophiolite at the Western Edge of the Middle Anatolian Massif, Turkey", *Journal of African Earth Sciences*, 18, 2, 163-174.
- Koçak, K., 2020, "Outlines Of The Mafic Dyke Swarm From Ladik Area, Nw Konya/Turkey, International

- Scientific Conference GEOBALCANICA 2020, 79-83.
- Kurt, H., 1994, Petrography and Geochemistry of Kadınhanı (Konya) area, Central Turkey, Glasgow Uni., Glasgw, 191.
- Kurt, H., 1996, "Geochemical characteristics of the meta-igneous rocks near Kadınhanı (Konya), Turkey", *Geosound* 28, 1-22.
- Kurt, H., 1997, "Geochemistry of metasedimentary rocks of the Kadınhanı (Konya) area, Turkey", *GEOSOUND*, 31, 1-21.
- Kurt, H., Asan, K., 1999, "Geological Bulletin Of Turkey - Kadınhanı ( Konya ) K ' ca zengin metatrakiandezitinin jeokimyası ve petrojenezi", *TJB*, 42, 1, 57-67.
- Lowen, K., Meinhold, G., Arslan, A., Gungor, T., Berndt, J., 2019, "Evolution of the Palaeotethys in the Eastern Mediterranean: a multi-method approach to unravel the age, provenance and tectonic setting of the Upper Palaeozoic Konya Complex and its Mesozoic cover sequence (south-central Turkey)", *International Geology Review*.
- Okay, A. I., 1986, "High-pressure/low temperature metamorphic rocks of Turkey.", *Geol. Soc. Amer. Mem*, 164, 338-348.
- Özcan, A., Göncüoğlu, M. C., Turhan, N., Şentürk, K., Uysal, Ş., Işık, A., 1990. Konya-Kadınhanı-İlgın dolayının temel jeolojisi (in Turkish), MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi.
- Paterson, S. R., Vernon, R. H., Fowler, T. K., 2018, Aureole Tectonics. In: M.K. Derrill (Editor), Contact Metamorphism. De Gruyter, 673-722.
- Reverdatto, V.V., Likhanov, I.I., Polyansky, O.P., Sheplev, V.S.Kolobov, V.Y., 2019, The Nature and Models of metamorphism. *Springer Nature Switzerland AG*, Switzerland, 330.
- Robertson, A. H. F., Parlak, O., Ustaomer, T., 2021, "Late Palaeozoic extensional volcanism along the northern margin of Gondwana in southern Turkey: implications for Palaeotethyan development", *International Journal of Earth Sciences*, 110, 6, 1961-1994.
- Robertson, A. H. F., Ustaomer, T., 2009, "Formation of the Late Palaeozoic Konya Complex and comparable units in southern Turkey by subduction-accretion processes: Implications for the tectonic development of Tethys in the Eastern Mediterranean region", *Tectonophysics*, 473, 1-2, 113-148.
- Rosenbusch, H., 1877, Die Steiger Schiefer und ihre Contactzone an der Granititen von Barr-Andlau und Hohwald. . Abhandlungen zur Geol. Specialkarte von Elsass-Lothringen. *Band I, Druck und Verlag von R. Schultz and Co.*, Strassburg.
- Taner, M. F., Martin, R. F., Gault, R. A., 2013, "The Mineralogy Of Skarns Of The Spurrite–Merwinite Subfacies, Sanidinite Facies, Güneyce–İkizdere Area, Eastern Black Sea, Turkey", *The Canadian Mineralogist*, 51, 6, 893-911.
- Topuz, G., 2006, "Contact metamorphism around the Eocene Saraycik Granodiorite, eastern Pontides, Turkey", *Turkish Journal of Earth Sciences*, 15, 1, 75-94.
- Turner, F. J., Verhoogen, J., 1960, Igneous and metamorphic petrology. International series in the earth sciences. *McGraw-Hill*, New York.
- Vernon, R. H., 1975, "Deformation and recrystallization of a plagioclase grain", *American Mineralogist*, 60, 9-10, 884-888.



## PUROLİTE CT169DR HETEROJEN KATALİZÖRÜ VARLIĞINDA METANOL İLE OLEİK ASİDİN ESTERİFİKASYONU

<sup>1</sup>Melike İmge ŞENOYMAK TARAKÇI , <sup>2</sup>Oğuzhan İLGEN 

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE*

<sup>1</sup>[imge.senoymak@kocaeli.edu.tr](mailto:imge.senoymak@kocaeli.edu.tr), <sup>2</sup>[oilgen@kocaeli.edu.tr](mailto:oilgen@kocaeli.edu.tr)

**Geliş/Received: 12.05.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.09.2022**

**ÖZ:** Biyodizel üretim sürecinde hammadde olarak atık yağ kaynaklarının kullanılabilmesi için esterifikasyon aşaması çoğunlukla gerekli olduğundan bitkisel ve hayvansal yağlarda en bol miktarda bulunan yağ asitlerinden biri olan oleik asit ile metanolün esterifikasyon reaksiyonunun yüksek asit konsantrasyonuna ve seçiciliğe sahip olan çevre dostu heterojen asidik iyon değiştirici reçinelerden biri olan Purolite CT169DR katalizörü varlığında parametrik incelemesi yapılmış ve sonuçta elde edilen oleik asit dönüşümleri hesaplanarak, %90,62 oleik asit dönüşümü ile reaksiyon için en uygun koşulların, oleik asit miktarı baz alınarak hesaplanmış ağırlıkça %9 katalizör miktarı, 6/1 metanol/oleik asit molar oranı ve 5 saatlik reaksiyon süresi olduğu bulunmuştur. Ayrıca reaksiyon kinetiği incelenmiş ve reaksiyonun yalnızca homojen birinci dereceden kinetik modele uygunluğu gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Esterifikasyon, Heterojen Katalizör, Biyodizel, İyon Değiştirici Reçine, Reaksiyon Kinetiği

### Oleic Acid Esterification with Methanol in the Presence of Purolite CT169DR Heterogeneous Catalyst

**ABSTRACT:** Esterification step is mostly necessary in order to use waste oils as a feedstock in the biodiesel production process. In this study oleic acid was preferred because it is one of the most abundant fatty acid in vegetable oils and animal fats. Parametric study of the esterification reaction of oleic acid and methanol was carried out in the presence of Purolite CT169DR catalyst which is one of the environmentally friendly heterogeneous acidic ion exchange resins with high acid concentration and high selectivity. According to obtained free fatty acid conversions, most suitable conditions with 90.62% oleic acid conversion for the esterification reaction were found as 9 wt. % catalyst amounts based on the weight of oleic acid, 6/1 methanol/oleic acid molar ratio and 5 hours reaction time. Additionally, reaction kinetics were examined and the suitability of the reaction to the pseudo-homogeneous first order model was proven.

**Keywords:** Esterification, Heterogeneous catalyst, Biodiesel, Ion exchange resin, Reaction Kinetics

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda fosil esaslı yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve bu yakıtların çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılması nedeniyle yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarına talep giderek artmaktadır. Biyodizel, petrol dizeline nazaran çevre dostu ve biyo esaslı bir yakıt olarak tüm dünyada dikkat çekmektedir. Yağ asidi alkil esteri olarak da isimlendirilen biyodizel, temel olarak bitkisel ve hayvansal yağlardan trigliseritlerin transesterifikasyonu veya yağ asitlerinin metanol ya da etanol gibi alkollerle bir alkali ya da asit katalizörü varlığında esterifikasyonu yolu ile elde edilmektedir. Bununla birlikte, yüksek üretim



maliyeti biyodizelin ticari üretimi için bir engel oluşturmaktadır (Kaur ve Ali, 2015; Sirisomboonchai *ve diğ.*, 2015; Li *ve diğ.*, 2015; Liu *ve diğ.*, 2016).

Biyodizel üretiminde atık bitkisel yağlar ve hayvansal yağlar, yemeklik rafine yağlara daha ucuz ve umut verici alternatif hammaddeler olarak önem kazanmaktadır. NaOH ve KOH gibi alkali katalizörler, genellikle rafine bitkisel yağlar gibi düşük serbest yağ asidi (SYA) içeren hammaddeler ile biyodizel üretiminde tercih edilmektedir (Liu *ve diğ.*, 2016; Ilgen, 2014; Demirbas, 2008). Alkali katalizör kullanımı istenmeyen sabunlaşma reaksiyonuna yol açar ve kullanılan bitkisel yağlar yüksek seviyelerde SYA (>2) içerdiğinde asit katalizörler kullanılarak SYA'lar esterleştirilebilir. Asit katalizörlerin kullanımı hem transesterifikasyon hem de esterifikasyon reaksiyonlarını aynı anda katalize edebilen yüksek SYA içeriğine sahip bitkisel yağlar için uygundur (Lam *ve diğ.*, 2010). Alternatif olarak, alkali katalizli transesterifikasyon adımı önce bitkisel yağın SYA içeriğini düşürmek için asit katalizli esterifikasyon reaksiyonu da uygulanabilir. Ancak biyodizel üretimi için homojen asit ve alkali katalizörlerin kullanımının ayırma güçlüğü, yan reaksiyon oluşumu, tekrar kullanılabilir olmayışı ve ekipmanların korozyonuna sebep oluşu gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Homojen katalizörlerin tüm bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için literatürde sıklıkla iyon-değiştirici reçineler (Lam *ve diğ.*, 2010; Ali *ve diğ.*, 2007) heteropoli asitler (Pesaresi *ve diğ.*, 2009), karbon esaslı katalizörler (Lou *ve diğ.*, 2008), zeolitler (Shu *ve diğ.*, 2007) veya katalizör destekleri (Verhoef *ve diğ.*, 1999; Bamoharram *ve diğ.*, 2006; Sepulveda *ve diğ.*, 2005) önerilmektedir.

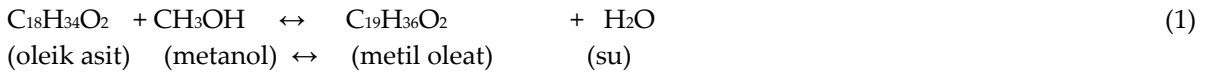
Bunların içerisinde iyon-değiştirici reçineler yüksek asit konsantrasyonları nedeniyle reaksiyonu daha hafif koşullarda katalizleyebildiklerinden, yüksek oranda seçici olduklarından, çevreye zarar vermeyen karakterlerinden ve ticari olarak kolay ulaşılabilir olmalarından kaynaklı sıklıkla tercih edilmektedirler (Kitakawa *ve diğ.*, 2007; Lachter *ve diğ.*, 2019). Biyodizel üretiminde kullanılan birçok iyon-değiştirici reçine, sülfonik asit grubu (-SO<sub>3</sub>H) taşıyan çapraz bağlı polistiren-divinil benzen kopolimerleridir. Son yıllarda biyodizel üretim prosesinde katalizör olarak iyon-değiştirici reçinelerin geliştirildiği birçok çalışma yapılmıştır (Veljković *ve diğ.*, 2006; Feng *ve diğ.*, 2010; Yun ve Ling, 2009; Leyva *ve diğ.*, 2013; Banchemo ve Gozzelino, 2018; Ilgen, 2014; Alhassani *ve diğ.*, 2018; Zhang *ve diğ.*, 2016).

Bu çalışmada, metanol ile oleik asidin esterifikasyon reaksiyonunda heterojen asidik katalizör olarak yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı iyon değiştirici reçinelerden Purolite CT169DR seçilmiştir. Ayrıca Purolite CT169DR iyon değiştirici reçinenin esterifikasyon reaksiyonunda kullanımıyla ilgili çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, bu çalışmalardan birinde Abidin ve Saha, 2017, bitkisel atık yağdan biyodizel eldesinde ilk adım olarak atık yağı, Purolite D5081 katalizörü varlığında esterifikasyon reaksiyonu aracılığıyla ön işleme tabi tutmuş ve buradan elde ettiği ön işleme tabi olmuş atık bitkisel yağ ile metanol arasındaki transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör olarak farklı iyon değiştirici reçinelerin (Purolite CT122, Purolite CT169, Purolite CT175, Purolite CT275, Purolite D5081, Diaion PA306s) performansını incelemiştir. Purolite CT169 katalizörü ile kayda değer bir Yağ Asidi Metil Ester (YAME) dönüşümü elde edemediğini raporlamıştır (Abidin ve Saha, 2017). Galia *ve diğ.*, 2011, ticari stiren- divinil benzen makro gözenekli asit reçineleri tarafından katalizlenen kolza yağının metanolizi reaksiyonunu süperkritik karbondioksitin (ScCO<sub>2</sub>) proses performansları üzerindeki etkilerini incelemek için kesikli bir reaktörde 100-140°C ve 10-46MPa koşullarında gerçekleştirilmiştir. İki sıvı fazlı sistemde CO<sub>2</sub> destekli transesterifikasyon reaksiyonunda farklı polimerik asit katalizörleri (Purolite CT275 DR ve Purolite CT169DR), 8,6- 8,7g katalizör miktarı, 27,7 mol/mol metanol/yağ oranı ve 140 °C reaksiyon koşulları altında incelenmiştir. Purolite CT275DR katalizörü ile %52 YAME verimi elde edilirken Purolite CT169DR katalizörü ile %33 YAME verimi elde etmişlerdir (Galia *ve diğ.*, 2011). Oleik asidin tercih edilme sebebi ise, bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunan en yaygın doymamış yağ asitlerinden biri olmasıdır. Bu çalışmada, metanol ile oleik asidin esterifikasyonunda Purolite CT169DR'nin katalitik performansı, reaksiyon süresine karşı farklı metanol/oleik asit molar oranları ve farklı katalizör miktarları altında incelenmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada kullanılan %99,9 saflıkta olan Oleik asit ve metanol Merck firmasından tedarik edilmiştir. %99,9 saflıkta olan Purolite CT169DR ise Purolite firmasından tedarik edilmiştir. Purolite CT169DR'ye ait başlıca özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Reaksiyonlar bir kondenser içeren üç boyunlu bir cam reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaktöre gerekli miktarda metanol, 50g oleik asit ve Purolite CT169DR katalizörü yüklenmiştir. Katalizör miktarı, oleik asidin ağırlıkça yüzdesine göre hesaplanmıştır. Karıştırma hızı 500 rpm olarak sabit tutulmuştur. Reaksiyon sıcaklığı istenilen noktaya ulaştığında reaksiyon süresi başlatılmıştır.

Oleik asidin metanol ile metil oleat ve suya esterleşmesi reaksiyonu aşağıdaki şekildedir:



Reaksiyondan sonra katalizör, reaksiyon ortamından süzülerek ayrılmıştır. Fazla metanol ve reaksiyon sonucu açığa çıkan su ise buharlaştırılarak uzaklaştırılmıştır. 0,01M KOH çözeltisi ile titrasyondan önce reaksiyon karışımından alınan ~1g numune hacimce 1:1 oranında etanol/dietil eter karışımı içerisinde çözülmüş ve indikatör olarak birkaç damla fenolftalein çözeltisi eklenmiştir. Titrasyondan sonra sarf edilen KOH çözeltisinin hacmi kaydedilmiş ve karışımın oleik asit içeriği ve dönüşümü aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır:

$$\text{Oleik asit (\%)} = \frac{V_{KOH} C_{KOH} MW_{OA}}{m_s \cdot 10} \quad (2)$$

$$\text{Dönüşüm (\%)} = 100 - \text{Oleik asit (\%)} \quad (3)$$

Burada;  $V_{KOH}$  = KOH çözeltisinin hacmi (ml);  $C_{KOH}$  = KOH çözeltisinin konsantrasyonu (mol/l);  $MW_{OA}$  = oleik asidin moleküler ağırlığı (g/mol);  $m_s$  = numune ağırlığı (gr).

Tüm deneyler ve titrasyonlar iki kez tekrarlanmış ve ortalama değerler kullanılmıştır. Tekrarlar arasındaki fark  $\pm 2\%$ 'den az bulunmuştur.

### Çizelge 1. Purolite CT169DR katalizörüne ait fiziksel ve kimyasal özellikler (Product data sheet, 2016)

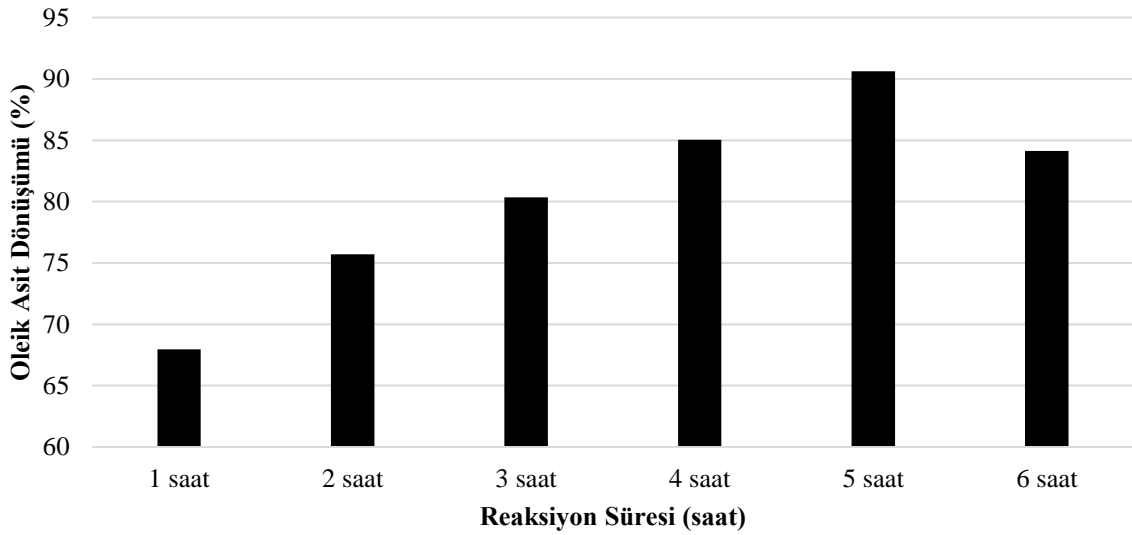
Table 1. Physical and chemical properties of Purolite CT169DR catalyst

|  |   |
|--|---|
| Polimer yapısı                           | Divinilbenzen ile çapraz bağlanmış makro-<br>gözenekli polistiren |
| Görünüş                                  | Küresel boncuklar   |
| Fonksiyonel grup                         | Sülfonik asit   |
| İyonik form                              | H   |
| Kuru ağırlık kapasitesi (min.) (eq/kg)   | 4,7   |
| Nem tutma (%)                            | 51-57 (H formunda)  |
| Nem oranı (max.) (%)                     | 3   |
| Partikül boyut aralığı ( $\mu\text{m}$ ) | 425- 1200   |
| <425 $\mu\text{m}$ (max.) (%)            | 2   |
| Yüzey alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )    | 35- 50  |
| Gözenek hacmi ( $\text{mL}/\text{g}$ )   | 0,3- 0,5  |
| Orta gözenek çapı ( $\text{Å}$ )         | 250- 425  |
| Özgül ağırlık                            | 1,2   |
| Çalışma sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 180 $^{\circ}\text{C}$ (356,0 $^{\circ}\text{F}$ )                |

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

### Reaksiyon Süresinin Etkisi (Effect of Reaction Time)

Bu çalışmada reaksiyon süresi incelenirken diğer parametreleri sabit tutularak (ağırlıkça %9 katalizör miktarı, 6/1 metanol/yağ molar oranı) bir reaksiyon gerçekleştirilmiş ve reaksiyon süresi 1 saat-6 saat aralığında incelenmiştir. Şekil 1’de görüldüğü üzere % oleik asit dönüşümü 5 saate kadar sürekli artış göstermiş ve 90,62’ye ulaşmıştır. Ancak 5 saatten sonraki ilave artışlar, muhtemelen esterifikasyon reaksiyonunun tersinir karakterinden dolayı % oleik asit dönüşümünde bir azalmaya sebep olmuştur. Literatürdeki birçok çalışmada da belirtildiği üzere 5 saatlik reaksiyon süresinden sonra geri reaksiyon devreye girmiş ve ürünleri azaltmıştır (Moradi *ve diğ.*, 2021; Cao *ve diğ.*, 2021; Zhang *ve diğ.*, 2017). Bundan dolayı bu çalışma için en uygun reaksiyon süresi olarak 5 saat seçilmiştir.



**Şekil 1.** Purolite CT169DR katalizörü varlığında oleik asidin esterifikasyonu reaksiyonunda reaksiyon süresinin etkisi. Reaksiyon koşulları: ağırlıkça %9 katalizör miktarı; 6/1 metanol/oleik asit molar oranı; geri akış sıcaklığı (65°C).

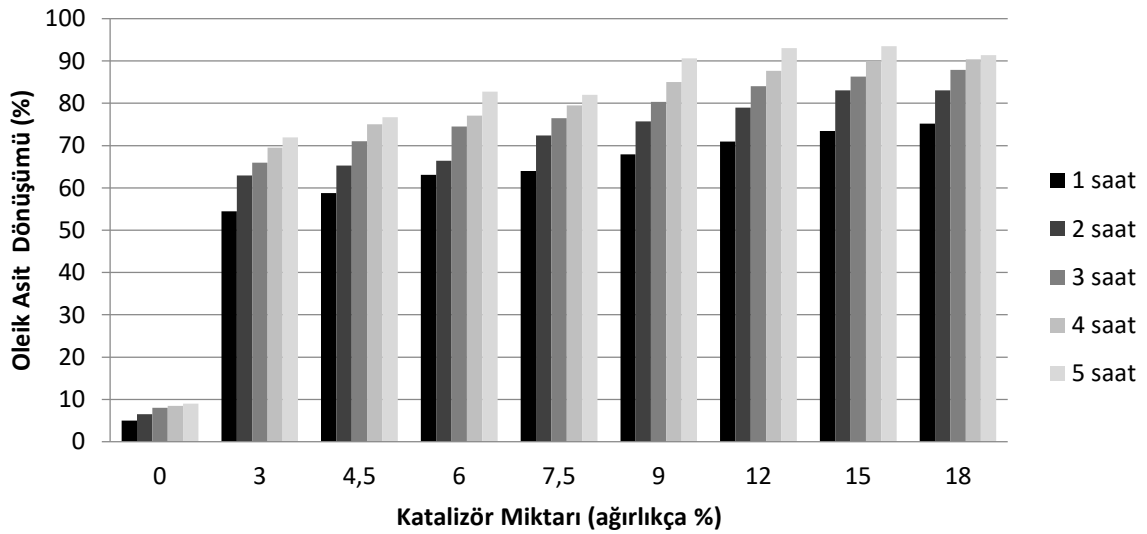
*Figure 1.* Effect of reaction time on esterification reaction of oleic acid in the presence of Purolite CT169DR catalyst. Reaction conditions: catalyst amount, 9 wt.%; methanol/oleic acid molar ratio, 6/1; reaction temperature, reflux temperature (65 °C).

### Katalizör Miktarının Etkisi (Effect of Catalyst Amount)

Kullanılan katalizör miktarı, dönüşümü büyük ölçüde etkileyen önemli parametrelerdendir. Şekil 2’de görüldüğü üzere, katalitik olmayan bir reaksiyon sisteminde ve tüm reaksiyon sürelerinde oleik asit dönüşümü %10’dan daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Oleik asit dönüşümüne katalizör miktarının etkisi ise diğer reaksiyon parametreleri sabit tutularak ve oleik asit ağırlığı esas alınarak ağırlıkça %3 - %18 aralığında incelenmiştir.

Şekil 2’de gösterildiği üzere, katalizör miktarı ağırlıkça %3’ten %15’e yükseldiğinde aktif bölgelerdeki artıştan kaynaklı oleik asit dönüşümünde sürekli bir artış gözlenmiştir (Senoyamak Tarakçı ve Ilgen, 2018). Başka bir deyişle giderek artan bir dönüşüm elde edilmesinin sebebi katalizör ve metanol arasındaki teması iyileştiren katalizör miktarının artışıdır (Gan *ve diğ.*, 2012). Katalizör miktarı ağırlıkça %18’e yükseltildiğinde ise kayda değer bir artış olmadığı gözlenmiştir. Örneğin, 5 saatlik bir reaksiyonun ardından ağırlıkça %15

katalizör miktarı ile elde edilen oleik asit dönüşümü %90 iken ağırlıkça %18 katalizör miktarının kullanıldığı reaksiyonda oleik asit dönüşümü %90,37 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, 5 saatlik bir reaksiyon sonunda ağırlıkça %9 katalizör miktarı ile elde edilen % oleik asit dönüşümü 90.62 iken %15 katalizör miktarı ile elde edilen % oleik asit dönüşümü 93,5 olarak bulunmuştur. Katalizör miktarında gerçekleştirilen yaklaşık 1,5 kat artış, % oleik asit dönüşümündeki artışa aynı oranda yansımamıştır. Bunun nedeni denge noktasına ulaşan katalizör, metanol ve oleik asit arasındaki kütle aktarım hızı veya temas hızıdır. (Lokman ve diğ., 2015). Benzer bir ifade ile artan katalizör miktarının reaksiyon ortamındaki maddelerin temaslarını kısıtlaması olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle tüm sonuçlar dikkate alındığında ayırma işlemini ve dolayısıyla maliyeti en aza indirmek için en uygun katalizör miktarının ağırlıkça %9 katalizör miktarı olduğu sonucuna varılmıştır. Literatürde katalizör miktarının dönüşüm üzerine benzer etkileri birçok çalışmada rapor edilmiştir. Örneğin, Gupta ve diğ., çalışmalarında süper-asit katalizör olan  $\text{HClSO}_3\text{-ZrO}_2$  varlığında palm yağ asidinin esterifikasyonu incelemişler ve katalizör miktarının ağırlıkça %3,5'tan sonraki artışlarda aktif bölgelerin artışına bakılmaksızın dönüşüm üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı sonucunu raporlamışlardır (Gupta ve diğ., 2020). Benzer sonuçlara Bai ve arkadaşlarının çalışmasında da rastlanmıştır. Çalışmada atık bitkisel yağın biyodizel üretiminde kullanılabilirliği incelenmiş ve öncelikle yağın SYA miktarını belli bir seviyeye düşürmek için  $\text{H}_2\text{SO}_4$  katalizörü kullanılarak esterifikasyon reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Esterifikasyon reaksiyonunda katalizör miktarının da etkisi araştırılmış ve katalizör miktarı, ağırlıkça %2'den %5'e arttırıldığında SYA dönüşümünün arttığı ancak %5'ten sonraki artışlarda SYA dönüşümünde herhangi bir artışın olmadığı rapor edilmiştir (Bai ve diğ., 2022).



**Şekil 2.** Purolite CT169DR katalizörü varlığında oleik asidin esterifikasyonu reaksiyonunda reaksiyon süresine karşı katalizör miktarının etkisi. Reaksiyon koşulları: 6/1 metanol/oleik asit molar oranı; geri akış sıcaklığı (65°C).

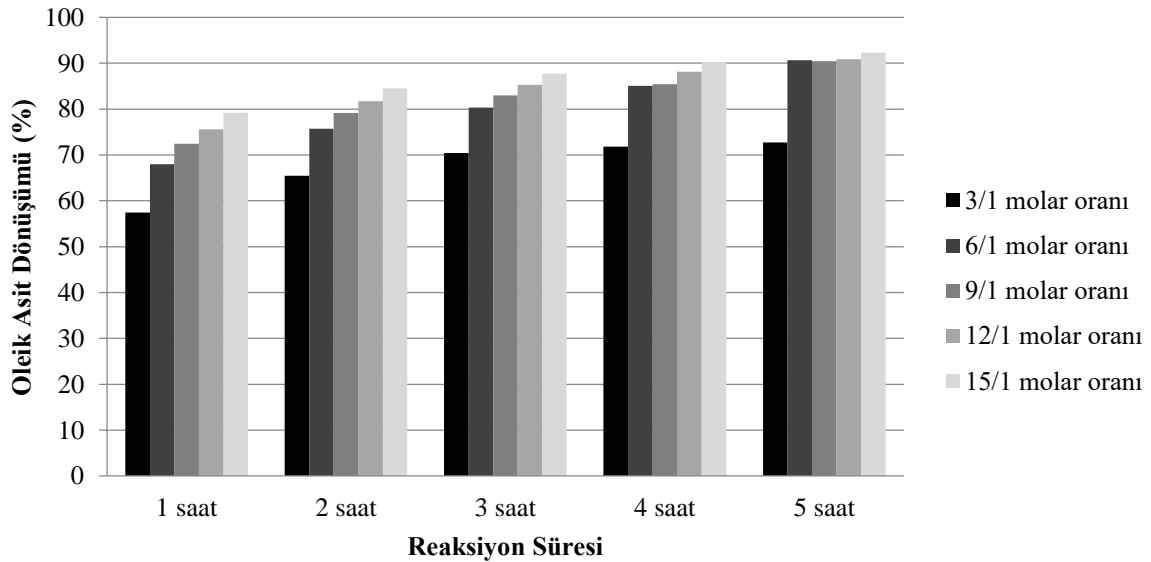
*Figure 2.* Effect of catalyst amount versus reaction time on esterification reaction of oleic acid in the presence of Purolite CT169DR catalyst. Reaction conditions: methanol/oleic acid molar ratio, 6/1; reaction temperature, reflux temperature (65 °C).

#### Metanol/Oleik Asit Molar Oranının Etkisi (Effect of Methanol/Oleic Acid Molar Ratio)

Esterifikasyon reaksiyon stokiyometrisine bakıldığında oleik asidin metanole molar oranı 1:1'dir. Bunun yanında, esterifikasyon reaksiyonu tersinir bir reaksiyon olduğundan aşırı alkol kullanımı dengeyi sağ

tarafa doğru kayarak yüksek verimli ester ürünü elde etmeyi mümkün kılmaktadır (Khan *ve diğ.*, 2021; Khazaai *ve diğ.*, 2021). Ayrıca fazla alkol kullanımı reaktanlar arasındaki yoğunluk farkının büyük olduğu durumlarda reaksiyon ortamının viskozitesini de düşürmeye yardımcı olmaktadır. Bu durum reaktanlar arasında temas yüzeyini arttırmaya yardımcı olmaktadır (Khan *ve diğ.*, 2021). Esterifikasyon reaksiyonlarında molar oranın artmasıyla elde edilen dönüşümün artması durumu literatürde sıklıkla rapor edilmiştir (Diaz-Felix *ve diğ.*, 2009; Lilja *ve diğ.*, 2002; Peng-Lim *ve diğ.*, 2013). Ancak fazla miktarda alkol kullanımının da bir sınırı vardır. Farklı çalışmalarda alkol konsantrasyonunu belirli sınırların üzerine çıkarmanın dönüşümü azalttığı veya önemli bir artış yaratmadığı görülmüştür (Khan *ve diğ.*, 2021; Jiang *ve diğ.*, 2013). Zheng *ve diğ.*, iyonik bir sıvı ile birleştirilmiş Bronsted asit-yüzey aktif madde katalizörü varlığında etanol ile oleik asit esterifikasyonunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 3/1, etanol/oleik asit molar oranından daha büyük değerlerdeki molar oranlarda muhtemelen oleik asit ve katalizörün belirli bir orandan sonraki aşırı alkol kullanımından dolayı aşırı derecede seyreltilmiş olacağından oleik asit dönüşümünde bir düşüş görmüşlerdir (Zheng *ve diğ.*, 2017).

Bu çalışmada, metanol/oleik asit molar oranının etkisi, reaksiyon süresine karşı, ağırlıkça %9 katalizör miktarı ve geri akış sıcaklığı (65°C) altında 5 farklı metanol/oleik asit molar oranında (3/1, 6/1, 9/1, 12/1, 15/1) denenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, özellikle 5 saatlik reaksiyon süresinde metanol/oleik asit molar oranı 6/1 iken % oleik asit dönüşümü 90,62 olarak bulunmuş ve metanol/oleik asit molar oranındaki ilave artışlarda % oleik asit dönüşümü neredeyse sabit kalmıştır. Metanol/oleik asit molar oranı 2,5 kat arttırıldığında % oleik asit dönüşümünün ancak %92,32'ye yükseldiği görülmüştür. Alkolün aşırısının kullanımı geri kazanım için daha yüksek bir enerji gerektireceğinden ve metil esterin endüstriyel üretim maliyetini arttıracığından tercih edilmemektedir (Syazwani *ve diğ.*, 2017).



**Şekil 3.** Purolite CT169DR katalizörü varlığında oleik asidin esterifikasyonu reaksiyonunda reaksiyon süresine karşı metanol/oleik asit molar oranının etkisi. Reaksiyon koşulları: ağırlıkça %9 katalizör miktarı; geri akış sıcaklığı (65°C).

*Figure 3.* Effect of molar ratio of methanol to oleic acid versus reaction time on esterification reaction of oleic acid in the presence of Purolite CT169DR catalyst. Reaction conditions: catalyst amount, 9 wt.%; reaction temperature, reflux temperature (65 °C).

### Reaksiyon Kinetiği (Reaction Kinetics)

Çalışmada elde edilen verilere uyum sağlayan kinetik modeli belirlemek amacı ile yalancı homojen birinci dereceden kinetik model önerilmiş ve reaksiyon hızı, denklem (4)'te görüldüğü şekliyle ifade edilmiştir.

$$-r_{OA} = k_f C_{OA} C_M - k_r C_{MeO} C_W \quad (4)$$

Burada,  $C_{OA}$ ,  $C_M$ ,  $C_{MeO}$  ve  $C_W$  terimleri sırasıyla, oleik asit, metanol, metil oleat ve suyun konsantrasyonlarını;  $k_f$  ve  $k_r$  terimleri ise, sırasıyla ileri ve geri reaksiyon hız sabitlerini göstermektedir. Nispeten yüksek miktarlarda metanol/oleik asit molar oranı kullanıldığından reaksiyon tersinmez olarak düşünülmüş ve esterifikasyon reaksiyonu boyunca metanol konsantrasyonunun sabit kaldığı kabul edilmiştir. Bu durumda, reaksiyon hız denklemi aşağıdaki şekilde basitleştirilmiş ve denklem (5) elde edilmiştir.

$$-r_{OA} = \frac{dC_{OA}}{dt} = k C_{OA} \quad (5)$$

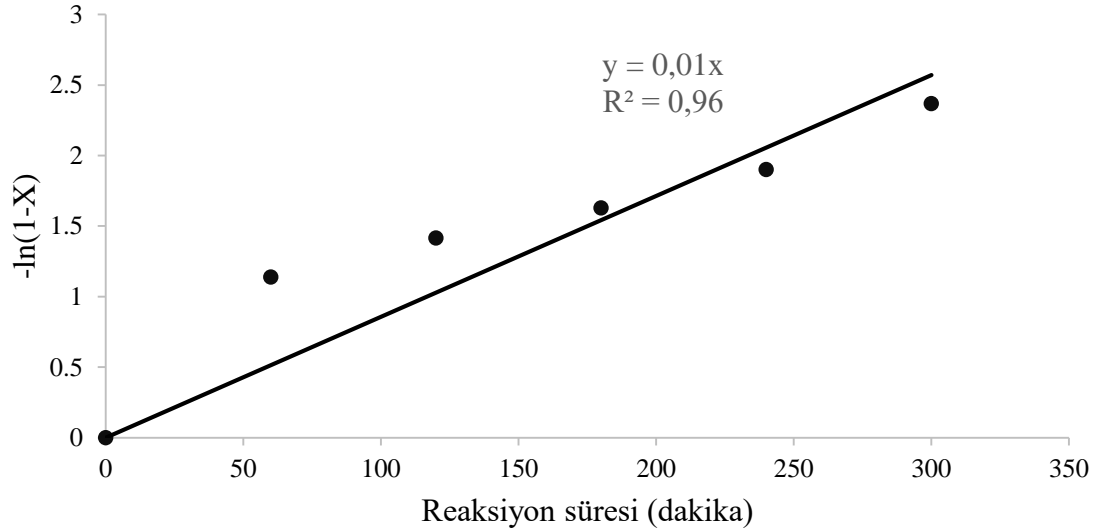
$$k = k_f C_M \quad (6)$$

$$C_{OA} = C_{OA_0} (1-X) \quad (7)$$

Burada  $C_{OA_0}$  ve  $X$  sırasıyla, oleik asidin başlangıç konsantrasyonunu ve oleik asit dönüşümünü ifade etmektedir. Denklem (5), (6) ve (7) birleştirilerek tekrar düzenlenmiş ve denklem (8) elde edilmiştir.

$$-\ln(1-X) = kt \quad (8)$$

Elde edilen bu denklemden yola çıkarak Şekil 4'te görüldüğü üzere,  $-\ln(1-X)$ 'e karşı zaman grafiği çizilmiş ve reaksiyon hız sabiti  $k = 0.01s^{-1}$  olarak bulunmuştur. Grafikten elde edilen regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ise yalancı homojen birinci dereceden kinetik modelin uygun olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.** Zamana karşı  $-\ln(1-X)$  grafiği. Reaksiyon koşulları: 6/1 metanol/oleik asit molar oranı, ağırlıkça %9 katalizör miktarı, geri akış sıcaklığı (65°C)

*Figure 4.* Plot of  $-\ln(1-X)$  versus time. Reaction conditions: methanol/oleic acid molar ratio, 6/1; catalyst amount, 9 wt.%; reaction temperature, reflux temperature (65 °C).

Bununla birlikte, literatürde de yalancı homojen birinci dereceden kinetik model önermesinin uygun bulunduğu birçok çalışma bulunmaktadır (Olagbende *ve diğ.*, 2021; Nandi *ve diğ.*, 2021; Salsabila *ve diğ.*, 2020; Prasertpong *ve diğ.*, 2020; Senoymak Tarakçı ve Ilgen, 2018).

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Biyodizel üretim prosesi esnasında maliyet olarak uygun olması açısından sıklıkla tercih edilen atık bitkisel ve hayvansal yağların içeriğindeki yüksek miktarda bulunan SYA değerini belirli bir seviyenin (>2) altına düşürmek gerekmektedir. Çalışmada bu amaç doğrultusunda tercih edilen heterojen asit katalizörlerden Purolite CT169DR katalizörü, yüksek asit konsantrasyonu, çevreye zararsız oluşu ve ticari olarak kolay ulaşılabilir olması gibi özelliklere sahip olan iyon değiştirici reçine grubuna aittir. Çalışma süresince, Purolite CT169DR asidik heterojen katalizörü varlığında oleik asidin metanol ile esterifikasyon reaksiyonunda katalizör miktarı, metanol/oleik asit molar oranı ve reaksiyon süresi gibi reaksiyon parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Purolite CT169DR katalizörü, oleik asit esterifikasyonunda iyi bir katalitik aktivite göstermiştir. Elde edilen en uygun reaksiyon koşulları olan ağırlıkça %9 katalizör miktarı, 6/1 metanol/oleik asit molar oranı ve 5 saatlik reaksiyon süresinde %90,62 değerinde oleik asit dönüşümü elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada reaksiyon kinetiği de incelenmiştir. Reaksiyonun yalancı homojen birinci dereceden kinetik modele uygunluğu gösterilmiş ve reaksiyon hız sabiti (k) değeri  $0.01s^{-1}$  olarak bulunmuştur.

## SEMBOLLER (SYMBOLS USED)

|            |                                       |           |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| $C_{OA}$   | Oleik asit konsantrasyonu             | [mol/l]   |
| $C_M$      | Metanol konsantrasyonu                | [mol/l]   |
| $C_{MeO}$  | Metil oleat konsantrasyonu            | [mol/l]   |
| $C_W$      | Su konsantrasyonu                     | [mol/l]   |
| $C_{OA_0}$ | Oleik asidin başlangıç konsantrasyonu | [mol/l]   |
| $C_{KOH}$  | KOH çözeltisi konsantrasyonu          | [mol/l]   |
| $k_f$      | İleri reaksiyon hız sabiti            | [1/s]     |
| $k_r$      | Geri reaksiyon hız sabiti             | [1/s]     |
| $MW_{OA}$  | Oleik asidin moleküler ağırlığı       | [g/mol]   |
| $m_s$      | Numune ağırlığı                       | [gr]      |
| $-r_{OA}$  | Reaksiyon hızı                        | [mol/s.l] |
| $R^2$      | Regresyon katsayısı                   |           |
| $X$        | Oleik asit dönüşümü                   |           |
| $V_{KOH}$  | KOH çözeltisinin hacmi                | [ml]      |

## KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

|     |                   |
|-----|-------------------|
| SYA | Serbest Yağ Asidi |
| M   | Metanol           |
| MeO | Metil oleat       |
| OA  | Oleik asit        |
| W   | Su                |

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

Abidin, Z. S., Saha B., 2017, Environmentally Bening Biodiesel Production from Renewable Sources”, The Water-Feed- Energy Nexus: Processes, Technologies, and Challenges, CRC Press, 333-362.

- Alhassani, M. H., Al-Jubouri, S. M., Noori, W. O., Al-Jendeel, H. A., 2018, "Esterification Reaction Kinetics Using Ion Exchange Resin Catalyst by Pseudo-Homogenous and Eley-Ridel Models", *International Journal of Engineering (IJE) IJE TRANSACTIONS B : Applications*, Cilt 31, Sayı 8, ss. 1172-1179.
- Ali, S. H., Tarakmah, A., Merchant, S. Q., Al-Sahhaf, T., 2007, "Synthesis of esters: Development of the rate expression for the Dowex 50 Wx8-400 catalyzed esterification of propionic acid with 1-propanol", *Chem. Eng. Sci.*, Cilt 62, Sayı 12, ss. 3197- 3217.
- Bai, H., Tian, J., Talifu, D., Okitsu, K., Abulizi, A., 2022, "Process optimization of esterification for deacidification in waste cooking oil: RSM approach and for biodiesel production assisted with ultrasonic and solvent", *Fuel*, Cilt 318, 123697.
- Bamoharram, F. F., Heravi, M. M., Roshani, M., Jahangir, M., Gharib, A., 2006, "Preyssler catalyst,  $[\text{NaP}_5\text{W}_{30}\text{O}_{110}]^{14-}$ : A green, efficient and reusable catalyst for esterification of salicylic acid with aliphatic and benzylic alcohols", *Appl. Catal., A*, Cilt 302, Sayı 1, ss. 42-47.
- Banchero, M., Gozzelino, G., 2018, "A Simple Pseudo-Homogeneous Reversible Kinetic Model for the Esterification of Different Fatty Acids with Methanol in the Presence of Amberlyst-15" *Energies*, Cilt 11, Sayı 7, ss. 1843-1854.
- Cao, M., Peng, L., Xie, Q., Xing, K., Lu, M., Ji, J., 2021, "Sulfonated Sargassum horneri carbon as solid acid catalyst to produce biodiesel via esterification", *Bioresource Technology*, Cilt 324, 124614.
- Demirbas, A., 2008, "Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats", *Energy Convers. Manage.*, Cilt 49, ss. 125–130.
- Diaz-Felix, W., Riley, M. R., Zimmt, W., Kazz, M., 2009, "Pretreatment of yellow grease for efficient production of fatty acid methyl esters" *Biomass and Biorefinery*, Cilt 33, Sayı 4, ss. 558-563.
- Feng, Y., He, B., Cao, Y., Li, J., Liu, M., Yan, F., Liang, X., 2010, "Biodiesel Production using Cation-Exchange Resin as Heterogeneous Catalyst", *Bioresour. Technol.*, Cilt 101, Sayı 5, ss. 1518-1521.
- Galia, A., Scialdone, O., Tortorici, E., 2011, "Transesterification of rapeseed oil over acid resins promoted by supercritical carbon dioxide", *J. of Supercritical Fluids*, Cilt 56, ss. 186-193.
- Gan, S., Ng, H. K., Chan, P. H., Leong, F. L., 2012, "Heterogeneous free fatty acids esterification in waste cooking oil using ion-exchange resins", *Fuel Process. Technol.*, Cilt 102, ss. 67–72.
- Gupta, A. R., Chiplunkar, P. P., Pratap, A. P., Rathod, V. K., 2020, "Esterification of Palm Fatty Acid Distillate for FAME Synthesis Catalyzed by Super-Acid Catalyst  $\text{HClSO}_3\text{-ZrO}_2$ ", *Waste and Biomass Valorization*, Cilt 12, ss. 281-292.
- İlgen, O., 2014, "Investigation of reaction parameters, kinetics and mechanism of oleic acid esterification with methanol by using Amberlyst 46 as a catalyst", *Fuel Process. Technol.*, Cilt 124, ss. 134–139.
- Jiang, Y., Lu, J., Sun, K., Ma, L., Ding, J., 2013, "Esterification of oleic acid with ethanol catalyzed by sulfonated cation exchange resin: Experimental and kinetic studies", *Energy Convers. Manage.*, Cilt 76, ss. 980-985.
- Kaur, N., Ali, A., 2015, "Lithium zirconate as solid catalyst for simultaneous esterification and transesterification of low quality triglycerides", *Appl. Catal., A*, Cilt 489, ss. 193–202.
- Khan, Z., Javed, F., Shamair, Z., Hafeez, A., Fazal, T., Aslam, A., Zimmerman, W. B., Rehman, F., 2021, "Current developments in esterification reaction: A review on process and parameters", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Cilt 103, ss. 80-101.
- Khazaai, S. N. M., Yiting, S., Rahim, M. H. A., Ibrahim, M. L., Maniam, G. P., 2021, "Application of Waste Catalyst  $\text{CaO-SiO}_2$  in the Transesterification of Palm Oil", *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, Cilt 25, Sayı 3, ss. 490-497.
- Kitakawa, N. S., Honda, H., Kuribayashi, H., Toda, T., Fukumura, T., Yonemoto, T., 2007, "Biodiesel Production using Anionic Ion-Exchange Resin as Heterogeneous Catalyst", *Bioresour. Technol.*, Cilt 98, Sayı 2, ss. 416-421.



- Lachter, E. R., Rodrigues, J. A., Teixeira, V. G., Mendonça, R. H., Ribeiro, P. S., Estupinan, S. V., 2019, Use of Ion-Exchange Resins in Alkylation Reactions. In: Inamuddin, Rangrez T., M. Asiri A. (eds) Applications of Ion Exchange Materials in Chemical and Food Industries. Springer, Cham.
- Lam, M. K., Lee, K. T., Mohamed, A. R., 2010, "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review", *Biotechnol. Adv.*, Cilt 28, Sayı 4, ss. 500-518.
- Leyva, F., Orjuela, A., Miller, D. J., Gil, I., Vargas, J., Rodriguez, G., 2013, "Kinetics of Propionic Acid and Isoamyl Alcohol Liquid Esterification with Amberlyst 70 as Catalyst" *Ind. Eng. Chem. Res.*, Cilt 52, ss. 18153-18161.
- Li, X., Tong, D., Hu, C., 2015, "Efficient production of biodiesel from both esterification and transesterification over supported  $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{MoO}_3$ - $\text{ZrO}_2$ - $\text{Nd}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$  catalysts", *J. Energy Chem.*, Cilt 24, Sayı 4, ss. 463-471.
- Lilja, J., Aumo, J., Salmi, T., Murzin, D. Y., Maki-Arvela, P., Sundell, M., Ekman, K., Peltonen, R., Vainio, H., 2002, "Kinetics of esterification of propanoic acid with methanol over a fibrous polymer-supported sulphonic acid catalyst", *Applied Catalysis A: General*, Cilt 228, Sayı 1-2, ss. 253-267.
- Liu, Y., Lu, H., Nyarko, K. A., MacDonald, T., Tavlarides, L. L., Liu, S., Liang, B., 2016, "Kinetic studies on biodiesel production using a trace acid catalyst", *Catal. Today*, Cilt 264, ss. 55-62.
- Lokman, I. M., Rashid, U., Taufiq-Yap, Y. H., Yunus, R., 2015, "Methyl ester production from palm fatty acid distillate using sulfonated glucose-derived acid catalyst", *Renewable Energy*, Cilt 81, ss. 347-354.
- Lou, W. Y., Zong, M. H., Duan, Z. Q., 2008, "Efficient production of biodiesel from high free fatty acid-containing waste oils using various carbohydrate-derived solid acid catalysts", *Bioresour. Technol.*, Cilt 99, Sayı 18, ss. 8752- 8758.
- Moradi, P., Saidi, P., Najafabadi, A. T., 2021, "Biodiesel production via esterification of oleic acid as a representative of free fatty acid using electrolysis technique as a novel approach: Non catalytic and catalytic conversion", *Process Safety and Environmental Protection*, Cilt 147, ss. 684-692.
- Nandi, S., Bhattacharyya, R., Mandal, B., 2021, "Optimization and kinetics of biodiesel from joba (*Simmondsia chinensis* L. Schneider) oil", *World Scientific News*, Cilt 159, ss. 108-121.
- Olagbende, O. H., Falowo, O. A., Latinwo, L. M., Betiku, E., 2021, "Esterification of *Khaya senegalensis* seed oil with a solid heterogeneous acid catalyst: Modeling, optimization, kinetic and thermodynamic studies", *Cleaner Engineering and Technology*, Cilt 4, ss. 100200.
- Peng-Lim, B., Ganesan, S., Maniam, G. P., Khairuddean, M., Efendi, J., 2013, "A new heterogeneous acid catalyst for esterification: Optimization using response surface methodology", *Energy Conversion and Management*, Cilt 65, ss. 392-396.
- Pesaresi, L., Brown, D. R., Lee, A. F., Montero, J. M., Williams, H., Wilson, K., 2009, "Cs-doped  $\text{H}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$  catalysts for biodiesel applications", *Appl. Catal., A*, Cilt 360, Sayı 1, ss. 50-58.
- Prasertpong, P., Shimpalee, S., Tippayawong, N., 2020, "Kinetic model for esterification of oleic acid catalyzed by a green catalyst in ethanol", *Energy Reports*, Cilt 6, ss. 66-70.
- Purolite, *Product Data Sheet*, <https://www.purolite.com/product-pdf/CT169DR.pdf>, ziyaret tarihi: 10.03.2022.
- Salsabila, R., Perdani, M. S., Kitikawa, N. S., Hermansyah, H., 2020, "Production of methyl caffeate as an intermediate product to produce caffeic acid phenethyl ester by esterification using cation-exchange resin", *Energy Reports*, Cilt 6, ss. 528-533.
- Senoyamak Tarakçı, M. I., Ilgen, O., 2018, "Esterification of Oleic Acid with Methanol Using  $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$  as a Heterogeneous Catalyst", *Chem. Eng. Technol.*, Cilt 41, Sayı 4, ss. 845-852.
- Sepulveda, J. H., Yori, J. C., Vera, C. R., 2005, "Repeated use of supported  $\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$  catalysts in the liquid phase esterification of acetic acid with butanol", *Appl. Catal., A*, Cilt 288, Sayı 1-2, ss. 18-24.
- Shu, Q., Yang, B., Yuan, H., Qing, S., Zhu, G., 2007, "Synthesis of biodiesel from soybean oil and methanol catalyzed by zeolite beta modified with  $\text{La}^{3+}$ ", *Catal. Commun.*, Cilt 8, Sayı 12, ss. 2159- 2165.

- Sirisomboonchai, S., Abuduwayiti, M., Guan, G., Samart, C., Abliz, S., Hao, X., Kusakabe, K., Abudula, A., 2015, "Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst", *Energy Conversion and Management*, Cilt 95, ss. 242–247.
- Syazwani, O. N., Teo, S. H., Islam, A., Taufiq-Yap, Y. H., 2017, "Transesterification activity and characterization of natural CaO derived from waste venus clam (*Tapes belcheri* S.) material for enhancement of biodiesel production", *Process Safety and Environmental Protection*, Cilt 105, ss. 303-315.
- Veljković, V. B., Lekićević, S. H., Stamenković, O. S., Todorović, Z. B., Lazic, M. L., 2006, "Biodiesel Production from Tobacco (*Nicotiana Tabacum* L.) Seed Oil with a High Content of Free Fatty Acids", *Fuel*, Cilt 85, Sayı 17-18, ss. 2671-2675.
- Verhoef, M. J., Kooyman, P. J., Peters, J. A., Bekkum, H. V., 1999, "A study on the stability of MCM-41-supported heteropoly acids under liquid- and gas-phase esterification conditions", *Microporous Mesoporous Mater.*, Cilt 27, Sayı 2-3, ss. 365-371.
- Yun, L., Ling, W., 2009, "Bio-Diesel Preparation from Waste Oil using Cation Exchange Resin as Heterogeneous Catalyst" *Chem. Technol. Fuels Oils*, Cilt 45, Sayı 6, ss. 417-424.
- Zhang, H., Li H., Pan, H., Liu, X., Yang, K., Huang, S., Yang, S., 2017, "Efficient production of biodiesel with promising fuel properties from *Koelreuteria integrifoliola* oil using a magnetically recyclable acidic ionic liquid", *Energy Conversion and Management*, Cilt 138, ss. 47-53.
- Zhang, X., Deng, Q., Han, P., Xu, J., Pan, L., Wang, L., Zou, J., 2016, "Hydrophobic Mesoporous Acidic Resin for Hydroxyalkylation/Alkylation of 2-Methylfuran and Ketone to High-Density Biofuel" *AIChE Journal*, Cilt 63, Sayı 2, ss. 680-688.
- Zheng, Y., Zheng, Y., Yang, S., Guo, Z., Zhang, T., Song, H., Shao, Q., 2017, "Esterification synthesis of ethyl oleate catalyzed by Brønsted acid–surfactant-combined ionic liquid", *Green Chemistry Letters and Reviews*, Cilt 10, Sayı 4, ss. 202-209.



## BETONARME SÜREKLİ KİRİŞLERDE OPTİMAL KESİT VE DONATI ORANLARININ PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE BELİRLENMESİ

Mehmet Kevser DERDİMAN

*Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE*  
<sup>1</sup> [mehmetderdیمان@isparta.edu.tr](mailto:mehmetderdیمان@isparta.edu.tr)

(Geliş/Received: 02.07.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.09.2022)

**ÖZ:** Tüm dünyada mühendislik tasarımları için optimizasyon giderek büyük bir önem kazanmaktadır. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında da optimal tasarımlar hem performans hem de ekonomi açısından çok önemlidir. Betonarme yapı elemanlarının ekonomik olarak tasarımı, boyutların belirlenmesinde izlenen prosedür gereği ve yönetmeliklerdeki koşul ve kısıtlamalardan dolayı karmaşık bir tasarım zorluğuna sahiptir. Ayrıca kesit boyutlarının tercihinde çok sayıda alternatif mevcuttur. Kesit tercihleri genelde deneyime dayalı ön boyut seçimi ile belirlenir ve ekonomik olmayan kesitler ortaya çıkar. Bunun yanında kesitte yer alan beton ve donatının birim fiyatları ve birbirine oranı zaman zaman değişmekte, bu da ekonomik kesit boyutlarını etkilemektedir. Bu çalışmada sürekli kirişlerde yer alan ve ön boyutlamada genelde esas alınan bir iç kirişin TS500 hesap yöntemleri ve kısıtları ile değişen tasarım yükleri ve beton sınıfları altında optimum kesit boyutları ve donatı oranlarının belirlenmesi için optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyonda çok kullanılan ve yaygın şekilde bilinen metasezgisel yaklaşımlardan parçacık sürü optimizasyon algoritması (PSO) kullanılmıştır. Çalışmada bir sürekli kirişin iç (ara) kirişi ele alınmıştır. Farklı beton sınıfları ve değişen tasarım yükleri ve kiriş boyları altında çok sayıda model oluşturulmuş ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Modellerin her biri için kesit boyutları ve donatı kesit alanları minimum maliyeti verecek şekilde optimize edilmiştir. Analiz sonuçlarında değişen kiriş boyu ve tasarım yükleri altında beton sınıflarına bağlı olarak kiriş kesit ve donatı oranlarındaki değişim belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Optimal Kiriş Kesiti, Optimal Donatı Oranı, Kiriş Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)*

### Determination of Optimal Cross-Section and Reinforcement Ratios in RC Continuous Beams by Particle Swarm Optimization Algorithm

**ABSTRACT:** Optimization is becoming increasingly important for engineering designs all over the world. Optimal designs in reinforced concrete structural system elements are also very important in terms of both performance and economy. The economical design of reinforced concrete structural elements has a complex design challenge due to the procedure followed in determining the dimensions and due to the conditions and restrictions in the regulations. In addition, there are many alternatives in the choice of cross-section dimensions. Cross-sectional preferences are usually determined by pre-size selection based on experience, and uneconomical cross-sections arise. In addition, the unit prices and the ratio of the concrete and reinforcement contained in the cross section to each other change from time to time, which affects the economic dimensions of the cross section. In this study, optimization analysis was performed to determine the optimum section dimensions and reinforcement ratios with TS500 calculation methods and constraints of an inner beam in continuous beams, which is generally taken as a basis for pre-sizing. Particle swarm optimization algorithm (PSO), one of the widely used and widely known metaheuristics, is used in optimization. In the study, the inner beam of a continuous beam is considered. A large number

of models have been created and optimized under different classes of concrete and varying design loads and beam lengths. For each of the models, the cross-sectional dimensions and the cross-sectional areas of the reinforcement are optimized to give the minimum cost. In the results of the analysis, the change in the cross-section and reinforcement ratios of the beams was determined depending on the concrete classes under varying beam length and design loads.

**Keywords:** *Optimal Beam Section, Optimal Reinforcement Ratio, Beam Optimization, Particle Swarm Optimization (PSO)*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Optimizasyon son yıllarda oldukça yoğun araştırma konusu olmuş ve birçok yeni optimizasyon yöntemi gelişimi sağlanmış ve geliştirilen bu yeni yöntemler gerçek mühendislik problemlerini çözmek için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Gerçek tasarım optimizasyon problemlerinin neredeyse tamamı, çok sayıda çözüm kümesine ve doğrusal olmayan karmaşık kısıtlamalara sahiptir. Karmaşıklığın arkasındaki temel nedenlerden biri de değişken sayısını fazlalığı ve bu değişkenlerin çok sayıda kısıtlamaları içermesidir (Altunbey Özbay ve Özbay, 2021). Dolayısıyla karmaşık sistemlerin optimal tasarımı, veri işleme ve çok sayıda hesaplama gerektirir. Yakın geçmişte, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak optimizasyon algoritmalarında da önemli gelişmeler gerçekleşmiş ve benzeri görülmemiş bir popülerlik kazanmıştır. Bunun ana nedeni günümüzün güçlü bilgisayarlarının karmaşık hesaplamaları yapabilir ve çok miktarda veriyi hızla işleyebilir duruma gelmesidir. Mühendislik tasarımı ve optimizasyon işlemleri bu gelişmeden büyük ölçüde faydalanmıştır. Dolayısıyla daha iyi optimal sistemler artık daha kısa sürede optimize edilerek tasarlanabilmektedir. (Arora, 2012; Zolghadr-Asli ve diğ., 2018).

Optimizasyon, tasarıma ilişkin konulan kısıtlamalar altında mevcut çözüm kümeleri içinden, en uygun çözümü tespit etmeyi amaçlayan hesaplama teknikleridir. Temel amacı, amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize etmek için en uygun değişken değerlerini belirlemektir. Optimizasyon problemleri, üretilen çözüm yöntemlerine bağlı olarak temelde iki türe ayrılır: Birisi klasik matematiğe dayalı deterministik çözüm yöntemini içeren algoritmalar diğeri ise sezgisel tabanlı stokastik algoritmalar. Stokastik algoritmalar ayrıca sezgisel ve metasezgisel teknikler olarak sınıflandırılabilir. Klasik matematiksel optimizasyon tekniklerinin çoğu, karmaşık tasarım optimizasyon problemlerine uygun çözümler sağlayamamaktadır. Bu optimizasyon yöntemleri genellikle, basit optimizasyon problemlerinde kullanılabilir. Ancak, mühendislikte karşılaşılan tasarım optimizasyon problemlerinin çoğunluğu klasik optimizasyon yöntemleri ile çözülmesi mümkün değildir. Bu tür karmaşık mühendislik problemlerinin çözümü artık bilgisayar teknolojilerinin avantajıyla ve metasezgisel algoritmaların kullanımıyla mümkün olmaktadır (Altunbey Özbay ve Özbay, 2021; Kim ve Kwak, 2022; Okwu ve Tartibu, 2021; Vasuki, 2020; Yang, 2014; Yang ve Karamanoglu, 2020).

Metasezgisel algoritmaların temel ilkesi, makul bir sürede karmaşık bir soruna kabul edilebilir bir çözüm üretmek için bir deneme yanılma yöntemidir (Zolghadr-Asli ve diğ., 2018) ve teknik anlamda, bir arama uzayını etkili bir şekilde araştırmak amacıyla temel sezgisel yöntemleri üst düzey çerçevelerde birleştirmeye çalışır. Başka bir deyişle, metasezgisel algoritmalar, genellikle evrim, biyolojik sistemlerin özellikleri, sosyal sistemler, sürü zekası ve temel fizik yasaları gibi doğal fenomenlerden esinlenen yöntemleri kullanmaya çalışır. Kısaca, arama alanını keşfetmek ve kullanmak için farklı kavramları akıllıca bir araya getirerek ikincil bir buluşsal yöntemi yönlendiren yinelemeli bir üretim süreci olarak tanımlanır (Kaveh, 2017). Bu yöntemler, makul hesaplama çabasıyla arama uzayında optimal bölgeleri keşfetme ve bulma yeteneklerinden dolayı tüm arama uzayı üzerinde global aramalar için uygundur. Sonuç olarak, metasezgisel algoritmalar çoğu optimizasyon problemi için oldukça iyi performans gösterme eğilimindedir (Yang, 2014; Yang ve He, 2019).

Doğa esinli olan metasezgisel algoritmalar genel olarak genetik algoritmalar ve sürü zekası algoritmaları olarak sınıflandırılır. Bunun yanında metasezgisel algoritmaların üçüncü bir kategorisi vardır, bu da fiziksel ve kimyasal süreçlere dayanır ve tavlama benzetimi algoritması bu sınıf altında ünlü

bir algoritmadır. Genetik algoritmalar, evrimin biyolojik süreçlerinden esinlenerek geliştirilirken, sürü zekası algoritmaları, hayvanların sürü davranışından esinlenerek geliştirilir. 1995 yılında parçacık sürüsü optimizasyonunun (PSO) icadından bu yana hayvan, kuş ve böcek sürülerinin davranışlarını taklit eden doğadan ilham alan algoritmaların geliştirilmesinde bir atılım olmuştur (Vasuki, 2020). Bu algoritmalar genetik algoritma, parçacık sürü algoritması, harmoni arama algoritması, tavlama benzetimi algoritması, karınca ve arı kolonisi optimizasyonu, martı ve guguk kuşu optimizasyon algoritmaları vb. gibi çok sayıda algoritmayı içerir (Kripka ve diğ., 2015). Bu geniş çeşitliliğe rağmen hala en fazla kullanılan yöntemler parçacık sürü algoritması, genetik algoritma, harmoni arama algoritması ve tavlama benzetimi algoritmalarıdır. Son yıllarda evrimsel tabanlı genetik algoritma ve harmoni arama algoritması çok sayıda araştırmaya konu olmuş en yaygın optimizasyon teknikleridir (Yousef ve diğ., 2016).

### Güvenilirlik Tabanlı Optimizasyon (Reliability-Based Optimization)

Yapıların tasarımı, maliyet, güvenlik, performans ve dayanıklılık gibi bir dizi farklı kriteri yerine getirmeli ve aynı anda mühendis tarafından dikkate alınan ve çelişkili olabilen gereksinimleri de sağlamalıdır. Bu nedenle, tasarım sürecindeki zorluk, çelişkili tasarım gereksinimleri arasındaki en iyiyi nasıl tanımlayacağınızdır. Bazen de tasarım sürecinin karmaşıklığı, tasarım kriterlerinin tüm parametrelere göre eşzamanlı olarak optimizasyonuna izin vermez. Tasarımcı, dolayısıyla çabasını sadece bir hedefe, genel olarak maliyete yoğunlaştırabilir ve daha sonra diğer gereksinimlerin, daha az ya da çok olamayacağını kontrol eder. Gerekirse, elde edilen çözümü geliştirmek için daha fazla ayarlamalar (kısıtlar) konulur. Bu prosedür performansa dayalı optimum tasarımı sağlar (Tsompanakis ve diğ., 2008). Performans sınırları ise güvenilirlik kısıtlarıdır.

Mekanik sistemlerde güvenilirlik havacılık, uzay, savunma endüstrileri, otomobil ve inşaat mühendisliğinde rekabetin merkezindedir (El Hami ve Radi, 2013).

Bir yapıda aranan en önemli özellik, yapıda öngörülen yüklerin olası en elverişsiz etkiye durumunda göçmemesi ve kullanım yükleri altında yapı elemanlarında deformasyon, çatlama ve titreşim sınır değerlerinin aşılmamasıdır (Ersoy ve diğ., 2019). Bu temel güvenilirlik ilkesi olarak adlandırılır ve bu ilke dayanım değerlerinin en az yük etkilerine eşit olmasını ve deplasman miktarı ile çatlak genişliğinin yapı kullanım amacı doğrultusunda belirlenecek kısıtlar içinde kalması zorunluluğunu gerektirir. Dayanım ait en önemli değişkenler kullanılan malzemelerin mekanik özellikleridir. Betonarmada bu özelliklerin üretim aşamasındaki belirsizlikler ve zamana bağlı değişkenliği nedeniyle dayanımın deterministik yöntemle kesin bir değer olarak belirlenmesi mümkün değildir. Ayrıca yük etkisinin belirlenmesinde kullanılacak olan yüklerin de belirsizliği söz konusudur. Bunun için malzeme özelliklerinin ve yük değerlerinin belirlenmesi ancak istatistiksel yaklaşımlarla mümkündür.

Geçmiş yılların veri birikimi ile istatistiksel değerlendirmeler yapılarak TS498'de (TSE, 1997) yük katsayıları ve TS500'de (TSE, 2000) dayanım, malzeme şartları ve bunlara ait güvenlik katsayıları verilmiştir.

Denklem (1)'de TS500'deki "taşıma gücü" şartı verilmiştir. Buna göre betonarme elemanların Denklem (2)'de belirtilen biçimde hesaplanmış malzeme tasarım dayanım değerleri, katsayılarla çarpılmış tasarım yükü ile hesaplanan iç kuvvet değerlerinden hiçbir zaman büyük eşit olduğu kanıtlanmalıdır.

$$R_d \geq F_d \quad (1)$$

Buradaki  $R_d$ : dayanım ve  $F_d$ : yük etkisini değerlerini göstermek üzere Denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

$$R_d = R_k / \gamma_m \quad F_d = \gamma_Q F_Q + \gamma_G F_G \quad (2)$$

Buradaki  $\gamma_m$ : malzeme katsayıları,  $\gamma_Q, \gamma_G$ : yük katsayıları,  $R_k$ : karakteristik dayanım ve  $F_Q, F_G$ : karakteristik yük etkileridir.

Şayet optimizasyon içinde Denklem (1)'deki şartların (moment ve kesme kuvveti açısından) kısıt olarak tanımlanması durumunda güvenilirlik esaslı bir optimizasyon yapılmış olacaktır. Güvenilirlik esaslı bir optimizasyon Denklem (3)'deki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$\text{Güvenilirlik Kısıtları: } \begin{cases} (g_R)_i(x) \leq (g_F^*)_i \\ i = 1, 2, \dots, j \end{cases} \quad (3)$$

Kullanım yükü etkisindeki yapıda aşırı yer değiştirme veya sehim olmamalıdır. Kullanım yükü, servis yükü veya işletme yükü şeklinde adlandırılan yükler sabit ve hareketli yüklerdir. Deprem ve rüzgar yükleri kullanım yükü değildir. Aşırı sehim taşıyıcı olmayan elemanlarda hasara neden olur ve eğer varsa, hassas makinelerin işlevini bozar.

Taşıma gücü ilkelerine göre tasarlanmış, yani dayanım açısından güvenli donatılmış bir kirişin veya döşemenin ne kadar sehim yapacağını belirlenmesi ve izin verilen sınırı aşp aşmadığının kontrol edilmesi de gerekir. Son yıllarda, artan beton kalitesi ve dayanımı (C30/37, C40/50 gibi) sonucu mühendisler kiriş, döşeme ve kolonların kesitlerini küçültme eğilimindedirler. Bunun sonucu olarak aşırı sehim oluşmaktadır (Topçu, 2019a).

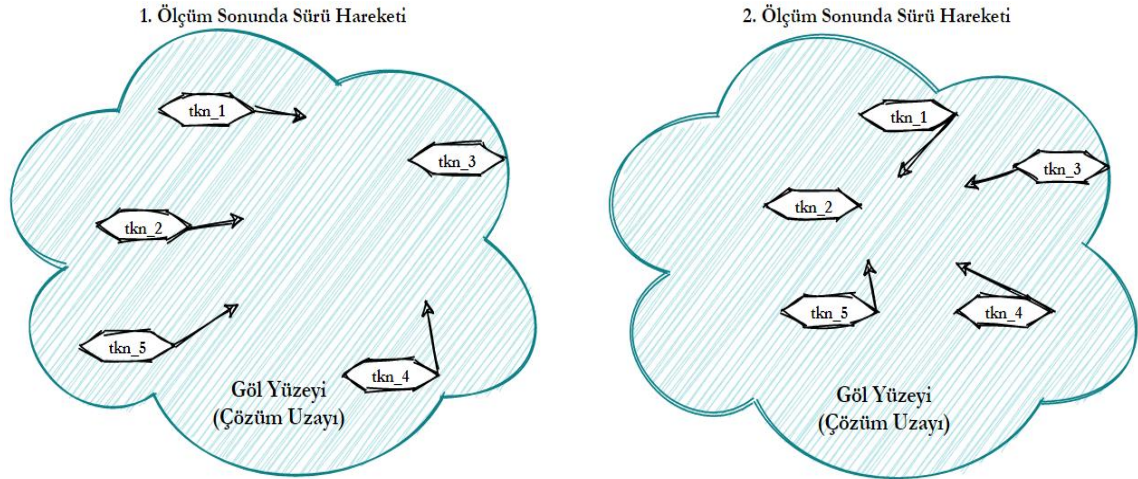
Kullanım yükleri altında çelik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi doğrusaldır fakat beton için aynı durum geçerli değildir. Çünkü betonun elastisite modülü gerilme düzeyine ve zamana bağlı olarak değişir. Fakat çatlamamış betonun, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin doğrusal davranışa çok yakın olduğu varsayılabilir. Sehim hesaplarında çeliğin doğrusal davrandığı betonun ise çatlama durumu dikkate alınarak hesaplanan etkili atalet momenti ile doğrusal davrandığı kabulü ile hesap yapılır. Sehim ve çatlak hesapları için daha doğru ve daha basit bir hesap yolu yoktur. Dolayısıyla sehim hesabı yaklaşıktır, kesin değeri hesaplamak imkansızdır.

### Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Purdue Üniversitesi'nde James Kennedy ve Russell C. Eberhart tarafından 1995 yılında geliştirildi (Eberhart ve Kennedy, 1995). PSO'nun kökleri, kuş sürülerinin sürü davranışında dayanmaktadır. Bir kuş sürüsü birbirine çarpmadan birlikte uçar, komşularıyla optimum mesafeyi korur ve faaliyetlerini topluca yürütür. PSO, kuşların sürü davranışı üzerine modellenen ilk popülasyon tabanlı sürü zekası algoritmasıdır. PSO kısıtlı veya kısıtsız, doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon problemleri için önerilen bir optimizasyon algoritmasıdır. Türevlerin hesaplanmasını gerektirmez ve sürekli ve ayrık kombinatoriyal optimizasyon problemleri için uygundur. PSO, tekli ve çoklu amaç fonksiyonlarını optimize edebilir, sürekli, ayrık ve karışık arama uzaylarına uygulanabilir (Vasuki, 2020; Yang, 2018, 2017, 2014).

PSO algoritmasını benzersiz kılan özellik parçacıkların d-boyutlu bir hiperuzay olan arama uzayı boyunca uçması, daha iyi konumlara doğru hızlanarak sonunda global olarak en iyi konuma ulaşmasıdır. PSO, arama uzayında uçan kuşlar tarafından temsil edilen aday çözüm kümesine sahiptir. Bu, uzayda bilinen ve bilinmeyen bölgeleri aramayı mümkün kılar. Her yinelemede, aday çözümlerin her birinin uygunluk değerleri, arama uzayındaki konumlarına göre hesaplanır. Çözümler, girdileri parçacıkların konum vektörleri olan amaç fonksiyonu ile değerlendirilir. Parçacıkların başlangıç konumları rastgele seçilir ve popülasyon büyüklüğü probleme göre belirlenir. PSO'da arama alanında (mümkün olan çözüm aralığında) bulunan ve her biri bir çözümü temsil eden sürü elemanına parçacık, parçacıkların oluşturduğu topluluğa (popülasyona) ise sürü adı verilir. Parçacıkların içerdikleri değişkenler amaç fonksiyonda yerine konması ile uygunluk (fitness) değerleri belirlenir. Uygunluk değeri en iyi olan belirlenir ve en iyi çözüm olarak adlandırılır ve sonraki döngüde diğer parçacıkların hız ve yön tayini için saklanır. Tüm parçacıkların amaç fonksiyonu hesaplanırken her parçacığın kendine ait en uygun değeri de parçacık bilgisi içinde saklanır ve bu da parçacığın en iyisi olarak bir sonraki döngüde o parçacığın hız ve yön tayini için saklanır. Yani parçacıkların yeni yön ve hızı bu iki bilgi ile belirlenmiş olur (Li ve Liu, 2011; Shukla ve Tiwari, 2018; Vasuki, 2020; Yang, 2014).

PSO'daki sürünün yön ve hareketliliği bir göl benzetmesi ile anlatılabilir. Örneğin bir göl üzerinde bulunan tekneler tarafından gölün en derin noktası tespit edilmeye çalışılıyor olsun. Göl yüzeyi sıfır noktası kabul edilirse, maksimum derinlik aranan noktayı yani çözümü ifade edecektir. Göl yüzeyinde bulunan ve başlangıçta rastgele dağıtılmış birbirleri ile bilgi paylaşımı yapabilen ve ölçüm yapabilen  $tkn_1$ ,  $tkn_2$ ,  $tkn_3$ ,  $tkn_4$  ve  $tkn_5$  tekneleri olduğunu varsayalım. İlk ölçümde (ilk döngü) sürünün en iyi değeri  $tkn_3$  tarafından alınmış ise diğer tekneler doğrudan ve hızlarını (kendi en iyilerine de bir miktar bağlı olarak)  $tkn_3$ 'e yönlendirecek ve en iyi değere uzaklığı oranında iyi olana yaklaşma hızına sahip olacaktır. Sonraki ölçümde (takip eden döngü) parçacıklar değişen konumları ile ölçümleri tekrar yaparak kendi en iyi değerine ve sürünü en iyi değerine göre ikinci ölçümün yön ve hızlarını elde edeceklerdir. Bu süreç yinelemeli olarak devam ettirildiğinde ve çok sayıda parçacık varsa tüm göl yüzeyi (çözüm uzayı) ölçülmüş olacaktır. Yukarıda anlatılan parçacık hareketliliği Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu örnekte teknelerin sayısı sürü sayısını (popülasyon nüfusunu), her ölçüm ve en iyilerin belirlenmesi döngü içi işlemleri, göl yüzeyi arama alanını ve bulunan en büyük derinlik noktası çözümü ifade etmektedir (Derdiman, 2022b).



Şekil 1. Sürü-Parçacık hareketliliğinin göl benzetmesi ile gösterimi (Derdiman, 2022b).

Figure 1. Example of a lake showing Swarm-Particle activity.

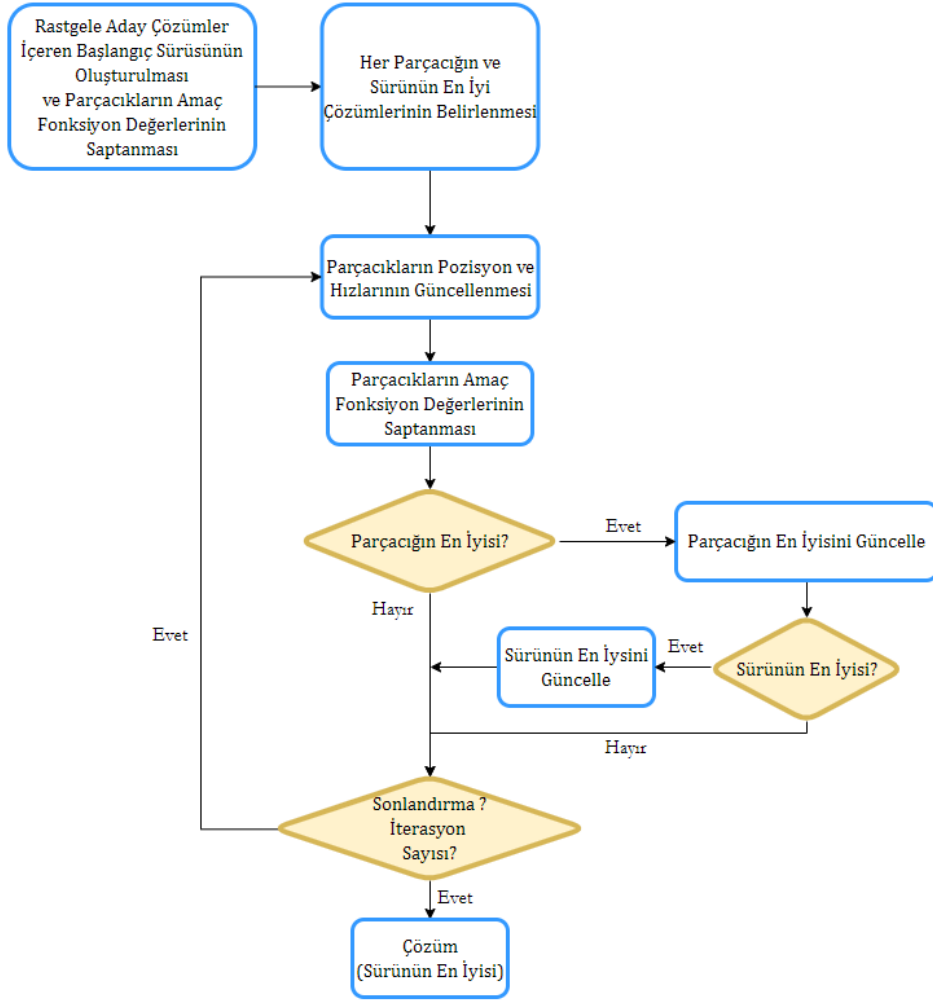
Parçacıklar arama alanı boyunca hareket eder ve konumları, her yinelemede tek tek parçacıkların en iyi konumlarına göre güncellenir. Parçacıkların konumu, her yinelemede tüm parçacıkların en iyi konumlarına ve kendi en iyi konumuna göre güncellenir. Belirli bir sayıda (100-1000) döngü sonrası artık en iyi parçacık vektörünün (çözüm kümesi) değişmemesi döngünün durdurulmasını gerektirir. Prathabro ve diğ. (2017) yaptıkları araştırmada bu döngü sayısının 100-1000 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Sheikhalishahi ve diğ. (2013) yaptıkları araştırmada değişen parçacık sayısının, döngü (iterasyon) sayısını etkilediğini vurgulamaktadırlar.

PSO algoritmasının genel akış şeması Şekil 2'de, k döngüsünde parçacığın pozisyonu ve k+1'nci döngü için hızının ve yönünün vektörel gösterimi Şekil 3'de verilmiştir.

Şekil 3'de gösterilen konum ve hızların hesabı Denklem (4),(5)'de verilmiştir (Li ve Liu, 2011).

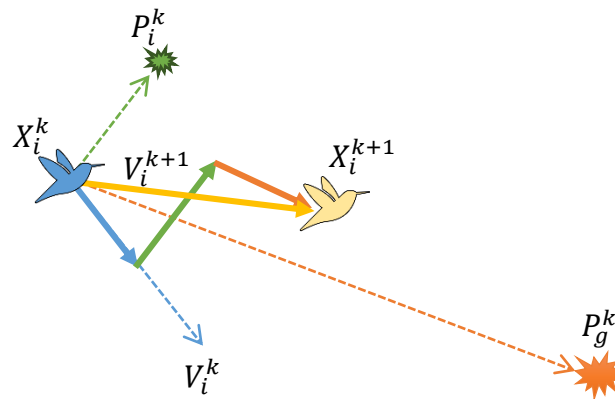
$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k) + c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k) \quad (4)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (5)$$



Şekil 2. PSO algoritmasının genel akış şeması (Derdiman, 2022b; Yang, 2014).

Figure 2. The general flowchart of the PSO algorithm.



Şekil 3.  $k$  döngüsünde parçacığın pozisyonu ve  $k+1$ 'nci döngü için hızının ve yönünün vektörel gösterimi (Derdiman, 2022b).

Figure 3. Position of the particle in the  $k$  cycle and the vector representation of its velocity and direction for the  $k+1$ st cycle.

Burada  $X_i^k$  ve  $V_i^k$  parçacığın geçerli pozisyon ve hızını,  $X_i^{k+1}$  ve  $V_i^{k+1}$  parçacığın güncellenmiş pozisyon ve hızını,  $\omega$  atalet katsayısını,  $c_1$  ve  $c_2$  parçacığın bilişsel ve sosyal bileşen ivme değerlerini (kendi ve sürü en iyisine doğru ivme katsayılarını),  $r_1$  ve  $r_2$  birden küçük sıfırdan büyük uniform bir rastgele sayı değerini,  $P_i^k$  ve  $P_g^k$  ise parçacık ve sürüye ait en iyi çözüm değerlerini,  $c_1 r_1 (P_i^k - X_i^k)$  bilişsel bileşen katkı



değerini ve  $c_2 r_2 (P_g^k - X_i^k)$  sosyal bileşen katkı değerini ifade etmektedir. PSO temel algoritmasında atalet katsayısı  $\omega$  her döngüde azaltılır. Dolayısıyla iterasyon içinde sönüm katsayısı olan  $\omega_{dam}$  ile çarpılarak bu işlem gerçekleştirilir. Örneğin atalet katsayısının 0.99 ve sönümün 0.95 olduğu bir durum için sonraki döngüde  $\omega = \omega * \omega_{dam}$  işlemi sonucu atalet katsayısı 0.9405 olacaktır (Derdiman, 2022b).

Metasezgisel algoritmaların popülaritesine ve başarılarına rağmen, hala daha fazla araştırma gerektiren bazı problemler mevcuttur. Bu tür algoritmaları analiz etmek için titiz bir matematiksel formüllerin bulunmaması nedeni ile önemli bir araştırma alanı da parametre ayarlama ve parametre kontrolüdür. Hemen hemen tüm algoritmalar içlerinde etkin olan parametrelere sahip olduğundan, bunların ayarları söz konusu algoritmanın performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Bununla birlikte, bir algoritmanın verimli bir şekilde nasıl ayarlanacağı ve parametrelerinin nasıl değiştirileceği/kontrol edileceği hala tam olarak çözülememiştir (Yang, 2018).

Kirişlerin kesit optimizasyonu ile ilgili araştırmalar 1960'lara kadar uzanmaktadır (Haug ve Kirmser, 1964; Kirsch, 1973, 1972). O tarihten bu yana farklı açı ve yönleriyle ilgili çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir.

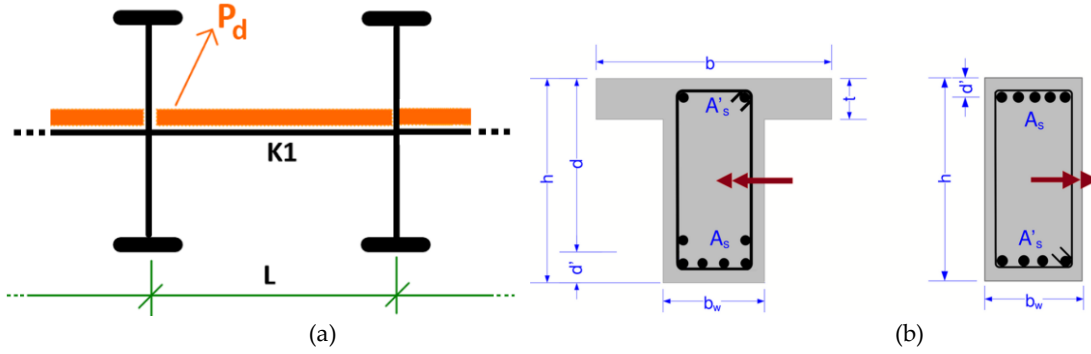
Metasezgisel algoritmaların uygulamaları ise 1990'lı yıllarda yaygınlaşmaya başlamış ve giderek artmıştır. Bu algoritmalar ile betonarme yapı elemanlarının optimal tasarımı geçmişte pek çok araştırmaya konu olmuştur. Malasri ve diğ. (1994) betonarme kiriş örneği üzerinden genetik algoritmanın nasıl çalıştığını, Coello ve diğ. (1997) genetik algoritma ile sabit tasarım yükü altında basit mesnetli bir kirişin optimizasyonunu, Koumousis ve Arsenis (1998) betonarme yapı elemanlarının genetik algoritma ile optimal tasarımını irdeleyen çalışmaları bu alandaki araştırmaların ilk örneklerindedir.

Bu çalışmada, TS500 kısıtları altında betonarme dikkörtgen (mesnet) ve tablalı (açıklık) kesite sahip sürekli kirişteki bir iç kirişin optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon güvenilirlik ve sehim şartları çerçevesinde, artan yük ile ortaya çıkan farklı eğilme momentleri ve farklı beton sınıfları dikkate alınarak, optimum kesit değişkenleri ve donatı oranlarının maliyeti minimize edecek şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede geçmişteki araştırmalardan farklı olarak bu çalışmada,

- Analizlerde basınç donatısı dikkate alınmıştır (çünkü basınç donatısı taşıma gücünde ve daha çok sehim üzerinde etkisi mevcuttur ve her kiriş basınç bölgesinde donatı içerir),
- Sürekli kirişlerin boyutlandırılmasında genelde ön planda olan bir iç kiriş optimizasyonu gerçekleştirilmiştir,
- Sehim kısıtlaması dikkate alınmıştır (optimizasyon içinde her döngü ve her parçacık için sehim hesaplatılarak maksimum değeri aşmayacak şekilde analiz yapılmıştır),
- Her yıl birim fiyat oranları (çelik/beton fiyat oranı) değişmektedir, bu optimizasyonda 2022 birim fiyatları ile çalışılmıştır,
- Ve optimizasyon güvenilirlik tabanlı gerçekleştirilmiştir.

## OPTİMİZASYON YÖNTEMİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ (OPTIMIZATION METHOD AND MATERIAL PROPERTIES)

Şekil 4'de verilen sürekli kirişi değişen  $P_a$  ve kiriş uzunlukları nedeniyle  $M_d$  kesit zoruna maruzdur. Bu eğilme momentini karşılayacak, kiriş kesit değerleri ile çekme ve basınç donatısı kesit alanlarının, TS500 taşıma gücü yöntemi ve konstrüktif kısıtları dikkate alınarak maliyet açısından optimizasyonu kurgulanmıştır. Optimizasyonda yaygın şekilde kullanılan sürekli kirişteki iç kirişin kesit optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.



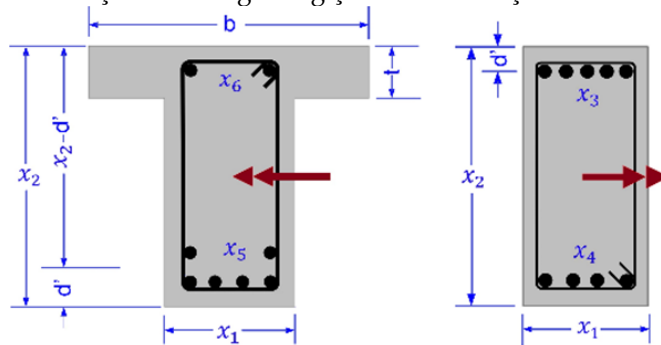
Şekil 4. a. Optimizasyonu yapılan kiriş, b. Açıklık ve mesnet bölgesi kiriş kesitleri

Figure 4. a. The optimized beam, b. Cross-sections of the span and support zone beams

Problem çözümü için Python programlama dili (Python Software Foundation, 2021) ve NumPy modülleri (NumPy Project, 2021) ile bir program geliştirilmiş ve bu program ile değişen tasarım etkileri için analiz yapılmıştır.

Optimizasyon problemi 6 boyutlu dolayısıyla  $k = 6$  değişkenli olarak ele alınmıştır. Değişkenlerimiz  $x_1 = b_w$  kiriş gövde genişliği,  $x_2 = h$  kiriş yüksekliği,  $x_3 = A_{s1}$  mesnet çekme donatısı,  $x_4 = A'_{s1}$  mesnet bölgesi basınç donatısı,  $x_5 = A_s$  açıklık bölgesi çekme donatısı,  $x_6 = A'_s$  açıklık bölgesi basınç donatısıdır.

Ayrıca çalışma içerisinde  $L$  kiriş uzunluğunu ve  $f_{ck}$  beton karakteristik basınç dayanımını,  $P_d$  kiriş yayılı yükünü,  $t$  tabla kalınlığını ve  $b$  etkili tabla genişliğini,  $d'$  çekme ve basınç donatısı için paspayını ifade etmektedir. Şekil 5 'de kiriş kesiti ve ilgili değişkenler verilmiştir.



Şekil 5. Optimizasyon modelinin kiriş kesit değişkenleri.

Figure 5. The beam cross-sectional variables of the optimization model.

Analizlerde  $t = 120 \text{ mm}$ ,  $b = 1000 \text{ mm}$  ve  $d' = 40 \text{ mm}$  alınmıştır. Beton karakteristik basınç dayanımı  $f_{ck}$ , 25 MPa (C25/30) 'dan 50 MPa (C50/60) 'a kadar değişen değerlerde ve  $L$  kiriş boyu 3.0 m den başlayıp 0.5 m artış ile 7.5 m'ye kadar değişen değerlerde alınmıştır. Betonarme çeliğinin karakteristik dayanımı hesaplarında  $f_{yk} = 420 \text{ N/mm}^2$  ve malzeme katsayısı  $\gamma_{ms} = 1.15$  alınmıştır. Tüm analizde denetimli beton kullanıldığı kabul edilerek malzeme katsayısı  $\gamma_{mc} = 1.5$  ile hesaplar yapılmıştır. Sisteme mesnetlik yapan kolonlar 300x300 mm kesitinde ve 3 m boyunda kabul edilmiştir. Kirişin mesnet ve açıklık momentleri yaklaşık yöntemlerle belirlenmiştir.

Analizler TS500 'ün (TSE, 2000) taşıma gücü yöntemi ve varsayımları ile yapılmıştır. Bu varsayımlar şunlardır:

- Beton ve donatı arasında tam kenetlenme vardır, uzama ve kısalmayı aynı oranda yaparlar.
- Betonun çekme dayanımının olmadığı kabul edilir.
- Kesit yüksekliği boyunca birim şekil değiştirme değişimi doğrusaldır (Bernoulli/Navier hipotezi geçerlidir).
- Betonarme çeliğinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elasto-plastiktir ve Hooke kanununun geçerli olduğu bölgede elastisite modülü  $E_s = 200 \text{ GPa}$  dır.
- Taşıma gücüne erişildiğinde basınç bölgesindeki maksimum birim kısalma 0.003 dür.
- Beton basınç bölgesinde gerilme dağılımı eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu modelidir.

Programda amaç fonksiyonu, beton, betonarme çeliği ve kalıp yapılması birim fiyatları için Çizelge 1’de verilen değerler dikkate alınmış ve maliyeti minimize edecek şekilde kodlanmıştır.

**Çizelge 1.** 2022 yılına ait birim fiyatlar (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022).

| C25/30   | C30/37           | C35/45           | C40/50           | C45/55           | C50/60           | B420C    | B420C            |
|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------|------------------|
| ₺/m <sup>3</sup>   | ₺/m <sup>3</sup> | ₺/m <sup>3</sup> | ₺/m <sup>3</sup> | ₺/m <sup>3</sup> | ₺/m <sup>3</sup> | ₺/Ton    | ₺/m <sup>3</sup> |
| 951.48   | 982.73           | 1045.23          | 1101.48          | 1120.23          | 1151.48          | 18858.88 | 148042.21        |
| <b>Plywood ile düz yüzeyli betonarme kalıbı yapılması, ₺/m<sup>2</sup></b> |                  |                  |                  |                  |                  |          |                  |
| 142.14   |                  |                  |                  |                  |                  |          |                  |

Optimizasyon probleminin genel matematiksel ifadesi Denklem (6)’deki gibidir. Minimize edilmesi istenen amaç fonksiyonun ( $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ) doğru ifade edilmesi, optimizasyon çözümünün kabul edilebilir ve verimli olmasını sağlayacaktır. Zayıf amaç fonksiyonu yanlış veya anlamsız çözümlere neden olabilir (Yang, 2014). Burada amaç fonksiyonu ağırlığı değil, fiyatı minimize edecek şekilde kurgulanmıştır. İşlem hacmini azaltmak için program içerisinde beton ve betonarme çeliğinin her ikisi içinde metreküp (m<sup>3</sup>) birim fiyatına (₺/m<sup>3</sup>) dönüştürülerek analizler yapılmıştır.

$$\text{Optimizasyon: } \begin{cases} \min_{x_i \in [x_i^L, x_i^U]} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Kısıtlar: } \begin{cases} g_j(x) \leq g_j^* \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Kirişin birim boy maliyetini veren amaç fonksiyonun yapısı Denklem (7)’de ki gibidir. Amaç fonksiyonu, değişkenlerin kısıtlamalara uymaması durumunda ceza (penalti) değeri eklemesi olacak ve amaç fonksiyon değeri minimum değerden uzaklaşacak şekilde programlanmıştır. Dolayısıyla kısıtlara uymayan parçacıkların amaç fonksiyon değerleri arttığı için sürünün davranışı üzerine etkisi olmayacağı anlamına gelir.

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \begin{cases} BF \frac{x_1 x_2}{1e6} + CF \frac{((x_3 + x_4)L/2 + (x_5 + x_6)L/2)/L + 226}{1e6} + \frac{KF(x_1 + 2(x_2 - t))}{1e3} + penlt, & x_2 \geq 600 \\ BF \frac{x_1 x_2}{1e6} + CF \frac{((x_3 + x_4)L/2 + (x_5 + x_6)L/2)/L}{1e6} + \frac{KF(x_1 + 2(x_2 - t))}{1e3} + penlt, & x_2 < 600 \end{cases} \quad (7)$$

Probleme ait değişkenlerin alt ve üst sınırları Çizelge 2’de verilmiştir. Fark edileceği üzere alt sınır değerleri kısıtları çerçevesinde belirlenmiştir. Kiriş yüksekliği, konut tipi yapılar için genelde mimari kısıt gereği (kapı ve pencere engeli) nedeni ile 750 mm alınmıştır. Çekme donatısı ve basınç donatısının alt sınırı ise 3Ø12’in kesit alanı 339 mm<sup>2</sup> olarak alınmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu içerisindeki hesaplamada  $h > 600 \text{ mm}$  olması durumu için kesit içindeki gövde donatısı dikkate alınarak toplam donatı alanı 226 mm<sup>2</sup> artırılmıştır.

**Çizelge 2.** Optimizasyon değişkenlerinin alt ve üst sınır aralıkları.

Table 2. The lower and upper bound ranges of the optimization variables.

| Değişkenler     | Alt sınır (mm) | Üst sınır (mm) |
|-----------------|----------------|----------------|
| $b_w = x_1$     | 250            | 600            |
| $h = x_2$       | 360            | 750            |
| $A_{s1} = x_3$  | 339            | 7000           |
| $A'_{s1} = x_4$ | 339            | 7000           |
| $A_s = x_5$     | 339            | 7000           |
| $A'_s = x_6$    | 339            | 7000           |

Uygulamadaki kiriş yüksekliği ve genişliğinin 50 mm'nin katları olacak şekilde ve donatı çubuklarının da sağladığı kesit alanlarının belirli sayıları vermesinden dolayı gerçekte bu problem kombinatorik ayrık optimizasyon problemidir. Fakat bu çalışmada problem sürekli optimizasyon olarak modellenmiştir. Bunun nedeni farklı tasarım momentleri için optimum kesit boyutları ve donatı oranlarının elde edilmek istenilmesindedir.

Problemdeki kısıtlar fonksiyonu içerisinde çekme donatısı oranının ( $\rho$ ) kısıtları Denklem (8)-(10)'da gösterilmiştir.

$$\rho - \rho' \leq 0.85 \rho_b \rightarrow (A_s - A'_s)/(0.85 \rho_b b_w d) - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$\rho \leq 0.02 \rightarrow (A_s/b_w d)/0.02 - 1 \leq 0 \quad (9)$$

$$\rho \geq 0.8 f_{ctd}/f_{yd} \rightarrow (0.8 f_{ctd}/f_{yd})/(b_w d/A_s) - 1 \leq 0 \quad (10)$$

TBDY-2018 (AFAD, 2018) de Deprem Tasarım Sınıfı; DTS 1, 1a, 2 ve 2a olan betonarme taşıyıcı sistemlerde, mesnet alt donatı, aynı mesnetteki üst donatının %50'sinden daha büyük olmalı ve açıklık bölgesindeki basınç donatısı da mesnetlerdeki üst donatının %25 'den daha büyük olmalı koşulları da Denklem (11) ve (12)'de verilmiştir.

$$\rho'_1 \geq 0.5 \rho_1 \rightarrow 0.5 \rho_1/\rho'_1 - 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$\rho' \geq 0.25 \rho_1 \rightarrow 0.25 \rho_1/\rho' - 1 \leq 0 \quad (12)$$

Kirişin yüksekliği ve gövde genişliği ile ilgili kısıtlar ise Denklem (13) ve (14)'de verildiği gibidir.

$$h \leq 3.5 b_w \rightarrow h/(3.5 b_w) - 1 \leq 0 \quad (13)$$

$$b_w \leq h + 300 \rightarrow b_w/(h + 300) - 1 \leq 0 \quad (14)$$

Yönetmelikteki kirişin gövde genişliğinin maksimum değeri kirişin yüksekliği ile saplandığı kolon kenarının toplamını aşamaz koşulu nedeniyle Denklem (14)'deki kısıt saplandığı kolonun minimum 300 mm olduğu düşünülerek tanımlanmıştır.

Buradaki tüm optimizasyon kısıtlarının sırasıyla kodlamaya esas teşkil eden kısıt fonksiyonları, yukarıdaki koşullar bağlamında Denklem (15)-(20)'de verilmiştir.

$$g_1(x) = \frac{(x_3 - x_4)}{0.85 \rho_b x_1 (x_2 - d')} - 1 \leq 0 \quad (15)$$

$$g_2(x) = \frac{x_3}{0.02 x_1 (x_2 - d')} - 1 \leq 0 \quad (16)$$

$$g_3(x) = \frac{(0.8 f_{ctd}/f_{yd})}{x_3/(x_1(x_2 - d'))} - 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$g_4(x) = \frac{0.5 x_4}{x_3} - 1 \leq 0 \quad (18)$$

$$g_5(x) = \frac{x_2}{3.5 x_1} - 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$g_6(x) = \frac{x_1}{x_2 + 300} - 1 \leq 0 \quad (20)$$

Güvenilirlik kısıtlamalarından olan  $g_8(x)$  ve  $g_9(x)$ , Denklem (21)-(24)'de verilmiştir.  $g_8(x)$  kısıtı hem mesnette hem açıklıkta koşulları sağlayacak şekilde programda kodlanmıştır.

$$M_d/M_r(b, t, b_w, h, A_s, A'_s, A_{s1}, A'_{s1}, f_{ck}, f_{yk}) - 1 \leq 0 \quad (21)$$

$$g_8(x) = M_d/M_r(b, t, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, f_{cd}, f_{yd}) - 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$V_d/V_r(b_w, h, f_{ctk}) - 1 \leq 0 \quad (23)$$

$$g_9(x) = V_d/V_r(x_1, x_2, f_{cd}) - 1 \leq 0 \quad (24)$$

Burada  $M_d$  tasarım momentini,  $M_r$  taşıma gücü momentini,  $V_d$  tasarım kesme kuvvetini,  $V_r$  ise kesitte müsaade edilen maksimum kesme kuvveti değerini ifade etmekte olup,  $M_d$  ve  $V_d$  yük dikkate alınarak,  $M_r$  ve  $V_r$  ise malzeme dikkate alınarak hesaplandığı için bu kısıt kirişin taşıma gücü güvenliğini ifade eder. Bu ifadedeki  $M_r$  ve  $V_r$  ise Denklem (25) ve (27)'de verilmiştir.

$$M_r(x_1, x_2, x_3, x_4, f_{cd}, f_{yd}) = \begin{cases} 0.85 f_{cd} x_1 c(x) k_1 \left( x_2 - d' - \frac{c(x) k_1}{2} \right) + x_4 f_{yd} (x_2 - 2 d'), & \sigma' \geq f_{yd} \\ 0.85 f_{cd} x_1 c(x) k_1 \left( x_2 - d' - \frac{c(x) k_1}{2} \right) + x_4 \sigma'(x) (x_2 - 2 d'), & \sigma' < f_{yd} \end{cases} \quad (25)$$

$$V_r(x_1, x_2, f_{cd}) = 0.22 f_{cd} x_1 (x_2 - d') \quad (26)$$

Denklem (25)'de verilen moment kapasitesi basınç donatısına da bağımlı olarak değişir. Bu durum kendi içinde ilave bir kısıtlamayı beraberinde getirmektedir. Buna ilişkin kısıt, basınç donatısında akma olup olmadığına dairdir. Eğer basınç donatısındaki birim kısalma değeri  $\varepsilon'_s \geq f_{yd}/E_s$  ise (akmış) basınç donatı gerilme değeri  $f_{yd} = 365.22 \text{ N/mm}^2$ ,  $\varepsilon'_s < f_{yd}/E_s$  ise Hooke kanununa uygun olarak gerilme değeri  $\sigma'_s = E_s \varepsilon'_s$  alınmıştır.

Deplasman hesabında, analizi yapılan iç kirişin mesnetlerinde ankastrelik momentlere yakın büyük momentler olacağı dikkate alınarak Denklem (27)'de verilen eşitlik ile hesaplanmıştır. Tüm kullanım yüklerinden (G+Q) oluşan ani sehime değeri ( $\delta_i$ ) ve ani sehime bağlı olarak da TS500'e göre zamana bağlı sehime ( $\delta_{ig}\lambda$ ) hesaplanmıştır (TSE, 2000).

$$\delta_i = \frac{5PL^4}{384E_c I_{ef}} - \frac{1}{16} \frac{M_{mes1} L^2}{E_c I_{ef}} - \frac{1}{16} \frac{M_{mes2} L^2}{E_c I_{ef}} \quad (27)$$

$$I_{ef} = \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (28)$$

$$M_{cr} = 2.5 f_{cta} \frac{I_c}{y} \quad (29)$$

$$\delta_t = \delta_i + \delta_{ig}\lambda \quad (30)$$

$$\lambda = \frac{\gamma_t}{1 + 50\rho'} \quad (31)$$

$$\delta_{ig} = \delta_i \frac{\sum \text{KalıcıYükler}}{\sum \text{TümYükler}} \quad (32)$$

Denklem (27) de yer alan efektif atalet momenti ve kesitin çatlama momenti Denklem (28) ve (29)'de verilmiştir. Sünme ve büzülme etkisi ile oluşan zamana bağlı ek sehimlerin hesabı, TS500'de verilen değişkenlere göre hesaplanır. Toplam sehime ise Denklem (30)'ten hesaplanır (TSE, 2000). Denklem (30) ile  $\lambda$  değeri yine TS500-Çizelge 13.2'den alınan kalıcı yük süre katsayısı,  $\gamma_t = 2$  alınarak hesaplanmıştır. Buradaki  $\rho'$  kirişin açıklık ve mesnetlerinde genelde farklı olur, dolayısıyla ortalama alınmıştır (Topçu, 2019a). Kısıtlamadaki sınır değer ise  $L_k/240$  olarak TS500'den alınmıştır.

### ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Analizinde 600 modelin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın tipik değerlerini oluşturan sonuçlar beton sınıfı, tasarım yükü ve kiriş boyuna bağlı olarak optimal kiriş kesit yüksekliği, kiriş gövde genişliği ve mesnet donatısı oranları Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3’de görüldüğü gibi kiriş gövde genişliği, kiriş boyunun 6.5 m ve yayılı yükünün 200 kN/m ve daha büyük değerlerinde artış göstermiştir. Çünkü kiriş yüksekliğinin 750 mm den daha büyük olamayacağı (optimizasyonda ilgili değişkenin üst sınırı) durumlarda kiriş gövde genişliği artış göstermiştir. Bu değerler ilgili çizelgede koyu olarak yazdırılmıştır.

Optimizasyon algoritması kirişin yüksekliğini ilgili kısıt nedeni artıramadığında diğer taşıma gücü ve deplasman kısıtlarını sağlayabilmek için büyük tasarım yükü ve kiriş uzunluklarında kiriş gövde genişliğini artırdığı görülmüştür.

**Çizelge 3.** Optimizasyon sonuçları (L ve h: mm,  $f_{ck}$ : MPa)

*Table 3. Optimization results (L and h: mm,  $f_{ck}$ : MPa)*

|                            | $f_{ck}=30$ |       |          | $f_{ck}=40$ |       |          | $f_{ck}=50$ |       |          |      | $f_{ck}=30$ |       |            | $f_{ck}=40$ |          |            | $f_{ck}=50$ |          |            |            |
|----------------------------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|-------------|-------|----------|------|-------------|-------|------------|-------------|----------|------------|-------------|----------|------------|------------|
|                            | $P_d$       | L     | $\rho_1$ | h           | $b_w$ | $\rho_1$ | h           | $b_w$ | $\rho_1$ |      | h           | $b_w$ | $P_d$      | L           | $\rho_1$ | h          | $b_w$       | $\rho_1$ | h          | $b_w$      |
| P <sub>at</sub> : 50 kN/m  | 3000        | 0.005 | 360      | 250         | 0.005 | 360      | 250         | 0.005 | 360      | 250  | 3000        | 0.015 | 386        | 250         | 0.016    | 374        | 250         | 0.016    | 371        | 250        |
|                            | 3500        | 0.006 | 360      | 250         | 0.006 | 360      | 250         | 0.005 | 360      | 250  | 3500        | 0.011 | 505        | 250         | 0.013    | 474        | 250         | 0.014    | 450        | 250        |
|                            | 4000        | 0.008 | 360      | 250         | 0.008 | 360      | 250         | 0.008 | 360      | 250  | 4000        | 0.011 | 584        | 250         | 0.012    | 541        | 250         | 0.014    | 520        | 250        |
|                            | 4500        | 0.010 | 360      | 250         | 0.010 | 360      | 250         | 0.010 | 360      | 250  | 4500        | 0.013 | 599        | 250         | 0.013    | 595        | 250         | 0.014    | 578        | 250        |
|                            | 5000        | 0.012 | 360      | 250         | 0.012 | 360      | 250         | 0.012 | 360      | 250  | 5000        | 0.016 | 600        | 250         | 0.016    | 600        | 250         | 0.016    | 600        | 250        |
|                            | 5500        | 0.015 | 360      | 250         | 0.015 | 360      | 250         | 0.015 | 360      | 250  | 5500        | 0.012 | 750        | 250         | 0.012    | 750        | 250         | 0.012    | 750        | 250        |
|                            | 6000        | 0.015 | 385      | 250         | 0.016 | 374      | 250         | 0.016 | 371      | 250  | 6000        | 0.014 | 750        | 250         | 0.014    | 750        | 250         | 0.014    | 750        | 250        |
|                            | 6500        | 0.013 | 444      | 250         | 0.014 | 423      | 250         | 0.015 | 419      | 250  | 6500        | 0.016 | 750        | 250         | 0.016    | 750        | 250         | 0.016    | 750        | 250        |
|                            | 7000        | 0.011 | 506      | 250         | 0.015 | 443      | 250         | 0.014 | 458      | 250  | 7000        | 0.019 | 750        | 250         | 0.019    | 750        | 250         | 0.019    | 750        | 250        |
| 7500                       | 0.010       | 554   | 250      | 0.013       | 503   | 250      | 0.014       | 480   | 250      | 7500 | 0.020       | 750   | <b>277</b> | 0.020       | 750      | <b>273</b> | 0.020       | 750      | <b>271</b> |            |
| P <sub>at</sub> : 100 kN/m | 3000        | 0.009 | 360      | 250         | 0.009 | 360      | 250         | 0.009 | 360      | 250  | 3000        | 0.014 | 427        | 250         | 0.015    | 409        | 250         | 0.015    | 404        | 250        |
|                            | 3500        | 0.012 | 360      | 250         | 0.012 | 360      | 250         | 0.012 | 360      | 250  | 3500        | 0.010 | 561        | 250         | 0.014    | 477        | 250         | 0.014    | 476        | 250        |
|                            | 4000        | 0.016 | 360      | 250         | 0.016 | 360      | 250         | 0.016 | 360      | 250  | 4000        | 0.011 | 596        | 250         | 0.013    | 570        | 250         | 0.014    | 542        | 250        |
|                            | 4500        | 0.014 | 427      | 250         | 0.015 | 408      | 250         | 0.015 | 405      | 250  | 4500        | 0.014 | 599        | 250         | 0.014    | 600        | 250         | 0.014    | 597        | 250        |
|                            | 5000        | 0.011 | 515      | 250         | 0.013 | 477      | 250         | 0.015 | 449      | 250  | 5000        | 0.018 | 600        | 250         | 0.018    | 600        | 250         | 0.018    | 600        | 250        |
|                            | 5500        | 0.011 | 566      | 250         | 0.013 | 521      | 250         | 0.016 | 468      | 250  | 5500        | 0.013 | 750        | 250         | 0.013    | 750        | 250         | 0.013    | 750        | 250        |
|                            | 6000        | 0.012 | 587      | 250         | 0.012 | 584      | 250         | 0.015 | 522      | 250  | 6000        | 0.016 | 750        | 250         | 0.016    | 750        | 250         | 0.015    | 750        | 250        |
|                            | 6500        | 0.013 | 600      | 250         | 0.013 | 599      | 250         | 0.013 | 599      | 250  | 6500        | 0.019 | 750        | 250         | 0.018    | 750        | 250         | 0.018    | 750        | 250        |
|                            | 7000        | 0.011 | 696      | 250         | 0.015 | 600      | 250         | 0.015 | 599      | 250  | 7000        | 0.020 | 750        | <b>272</b>  | 0.020    | 750        | <b>268</b>  | 0.020    | 750        | <b>266</b> |
| 7500                       | 0.011       | 750   | 250      | 0.011       | 738   | 250      | 0.011       | 750   | 250      | 7500 | 0.020       | 750   | <b>312</b> | 0.020       | 750      | <b>308</b> | 0.020       | 750      | <b>305</b> |            |
| P <sub>at</sub> : 150 kN/m | 3000        | 0.013 | 360      | 250         | 0.013 | 360      | 250         | 0.013 | 360      | 250  | 3000        | 0.012 | 469        | 250         | 0.014    | 446        | 250         | 0.014    | 442        | 250        |
|                            | 3500        | 0.015 | 393      | 250         | 0.016 | 377      | 250         | 0.016 | 375      | 250  | 3500        | 0.011 | 566        | 250         | 0.013    | 517        | 250         | 0.013    | 512        | 250        |
|                            | 4000        | 0.012 | 487      | 250         | 0.013 | 471      | 250         | 0.014 | 446      | 250  | 4000        | 0.013 | 598        | 250         | 0.013    | 595        | 250         | 0.013    | 582        | 250        |
|                            | 4500        | 0.012 | 548      | 250         | 0.013 | 512      | 250         | 0.014 | 494      | 250  | 4500        | 0.016 | 599        | 250         | 0.016    | 600        | 250         | 0.016    | 600        | 250        |
|                            | 5000        | 0.012 | 597      | 250         | 0.013 | 576      | 250         | 0.014 | 551      | 250  | 5000        | 0.020 | 600        | 250         | 0.012    | 750        | 250         | 0.012    | 750        | 250        |
|                            | 5500        | 0.014 | 600      | 250         | 0.014 | 600      | 250         | 0.014 | 600      | 250  | 5500        | 0.015 | 750        | 250         | 0.015    | 750        | 250         | 0.014    | 750        | 250        |
|                            | 6000        | 0.017 | 600      | 250         | 0.017 | 600      | 250         | 0.017 | 600      | 250  | 6000        | 0.018 | 750        | 250         | 0.017    | 750        | 250         | 0.017    | 750        | 250        |
|                            | 6500        | 0.012 | 750      | 250         | 0.012 | 750      | 250         | 0.012 | 750      | 250  | 6500        | 0.020 | 750        | <b>260</b>  | 0.020    | 750        | <b>257</b>  | 0.020    | 750        | <b>254</b> |
|                            | 7000        | 0.014 | 750      | 250         | 0.014 | 750      | 250         | 0.014 | 750      | 250  | 7000        | 0.020 | 750        | <b>302</b>  | 0.020    | 750        | <b>298</b>  | 0.020    | 750        | <b>295</b> |
| 7500                       | 0.016       | 750   | 250      | 0.016       | 750   | 250      | 0.016       | 750   | 250      | 7500 | 0.020       | 750   | <b>347</b> | 0.020       | 750      | <b>342</b> | 0.020       | 750      | <b>339</b> |            |

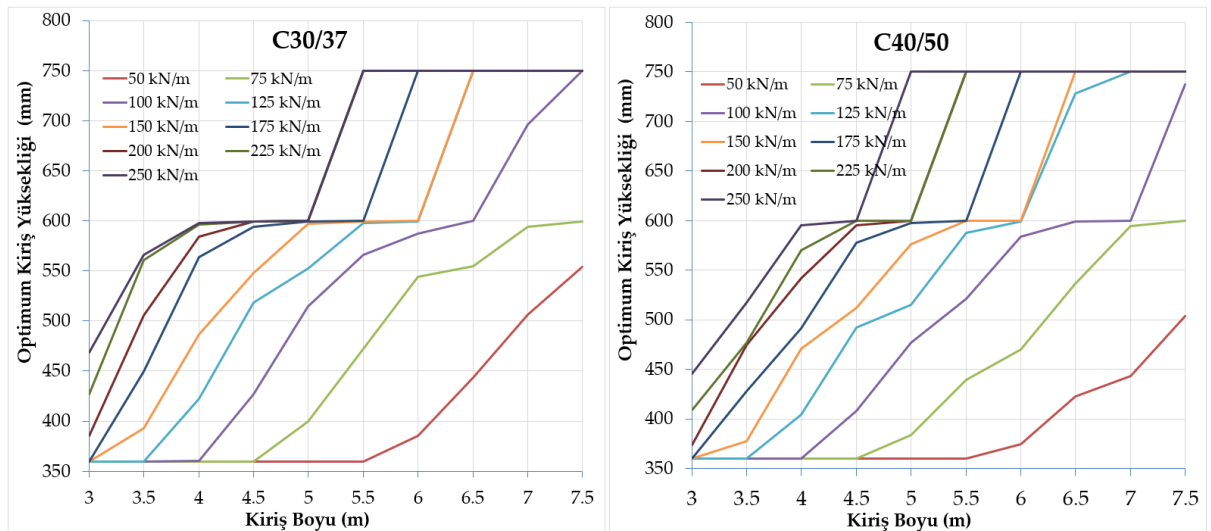
Kiriş boyunun 5 m'den küçük ve tasarım yüklerinin düşük olduğu durumlarda optimal kesit yüksekliği ve donatı oranlarının beton sınıflarına bağlı olarak değişmediği, artan kiriş boyu ve yüksek tasarım yüklerinde ise beton sınıfının optimal kesit yüksekliği ve donatı oranları üzerinde etkisi olduğu tabloda gözlemlenmektedir. Beton sınıfının taşıma gücü üzerinde önemli bir etken olmadığı gerçeği (Derdiman, 2022a; Topçu, 2019b) dikkate alındığında, buradaki etkinin deplasman kısıtından kaynaklandığı görülmektedir.

Çizelge 4'de optimizasyonda elde edilen donatı oranları beton sınıflarına ve boy aralıklarına göre ortalama değerleri verilmiştir. Burada verilen  $\rho$  açıklık bölgesi çekme donatısı oranını,  $\rho'$  açıklık bölgesi basınç donatısı oranını,  $\rho_1$  mesnet bölgesi çekme donatısı oranını ve  $\rho_1'$  mesnet bölgesi basınç donatısı oranını ifade etmektedir.

**Çizelge 4.** Optimizasyonda elde edilen ortalama donatı oranları

*Table 4. Average reinforcement ratios found in optimization*

| $P_d$           | L:3500 mm-5000 mm |               |               |               | L:5500 mm-7500 mm |               |               |               |
|-----------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
|                 | $\rho$            | $\rho_1$      | $\rho'$       | $\rho_1'$     | $\rho$            | $\rho_1$      | $\rho'$       | $\rho_1'$     |
| 25              | 0.00457           | 0.00478       | 0.00424       | 0.00424       | 0.00457           | 0.01040       | 0.00424       | 0.00528       |
| 50              | 0.00457           | 0.00794       | 0.00424       | 0.00472       | 0.00395           | 0.01384       | 0.00359       | 0.00687       |
| 75              | 0.00448           | 0.01137       | 0.00415       | 0.00586       | 0.00446           | 0.01304       | 0.00329       | 0.00648       |
| 100             | 0.00428           | 0.01272       | 0.00391       | 0.00630       | 0.00503           | 0.01251       | 0.00314       | 0.00622       |
| 125             | 0.00418           | 0.01315       | 0.00369       | 0.00652       | 0.00605           | 0.01286       | 0.00321       | 0.00640       |
| 150             | 0.00419           | 0.01326       | 0.00352       | 0.00658       | 0.00750           | 0.01435       | 0.00357       | 0.00715       |
| 175             | 0.00441           | 0.01340       | 0.00345       | 0.00666       | 0.00865           | 0.01577       | 0.00391       | 0.00785       |
| 200             | 0.00497           | 0.01382       | 0.00347       | 0.00687       | 0.00920           | 0.01647       | 0.00409       | 0.00821       |
| 225             | 0.00562           | 0.01420       | 0.00356       | 0.00706       | 0.00991           | 0.01746       | 0.00434       | 0.00870       |
| 250             | 0.00552           | 0.01353       | 0.00338       | 0.00673       | 0.01054           | 0.01840       | 0.00457       | 0.00917       |
| <b>Ortalama</b> | <b>0.0047</b>     | <b>0.0118</b> | <b>0.0038</b> | <b>0.0062</b> | <b>0.0070</b>     | <b>0.0145</b> | <b>0.0038</b> | <b>0.0072</b> |



**Şekil 6.** Farklı beton sınıfları için tasarım yükü ve artan kiriş uzunluğuna bağlı olarak optimal kiriş yüksekliğini gösteren grafikler

*Figure 6. Graphs showing the optimal beam height depending on the design load and the increased beam length for different classes of concrete*

Tasarım yükü ve artan kiriş uzunluğuna bağlı olarak optimal kiriş yüksekliğindeki değişim C30/37 ve C40/50 beton sınıfları için Şekil 6'da verilmiştir. Betonarme elemanların tasarımında ilk önce eleman kesiti ön tasarım olarak gerçekleştirildiği için optimal kiriş yüksekliğinin doğru belirlenmesi

önem kazanmaktadır. Grafiklerden de görüleceği üzere çok düşük tasarım yüklerinde boyu 5.5 m'ye kadar olan kirişler için minimum boyutlar tercih edilmelidir. Normal tasarım yüklerinde ( $\sim 150 \text{ kN/m}$ ) ise boyu 5.0-6.0 m olan kirişler için kesit yüksekliğin optimal değerinin 600 mm olduğu görülmektedir.

Basınç donatılarının optimizasyon algoritması tarafından sadece kısıtları sağlayacak şekilde belirlendiği görülmektedir. Örneğin 100 kN/m tasarım yükünde 5.5 m den küçük kirişler için mesnet çekme donatı oranı 0.0127, basınç donatısı oranı ise 0.0127'in %50'si yani 0.0063 olarak bulunmuştur. Bulgulara göre optimal tasarımı belirleyen donatı oranı mesnet bölgesindeki değerler olup,  $\sim 150 \text{ kN/m}$  gibi normal tasarım yüklerinde 5.5 m den küçük kirişler için optimum mesnet çekme donatısı oranı %1.33, açıklık optimum çekme donatısı oranı %0.42, 5.5 m'den büyük kirişlerde optimum mesnet çekme donatısı oranı %1.43, açıklık optimum çekme donatısı oranı %0.74 civarında elde edilmiştir.

**Çizelge 5.** Kiriş boyu ve beton sınıfına göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranları

*Table 5. Optimal  $L/h$  (beam length/beam height) ratios according to beam length and concrete class*

| Pa<br>(kN/m) | $f_{ck}$ (MPa) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | 25             | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   |
| 25           | 9.7            | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| 50           | 9.7            | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| 75           | 9.7            | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| 100          | 9.7            | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 10.7 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 11.1 | 9.8  | 10.5 | 10.9 | 11.0 | 11.1 | 11.1 |
| 125          | 9.7            | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.7  | 9.0  | 9.5  | 9.8  | 9.9  | 10.1 | 9.9  | 8.6  | 8.7  | 9.3  | 9.2  | 9.6  | 9.7  |
| 150          | 8.3            | 8.9  | 9.2  | 9.3  | 9.2  | 9.3  | 7.5  | 8.2  | 8.5  | 8.5  | 8.8  | 9.0  | 7.7  | 8.2  | 8.3  | 8.8  | 8.7  | 9.1  |
| 175          | 7.2            | 7.8  | 8.1  | 8.2  | 8.3  | 8.2  | 6.9  | 7.1  | 7.8  | 8.1  | 8.0  | 8.5  | 7.6  | 7.6  | 7.6  | 7.8  | 8.0  | 8.4  |
| 200          | 6.4            | 6.9  | 7.3  | 7.4  | 8.1  | 7.8  | 6.7  | 6.8  | 7.1  | 7.4  | 7.8  | 7.7  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.6  | 7.6  | 7.8  |
| 225          | 6.2            | 6.2  | 6.9  | 7.3  | 7.3  | 7.4  | 6.7  | 6.7  | 6.8  | 7.0  | 7.2  | 7.4  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  |
| 250          | 6.0            | 6.2  | 6.5  | 6.8  | 7.1  | 6.8  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.9  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  | 7.5  |
| 25           | 13.9           | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 16.7 | 16.7 | 16.7 | 16.7 | 16.7 | 16.7 |
| 50           | 13.9           | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 13.9 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 15.3 | 14.5 | 15.6 | 16.0 | 16.0 | 16.2 | 16.2 |
| 75           | 11.6           | 12.5 | 12.5 | 13.0 | 13.1 | 13.1 | 10.8 | 11.6 | 12.2 | 12.5 | 12.5 | 12.4 | 13.6 | 11.0 | 11.6 | 12.8 | 12.7 | 12.9 |
| 100          | 10.0           | 9.7  | 10.7 | 10.5 | 11.2 | 11.1 | 10.0 | 9.7  | 10.2 | 10.6 | 11.3 | 11.8 | 10.0 | 10.2 | 10.1 | 10.3 | 10.8 | 11.5 |
| 125          | 9.0            | 9.0  | 9.2  | 9.7  | 9.6  | 9.9  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.4  | 9.4  | 9.8  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 150          | 8.4            | 8.4  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.1  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 8.2  | 10.0 | 8.0  | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 175          | 8.4            | 8.3  | 8.4  | 8.4  | 8.4  | 8.4  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 9.2  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  |
| 200          | 8.3            | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 7.5  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  |
| 225          | 8.3            | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  |
| 250          | 6.7            | 8.3  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 7.3  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  | 8.0  |
| 25           | 18.1           | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 18.1 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 | 20.8 |
| 50           | 13.6           | 14.7 | 15.3 | 15.4 | 15.4 | 15.5 | 13.0 | 13.8 | 14.6 | 15.8 | 15.2 | 15.3 | 13.5 | 13.5 | 14.7 | 14.9 | 15.2 | 15.6 |
| 75           | 10.9           | 11.7 | 12.0 | 12.1 | 12.9 | 12.9 | 11.9 | 11.8 | 11.7 | 11.8 | 12.4 | 12.6 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 |
| 100          | 10.9           | 10.8 | 10.9 | 10.9 | 10.8 | 10.9 | 9.3  | 10.1 | 10.1 | 11.7 | 11.7 | 11.7 | 10.1 | 10.0 | 10.0 | 10.2 | 10.0 | 10.0 |
| 125          | 9.0            | 8.7  | 10.8 | 8.9  | 8.8  | 10.8 | 9.3  | 9.3  | 9.4  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 150          | 8.7            | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 175          | 8.7            | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 200          | 8.7            | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 225          | 8.7            | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 250          | 8.7            | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 8.7  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 9.3  | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |

Çizelge 5 beton sınıfına ve tasarım yüküne göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranlarını ve Çizelge 6 ise beton sınıfına ve tasarım yüküne göre 5.5 m'den küçük ve büyük olan kirişlerin ortalama optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranlarını göstermektedir.  $L/h$  oranı genelde ön tasarımda bir kriter olarak kullanıldığı için bu çizelgeler verilmiştir. Boyu 3.5-5.0 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 8.6$  çıkarken, boyu 5.5-7.5 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 9.3$  bulunmuştur. Ayrıca Çizelge 5'de belirli boy ve belirli tasarım yükü değerleri aşıldığında  $L/h$



oranlarının aynı çıktığı görülmektedir. Bu şu şekilde de yorumlanabilir, örneğin 6.5 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 150 \text{ kN/m}$  değeri, 7.0 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 125 \text{ kN/m}$  değeri ve 7.5 m kiriş boyunda tasarım yükü  $\sim 100 \text{ kN/m}$  değeri aşılnca, optimal kesit yüksekliği algoritma tarafından 750 mm olarak belirlenmiştir.

Buradaki çizelgelerde yer alan değerlerin hem taşıma gücü hem de sehim güvenilirlik koşullarını sağlayan optimal değerler olduğu unutulmamalıdır.

**Çizelge 6.** Beton sınıfına ve tasarım yüküne göre optimal  $L/h$  (kiriş boyu/kiriş yüksekliği) oranları

*Table 6. Optimal  $L/h$  (beam length/beam height) ratios according to concrete classes and design load*

|  | P <sub>a</sub> | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/50 | C45/55 | C50/60 | Tüm Beton Sınıfları İçin Ortalama $L/h$ |
|--|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| L=3000 mm-5000 mm aralığı için ortalama $L/h$  | 50             | 11.1   | 11.1   | 11.1   | 11.1   | 11.1   | 11.1   | 11.1                                    |
|  | 75             | 10.7   | 10.8   | 10.8   | 10.9   | 11.0   | 11.0   | 10.9                                    |
|  | 100            | 9.7    | 9.9    | 10.2   | 10.1   | 10.3   | 10.3   | 10.1                                    |
|  | 125            | 8.9    | 9.0    | 9.3    | 9.4    | 9.5    | 9.5    | 9.3                                     |
|  | 150            | 8.0    | 8.4    | 8.6    | 8.7    | 8.7    | 9.0    | 8.6                                     |
|  | 175            | 7.6    | 7.8    | 8.0    | 8.2    | 8.2    | 8.4    | 8.0                                     |
|  | 200            | 7.3    | 7.5    | 7.6    | 7.7    | 8.0    | 7.9    | 7.7                                     |
|  | 225            | 7.1    | 7.2    | 7.4    | 7.5    | 7.5    | 7.6    | 7.4                                     |
|  | 250            | 6.6    | 7.0    | 6.8    | 6.9    | 7.0    | 6.9    | 6.9                                     |
| L=5500 mm -7500 mm aralığı için ortalama $L/h$ | 50             | 14.0   | 14.6   | 15.2   | 15.5   | 15.5   | 15.6   | 15.0                                    |
|  | 75             | 11.9   | 11.7   | 12.0   | 12.3   | 12.6   | 12.6   | 12.2                                    |
|  | 100            | 10.1   | 10.2   | 10.3   | 10.7   | 10.9   | 11.2   | 10.5                                    |
|  | 125            | 9.5    | 9.4    | 9.9    | 9.5    | 9.5    | 10.0   | 9.6                                     |
|  | 150            | 9.1    | 9.4    | 9.0    | 9.4    | 9.4    | 9.4    | 9.3                                     |
|  | 175            | 9.0    | 9.0    | 9.0    | 9.0    | 9.0    | 9.0    | 9.0                                     |
|  | 200            | 8.7    | 8.7    | 9.0    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7                                     |
|  | 225            | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7                                     |
|  | 250            | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7    | 8.7                                     |

**Çizelge 7.** Optimal donatı oranlarının farklı çalışmalar ile karşılaştırması (Birimler: Md: kN.m; fck: MPa;  $A_s'$ :mm<sup>2</sup>)

*Table 7. Comparison of optimal reinforcement ratios with different studies (Units: Md: kN.m; fck: MPa;  $A_s'$ : mm<sup>2</sup>)*

|                        | Donatı Oranı<br>(Basit mesnetli kirişin<br>açıklık donatı oranı) | Bu çalışmada Açıklıkta<br>(T kesit) donatı<br>oranları | Bu çalışmada Mesnette<br>donatı oranları         |
|------------------------|--|--|--|
| Camp ve diğ. (2003)    | <b>0.007</b><br>Md≈180; fck≈27.6;<br>$A_s'$ =568                 | <b>0.005</b><br>Md=180; fck=30;<br>$A_s'$ =395         | <b>0.0128</b><br>Md=179; fck=30;<br>$A_s'$ =650  |
| Turgut ve diğ. (1997)  | <b>0.009</b><br>Md≈225; fck=16;<br>$A_s'$ =0                     | <b>0.0082</b><br>Md=225 fck=25;<br>$A_s'$ =495         | <b>0.0199</b><br>Md=225 fck=25<br>$A_s'$ =610    |
| Mathern ve diğ. (2020) | <b>0.014</b><br>Md≈?; fck=45;<br>$A_s'$ =980                     | <b>0.0056</b><br>Md=228; fck=45;<br>$A_s'$ =359        | <b>0.0142</b><br>Md=380; fck=45;<br>$A_s'$ =986  |
| Coello ve diğ. (1997)  | <b>0.015</b><br>Md≈700-800; fck=?;<br>$A_s'$ =0                  | <b>0.0115</b><br>Md=703; fck=30;<br>$A_s'$ =1226       | <b>0.0176</b><br>Md=750; fck=30;<br>$A_s'$ =1560 |
| Algedra ve diğ. (2011) | <b>0.005</b><br>Md≈200-220 fck=?<br>$A_s'$ =0                    | <b>0.0068</b><br>Md=211 fck=30<br>$A_s'$ =459          | <b>0.0133</b><br>Md=211 fck=30<br>$A_s'$ =648    |

Çizelge 7'de optimal donatı oranlarının farklı çalışmalar ile karşılaştırması verilmiştir. Buradaki çalışmalar sabit tasarım yüküne göre ve basit mesnetli kiriş için yapılmış, bazılarında eğilme momenti

bazılarında ise beton dayanımları verilmediğinden dolayı moment değerleri kesit taşıma gücü hesabı ile yeter yakınlıkta hesaplanmıştır. Bu çalışmalarda hesaplanan optimal kesit ve donatı oranları ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar birbirlerine yakındır, farklılıkların bu çalışmada ele alınan kirişlerin tablalı (T kesit) olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

### SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, TS500 kısıtları altında betonarme dikdörtgen (mesnet) ve tablalı (açıklık) kesite sahip sürekli kirişteki bir iç kirişin genelde ön tasarıma esas teşkil etmesi nedeniyle optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon güvenilirlik ve sehim şartları çerçevesinde, artan yük ve farklı beton sınıfları dikkate alınarak, kirişin güvenilirlik ve deplasman koşullarını sağlayacak şekilde kesit değişkenleri ve donatı oranlarının optimizasyonu yapılmış ve şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Kiriş boyu 3.5 – 5.0 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde hem güvenilirlik hem deplasman koşullarını sağlayan analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 8.6$  ( $L/h$  oranı genelde ön tasarımda bir kriterdir) bulunmuştur.
- Kiriş boyu 5.5 – 7.5 m olan kirişlerde  $\sim 150 \text{ kN/m}$  tasarım yüklerinde hem güvenilirlik hem deplasman koşullarını sağlayan analizdeki tüm beton sınıflarının ortalaması için optimal  $L/h \approx 9.3$  bulunmuştur.
- Kiriş boyu ve tasarım yükü büyük değerlere ulaştığında  $L/h$  oranlarının aynı çıktığı görülmektedir. (Konutlardaki ortalama kat yüksekliği ve kapı yüksekliği nedeni ile maksimum kiriş yüksekliğinin 750 mm ile kısıtlanması buna neden olmaktadır).
- Kiriş boyu 5.0 m den küçük kirişler için tasarım yükünün ortalama  $\sim 150 \text{ kN/m}$  olduğu durumda mesnet çekme donatı oranı 0.0133, açıklık çekme donatısı oranı 0.0042 (analizdeki tüm beton sınıflarının ortalama değeri) olduğu görülmektedir.
- Kiriş boyu 5.5 m den büyük kirişler için tasarım yükünün ortalama  $\sim 150 \text{ kN/m}$  olduğu durumda mesnette optimal çekme donatısı oranı 0.0143, açıklık optimal çekme donatısı oranı 0.0075 bulunmuştur (buradaki değerler hem kiriş boyları hem de beton sınıfları için ortalama değerdir).
- Kiriş boyu ve tasarım yükü artarken optimal donatı oranının da hem mesnette hem de açıklıkta arttığı görülmektedir (donatı oranının açıklıkta düşük değerlerde çıkması tabla etkisindedir).
- Hem mesnette hem açıklıktaki optimal basınç donatı oranları yönetmelikteki kısıtlarda kaldığı görülmüştür.
- Sürekli kirişlerde kesit boyutlarının genelde bir iç kirişe bağımlı olarak yapıldığı dikkate alınır, ön tasarım yapılırken yüküne ve boyuna bağımlı olarak optimal sonuçların dikkate alınması sehim ve taşıma gücü şartlarını sağlayan kesin boyutlama hassasiyetinde ekonomik bir boyutlama yapılmasını sağlayacaktır.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)




- AFAD, 2018, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar), Ankara.
- Algedra, M., Arafa, M., Ismail, M., 2011, Optimum Cost of Prestressed and Reinforced Concrete Beams using Genetic Algorithms, Journal of Artificial Intelligence 4, 76–88.
- Altunbey Özbay, F., Özbay, E., 2021, Martı Optimizasyon Algoritmasının Kısıtlı Mühendislik Tasarım Problemleri için Performans Analizi, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 15, 469–485.
- Arora, J., 2012, Introduction to Optimum Design, 2nd ed. Elsevier Ltd., California.
- Camp, C. V., Pezeshk, S., Hansson, H., 2003, Flexural Design of Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm, Journal of Structural Engineering 129, 105–115.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022, İnşaat Birim Fiyatlarına Esas İşçilik-Araç ve Gereç Rayiç Listeleri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

- Coello, C.C., Hernández, F.S., Farrera, F.A., 1997, Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert Systems with Applications* 12, 101–108.
- Derdiman, M.K., 2022a, Betonarme ön üretimli makas kirişlerin değişen tasarım momentleri altında beton dayanımlarına bağlı optimal kesit değerlerinin belirlenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 28, 409–418.
- Derdiman, M.K., 2022b, Ayrık PSO algoritması ile sehim kısıtı altında iki doğrultudaki kirişli döşemelerin güvenilirlik tabanlı optimizasyonu, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 9, 1, 2022 (49–64).
- Eberhart, R., Kennedy, J., New optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 39–43, 04-06 October 1995.
- El Hami, A., Radi, B., 2013, *Uncertainty and optimization in structural mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., London.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Canbay, E., 2019, *Betonarme : Davranış ve Hesap İlkeleri*, Evrim Kitapevi, İstanbul.
- Haug, E.J., Kirmsier, P.G., 1964, Minimum weight design of beams with inequality constraints on stress and deflection, *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME* 34, 999–1004.
- Kaveh, A., 2017, *Applications of Metaheuristic Optimization Algorithms in Civil Engineering*, Springer Nature, Cham, Switzerland.
- Kim, S.H., Kwak, H.G., 2022, Optimization of an RC frame structure based on a plastic analysis and direct search of a section database, *Journal of Building Engineering* 48, 103959.
- Kirsch, U., 1973, Optimized prestressing by linear programming, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 7, 125–136.
- Kirsch, U., 1972, Optimum design of prestressed beams, *Computers and Structures* 2, 573–583.
- Koumousis, V.K., Arsenis, S.J., 1998, Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 13, 43–52.
- Kripka, M., Medeiros, G.F., Lemonge, A.C.C., 2015, Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures, *Engineering Structures* 99, 311–318.
- Li, L., Liu, F., 2011, *Group Search Optimization for Applications in Structural Design*, Springer International Publishing, Berlin.
- Malasri, S., Halijan, D., Keough, M., 1994, Concrete Beam Design Optimization with Genetic Algorithms, *Journal of the Arkansas Academy of Science* 48, 111–115.
- Mathern, A., Steinholtz, O.S., Sjöberg, A., Önnheim, M., Ek, K., Rempling, R., Gustavsson, E., Jirstrand, M., 2020, Multi-objective constrained Bayesian optimization for structural design, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 63, 689–701.
- Okwu, M.O., Tartibu, L.K., 2021, *Metaheuristic Optimization : Nature-Inspired Algorithms Swarm and Computational Intelligence , Theory and Applications*, Springer Na, Cham, Switzerland.
- Prathab Rao, M., Nawawi, A., Sidek, N.A., "Swarm size and iteration number effects to the performance of PSO algorithm in RFID tag coverage optimization", *7th International Conference on Mechanical and Manufacturing Engineering*, Jogjakarta, Indonesia, AIP Conf. Proc. 1831, 020051-1–020051-6, 21-April 2017.
- Python Software Foundation, Python [WWW Document], URL <http://www.python.org>, ziyaret tarihi: 5.1.21.
- Sheikhalishahi, M., Ebrahimipour, V., Shiri, H., Zaman, H., Jeihoonian, M., 2013, A hybrid GA-PSO approach for reliability optimization in redundancy allocation problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68, 317–338.
- Shukla, A., Tiwari, R., 2018, *Discrete Problems in Nature Inspired Algorithms*, CRC Press Taylor & Francis Group, London.
- The NumPy Project and Community, NumPy [WWW Document], URL <https://numpy.org>, ziyaret tarihi: 5.1.21.
- Topçu, A., 2019a, *Betonarme II*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.

- Topçu, A., 2019b, Betonarme I, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- TSE, 2000, TS 500: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE, 1997, TS 498: Yapi Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tsompanakis, Y., Lagaros, N.D., Papadrakakis, M., 2008, Structural design optimization considering uncertainties, Taylor & Francis, Balkema.
- Turgut, P., Gürel, M.A., Arslan, A., "Genetik Algoritma ile Betonarme Bir Kirişin Optimum Tasarımı", İstanbul Teknik Üniversitesi Prof.Dr. A. Rifat Yarar Sempozyumu, Maslak, İstanbul, pp. 349–361, 10 Aralık 1997.
- Vasuki, A., 2020, Nature-Inspired Optimization Algorithms, Taylor & Francis, Oxford.
- Yang, X.S., 2018, "Mathematical Analysis of Nature-Inspired Algorithms", Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization, Ed.:Yang, X.S., Springer, London, p. 330.
- Yang, X.S., 2014, Nature-Inspired Optimization Algorithms, First. ed., Elsevier, London.
- Yang, X.S., He, X.S., 2019, Mathematical Foundations of Algorithms, Springer, Switzerland.
- Yang, X.S., Karamanoglu, M., 2020, "Nature-inspired computation and swarm intelligence: a state-of-the-art overview", Nature-Inspired Swarm Intelligence Computation and Algorithms, Theory and Applications, Ed.: Yang, X.S., Oxford, United Kingdom, pp. 3–18.
- Yousef, A.H., Salama, C., Jad, M.Y., El-Gafy, T., Matar, M., Habashi, S.S., "A GPU based genetic algorithm solution for the timetabling problem", ICCES 2016 - 11th International Conference on Computer Engineering and Systems, Cairo, Egypt, pp. 103–109, December 2016.
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., Chu, X., 2018, "Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms", Studies in Computational Intelligence, Vol. 720, Ed.: Bozorg-Haddad, O., Singapore, p. 166.



## POINT POSITIONING PERFORMANCE OF TRIMBLE-RTX IN DIFFERENT SATELLITE COMBINATIONS

<sup>1</sup>Burhaneddin BİLGEN , <sup>2</sup>Cevat İNAL , <sup>3</sup>Sercan BÜLBÜL 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>bbilgen@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>cinal@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>sbulbul@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 23.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.09.2022)

**ABSTRACT:** Today, new global positioning algorithms, techniques and technologies are emerging thanks to services such as International Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Service (IGS) that offer orbit and clock correction data of satellite systems to all GNSS users. These solutions are developed in order to eliminate the disadvantages of current positioning techniques such as requiring more than one GNSS receiver and not exceeding a certain distance between the reference station and the rover. One of these innovative technology products is Trimble CenterPoint RTX Post-Processing (Trimble-RTX) technology. In this study, the point positioning performance of the Trimble-RTX service was investigated. The 31-day RINEX data obtained from 2 IGS stations are used in 4 different satellite combinations (GPS (G), GPS+GLONASS (G+R), GPS+GALILEO (G+E), GPS+GLONASS+GALILEO (G+R+E)) processed with Trimble-RTX. By comparing the obtained coordinates with the coordinates of the stations published by IGS, the accuracy and precision of the coordinates were evaluated for each satellite combination. As a result of the evaluation, it was seen that there were generally no significant differences between the results obtained from 4 different satellite combinations at the stations.

**Keywords:** Accuracy, IGS, Online-PPP, Precision, Trimble-RTX

### Trimble-RTX'in Farklı Uydu Kombinasyonlarında Nokta Konumlama Performansı

**ÖZ:** Günümüzde uydu sistemlerinin yörünge ve saat düzeltme verilerini tüm GNSS kullanıcılarına sunan Uluslararası Uydularla Konum Belirlemede Sistemi (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) Servisi (IGS: International GNSS Service) gibi servisler sayesinde yeni küresel konum belirleme algoritmaları, teknikleri ve teknolojileri ortaya çıkmaktadır. Bu çözümler, mevcut konumlandırma tekniklerinin birden fazla GNSS alıcısı gerektirmesi ve referans istasyonu ile gezici arasında belirli bir mesafeyi aşmaması gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Bu yenilikçi teknoloji ürünlerinden biri de Trimble CenterPoint RTX Ölçü Sonrası değerlendirme (Trimble-RTX) servisedir. Bu çalışmada Trimble-RTX hizmetinin nokta konumlandırma performansı incelenmiştir. Bu amaçla 2 IGS istasyonundan elde edilen 31 günlük RINEX verileri 4 farklı uydu kombinasyonunda (GPS (G), GPS+GLONASS (G+R), GPS+GALILEO (G+E), GPS+GLONASS+GALILEO (G+R+E)) Trimble-RTX ile çözümlenmiştir. Çözümleme sonucunda elde edilen koordinatlar, istasyonların IGS tarafından yayınlanan koordinatları ile karşılaştırılarak, her bir uydu kombinasyonu için koordinatların doğruluğu ve hassasiyeti incelenmiştir. İnceleme sonucunda istasyonlarda 4 farklı uydu kombinasyonundan elde edilen sonuçlar arasında genel olarak anlamlı bir farklılık olmadığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Doğruluk, Hassasiyet, IGS, Online-PPP, Trimble-RTX.

## 1. INTRODUCTION

With the development of technology, the process of change and development has begun in every field of science (Solak, 2020). Important developments in the science world have led to the development of different solutions with various algorithms and significant changes in different professions as well as satellite-based positioning (Geliskan, 2019). Satellite technologies are indispensable equipment of a world that serves global organizations and users and even has no borders like the internet. As a product of these technologies, the idea of global positioning was introduced to coordinate American military units and has been available to researchers and civilians since the 1990s. In the following process, Global Navigation Satellite Systems (GNSS) started to take place in daily life as a result of the acceleration of space studies with the development of computational technique and electronic science.

International GNSS Service (IGS), which started its operations officially on January 1, 1994, has produced many high quality GNSS products (precise satellite orbit and clock products, earth rotation parameters, the coordinates and velocities of the stations, the time information of fixed stations) produced at different delay times and accuracies since 1994. These products have been made available to the scientific world (Kahveci and Yildiz, 2017). While these products are widely used in scientific research and engineering projects and many GNSS applications for geodetic and geophysical purposes, they have also led to the emergence of these new algorithms and techniques in satellite-based positioning.

When performing satellite-based positioning, two methods are used, absolute and relative positioning. However, both methods have some difficulties in obtaining high-accuracy coordinate information. For this reason, organizations such as the IGS produce high-precision orbital information and provide free of charge to users, and many new algorithms on positioning have been developed (Inyurt and Ulukavak, 2020). The most widely used among these is the technique called Precise Point Positioning (PPP). The aim of the PPP technique is to achieve very high point positioning accuracy with a single receiver. Thanks to the developing technology and developed algorithms in recent years, this goal has been tried to be achieved step by step (Alcay et al., 2013). The PPP method is a special case of the zero-difference method, and unlike position determination methods such as Differential GPS and Real Time Kinematic (RTK), it does not require a fixed station and consequently simultaneous observation (Alcay et al., 2013). Although PPP was developed by R.J. Anderle (1976), it has become today's standard positioning technique due to the improvements in the quality and accuracy of IGS products and has been widely used all over the world (Ucarli et al., 2021). Some of the prominent advantages of this method are the need for data collected with only one receiver, its high accuracy, ease of application, low cost, and location determination in a global reference system (Alkan et al., 2017). On the other hand, in the PPP technique, the convergence time for the ambiguity float solution required for position accuracies in the level of cm is 20 minutes on average. This is also an important limiting factor in real-time applications of the PPP technique (Bulbul et al., 2021).

The emergence of new satellite systems such as Galileo and BeiDou, as well as the recent launch of GLONASS at full capacity, has provided additional satellite resources and new frequencies for PPP. In addition to GPS, the inclusion of other satellite systems in the PPP solution not only increases the number of visible satellites, but also significantly strengthens the geometry of the satellite. Therefore, solutions in which more than one system is used jointly (multi-GNSS) offer important opportunities to improve PPP performance in terms of location accuracy and convergence time (Bahadur and Nohutcu, 2019).

The first study that included the relationship of PPP with GPS and initiated its development was conducted by Zumberge et al. (1997). Afterwards, Yigit and Gurlek (2017) investigated the usability of PPP to detect the dynamic displacement response of a vertically vibrating structure, Ochałek et al. (2018) assessed the accuracy of Trimble RTX with a Spectra Precision SP60 model GNSS receiver. Ilci (2020) tested the positioning performance and convergence time of Trimble-RTX technology, which is a real-time PPP service, evaluated the accuracy performance of the online GNSS post-processing service. Alkan (2021) investigated the usability and achievable accuracy of the Trimble-RTX correction service in kinematic applications, and Sisman and Ilci (2021) revealed the effect of different levels of resolution of the parameters known to be effective in positioning with satellites on the horizontal and vertical position

error. Yigit et al (2022) was investigated that Real-Time PPP with Trimble RTX correction service for real-time dynamic displacement monitoring based on high-rate GNSS observations.

In the studies carried out up to now, the accuracies of Trimble-RTX real-time positioning service have evaluated, but the accuracy assessment of Trimble-RTX post-processing service in different satellite combinations has received limited attention. The fact that the service is updated at certain intervals also makes it necessary to investigate the positioning performance at certain intervals. In this study, the point positioning performance of the web-based Trimble-RTX service, which provides real-time data over the global tracking station network with the help of innovative methods and advanced algorithms, for real-time high-precision location information with satellite orbit calculation, receiver/satellite clock and other system corrections has been investigated. The RINEX data for 31 days (July 1-July 31, 2021) obtained from EBRE and MERS stations. Then, it was arranged as 4 different satellite combinations (GPS, GPS+GLONASS (G+R), GPS+GALILEO (G+E), GPS+GLONASS+GALILEO (G+R+E)). The coordinates were obtained by analyzing these data with the Trimble-RTX service. The obtained coordinates were compared with the coordinates of EBRE and MERS stations for the date of 15 July 2021 published by IGS, and the root mean square error (rmse) in the direction of the coordinate axes were calculated in order to evaluate the precision and accuracy of the measurements for each satellite combination, and the 3D rmse of the points were obtained using the calculated values. The 3D rmse obtained for different satellite combinations were compared with statistical methods.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. PPP and Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Service

As a result of the rapidly continuing modernization studies in GNSS systems, the precise satellite orbit and clock corrections produced by organizations such as the IGS, Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Orbit Determination in Europe (CODE) are put into service. Thus, it enables high-precision position determination. The availability of higher-accuracy satellite and clock information and the development of algorithms that allow point positions to be calculated with a single GNSS receiver have led to the emergence of the method called Precise Point Positioning (PPP) (Ebner, 2008; Pan et al., 2014). The PPP is an absolute positioning method and it has been widely used in many researches in terms of both increasing positioning accuracies and ease of use, depending on the improvements in the quality and accuracy of IGS products (Yigit et al., 2016).

The success of the PPP technique largely depends on the orbital information of GNSS satellites. Therefore, the evaluation is based on precise orbit (ultra-rapid, rapid, final) and satellite clock information instead of broadcast orbit information. In recent years, the accuracy of precise satellite orbit and clock information offered by organizations such as IGS, CODE, JPL has increased the interest in the PPP method (Alcay et al., 2013). Today, PPP is a method used in the agricultural industry, hydrography, deformation monitoring, sensor positioning for the construction of submarine maps, aerial mapping. Different studies have been carried out on the accuracy and precision of both static and kinematic position determination of the PPP method (Pirti and Yazici, 2022).

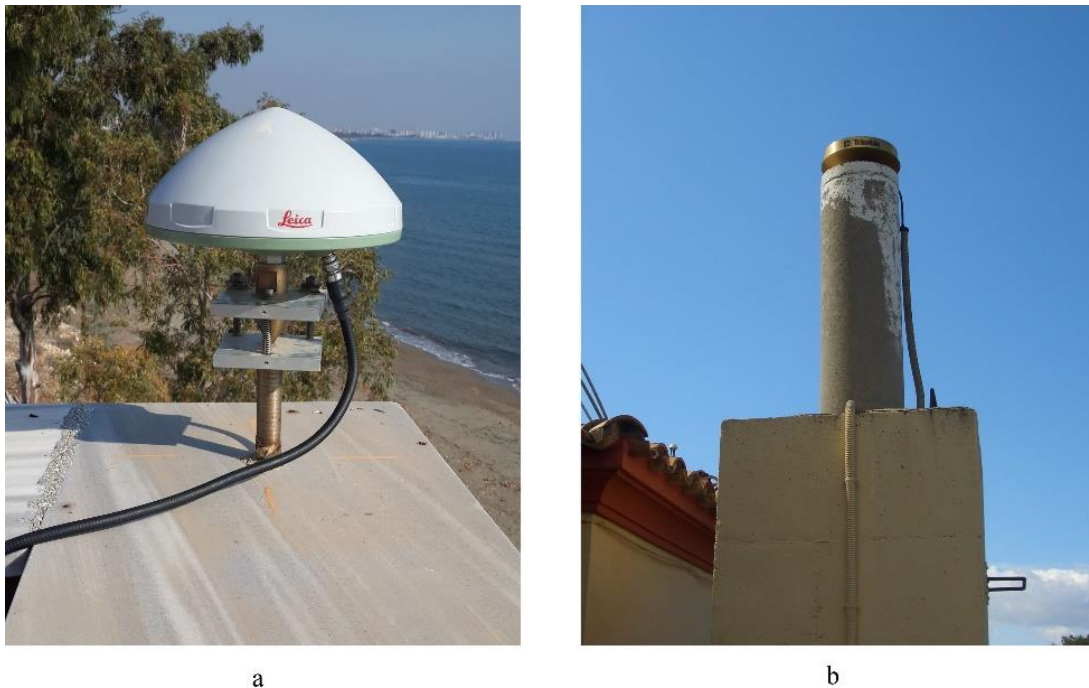
Users have different software alternatives to determine position with PPP method. Thanks to different software packages and web-based GNSS software, positioning can be performed with PPP. While CSRS-PPP, AUSPOS, APPS, Magic-GNSS, SCOUT, Trimble CenterPoint RTX are web-based online GNSS software; Bernese, GIPSY-OASIS and GrafNav can be given as examples of academic and package programs that can provide PPP services (Alcay et al., 2013; Choy et al., 2013; Dawidowicz and Krzan, 2014; Ogutcu, 2020).

The Trimble RTX service used in this study can be accessed at <https://trimblertx.com/>. Thanks to the service, GNSS observation data can be uploaded to the system and coordinate information can be received as a report. Position calculations are performed in the ITRF2008 datum for data collected before March 23, 2017, and in the ITRF2014 datum for data collected after March 23, 2017. It also offers the user a different coordinate system and tectonic plate selection. Observation files in RINEX 2.x, RINEX 3.x, Trimble T01,

T02 and DAT formats can be uploaded to the service. Observation files should be a minimum of 60 minutes and a maximum of 24 hours. Data files should only be static. It should also include dual frequency code and carrier phase observations (L1 and L2). After the observation files are uploaded to the system, the results are sent to the e-mail address in less than 2 minutes (Pirti and Yazici, 2022).

## 2.2. Study Area and Method

In this study, two Multi GNSS Experiment (MGEX) IGS stations, which are approximately on the same latitude, MERS (Erdemli, Türkiye) and EBRE (Roquetes, Spain), were selected to investigate the point positioning performance of the Trimble-RTX service (Figure 1). RINEX data with 24-hour and 30-second recording intervals between 01.07.2021 and 31.07.2021 of the stations used within the scope of the study were obtained.



**Figure 1.** MERS (a) and EBRE (b) stations used in the application (<https://igs.org/network/>)

31-day RINEX data were evaluated using Trimble-RTX, one of the web-based services developed for the PPP technique. In the evaluation, daily point coordinates were obtained by analyzing the RINEX data, which included G, G+R, G+E and G+R+E satellite combinations, and the obtained daily coordinates were compared with the values published by IGS. Errors, separately for G, G+R, G+E and G+R+E, to evaluate the accuracy of coordinates obtained with Trimble-RTX;

$$\varepsilon_{X_t} = X_t - X_r, \quad \varepsilon_{Y_t} = Y_t - Y_r, \quad \varepsilon_{Z_t} = Z_t - Z_r \quad (1)$$

In equation (1), the subscript  $t$  represents the day of the year and the subscript  $r$  represents the reference coordinates obtained from the IGS. The root mean square errors (rmse) in the direction of the coordinate axes for each satellite combination,

$$m_x = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{X_t} \varepsilon_{X_t}]}{n}}, \quad m_y = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Y_t} \varepsilon_{Y_t}]}{n}}, \quad m_z = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Z_t} \varepsilon_{Z_t}]}{n}} \quad (2)$$

where  $n$  is the number of errors calculated with equation (1) for each coordinate axes. By using the rmse in the direction of the coordinate components, the 3D rmse;

$$m_p = \pm \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (3)$$

The Fisher distribution is used to test whether the variances of two normally distributed measurement groups are statistically congruent. For this reason, the F-test was used to statistically compare the 3D rmse obtained in different satellite combinations at the stations with each other (Ghilani and Wolf, 2006). In



comparison, test value;

$$F_{test} = \frac{m_i^2}{m_j^2} \quad (4)$$

In calculating the test value, the larger variance was written into the numerator. In the equation,  $m_i$  and  $m_j$  show the variances of the  $i$  and  $j$  measurement groups.  $F_{test}$  value was compared with  $F_{tablo} = F_{f_i, f_j, 1-\alpha}$  value with  $f_i, f_j$  are degrees of freedoms and  $\alpha$  is probability of error. In comparisons, it was taken as  $F_{tablo} = F_{31, 31, 0.95} = 1.822$ .

Average coordinates for each satellite configuration for each station,  $n$  days, for the purpose of examining the precision of the measurements;

$$\bar{X} = \frac{[X_t]}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{[Y_t]}{n}, \quad \bar{Z} = \frac{[Z_t]}{n} \quad (5)$$

Errors that appear separately for G, G+R, G+E and G+R+E;

$$V_{X_t} = X_t - \bar{X}, \quad V_{Y_t} = Y_t - \bar{Y}, \quad V_{Z_t} = Z_t - \bar{Z} \quad (6)$$

For each satellite combination, the rmse are;

$$m_X = \pm \sqrt{\frac{[V_{X_t} V_{X_t}]}{n-1}}, \quad m_Y = \pm \sqrt{\frac{[V_{Y_t} V_{Y_t}]}{n-1}}, \quad m_Z = \pm \sqrt{\frac{[V_{Z_t} V_{Z_t}]}{n-1}} \quad (7)$$

3D rmse were calculated using equation (3).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The 31-day RINEX data of the selected stations were processed using the web-based Trimble-RTX post-processing service and the coordinates of each day were obtained. After the coordinates were obtained, the errors were calculated by comparing with the coordinates of the stations published by IGS on 15 July 2021. The rmse in the direction of the coordinate axes based on them were calculated using equations (1) and (2) and, the rmse were given in Table 1 for the MERS station and in Table 2 for the EBRE station.

**Table 1.** The rmse obtained at MERS station

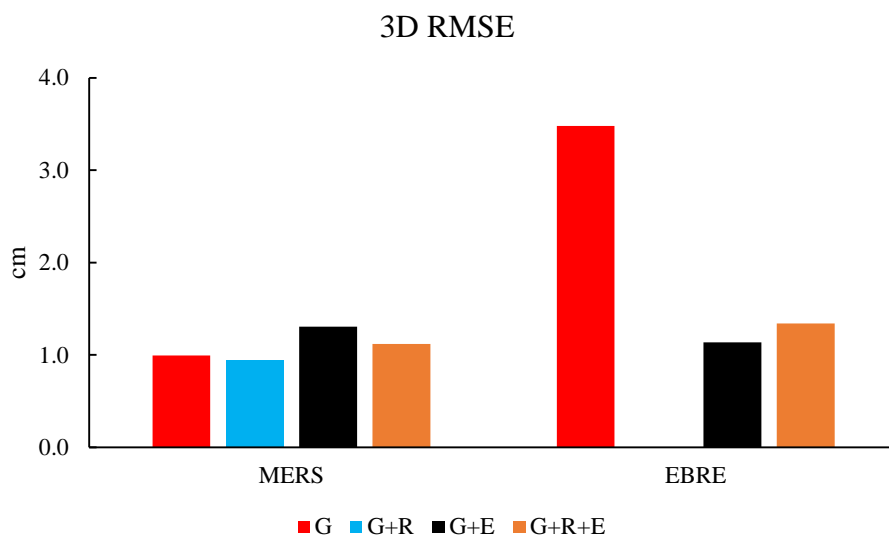
| Satellite System | $m_X$ (cm) | $m_Y$ (cm) | $m_Z$ (cm) |
|------------------|------------|------------|------------|
| G                | ±0.7       | ±0.5       | ±0.5       |
| G+R              | ±0.7       | ±0.4       | ±0.5       |
| G+E              | ±1.1       | ±0.5       | ±0.5       |
| G+R+E            | ±1.0       | ±0.3       | ±0.4       |

In Table 1, the rmse obtained in the direction of the axes at the MERS station generally varies between 0.3 cm and 1.1 cm. The rmse obtained only with GPS observations are more consistent with each other in the direction of different axes than other combinations. When R, E, or both are added to the GPS observations, an increase in the rmse in the X direction is observed.

**Table 2.** The rmse obtained at EBRE station

| Satellite System | $m_X$ (cm)                | $m_Y$ (cm) | $m_Z$ (cm) |
|------------------|---------------------------|------------|------------|
| G                | ±3.3                      | ±0.1       | ±1.1       |
| G+R              | No results were obtained. |            |            |
| G+E              | ±1.0                      | ±0.2       | ±0.5       |
| G+R+E            | ±1.0                      | ±0.8       | ±0.4       |

Table 2 shows that the rmse at the EBRE station generally vary between 0.1 cm and 1.0 cm, and the rmse in the X-axis direction obtained by GPS observations jumps to 3.3 cm. When E or R+E are added to the GPS observations, the axial rmse becomes more consistent with each other. After examining the rmse in the direction of the coordinate axes, the 3D rmse were obtained by Equation (3) and shown in Figure 2.



**Figure 2.** The 3D rmse of stations (cm)

In Figure 2, it is seen that the rmse are generally around 1 cm, very close results are obtained in four different satellite combinations at the MERS station, but these values are 3.5 cm in the G satellite combination at the EBRE station. It is thought that this situation is due to the decrease in the number of observations when only the G satellite combination is taken into account in that station, and as a result, the number of cycle slips increases. F-test was used to statistically compare the 3D rmse obtained in different satellite combinations at stations with each other and equation (4) was used to calculate the test value. F test results are shown in Tables 3 and 4.

**Table 3.** Comparison of different satellite combinations at MERS station

| Satellite System | G | G+R  | G+E  | G+R+E |
|------------------|---|------|------|-------|
| G                | - | 0.78 | 0.54 | 0.64  |
| G+R              | - | -    | 0.69 | 1.22  |
| G+E              | - | -    | -    | 0.85  |
| G+R+E            | - | -    | -    | -     |

\* significant test values

When the test values obtained in Table 3 are compared with the table value of 1.822, it is seen that these test values are not significant. This shows that the positioning results obtained in different satellite combinations at the MERS station are of the same accuracy.

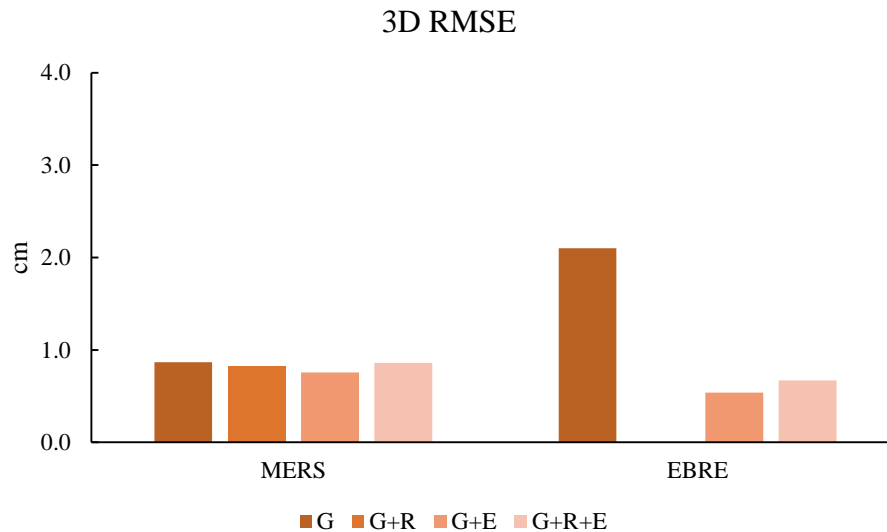
**Table 4.** Comparison of different satellite combinations at EBRE station

| Satellite System | G | G+R | G+E   | G+R+E |
|------------------|---|-----|-------|-------|
| G                | - | -   | 3.18* | 2.92* |
| G+R              | - | -   | -     | -     |
| G+E              | - | -   | -     | 1.09  |
| G+R+E            | - | -   | -     | -     |

\* significant test values

Table 4 shows that the results obtained in the G satellite combination at EBRE station are not in agreement with the results obtained in other combinations. It was also seen in the statistical test results that a larger rmse was obtained in the G satellite combination at the EBRE station and therefore a lower accuracy than the other combinations. After the accuracy assessment of the coordinates was completed,

the rmse were obtained using equations (5)-(7) and the 3D rmse were calculated in order to examine their precisions. The 3D rmse showing the precision of the coordinates are given in Figure 3.



**Figure 3.** 3D rmse for the precision of the coordinates (cm)

When Figure 3 is examined, it is seen that 3D rmse smaller than  $\pm 1$  cm are obtained in all combinations at the MERS station. This shows that the precision of the coordinates obtained at the MERS station is quite high. Similar to the accuracy assessment at the EBRE station, the rmse in the G satellite combination jumped around  $\pm 2$  cm. Despite this, it is seen that the coordinate repeatability is quite good, since the 3D rmse are generally in the millimeter level, and therefore, the rmse that are almost 50% better than those obtained in the accuracy assessment are obtained.

#### 4. CONCLUSIONS

In recent years, PPP technique has come to the fore among GNSS measurement techniques. In this technique, point locations can be determined with only a single GNSS receiver without the need for data collected at another station.

In this study, point positioning performance of Trimble CenterPoint RTX Post-Processing (Trimble RTX) service, which uses absolute solution technique (PPP), was investigated in different satellite combinations. The 31-day-24h-30 sec (1.07.2021- 31.07.2021) observation data of MERS and EBRE stations were obtained in RINEX format. The obtained RINEX data divided into four different satellite combinations, and these were sent to the Trimble RTX service for each day, then coordinates, which are belong to four different satellite combinations and each stations have been obtained. The differences between the coordinates obtained in the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) 2014 observation epoch for 31 days from Trimble-RTX and the coordinates published by the IGS of the MERS and EBRE stations were examined. Due to the low rmse values in the results obtained, it was seen that the solutions of Trimble-RTX in different satellite combinations gave results close to the values published by IGS.

The F-test was used to statistically compare the rmse obtained in different satellite configurations at the stations with each other. As a result of the comparison, it was seen that there was no significant difference between the results obtained from the four different satellite combinations of the MERS station. In the EBRE station, it was observed that there were significant differences between the results obtained from the G satellite combination and other satellite combinations, and more accurate results could be obtained with the E or R+E observations added to the GPS satellites in the measurements. The fact that the results obtained only with GPS observations also have cm accuracy reveals that different positioning systems can be used in different combinations in practical applications.

When an evaluation is made in terms of the precision of the measurements, it is seen that the solutions of Trimble-RTX in different satellite combinations are reliable because the rmse values are lower than those obtained in the accuracy evaluation. Some disadvantages of the Trimble RTX service used in this study are that it cannot be interfered with in the evaluation processes other than options such as antenna height, and the time to obtain the results is prolonged depending on the internet speed. In line with the data obtained within the scope of the research, it is thought that Trimble RTX technology can be an alternative to the post-process positioning techniques that are frequently used today, and its use will become widespread due to its accuracy, reliability and reproducibility.

## 5. REFERENCES

- Alcay, S., Yigit, C. O., Ceylan, A., 2013, "CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS web tabanlı yazılımların statik PPP modüllerinin karşılaştırılması", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Volume 5, Issue 1, pp. 1- 12.
- Alkan, R.M., 2021, "Cm-level high accurate point positioning with satellite-based GNSS correction service in dynamic applications", *Journal of Spatial Science*, Volume 66, Issue 2, pp. 351-359.
- Alkan, R.M., Ozulu, I.M., Ilci, V., 2017, "Klasik GNSS Veri Değerlendirme Yazılımlarına Alternatif Olarak Web-tabanlı Online Değerlendirme Servisleri", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Volume 17, Issue 2, pp. 603-619.
- Anderle, R. J., 1976, "Point Positioning Concept Using Precise Ephemeris", *Proc. Int. Geodetic Symp. On Satellite Doppler Positioning*, 12-14 October 1976, Las Cruces, New Mexico, pp. 47-75.
- Bahadır, B., Nohutcu, M., 2019, "Galileo Temelli Hassas Nokta Konumlama Yönteminin Performans Değerlendirmesi: Türkiye Örneği", *Harita Dergisi*, Volume 85, Issue 162, pp. 1-11.
- Bulbul, S., Bilgen, B., Inal, C., 2021, "The performance assessment of Precise Point Positioning (PPP) under various observation conditions", *Measurement*, Volume 171, Issue 108780.
- Choy S, Zhang S, Lahaye, F., Héroux, P., 2013, "A Comparison Between GPS-only and Combined GPS+GLONASS Precise Point Positioning", *Journal of Spatial Science*, Volume 58, Issue 2, pp. 169-190.
- Dawidowicz, K., Krzan, G., 2014, "Coordinate Estimation Accuracy of Static Precise Point Positioning Using on-line PPP Service, a Case Study", *Acta Geod Geophys*, Volume 49, pp. 37-55.
- Ebner, R., 2008, Validation and application of free-online and commercial post-processing PPP packages, Graz University of Technology, Institute of Navigation and Satellite Geodesy, PhD Thesis, Graz.
- Geliskan, S., 2019, Hassas Nokta Konumlama ile Deformasyonların Belirlenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Master of Science Thesis, Konya.
- Ghilani, C. D., and P. R. Wolf. 2006. Adjustment computations: Spatial data analysis. Hoboken, NJ: Wiley.
- Ilci, V., 2020, "CenterPoint RTX Teknolojisinin Doğruluk ve Tekrarlı Bilirliğinin Araştırılması", *Geomatik*, Volume 5, Issue 1, 10-18.
- Inyurt, S., Ulukavak, M., 2020, "Web tabanlı GNSS Yazılımlarının (CSRS-PPP, Trimble-RTX) Performansının Araştırılması", *Geomatik*, Volume 5, Issue 2, pp. 120-126.
- Kahveci, M., Yıldız, F., 2017, Global Konum Belirleme Sistemleri Teori-Uygulama, Nobel Yayın Dağıtım, 8. Baskı, Ankara, pp. 1-3.
- Ochalek, A., Niewiem, W., Puniach, E., Cwiakala, P., 2018, "Accuracy Evaluation Of Real-Time GNSS Precision Positioning With Rtx Trimble Technology", Volume 28, Issue 4, pp. 049-061.
- Ogutcu, S., 2020, "Assessing the contribution of Galileo to GPS+ GLONASS PPP: Towards full operational capability", *Measurement*, 151, 107143.
- Pan, L., Cai, C., Santerre, R., Zhu, J., 2014, "Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning with Fixed GPS Ambiguities", *Sensors*, Volume 14, pp. 17530-17547.
- Pirti, A., Yazici, D., 2022, "İnternet tabanlı GNSS yazılımlarının doğruluk açısından değerlendirilmesi", *Geomatik*, Volume 7, Issue 2, pp. 88-105.
- Solak, H.I., 2020, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu ve Çevresindeki Güncel Deformasyonların GNSS Yöntemi ile İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, PhD Thesis,

Afyonkarahisar.

- Sisman, Y., Ilci, V., 2021, "Real-Time eXtended (RTX) Konum Doğruluğuna Etki Eden Bazı Faktörlerin İstatistiksel Analizi" Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Volume 21, Issue 1, pp. 138-146.
- Ucarli, A. C., Demir, F., Erol, S., Alkan, R. M., 2021, "Farklı GNSS Uydu Sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Tekniğinin Performansına Etkisinin İncelenmesi" Geomatik, Volume 6, Issue 3, pp. 247-258.
- Yigit, C.O., Kizilarlan, M., Caliskan, E., 2016, "GPS-PPP ve GPS/GLONASS-PPP Yöntemlerinin Konum Belirleme Performanslarının Ölçü Süresine Bağlı Olarak Değerlendirilmesi", Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, Volume 8, Issue 1, pp. 22-39.
- Yigit, C.O., Gurlek, E., 2017, "Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures", Geomatics, Natural Hazards and Risk, Volume 8, Issue 2, pp. 893-904.
- Yigit, C.O., Bezcioglu, M., Ilci, V., Ozulu, I.M., Alkan, R.M., Dindar, A.N., and Karadeniz, B., 2022, "Assessment of Real-Time PPP with Trimble RTX correction service for real-time dynamic displacement monitoring based on high-rate GNSS observations", Measurement, Vol.201, Issue. 30, p.111704.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins M. M., Webb, F. H., 1997, "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Volume 102, pp. 5005-5017.



## BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE GALYUM FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMESİNİN KULLANIMININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Cumhur YALÇINDERE<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Tolga DEMİRCAN<sup>ID</sup>

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>kalieron33@gmail.com, <sup>2</sup>tolgademircan@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 23.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.09.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada, faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılan bir ısı enerjisi depolama sisteminde, Galyumun erime davranışları ve ısı performansı incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle içi içe geçmiş, eş merkezli iki dairesel borudan oluşan temel bir model geometrisi belirlenmiştir. Bu modelin iç borusundan su geçtiği, iki boru arasında kalan bölgenin ise faz değiştiren malzeme ile dolu olduğu düşünülmüştür. Bu temel geometride, iç borunun kesit geometrisinin eliptikliği değiştirilerek farklı yeni model geometriler oluşturulmuştur. Bu kapsamda, farklı model geometrileri ve farklı su giriş sıcaklıkları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yardımı ile zamana bağlı analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler aracılığı ile, doğal taşınımın ve akışkan giriş sıcaklığının erime davranışı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı arttıkça Galyumun erime süresinin azaldığı belirlenmiştir. İç borunun kesit geometrisinin eliptikliği arttıkça, erime hızının arttığı dolayısıyla erime süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir. En iyi ısı performansı eliptikliğin en fazla olduğu Model-5'te elde edilmiştir. Model-5 in erime süresi Model-2'ye oranla, akışkan giriş sıcaklığı 65 °C, 70 °C ve 75 °C olduğu durumlar için sırasıyla %34,06, %33,92 ve %30,91 kadar kısaldığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Faz Değiştiren Malzeme, FDM, Galyum, Enerji Depolama

### Analysis of Gallium Phase Changing Material in a Thermal Energy Storage System

**ABSTRACT:** In this study, the melting behavior and thermal performance of gallium as a phase changing material is investigated in a thermal energy storage system. For this purpose, a fundamental model geometry as an annular is determined. This model is assumed to have water flow on the inner pipe and phase changing material inside the gap between two pipes. Different new model geometries are created from this fundamental model by changing the cross-section geometry elliptic of the inner pipe. Within this scope, time-based analysis is conducted with Computational Fluid Dynamic for different model geometries and different water input temperature values. By using the data obtained from the analysis, the effects of natural convection and fluid input temperature on the melting behavior are investigated. As a result, it is found that the gallium melting duration decreased as the input temperature of thermal transfer increased. It is observed that melting speed increased and therefore, melting duration decreased as the ellipticity of the inner pipe cross-section geometry increased. The best thermal performance was obtained in Model-5 with the highest ellipticity. Compared to Model-5 and Model-2, melting times for 65 °C, 70 °C and 75 °C were shortened by 34.06%, 33.92% and 30.91% respectively.

**Keywords:** Phase Changing Material, PCM, Gallium, Energy Storage

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber enerji ihtiyacının karşılanabilmesi büyük bir problem haline almaktadır. Dünyamızda enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük oranda fosil yakıtların kullanılması, çevre açısından büyük sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Fosil yakıtlar enerji üretimi amacıyla

yakıldıklarında zararlı emisyon gazları üretmektedirler. Bu emisyon gazları hem insan sağlığı, hem canlı yaşamı hem de doğal çevre için büyük zararlar oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların yoğun kullanımı, bu kaynakların hızlıca tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu kaynakların rezervlerinin kısıtlı olması nedeniyle, gelecekte dünyanın enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük bir sorun yaşanacağı öngörülmektedir. Günümüzdeki tüketim hızıyla, petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların gelecekte hızlı bir şekilde tükeneceği tahmin edilmektedir. Bundan dolayı, enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanması sürdürülebilirlik açısından büyük bir önem arz etmektedir. Günümüzde güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi vb. yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Ancak bu yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımında farklı problemler ile karşılaşılabilir. Örneğin güneş enerjisinin temiz, yenilenebilir, ucuz olması gibi birçok avantajlı özelliği olmasına rağmen, kesintisiz olarak kullanılamaması büyük bir problem teşkil etmektedir. Güneş enerjisine ulaşım, anlık olarak değişebilmektedir. Özellikle gündüz ve gece vakitleri arasında güneş enerjisine ulaşımında büyük farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum, güneş ısıl enerjisinin depolanması ihtiyacını getirmiştir.

Isıl enerjinin depolanması ile, gün içinde enerji ihtiyacı olduğunda depolanan enerji kullanılabilen ve gerekli ihtiyaç karşılanabilmektedir. Bu amaçla geliştirilen enerji depolama sistemleri genellikle, güneş enerjisine ulaşımın fazla olduğu saatlerde ısıl enerjinin depolanması, güneş enerjisine ulaşımın yetersiz olduğu saatlerde ise depolanan enerjinin kullanılması mantığı ile çalışmaktadır. Bu ısıl enerji depolama sistemleri bir ısı değiştiricisi mantığı ile çalışmaktadır. Bu kapsamda, bir ısı transferi akışkanı ve bir faz değiştiren malzeme birlikte kullanılmaktadır. Isıl enerji depolama işlemi, duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal enerji depolama olmak üzere üç farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Gün içinde güneş enerjinin fazla olduğu zamanlarda, güneş enerjisi sayesinde ısı transfer akışkanının sıcaklığı artırılmaktadır. Bu yüksek sıcaklıktaki ısı transfer akışkanı ile, faz değiştiren malzeme arasında ısı geçişi gerçekleşmekte ve faz değiştiren malzeme erime davranışı göstermektedir. Faz değiştiren malzemenin erimesi ile ısıl enerji depolama sisteminin şarj olduğu düşünülmektedir. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu zamanlarda ise, ilgili sistem ters yönlü çalıştırılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki faz değiştiren malzemenin ısı transfer akışkanına ısı geçişi gerçekleşmekte ve faz değiştiren malzeme katılaşma davranışı göstermektedir. Yüksek sıcaklığa ulaşan ısı transferi akışkanı ise enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır. Faz değiştiren malzeme katılaşma davranışı gösterdiği bu süreçte ise, ısıl enerji depolama sisteminin deşarj olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında bir faz değiştiren malzemenin, erime süreci dolayısıyla şarj işlemi incelenmiştir.

Literatür incelendiğinde ısıl enerji depolama sistemlerinde faz değiştiren malzemelerin kullanımı üzerine yapılmış birçok çalışma olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmalarda, araştırmacılar genellikle şarj kapasitesinin artırılması ve şarj süresinin azaltılması üzerine çalışmışlardır. Faz değiştiren malzeme tipi, ısı transfer akışkanı giriş debisi, giriş sıcaklığı, geometri vb. birçok parametrenin ısıl performans üzerindeki etkilerini irdelemişlerdir. Bu kapsamda, literatürde bulunan bazı önemli çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Darzi ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada iki eş merkezli yatay silindir tüpün içinde, bir dikey eliptik, bir yatay eliptik, bir dairesel, bir de dairesel ancak kanatçıklı geometrinin şarj ve deşarj davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda dikey eliptik geometrinin şarj durumunda dairesel geometriye üstünlük sağladığını, ancak deşarj durumunda pek etkili olmadığını belirlemişlerdir. Assis ve diğ. (2007), dairesel bir geometri içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda doğal taşınım etkilerinin erimede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Bouhal ve diğ. (2018) ise, içerisinde ısı kaynağı olan faz değiştiren malzeme ile dolu silindirik bir geometrinin erime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak Galyum kullanmışlardır. Bu amaçla, düz silindir şeklinde ve dört kanatçıklı silindir şeklinde iki farklı model geometri kullanmışlardır. Sonuç olarak, dört kanatçıklı olan geometri kullanımı ile Galyumun erime süresinin 18,35 dakikadan 13,35 dakikaya kadar azaltılabildiğini belirlemişlerdir.

Cao ve diğ. (2018), yapmış oldukları sayısal ve deneysel çalışmada ısıl enerji depolama sistem

geometrilerinin eksantrikliğinin, erime davranışı üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, eksantrikliğin ve sınır sıcaklığının üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, eksantrikliğin erime süreci üzerinde önemli bir fark oluşturmadığını gözlemlemişlerdir. Ji ve diğ. (2018), ısı enerji depolama sistemlerinde kanatçıklı geometrinin kanatçıklarının açılı olmasının ısı transferine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında faz değiştiren malzeme olarak RT42 malzemesini kullanmışlardır. Oluşturdukları farklı model geometrilerde kanatçık açısını 0, +15, +30, -15 ve -30 derece olacak şekilde değiştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda -15° açılı kanatçığa sahip olan geometrinin erime sürecinin en hızlı tamamlandığını gözlemlemişlerdir. Ancak +15 ve +30 derecelerde kanatçık kullanımında ise erime sürecinin yavaşladığını belirtmişlerdir. Longeon ve diğ. (2013), eş merkezli bir ısı değiştiricinin gizli ısı enerji depolama sistemi olarak kullanılmasını deneysel ve sayısal olarak ele almışlardır. Faz değiştiren malzeme olarak RT35 kullanmışlardır. Doğal konveksiyonun, özellikle şarj sürecinde önemli bir rol aldığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, şarj işleminde üst enjeksiyonun,deşarj işleminde ise alt enjeksiyonun daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yazıcı ve diğ. (2014), bir ısı enerji depolama sisteminde kullanılan parafinin katılaşma karakteristiklerini incelemişlerdir. Akış hızı ve giriş sıcaklığının sabit tutulduğu çalışmada eksantrik geometrilerin ısı transferine olan etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. İç borunun eksantrikliğinin 10, 20, 30, -10, -20, -30 mm olduğu çalışmada dış tüp boyutu sabit olarak alınmıştır. Sonuç olarak içteki tüpün eksantrikliğinin değişmesiyle toplam katılaşma süresinin uzadığını gözlemlemişlerdir. Katılaşma sürecinde en iyi performansın, iki tüpünde eş merkezli olduğu durumda gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Pahamli ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada eksantrikliğin, ısı transfer akışkanının sıcaklığının ve akış hızının ısı performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak RT50'yi kullanmışlardır. Isı transfer akışkanının giriş hızının, erime davranışı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını görmüşlerdir. Eksantrikliğin artmasıyla, erime işleminin son aşamalarındaki ısı transfer hızının ve ortalama sıcaklığın arttığını belirlemişlerdir.

Tao ve diğ. (2017), yapmış oldukları çalışmada gövde borulu bir ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzeme kullanıldığında, doğal konveksiyonun ısı performansına olan etkilerini araştırmışlardır. İlgili problemi hem erime hem de katılaşma süreci için incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda doğal konveksiyon etkileri ihmal edildiğinde faz değiştiren maddenin erime sürecinin kısaldığını görmüşlerdir. Doğal konveksiyonun erime sürecinde sistem verimini artırdığını, ancak katılaşma sürecinde pek bir fark yaratmadığını belirtmişlerdir. Wang ve diğ. (2016), bir ısı depolama sisteminde, kanatçık uzunluğu, kanatçık oranı ve komşu kanatçıklar arası açı gibi değişkenlerin sisteme olan etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, kanatçık oranının erime sürecini kısalttığını belirtmişlerdir. Doğal konveksiyonun erime sürecinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Komşu kanatçıklar arasındaki açının 60-90 derece olduğu durumda optimum ısı performansına ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Deng ve diğ. (2019) ise, yapmış oldukları sayısal çalışmada yatay konumlandırılmış ısı enerji depolama sisteminde, iki kanatçıklı geometrinin kanatçık açılarının değiştirilmesinin sistem performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, dış borunun iletkenliğinin, erime davranışı ve kanat düzeni üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rana ve diğ. (2022) ısı eşanjörlerinde faz değiştiren malzemelerin erimesini ve ısı transfer karakteristiklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda dairesel, dikdörtgen ve eliptik borulu ısı eşanjörlerini ele almışlardır. Faz değiştiren malzemenin erimesinin en hızlı dikdörtgen borulu geometride, en yavaş ise daire borulu geometride gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Eisapour ve diğ. (2021) çift eliptik geometrili ısı enerji depolama sisteminin optimum tasarımını belirlemek için sayısal analizler yapmışlardır. Bu maksatla R35 faz değiştiren malzemesinin erime davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak, iç boru ile dış borunun alt duvarı arasındaki mesafe azaldıkça ısı performansın arttığını belirtmişlerdir. Çift dalgalı iç borular kullanılması ile ısı transfer yüzey alanının artırıldığı ve bu sayede faz değiştiren malzemenin erime süresinin hızlandığını gözlemlemişlerdir. Punniakodi ve Senthil (2021) güneş enerji depolama sistemlerinde faz değiştiren malzeme kullanımı ve kap geometrik parametreleri üzerine bir inceleme çalışması yapmışlardır. Geometriye kanatların eklenmesinin erime hızını önemli ölçüde artırdığını belirtmişlerdir. Nanoparçacık eklenmesi ve kabın yönünün değişiminin ısı transferi



üzerinde artırıcı etkisi olduğunu söylemişlerdir. Dikey kap geometrilerinin, yatay geometrilere oranla daha etkili erime sağladığı belirtmişlerdir.

Ghafoor ve Mussa (2020) termal enerji depolama sistemlerinde farklı iç boru geometrilerinin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin kullanmışlardır. İç boru geometrisini dairesel, yatay eliptik ve dikey eliptik olacak şekilde değiştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, inceledikleri parametre aralığında dairesel borunun ısı performansının daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Benbrika ve diğ. (2021) enerji depolama sistemlerinde eliptik geometrinin toplam erime süresine olan etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda yatay eliptik borunun, dikey eliptik boruya oranla daha yüksek erime hızına ve daha düşük erime süresine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Shin ve diğ. (2019) geliştirdikleri yeni tip eliptik geometriye sahip enerji depolama sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, geliştirdikleri PCM kapsülü ile, şarj ve deşarj işlem süresinin sırasıyla %50 ve %35 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Park ve diğ. (2021) kanatlı eliptik bir iç boruya sahip ısı enerji depolama sisteminde faz değiştiren malzemenin erime sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Kanat uzunluğunu 5-8 mm ve iç boru sıcaklığını ise 56,15-92,22°C aralığında değiştirerek analizler yapmışlardır. Sonuç olarak, ısı ve kütle transfer özelliklerinin kanat uzunluğunun ve iç boru sıcaklığının değişiminden önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Jourabian ve diğ. (2020), eliptik borulu bir ısı enerji depolama sisteminde, nanopartikül eklentisi ve gözenekliliğin etkilerini incelemişlerdir. bu kapsamda Cu nano partikülünün hacimsel karışım oranını 0-0,002 aralığında, gözenekliliği ise 1-0,9 aralığında değiştirmişlerdir. Eliptik halkanın eğiminin sıvı oranında herhangi bir değişikliğe sebep olmadığını belirtmişlerdir. Nano partikülünün hacimsel karışım oranının artması ile, gizli füzyon ısısının azaldığını ancak termal iletkenliğin ve sıvı oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Eisapour ve diğ. (2022) dalgalı geometriye sahip eliptik bir ısı enerji depolama sisteminde nano partikül eklenmiş faz değişim malzemesinin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak RT35, nano partikül olarak SiC kullanmışlardır. Dalgalı yüzey kullanımının ısı transferini artırdığını gözlemlemişlerdir. SiC nano partikül ilavesinin şarj boşalma hızını artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca ısı transfer akışkan sıcaklığının azaltılması ile faz değiştiren malzemenin katılma süresinin kısaldığını belirlemişlerdir. Bazai ve diğ. (2020) dairesel-eliptik çift borulu ısı enerji depolama sisteminin ısı performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Eliptik iç borunun farklı en-boy oranları ve farklı açıları için analizler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda daire bir boru yerine elips şeklinde bir iç boru kullanımı ile erime süresinin yaklaşık %61 azaldığını, verimliliğin ise %26 arttığını gözlemlemişlerdir. Elips açısı 90° olduğunda en iyi ısı performansı gözlemlemişlerdir.

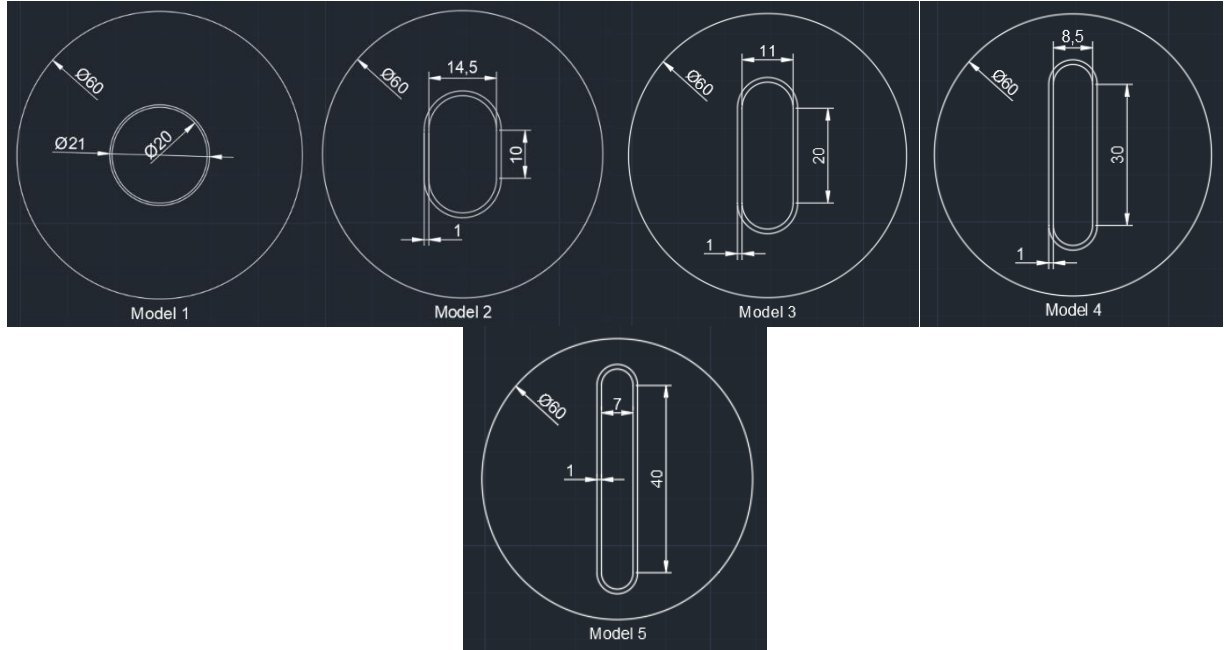
Literatür incelemesinden de görüldüğü üzere, ısı depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemeler üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak problem geometrisi, akışkan giriş sıcaklığı, debisi, faz değiştiren malzeme tipi vb. parametreler incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmında sadece erime veya sadece katılma süreci ele alınırken, diğer bir kısmında her iki süreç birlikte incelenmiştir. Yapılan incelemede, literatürde faz değiştiren malzemeler üzerine yapılmış birçok çalışmanın bulunduğu, güncel çalışmalarda yapılmaya devam edildiği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda, birçok geometrik parametrenin ısı performans üzerine etkilerinin incelendiği görülmüştür. Ancak yapılan incelemede, ısı transfer akışkanının geçtiği borunun kesitinin eliptikliğinin değişiminin, faz değiştiren malzemenin erime sürecine ve ısı performansına olan etkileri üzerine çalışıldığı çalışmalara fazla rastlanılmamıştır. Ayrıca literatürde bulunan mevcut çalışmalarda, farklı tip (N-eicosane, N-octadecane, RT22, RT50, RT65, RT82, RT44HC vb.) faz değiştiren malzemelerin erime sürecine ve ısı performansına olan etkileri üzerine yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak literatürde galyum üzerine yapılmış çalışmalara fazla rastlanılmamıştır. Galyum yüksek ısı iletkenliğe ve düşük erime sıcaklığına sahip bir faz değiştiren malzemedir. Bu özellikleri sayesinde düşük sıcaklıklarda, küçük sıcaklık farklarında bile faz değişimi gerçekleştirebilmekte ve hızlı bir şekilde ısı enerji depolama için kullanılabilir. Bundan dolayı bu çalışmada, literatürde bulunan diğer çalışmalardan farklı olarak ısı transfer akışkanının geçtiği borunun eliptikliğinin değişiminin ve galyum faz değiştiren malzeme kullanımının ısı performans üzerindeki etkilerine yoğunlaşılmıştır. Bu amaçla iç borunun eliptikliği değiştirilerek 5 farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometrilerde, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı değiştirilerek analizler

yapılmış ve galyum faz değiştiren malzemesinin erime davranışı irdelenmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### Problem Tanımı (Description of the Problem)

Bu çalışmada, faz değiştiren malzeme kullanılan bir ısı enerji depolama sisteminde, faz değiştiren malzemenin erime (şarj edilme) süreci ve ısı performansı incelenmiştir. Bu amaçla, iç içe geçmiş eş merkezli bakır borulardan oluşan bir ısı değiştiricisi temel modeli oluşturulmuştur. Bu temel model geometride, iç borunun çapı 20 mm, et kalınlığı 1 mm ve dış borunun çapı ise 60 mm olarak belirlenmiştir. İki borunun uzunluğu ise 500 mm olarak seçilmiştir. Oluşturulan bu temel geometriye Model-1 ismi verilmiştir. Bu Model-1 geometrisi kullanılarak, diğer model geometrileri tasarlanmıştır. Bu kapsamda, dış borunun çapı ve boruların uzunlukları değiştirilmeden sadece iç borunun eliptikliği değiştirilerek diğer 4 model geometri daha oluşturulmuştur. Bu yeni model geometriler oluşturulurken, Model-1 geometrisinde bulunan iç borunun kesit alanı kullanılmıştır. Bu kesit alanı sabit kabul edilmiş ve diğer model geometrilerde farklı eliptikliğe sahip elips şeklinde iç boru kesit geometrileri oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu çalışmada incelenen 5 geometrik modelde de, iç borunun kesit alanı birbirine eşit olarak belirlenmiştir. İç borunun elips kesit geometrileri oluşturulurken, elipsin odakları arasındaki mesafe kullanılmıştır. Bu mesafe Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5 geometrilerinde sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 mm olarak ayarlanmıştır. Oluşturulan model geometriler Şekil 1’de şematik olarak verilmektedir.



**Şekil 1.** Modellerin şematik gösterimi.

*Figure 1.* The schematic representation of the models.

Bu çalışmada ele alınan tüm model geometrilerde, iç borunun içinden ısı transfer akışkanı olarak su geçtiği, iki boru arasında kalan mesafenin ise Galyum faz değiştiren malzemesi ile doldurulduğu düşünülmüştür. Suyun ve Galyumun fiziksel özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmektedir. Isı transfer akışkanı olarak seçilen suyun, sisteme giriş debisi sabit kabul edilmiş, giriş sıcaklıkları ise değiştirilmiştir.

**Çizelge 1.** Suyun fiziksel özellikleri.*Table 1. Physical properties of water.*

|                               |          |
|-------------------------------|----------|
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | 998,2    |
| Özgül ısı (J/kgK)             | 4182     |
| Isı iletim katsayısı (W/mK)   | 0,6      |
| Dinamik Viskozite (kg/ms)     | 0,001003 |

**Çizelge 2.** Saf Galyumun fiziksel özellikleri (Bouhal ve diğ., 2018).*Table 2. Physical properties of pure Gallium (Bouhal et al., 2018).*

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| Erime sıcaklığı (K)               | 302,93  |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )     | 6093    |
| Özgül ısı (J/kgK)                 | 381,5   |
| Isı iletim katsayısı (W/mK)       | 32      |
| Dinamik viskozite (kg/ms)         | 0,00181 |
| Gizli ısı değeri (L) (J/kg)K      | 80160   |
| Isıl genleşme katsayısı (β) (1/K) | 0,00012 |

### Çözüm Yöntemi (Solution Method)

#### Matematiksel Formülasyon ve Diferansiyel Denklemler (Mathematical Formulation and Differential Equations)

Bu çalışmada incelenen problemin temel diferansiyel denklemleri aşağıda verilmiştir (Pahamli ve diğ., 2016).

Süreklilik Denklemleri

$$\Delta \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Momentum Denklemleri

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \beta (T - T_{ref})) + \vec{S} \quad (2)$$

Enerji Denklemleri

$$\frac{\partial h_{duy}}{\partial t} + \frac{\partial (h_{duy} + h_{gizli})}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} h_{duy}) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{\rho c_p} \nabla h_{duy} \right) \quad (3)$$

Bu denklemlerde " $\vec{V}$ " hız vektörünü, " $\rho$ " yoğunluğu, " $P$ " basıncı, " $\mu$ " dinamik viskoziteyi, " $\vec{g}$ " yerçekimi kuvvetini, " $T$ " sıcaklığı, " $T_{ref}$ " referans sıcaklığını, " $\vec{S}$ " kaynak terimini, " $h_{duy}$ " duyu entalpiyi, " $h_{gizli}$ " gizli entalpiyi, " $c_p$ " ise özgül ısıyı temsil etmektedir.

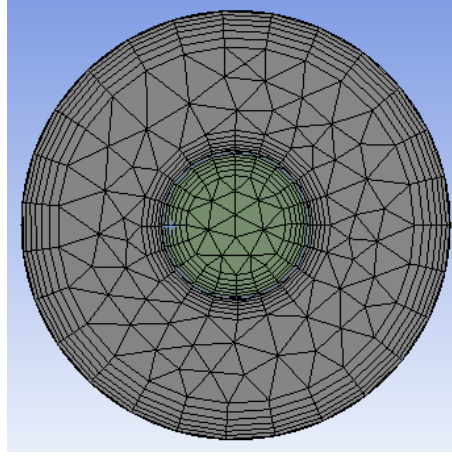
#### Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Bu çalışma kapsamında ele alınan 5 geometride de aynı sınır şartları kullanılmıştır. Dış borunun dış yüzeyinin yalıtılmış olduğu kabul edilmiştir. Faz değiştiren maddenin başlangıçta 25°C sıcaklıkta ve katı halde olduğu düşünülmüştür. Isı transfer akışkanını sisteme sabit 0,023 kg/s debi ile girmektedir. Giriş sıcaklığının ise sırasıyla 65, 70, 75°C olacak şekilde değiştiği varsayılmıştır. Sistemden ise atmosfer basıncında olan bir ortama çıkış yaptığı düşünülmüştür. Yapılan tüm analizlerde yer çekim ivmesinin etkileri dikkate alınmıştır.

#### Ağ Yapısı (Mesh Structure)

Bu çalışmada incelenen problemin ağ yapısı, sınır tabaka bölgelerine yakın bölgelerde sık diğer bölgelerde gevşek bir ağ yapısı olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu kapsamda, boru yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Örnek olması açısından Model-1 geometrisi için

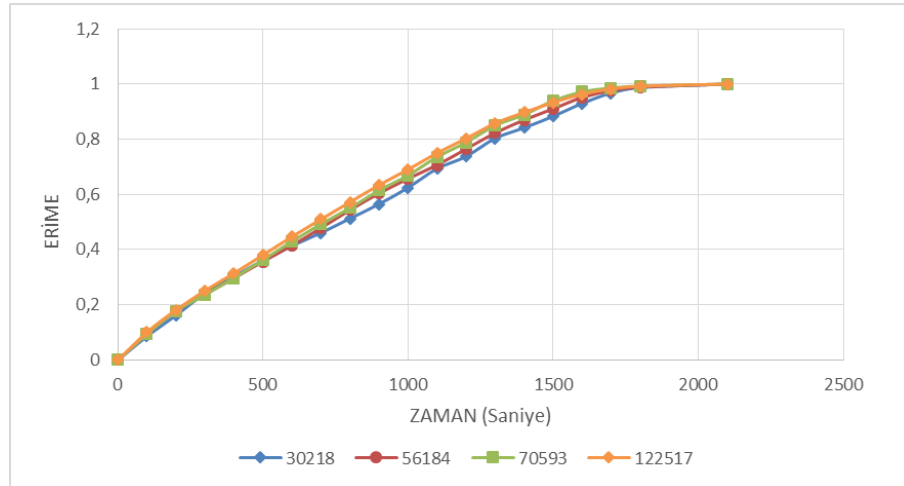
oluşturulan ağ yapısı Şekil 2’de verilmektedir. Diğer model geometrilerde de Model-1’dekine benzer bir ağ yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 2. Model-1'in ağ yapısı.

Figure 2. Mesh structure of Model 1.

Kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların ağ yapısından etkilenmemesi amacıyla, farklı düğüm nokta sayılarına sahip ağ yapıları oluşturularak simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlardan elde edilen sonuçlar Model-1 geometrisi için Şekil 3’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 70593 düğüm sayısından sonra, artan düğüm sayısı için fazla bir değişim gözlemlenmemiştir. Bundan dolayı 70593 düğüm sayısına sahip ağ yapısı, Model-1 için optimum ağ yapısı olarak kabul edilmiştir. Benzer işlemler diğer model geometrileri içinde uygulanmıştır. Bu kapsamda Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5 için, sırasıyla 122608, 212342, 288781 ve 194677 düğüm sayısına sahip ağ yapıları optimum ağ yapısı olarak belirlenmiştir. Yapılan tüm analizlerde bu optimum ağ yapıları kullanılmıştır.



Şekil 3. Farklı ağ yapıları için elde edilen sonuçlar.

Figure 3. The results for different mesh structures.

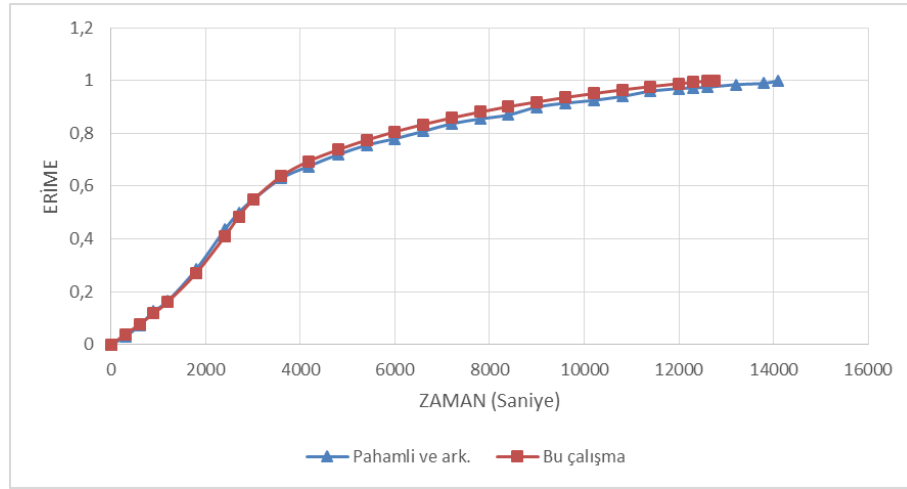
### Sayısal Yöntem (Numerical Method)

Bu çalışma kapsamında 5 farklı model geometri oluşturulmuştur. Bu model geometriler için optimum ağ yapıları belirlenmiştir. Problemin diferansiyel denklemleri, belirlenen sınır şartları kullanılarak Fluent paket programı aracılığı ile sayısal olarak çözülmüştür. Bu süreçte sayısal yaklaşım için SIMPLE algoritması tercih edilmiştir. Basınç hesaplamaları için PRESTO algoritması, momentum ve enerji hesaplamaları için ise QUICK algoritması kullanılmıştır. Sayısal analizler zamana bağımlı olarak

yapılmıştır. Zaman adımını belirlemek için zamandan bağımsızlaştırma işlemi yapılarak optimum zaman adımı boyutu 0,1 saniye olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan tüm analizlerde 0,1 saniye zaman adımı kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denklemlerinin yakınsama kriteri  $10^{-5}$ , enerji denkleminin yakınsama kriteri ise  $10^{-6}$  mertebesinde seçilmiştir.

#### Sayısal Yöntemin Güvenilirliğinin Test Edilmesi (Validation of Numerical Method)

Belirlenen modeller ve sınır şartları için yapılacak olan analizlere başlamadan önce, bu problemin çözümünde kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen sonuçların güvenilirliğinin belirlenmesi istenmiştir. Bu amaçla literatür incelenmiş ve bu çalışmaya benzer bir çalışma belirlenmiştir. Bu kapsamda, Pahamli ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmanın geometrisi ve şartları aynen kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar ile diğer çalışmanın sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere her iki çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak çizilen eğriler birbirleri ile oldukça uyumludur. Dolayısıyla bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemin ve elde edilen verilerin güvenilir bir seviyede olduğu söylenebilir.



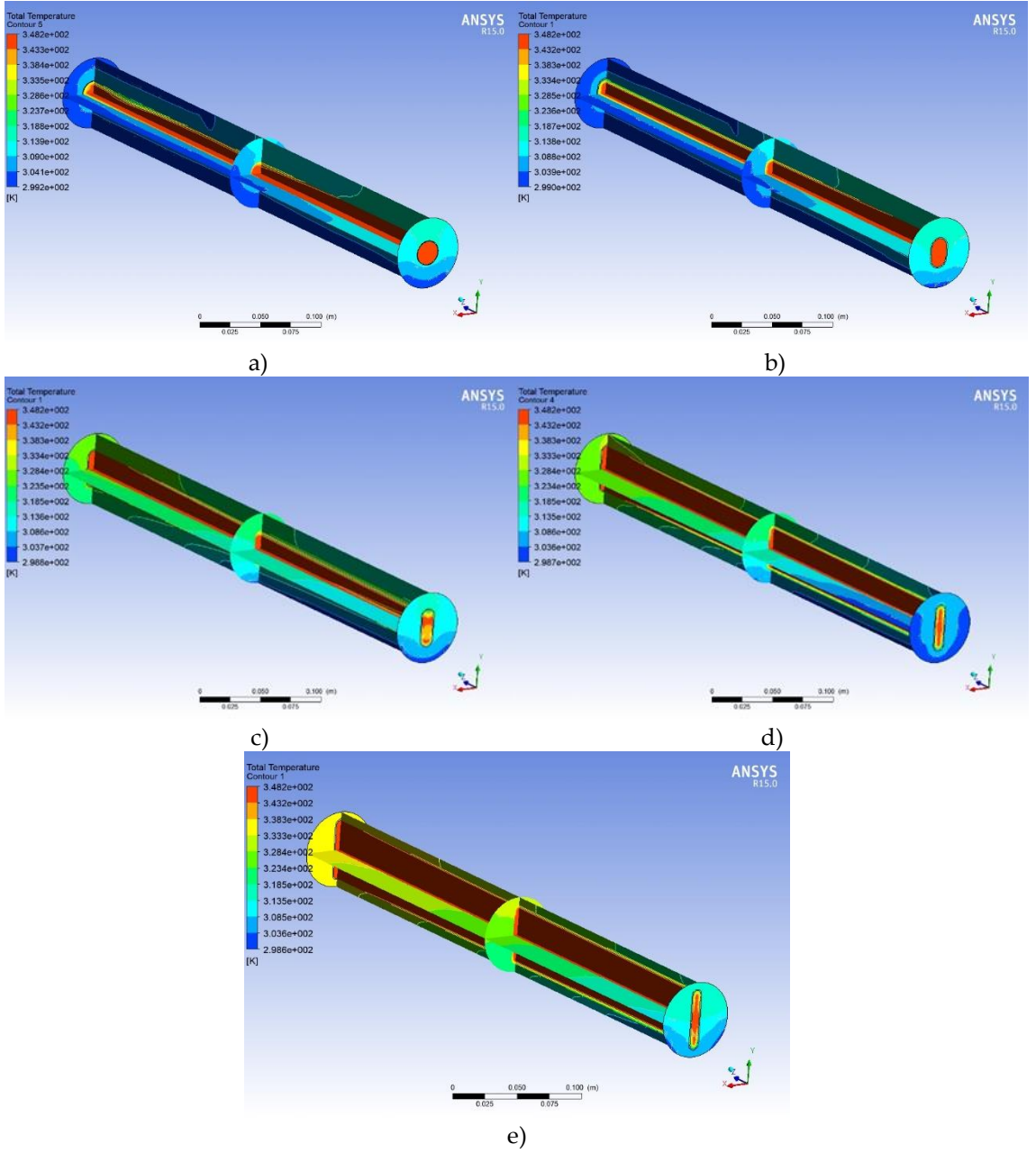
Şekil 4. Bu çalışmanın sonuçları ile literatürün (Pahamli ve diğ., 2016) karşılaştırılması.

Figure 4. Comparison of the results of this study with literature (Pahamli et al., 2016).

#### BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında, bir ısıl depolama sisteminde faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılması sayısal olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, kullanılan ısı değiştiricisinin iç borusunun eliptikliği değiştirilerek 5 adet farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometriler kullanılarak farklı su giriş sıcaklıkları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, problemin sıcaklık ve erime dağılımları belirlenmiştir. Bu sayede, geometrinin eliptikliğinin ve su giriş sıcaklığının Galyumun erime davranışları ve sistemin ısıl performansı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, sayısal analizlerden elde edilen verilerden oluşturulan şekil ve grafiklerden bir kısmı aşağıda verilmiş ve irdelenmiştir.

Şekil 5’te su giriş sıcaklığı  $75^{\circ}\text{C}$  olduğu durumda 12,5. dakika için elde edilen sıcaklık dağılımları farklı model geometrileri için birlikte verilmektedir. Şekiller incelendiğinde, iç borudan geçen sıcak suyun ve yerçekiminin etkisi ile galyumun sıcaklığının dikey yönde farklılık gösterdiği görülmektedir. Tüm model geometrilerde boru boyunca tüm kesitlerde, galyumun sıcaklığının dikey olarak yukarıdan aşağı doğru azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca iç borunun eliptikliği arttıkça faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklığının arttığı, buna karşılık suyun ortalama sıcaklığının ise azaldığı belirlenmiştir.



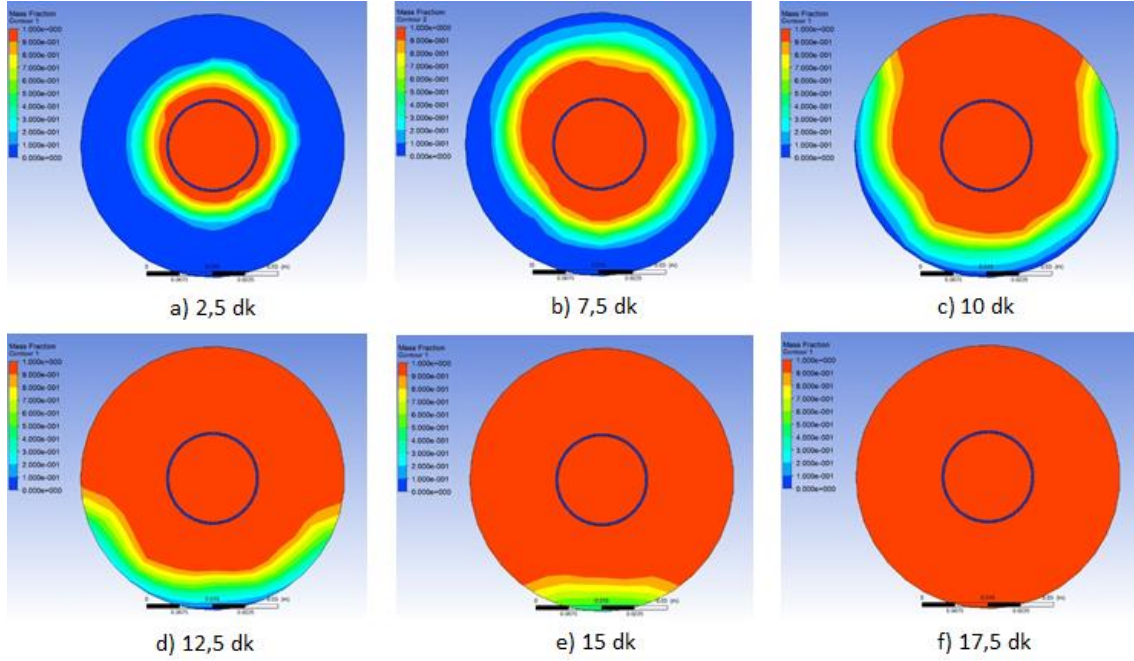
**Şekil 5.** Su giriş sıcaklığı 75°C ve 12,5. dakika için sıcaklık dağılımları; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 ve (e) Model-5.

*Figure 5.* Temperature distributions for 75°C and at 12.5th minute; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 and (e) Model-5.

Ayrıca Şekil 5'te, akış yönünde aksel olarak girişte, tam ortada ve çıkışta alınan kesitler için elde edilen sıcaklık dağılımı birlikte görülebilmektedir. Şekil incelendiğinde sabit model geometrisi için, giriş, orta ve çıkış kesitlerinde elde edilen sıcaklık dağılımlarının birbirinden farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu durum bu çalışmada incelen tüm geometriler için benzerlik göstermiştir. Aksel yönde gerçekleşen bu sıcaklık değişimi, aksel yönde erime hızının da farklı olduğunu belirtmektedir. Bu kapsamda akış girişinden çıkışına doğru aksel yönde, faz değiştiren malzemenin erime hızının arttığı gözlemlenmiştir.

Model-1 ve su giriş sıcaklığı 70 °C olduğu durumda, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı zaman anları için elde edilen kütle dağılımları Şekil 6'da birlikte görülmektedir. Şekil incelendiğinde 2,5. dakikada faz değiştiren malzemenin iç boru ile temasta olduğu bölgelerde sıvı faza geçmeye başladığı ancak diğer bölgelerde halen katı fazda olduğu görülmektedir. Zaman ilerledikçe faz değiştiren malzeme erimeye devam etmektedir. 10. dakikaya kadar sıvı faz ile katı fazın halka tipi bir

yapı oluşturduğu, bu dakikadan sonra ise üst bölgelerin daha hızlı eriyerek u tipi bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. 17,5. dakikada ise faz değiştiren malzemenin tamamının eriyerek sıvı faza geçtiği, dolayısıyla ısı depolama sisteminin şarj işlemini tamamladığı tespit edilmiştir.

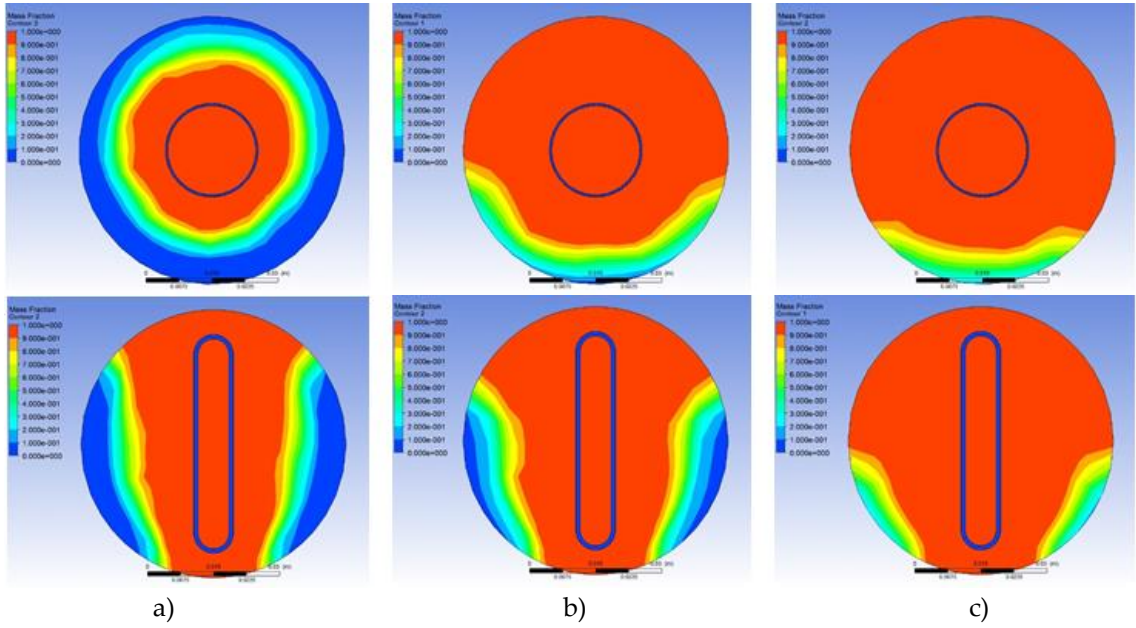


**Şekil 6.** Model-1 ve su giriş sıcaklığı 70 °C için kütle dağılımları; (a) 2,5 dk, (b) 7,5 dk, (c) 10 dk, (d) 12,5 dk, (e) 15 dk ve (f) 17,5 dk

*Figure 6. Melting distribution for Model-1 and 70°C; (a) 2.5th minute, (b) 7.5th minute, (c) 10th minute, (d) 12.5th minute, (e) 15th minute and (f) 17.5th minute.*

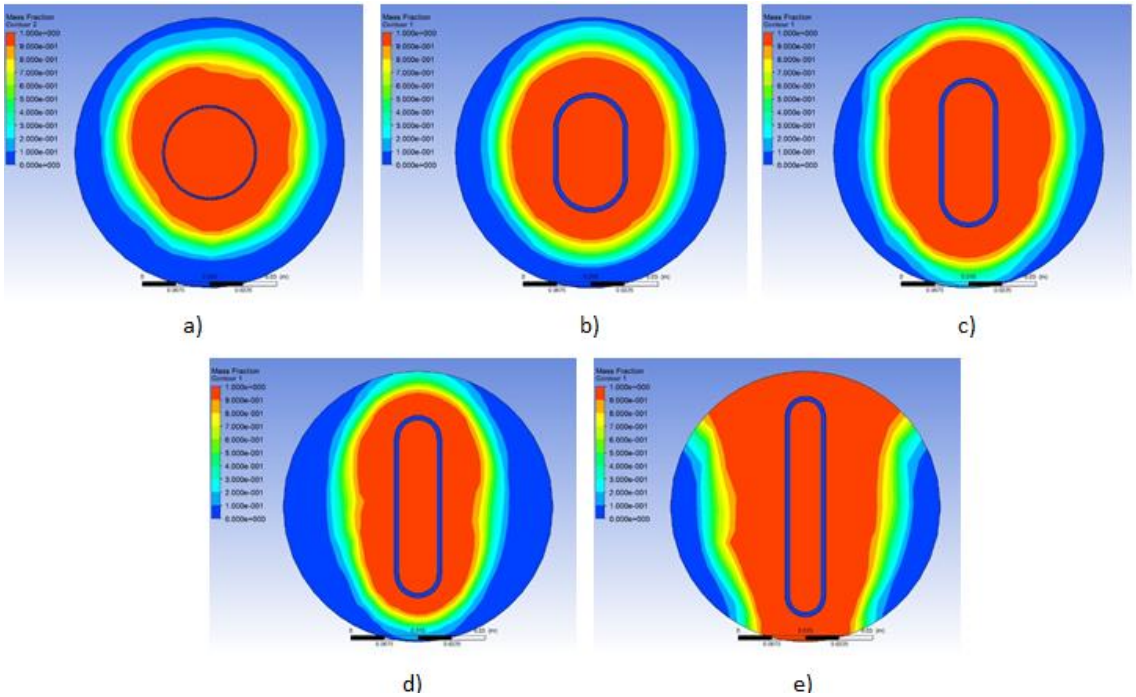
Model-1 ve Model-5 geometrilerinde 12,5. dakika için, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı giriş sıcaklıkları için elde edilen kütle dağılımları Şekil 7’de birlikte görülmektedir. Her iki model geometride de, su giriş sıcaklığı arttıkça faz değiştiren malzemenin erime miktarının da arttığı görülmüştür. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının artışı ile galyumun erime hızının arttığı ve erime süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir.

Şekil 8’de ise su giriş sıcaklığı 75 °C ve 7,5. dakikada, akış yönünde geometrinin tam orta noktasında alınan bir kesitte farklı model geometrileri için elde edilen kütle dağılımları görülmektedir. İç borunun eliptikliği arttıkça Galyumun erime miktarı artmaktadır. Bu durumun iç borudaki eliptiklik artışı ile erime üzerinde yer çekim kaynaklı doğal konveksiyon etkilerinin artış göstermesi olduğu düşünülebilir. Ayrıca iç borunun eliptikliği arttıkça, borunun ısı transfer yüzey alanı da artış göstermektedir. Bu durum yüzeylerden gerçekleşen ısı transferi miktarını da artırmaktadır. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğinin değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir.



Şekil 7. Model-1 ve Model-5 geometrileri için 12,5. dakikadaki kütle dağılımları; (a) 65 °C, (b) 70 °C, (c) 75 °C.

Figure 7. Melting distribution for Model 1 and Model 5 at 12.5th minute; (a) 65 °C, (b) 70 °C, (c) 75 °C.



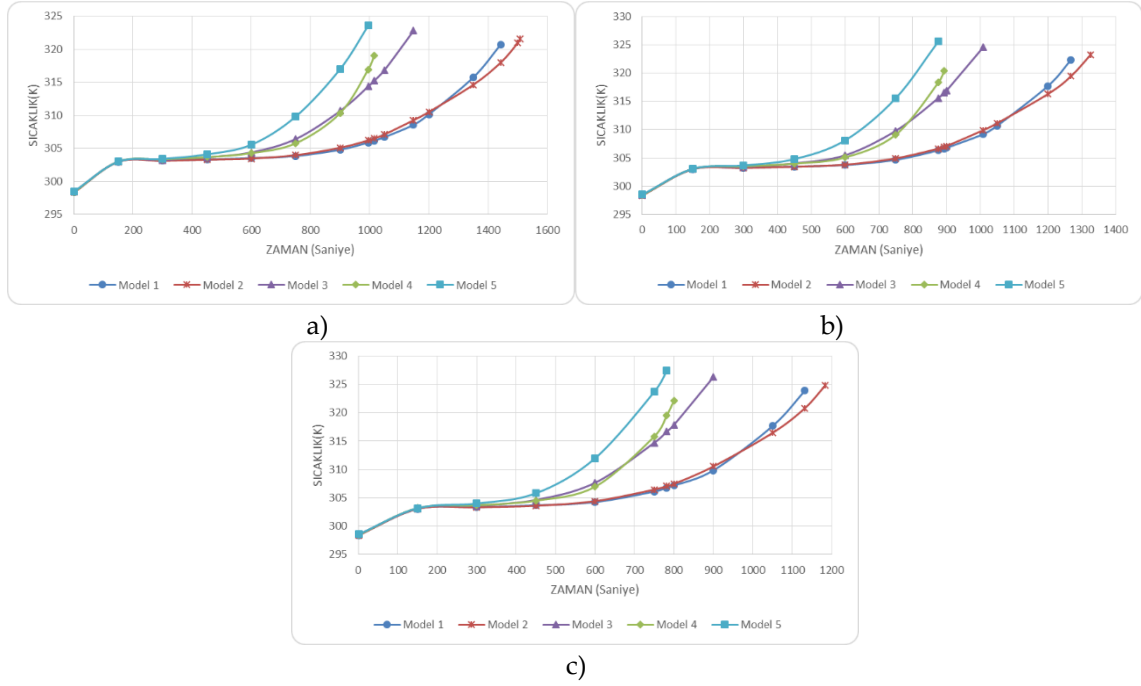
Şekil 8. Su giriş sıcaklığı 75 °C için 7,5. dakikadaki kütle dağılımları (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 ve (e) Model-5.

Figure 8. Melting distribution for 75 °C and at 7.5th minute; (a) Model-1, (b) Model-2, (c) Model-3, (d) Model-4 and (e) Model-5)

Şekil 9'da farklı model geometrileri için faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklık değerinin zamana göre değişimi, farklı su giriş sıcaklıkları için birlikte verilmiştir. Şeklin şıkları birlikte incelendiğinde, tüm model geometrileri için ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı arttıkça, faz değiştiren malzemenin maksimum ortalama sıcaklık değerinin de arttığı görülmektedir. İlk 300 saniyelik zaman diliminde tüm model geometriler benzer bir davranış göstermektedir ve galyumun ortalama sıcaklık değerleri birbiri ile benzerdir. Ancak yaklaşık ilk 5 dakikalık süreden sonra modeller arasında farklılaşma



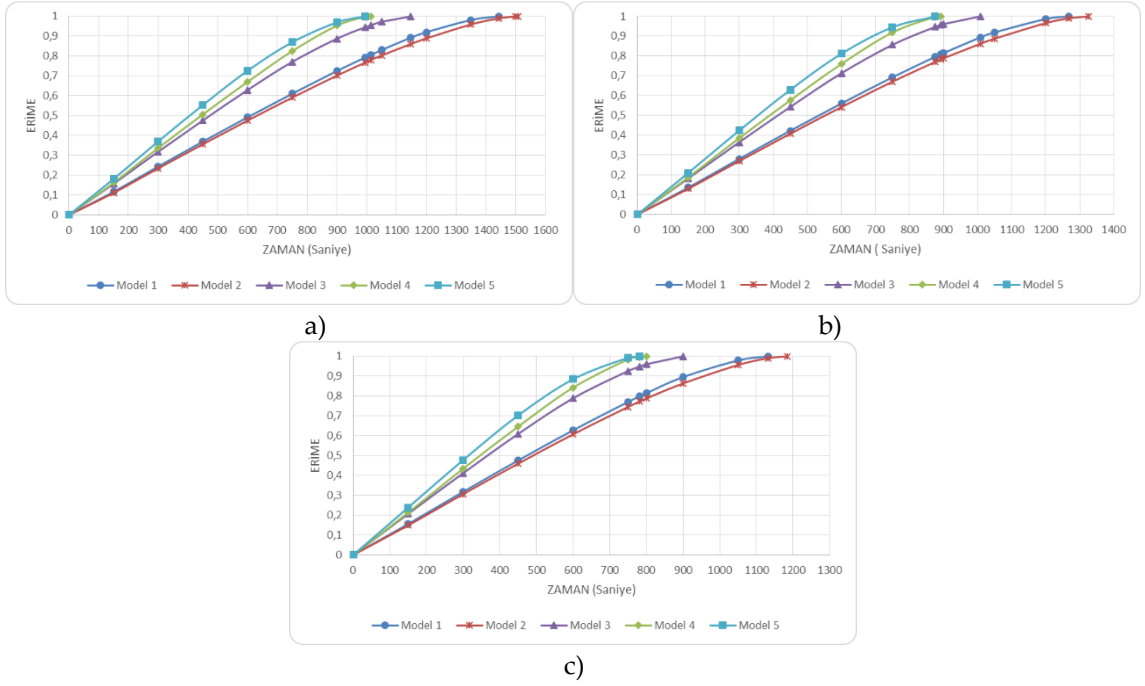
söz konusudur. Model-5 geometrisi en hızlı ısınan model olmuştur. Bu durum tüm su giriş sıcaklıkları için benzer olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca en yüksek sıcaklık değerine de Model-5’de ulaşılmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada ele alınan model geometriler içinden, eliptikliğin en fazla olduğu geometrinin ısı performansının diğerlerine göre daha iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Farklı model geometrileri için ortalama sıcaklığın zaman ile değişimi; (a) 65 °C, (b) 70 °C ve (c) 75°C

Figure 9. The variation of mean temperature with time for different model geometries; (a) 65 °C, (b) 70 °C and (c) 75°C

Şekil 10’da ise farklı model geometrileri için faz değişim malzemesinin erime oranının zamana göre değişimi, farklı su giriş sıcaklıkları için birlikte verilmiştir. İlgili şekilde verilen eğriler, galyumun erimesinin %100 gerçekleştiği duruma kadar yapılan analizlerin sonuçlarını içermektedir. Her model ve sıcaklık değerinde galyumun %100 erimesi için geçen süre farklılık göstermesinden dolayı, şekilde verilen eğrilerin uzunluğu farklılık göstermektedir. İncelenen tüm model geometriler için, su giriş sıcaklığının artışıyla erime süresinin kısaldığı görülmektedir. Şekil incelendiğinde, tüm su giriş sıcaklıkları için Model-5 geometrisinin en hızlı eriyen model olduğu görülmüştür. Su giriş sıcaklığı 65 °C olduğu durumda, dairesel iç boruya sahip olan Model-1’de galyumun %100 erimesi yaklaşık olarak 1500 saniye sürerken, eliptikliğin en fazla olduğu Model-5’de ise yaklaşık 1000 saniye sürmektedir. İç borunun eliptikliğin artırılmasının erimeyi hızlandırarak, erime süresinin yaklaşık %33 kısılmasına neden olduğu belirlenmiştir. Benzer durum diğer su giriş sıcaklıkları için de gözlemlenmiştir. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğin artırımının, faz değiştiren malzemenin daha hızlı erimesini sağlayarak ısı depolayan sistemin daha hızlı şarj olabilmesine katkı sağladığı söylenebilir.



Şekil 10. Farklı model geometrileri için erime yüzdesinin zaman ile değişimi; (a) 65 °C, (b) 70 °C ve (c) 75 °C

Figure 10. Variation of melting percentage with time for different model geometries; (a) 65 °C, (b) 70 °C and (c) 75 °C

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, bir ısı depolama sisteminde faz değiştiren madde olarak Galyum kullanılması sayısal olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, kullanılan ısı değiştiricisinin iç borusunun eliptikliği değiştirilerek 5 adet farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometriler kullanılarak farklı su giriş sıcaklıkları için analizler yapılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak, problemin sıcaklık ve erime dağılımları belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda, su giriş sıcaklığı arttıkça galyumun erime hızının arttığı ve erime süresinin kısaldığı belirlenmiştir. Bu kapsamda, akışkan giriş sıcaklığının 65 °C'den 75 °C'ye çıkarılması ile, Model-1 ve Model-5'in erime süreleri sırasıyla %21,53 ve %20,60 kısalmıştır. Dolayısıyla akışkan giriş sıcaklığının değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresi üzerinde önemli bir etki sağladığı görülmüştür. İç borunun eliptikliği arttığında ise faz değiştiren malzemenin ortalama sıcaklığının arttığı, buna karşılık suyun ortalama sıcaklığının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum galyumun erime hızının artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla iç borunun eliptikliğinin değişmesinin, faz değiştiren malzemenin şarj olma süresini etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışılan parametre aralığında en iyi ısı performans eliptikliğinin en fazla olduğu Model-5'te elde edilmiştir. Bu kapsamda, Model 5 in erime süresi Model-2'ye oranla, akışkan giriş sıcaklığı 65 °C, 70 °C ve 75 °C olduğu durumlarda sırasıyla %34,06, %33,92 ve %30,91 kadar kısalmıştır. Sonuç olarak, faz değiştiren malzeme olarak galyum kullanılan bir ısı depolama sistemi tasarımında, su giriş sıcaklığının ve iç borunun eliptiklik oranının ısı performansını etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)



- Assis, E., Katsman, L., Ziskind, G., Letan, R., 2007, "Numerical and experimental study of melting in a spherical Shell", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 9–10, pp. 1790-1804.
- Bazai, H., Moghimi, M.A., Mohammed, H.I., Babaei-Mahani, R., Talebizadehsardari, P., 2020, "Numerical study of circular-elliptical double-pipe thermal energy storage systems", *Journal of Energy*

- Storage, Vol. 30, 101440.
- Benbrika, M., Teggar, M., Benbelhout, M., Ismail, K.A.R., Bouabdallah, S., 2021, "Effect of orientation of elliptic tube on the total melting time of latent thermal energy storage systems", *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 1479-1488.
- Bouhal, T., Fertahi, S.D., Kousksou, T., Jamila, A., 2018, CFD thermal energy storage enhancement of PCM filling a cylindrical cavity equipped with submerged heating sources", *Journal of Energy Storage*, Vol. 18, pp. 360-370.
- Cao, X., Yuan, Y., Xiang, B., Haghighat, F., 2018, "Effect of natural convection on melting performance of eccentric horizontal shell and tube latent heat storage unit", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 38, pp. 571-581.
- Darzi, A.A.R., Jourabian, M., Farhadi, M., 2016, "Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus", *Energy Conversion and Management*, Vol. 118, pp. 253-263
- Deng, S., Nie, C., Wei, G., Ye, W.B., 2019, "Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube", *Energy and Buildings*, Vol. 183, pp. 161-173.
- Eisapour, A.H., Eisapour, M., Mohammed, H.I., Shafaghat, A.H., Ghalambaz, M., Talebizadehsardari, P., 2021, "Optimum design of a double elliptical latent heat energy storage system during the melting process", *Journal of Energy Storage*, Vol. 44, No. A, 103384.
- Eisapour, M., Eisapour, A.H., Shafaghat, A.H., Mohammed, H.I., Talebizadehsardari, P., Chen, Z., 2022, "Solidification of a nano-enhanced phase change material (NePCM) in a double elliptical latent heat storage unit with wavy inner tubes", *Solar Energy*, Vol. 241, pp. 39-53.
- Ghafoor, A.N.A., ve Mussa, A., 2020, "Numerical study of a thermal energy storage system with different shapes inner tubes", *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 21-35.
- Jourabian, M., Darzi, A.A.R, Akbari, O.A., Toghraie, D., 2020, "The enthalpy-based lattice Boltzmann method (LBM) for simulation of NePCM melting in inclined elliptical annulus", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 548, 123887.
- Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F.H., Duan, F., 2018, "Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 269-279.
- Longeon, M., Soupart, A., Fourmigué, J.F., Bruch, A., Marty, P., 2013, "Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection", *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 175-184.
- Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., Bahrapoury, R., 2016, "Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchanger", *Renewable Energy*, Vol. 97, pp. 344-357.
- Park, S.Y, Park, Y.G., Park, S.H., Ha, M.Y., 2021, "Numerical study and multilayer perceptron-based prediction of melting process in the latent heat thermal energy storage system with a finned elliptical inner cylinder", *Journal of Energy Storage*, Vol. 42, 103008.
- Punniakodi B.M.S. ve Senthil, R., 2021, "A review on container geometry and orientations of phase change materials for solar thermal systems", *Journal of Energy Storage*, Vol. 36, 102452.
- Rana, S., Zunaid, M., Kumar, R., 2022, "CFD analysis for heat transfer comparison in circular, rectangular and elliptical tube heat exchangers filled with PCM", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, No. 2, pp. 637-644.
- Shin, D.H., Park, J., Choi, S.H., Ko, H.S., Karng, S.W., Shin, Y., 2019, "A new type of heat storage system using the motion of phase change materials in an elliptical-shaped capsule", *Energy Conversion and Management*, Vol. 182, pp. 508-519.
- Tao, Y.B., Liu, Y.K., He, Y.L., 2017, "Effects of PCM arrangement and natural convection on charging and discharging performance of shell-and-tube LHS unit", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, No. B, pp. 99-107.

- Wang, P., Yao, H., Lan, Z., Peng, Z., Huang, Y., Ding, Y., 2016, "Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins", *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, pp. 428-435.
- Yazici, M.Y., Avci, M., Aydin, O., Akgun, M., 2014, "On the effect of eccentricity of a horizontal tube-in-shell storage unit on solidification of a PCM", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, No. 1-2, pp. 1-9.



## Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> METALİK NANOALAŞIMLARIN HİDROTERMAL YÖNTEMLE SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

<sup>1</sup>Mehmet Şahin ATAS , <sup>1,2</sup>Ozlem ALTINTAS YILDIRIM 

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Nanoteknoloji ve İleri Malzeme Geliştirme, Uygulama ve Araştırma Merkezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya,  
TÜRKİYE

<sup>1</sup>msatas@ktun.edu.tr, <sup>1,2</sup>oayildirim@ktun.edu.tr

**ÖZ:** Bu çalışmada, Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> metalik nanoalaşımın hidrotermal yöntem kullanılarak 180 °C'de 2 saatte başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Sentezi gerçekleştirilen metalik nanoalaşımın yapısal ve morfolojik özellikleri X-ışını Kırınımı (XRD), Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometresi (FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. X-ışını Kırınım sonucu elde edilen kırınım desenleri incelendiğinde yüksek şiddetli piklerin kübik kristal yapıdaki FeNi<sub>3</sub> ve metalik Ni'e ait olduğu belirlenmiştir. Daha düşük şiddette elde edilen piklerin ise Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yapısına ait olduğu gösterilmiştir. FTIR analizi sonucu 455,2 ve 570,9 cm<sup>-1</sup>'de elde edilen piklerin sırasıyla Fe-Ni ve Fe-O bağlarına ait karakteristik pik olduğu gösterilmiştir. SEM-EDS analizlerinden ise sentezlenen metalik nanoalaşımın ortalama yarıçapı 3,51 µm olan küresel parçacıkların metalik Ni fazı olduğu ve yüzeylerin bir miktar FeNi<sub>3</sub> nanoparçacıkları ile kaplandığı görülmüştür. Ortalama yarıçapı 63,33 nm olan düzensiz şekilli nanoparçacıkların ise Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ile birlikte FeNi<sub>3</sub> yapısında olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Metalik Nanoalaşım, Hidrotermal Metot, FeNi<sub>3</sub>, Nanoparçacıklar

### Synthesis and Characterization of Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Metallic Nanoalloys by Hydrothermal Method

**ABSTRACT:** In this study, Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> metallic nanoalloys were successfully synthesized using the hydrothermal method at 180 °C for 2 hours. The structural and morphological properties of the synthesized metallic nanoalloys were characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). When the diffraction patterns obtained from XRD analysis, it was determined that the high intensity peaks belonged to FeNi<sub>3</sub> with cubic crystal structure and metallic Ni. It has been shown that the peaks obtained at lower intensity belong to the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> structure. As a result of the FTIR analysis, the peaks obtained at 455.2 and 570.9 cm<sup>-1</sup> were shown to be characteristic peaks of Fe-Ni and Fe-O bonds, respectively. SEM-EDS images showed that the synthesized metallic nanoalloys spherical particles with an average radius of 3.51 µm were the metallic Ni phase and the surfaces were covered with some FeNi<sub>3</sub>. It was determined that irregular shaped nanoparticles with an average radius of 63.33 nm were in FeNi<sub>3</sub> structure together with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

**Keywords:** Metallic Nanoalloys, Hydrothermal Method, FeNi<sub>3</sub>, Nanoparticles

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nanoyapılar sadece temel bilimsel araştırmalar için değil, aynı zamanda teknolojik uygulamalar için sergiledikleri üstün özelliklerinden dolayı da önem kazanmaktadır. Son zamanlarda nanoparçacıklar, nanoçubuklar ve nanoplakalar gibi hiyerarşik nanoyapılar aynı malzemenin büyük boyutluları ile kıyaslandığında genellikle morfoloji ve/veya boyuta bağlı özellikler sergiledikleri için dikkat

çekmektedirler (Yıldırım ve ark., 2013; Baylan ve Yildirim, 2019). Metalik nanoparçacıklar ise özellikle mekanik, manyetik, elektriksel ve termal özelliklere sahip oldukları için son on yılda büyük ilgi görmüşlerdir (Chen ve ark., 2012).

Son yıllarda, geçiş metali alaşımları ve bileşikleri elektronik ve enerji dönüşüm cihazlarındaki kullanımlarının artmasına bağlı araştırmalarda dikkat çekmektedirler (Liu ve Vipulanandan, 2017). Önemli geçiş metali alaşımları grubunda yer alan demir-nikel (Fe-Ni) alaşımları imalat için olduğu kadar, sergiledikleri özellikler sayesinde çeşitli uygulama alanlarında da kullanılmaktadırlar (Tremel ve ark., 1995; Datta ve ark., 1999; Liao ve ark., 2006; Chen ve ark., 2012). Fe-Ni alaşımlarından Permalloy olarak adlandırılan ve x'in ağırlıkça %20-50 aralığında olduğu  $Fe_xNi_{1-x}$  alaşımı yüksek yoğunluklu bilgi depolama (Moustafa ve Daoush, 2007), kataliz (Yan ve ark., 2009), kimyasal sensörler (Vitta ve ark., 2008; Djekoun ve ark., 2009) veya spintronik tabanlı cihazlarda (Tian ve ark., 2008; Golovin ve ark., 2013; Liu ve ark., 2014) kullanılan ve çevresel iyileştirme için malzemelerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayan metalik nano malzemelerdir.

Bahsi geçen uygulamalarda  $Fe_xNi_{1-x}$  alaşımlarının manyetik özelliklerinin optimizasyonu için bileşimlerinin ve morfolojilerinin (boyut, şekil, kümelenme durumu, vb.) kontrol altına alınması gerekmektedir (Biffis ve ark., 2003; Fernández-García ve ark., 2010; Haviv ve ark., 2010; Fernández-García ve ark., 2011; Estrader ve ark., 2013; Mao ve ark., 2013; Rinaldi-Montes ve ark., 2014; Rinaldi-Montes ve ark., 2015). Bu kapsamda istenilen özelliklerde nano parçacıkların düşük maliyetlerde kısmen basit laboratuvar ekipmanları gerektirmeden sentezlenmesi oldukça önemlidir. Şimdiye kadar, çeşitli morfolojilere ve boyut dağılımlarına sahip Fe-Ni metalik alaşımları mekanik alaşımlama (Chicinaş ve ark., 2003; Chicinas ve ark., 2005), susuz organometalik (Chen ve ark., 2009), sprey piroliz (Eroglu ve ark., 1996), sıvı nitrojende havada ergitme (Zhou ve ark., 1989), elektrodepozisyon (Kim ve ark., 2005) ve hidrotermal indirgeme (Liu ve ark., 2010; Yuan ve ark., 2011) gibi farklı yöntemlerle sentezlenmişlerdir. Bu sentez metotları arasından  $TiO_2$ , ZnO,  $Zn_2SnO_4$  gibi çeşitli nanoparçacıkların sentezinde yaygın bir şekilde uygulanan hidrotermal yöntem düşük reaksiyon sıcaklığı, sentez sonrası ek bir ısıl işlem gerektirmediği için düşük maliyetli olması ve diğer metotlarla kıyaslandığında sentez esnasında kullanılan ekipmanların basitliği nedenleriyle metalik nanoparçacıkların sentezlenmesinde de çok popülerlik kazanmıştır (Chen ve ark., 2013; Bouremana ve ark., 2014; Tan ve ark., 2014; Bouremana ve ark., 2015; Keles ve ark., 2020). Hidrotermal yöntemin düşük maliyetli ve kolay bir sentez yöntemi olmasına ek olarak iki metal tuzunun indirgenmesini sağlayabildiğinden metalik nanoalaşımların veya nanoparçacıkların hazırlanması için etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir (Liao ve ark., 2006; Liu ve ark., 2010; Yuan ve ark., 2011; Chen ve ark., 2012; Bouremana ve ark., 2018).

Metalik Fe-Ni alaşımlarının boyut ve morfolojisinin kontrol edebilmek amacıyla şelatlama ajanları (yüzey aktif maddeler) kullanılarak gerçekleştirilen hidrotermal sentezi üzerine çalışmalar bulunmasına rağmen sentez şartlarının belirlenmesi ve sentezlenen ürünlerinin detaylı yapısal ve morfolojik olarak incelenmesi üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça azdır (Hongxia ve ark., 2012; Chen ve ark., 2013; Guo ve ark., 2021). Bu çalışma kapsamında Fe-Ni metalik nanoalaşımların sentezi aşamasında herhangi bir şelatlama ajanı kullanılmadan hidrotermal sentez yöntemi uygulanmış ve sentezlenen numuneler yapısal ve morfolojik olarak detaylı bir şekilde incelenmişlerdir.

## DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

### Malzemeler (Materials)

Hidrotermal yöntemle metalik nanoalaşımların sentezi 150 mL'lik Teflon kaplı paslanmaz çelik bir otoklavda gerçekleştirilmiştir. Sentez aşamasında Nikel Klorür ( $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ ) (%99,9, Aldrich), Demir Nitrür ( $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ) (%98, Aldrich), hidrazin hidrat ( $N_2H_4 \cdot H_2O$ , %80, Aldrich) ve NaOH (%96, Aldrich) kimyasalları kullanılmış olup bu kimyasallar reaktif derecesinde saflıkta olduğundan ek bir saflaştırılma işlemine tabi tutulmamışlardır.

### Metalik Nanoalaşımların Sentezi (Synthesis of Metallic Nanoalloys)

Metalik nanoalaşımların sentezi için ilk olarak demir:nikel'in 1:3'lük mol oranına karşılık gelen 0.41 g Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O ve 0.71 g NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O tuzları 25 mL damıtılmış suda çözündürülerek Fe-Ni tuzlarını içeren çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra, Ni ve Fe tuzlarının indirgenmesi sağlamak amacıyla oda sıcaklığında kuvvetlice karıştırılan çözeltiye çözelti pH değeri 11.0 olana kadar 0,1 M oranında hazırlanmış NaOH çözeltisi damla damla ilave edilmiştir. Elde edilen çözeltiye  $\alpha$ -Fe ve  $\gamma$ -Ni nanoparçacıklarını hazırlamak için indirgeyici ajan olarak 2 mL hidrazin hidrat (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) yine damla damla olacak şekilde yavaşça ilave edilmiş ve hazırlanan çözeltinin homojen olması amacıyla 30 dk. boyunca oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda kuvvetlice karıştırılmıştır. Hidrazin hidratın bir Lewis bazı olduğu bilinmektedir. Hidrazin hidrat, Fe<sup>+3</sup> ve Ni<sup>+2</sup> iyonik formları indirgeyerek metalik Fe ve Ni atomlarını oluşturmaktadır. FeNi<sub>3</sub> metal nanoparçacıkların büyüme işlemi sırasında demir ve nikel tuzlarının konsantrasyonunda bir ortamda hidrazin hidrat tarafından indirgenmediği literatürden bilinmektedir (Yu ve ark., 2003; Xiaomin ve ark., 2005; Liu ve ark., 2010; Bouremana ve ark., 2018). Hazırlanan çözelti 150 mL kapasiteli Teflon kaplı paslanmaz çelik otoklava aktarılmış ve hidrotermal reaktörün sıcaklığı 180 °C'ye çıkarılarak 2 saat bu sıcaklıkta tutulduktan sonra reaktörün doğal olarak oda sıcaklığına soğuması beklenmiştir. Teflon potanın tabanından toplanan siyah parçacıklar 10000 rpm'de 5 dakika santrifüjlenerek çözeltide ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra alkali tuzları ve/veya yabancı maddeleri uzaklaştırmak amacıyla parçacıklar 1:1 oranında damıtılmış su ve etanol karışımı ile birkaç kez yıkanmıştır. Ek bir ısıl işlem yapılmadan 4 saat boyunca 40 °C'de hava ortamında kurutularak tozlar elde edilmiştir.

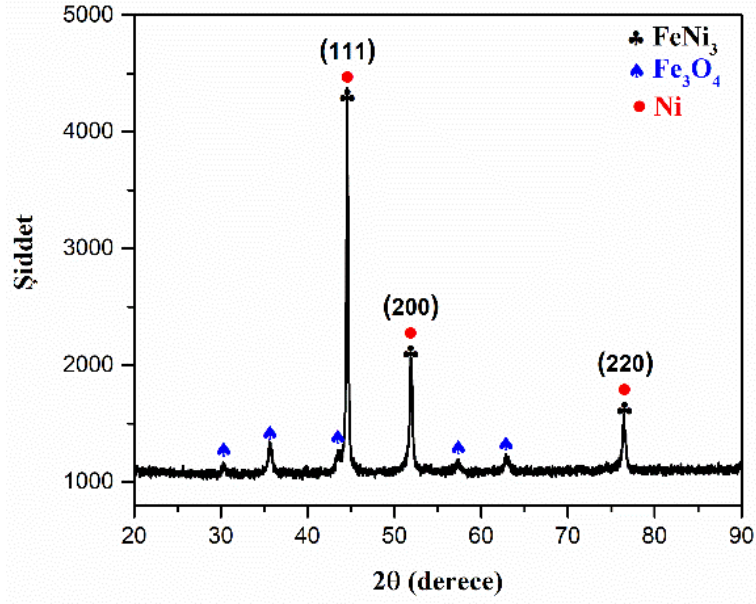
### Karakterizasyon (Characterization)

Elde edilen nihai tozlar faz bileşenleri ve kristal yapıları 2°/dakika tarama hızında 2 $\theta$  = 20-90° sınır değerleri arasında Cu-K $\alpha$  radyasyonu ( $\lambda$  = 1.54060 Å) ve 40 kV'luk bir x-ışını kaynağı çalışma voltajı ile Bruker D8 Advance model X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Bağ oluşumları Bruker marka VERTEX-70 model Fourier dönüşüm kızılötesi spektrumları (FTIR) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ölçümler; 4000-400 cm<sup>-1</sup> aralığında, 4 cm<sup>-1</sup> spektral çözünürlük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tozların elemental yapıları ve morfolojileri ise enerji dağılımlı X-ışını spektrometrisi (EDS) ile donatılmış SM Zeiss LS-10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### Yapısal Analiz (Structural Analysis)

Şekil 1'de hidrotermal yöntem ile 180 °C ve 2 saatte sentezlenen metalik Fe-Ni alaşımına ait X-ışını kırınım deseni verilmektedir. XRD kırınım deseninde 2 $\theta$ =30,25°, 35,57°, 43,45°, 44,43°, 51,86°, 57,21° 62,85° ve 76,41°'de ortaya çıkan sekiz kırınım tepe noktası gözlemlenmiştir. Elde edilen kırınım pikleri incelendiğinde yüksek şiddetli 2 $\theta$ = 44,43°, 51,86° ve 76,41°'deki piklerin kübik kristal yapısındaki FeNi<sub>3</sub>'e ait 65-3244 kart numaralı JCPDS verileri ve kübik kristal yapılı metalik Ni'e ait 04-0850 kart numaralı JCPDS verileri ile oldukça örtüştüğü görülmektedir (Liao ve ark., 2006; Chen ve ark., 2012; Bouremana ve ark., 2018).



Şekil 1. Metalik nanoalaşımına ait XRD kırınım deseni.

Figure 1. XRD pattern of metallic nanoalloys.

Çizelge 1’de  $\text{FeNi}_3$  ve metalik Ni’e ait JCPDS kart verileri ile bu çalışma kapsamında hidrotermal ile üretilmiş metalik tozlardan elde edilen kırınım verileri listelenmiştir. Çizelge 1’den görüldüğü üzere  $\text{FeNi}_3$  ve metalik Ni’in XRD kırınım verilerinde  $2\theta$  değerleri birbirine oldukça yakındır.  $2\theta = 44,43^\circ$ ,  $51,86^\circ$  ve  $76,41^\circ$ ’de gözlemlenen pikler  $\text{FeNi}_3$  ve Ni’in (111), (200) ve (220) piklerine karşılık gelmektedir. Ek olarak  $\text{FeNi}_3$  ve metalik Ni’in JCPDS kart verilerindeki  $\alpha$  kafes parametresi sabitleri sırası ile  $3,523$  ve  $3,555$  Å’dur. Şekil 1’de verilen XRD kırınım desenindeki  $2\theta = 44,43^\circ$ ’deki pikinden hesaplanan kafes parametresi sabiti  $\alpha = 3,529$  Å olarak belirlenmiştir. Belirlenen kafes parametresi değeri kırınım piklerinin  $\text{FeNi}_3$ ’e ait olabileceğini göstermektedir. Bu kapsamda sentezlenen metalik tozların faz birleşenlerinin daha detaylı belirlenebilmesi amacıyla Bölüm 3.2’de sonuçları ve tartışmaları verilen elemental haritalama analizi uygulanmıştır.

**Çizelge 1.** Hidrotermal yöntemle üretilen numunenin XRD kırınım verileri ile  $\text{FeNi}_3$ , metalik Ni ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ’e ait JCPDS kart verilerindeki  $2\theta$  değerleri, (hkl) indeksleri ve oransal pik şiddetleri.

Table 1. XRD data of sample synthesized with hydrothermal method and  $2\theta$  values, (hkl) indices and relative peak intensities of  $\text{FeNi}_3$ , metallic Ni and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in JCPDS card data.

|    | Bu çalışma | $\text{FeNi}_3$<br>(JCPDS 65-3244) | Ni<br>(JCPDS 04-0850) | $\text{Fe}_3\text{O}_4$<br>(JCPDS 65-3107) |
|----|------------|------------------------------------|-----------------------|--|
| 2θ | 30,25      |                                    |                       | 30,074 (220)-(29%)                         |
|    | 35,57      |                                    |                       | 35,425 (311)-(99%)                         |
|    | 43,45      |                                    |                       | 43,055 (400)-(20%)                         |
|    | 44,43      | 44,076 (111)-(99%)                 | 44,508 (111)-(100%)   |  |
|    | 51,86      | 51,352 (200)-(45%)                 | 51,847 (200)-(42%)    |  |
|    | 57,21      |                                    |                       | 56,941 (511)-(28%)                         |
|    | 62,85      |                                    |                       | 62,528 (440)-(36%)                         |
|    | 76,41      | 75,584 (220)-(21%)                 | 76,372 (220)-(21%)    |  |

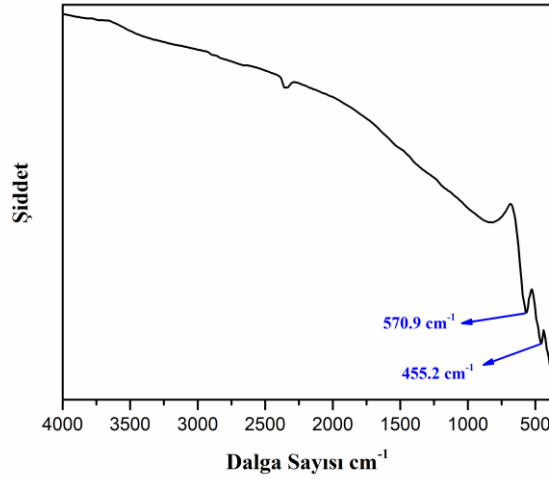
Faz analizi sonuçlarına göre  $2\theta = 30,25^\circ$ ,  $35,57^\circ$ ,  $43,45^\circ$ ,  $57,21^\circ$  ve  $62,85^\circ$ ’de gözlemlenen daha düşük şiddetli piklerin ise Çizelge 1’de verilen 65-3107 JCPDS kart numaralı  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yapısı ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan literatür taramasına göre  $\text{Ni}^{+2}$  sulu çözeltide hidrazin hidrat tarafından  $\text{Fe}^{+2}$ ’den daha kolay indirgenmektedir (Sounart ve ark., 2006). Hidrotermal reaksiyon sonucunda gözlemlenen  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oluşumu hidrazin tarafından indirgenen fazla metalik demirin oksidasyonu ile açıklamak



mümkündür. (Su ve ark., 2003; Yuan ve ark., 2011).

Liu ve arkadaşları hidrotermal analiz yöntemini kullanarak çiçek benzeri Ni-Fe nanoyapıların sentezi ve büyüme mekanizması üzerine yaptıkları çalışmada ilave edilen NaOH miktarının Fe-Ni alaşımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir (Liu ve ark., 2010). NaOH kullanılmadan elde edilen ürünlerin XRD piklerinin Ni ve  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışımından oluştuğunu rapor etmişlerdir.  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piklerinin, metalik Fe'nin güçlü oksidasyon eğiliminden dolayı XRD analizinde nanometre boyutlarında metalik Fe'nin oksidasyonundan geldiğini göstermişlerdir. Ayrıca, aşırı miktarda NaOH kullanılarak elde edilen ürünlerin XRD pikleri yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip Ni-Fe alaşımından oluştuğu göstermişlerdir. Liao ve arkadaşları hidrotermal indirgeme ile FeNi<sub>3</sub> alaşımlı nanoparçacıkların sentezi üzerine yaptıkları çalışmada ise ortamdaki başlangıç maddeleri olan Fe:Ni molar oranının elde edilecek ürünler üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Liao ve ark., 2006). XRD analizinde FeNi<sub>3</sub> nanoparçacıklarının yalnızca Fe:Ni molar oranlarının 1:3 olan reaksiyonlarda elde edilebileceğini göstermişlerdir. Başlangıçtaki Fe:Ni molar oranları 1:2 olduğunda Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ve FeNi<sub>3</sub>'ün aynı anda elde edilebileceğini ve Fe:Ni molar oranları 1:4 olduğunda ise yalnızca metalik nikelin oluşabileceğini göstermişlerdir. Yaptığımız bu çalışmada başlangıçtaki Fe:Ni molar oranları 1:3 olarak seçilmiş ve FeNi<sub>3</sub> ve/veya metalik Ni fazlarını içeren metalik alaşım elde edilmiştir.

Şekil 2'de verilen FTIR spektrumunda 455.2 cm<sup>-1</sup>'de çıkan pikin Fe-Ni, Ni-Fe-Ni veya Fe-Ni-Ni metallik bağlarına ait karakteristik pik olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür taramasına göre Fe-Ni, Ni-Fe-Ni veya Fe-Ni-Ni metallik bağlarına ait piklerin 636,9 cm<sup>-1</sup> (Nasseh ve ark., 2020b), 494 cm<sup>-1</sup> (Sahebdadzehi ve ark., 2022) ve 477,6 cm<sup>-1</sup> (Khodadadi ve ark., 2019; Nasseh ve ark., 2020a) aralığında çıktığı görülmüştür. Ek olarak FTIR spektrumunda 570.9 cm<sup>-1</sup>'de ortaya çıkan pik ise Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yapısında bulunan karakteristik Fe-O titreşim bağı göstermektedir (Yang ve ark., 2010; Tan ve ark., 2014; Gong ve Tang, 2020). Elde edilen sonuçların literatür ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak FTIR sonuçları XRD verileri ile örtüşmekte ve metalik alaşımın hidrotermal yöntemle başarılı bir şekilde üretildiğini doğrulamaktadır.



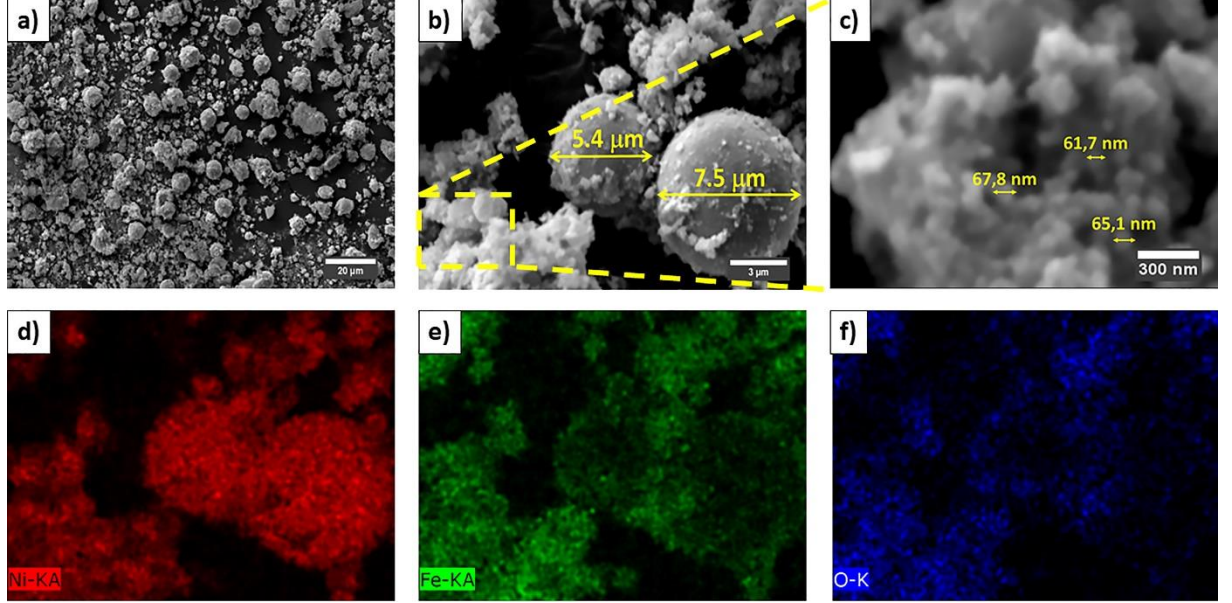
Şekil 2. Metalik nanoalaşımına ait FTIR spektrumu.

Figure 2. FTIR spectra of metallic nanoalloys.

### Morfolojik Analiz (Morphological Analysis)

Şekil 3, hidrotermal yöntemle elde edilen tozların SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 3(a)'da sentezlenmiş toz numunelere ait düşük büyütme çözümlü (X5000) SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 3(b) ve (c)'de mikro ve nano parçacıkların çapları image-j programı yardımıyla hesaplanıp ölçeklendirmeleri SEM görüntüleri üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3(a-c)'de görüldüğü üzere sentezlenen metalik alaşım ortalama 3,51  $\mu$ m yarıçapa sahip küresel parçacıklar ile ortalama 63,33 nm yarıçap

boyutunda düzensiz şekilli nanoparçacıkların bir araya gelmesi ile oluşan topaklanmalardan oluşmaktadır. Şekil 3(b) küresel parçacıkların daha detaylı incelenmesi için büyük büyütmelerde çekilmiş (X30000) SEM görüntüsünü göstermektedir. Şekle göre küresel parçacıkların yüzeyi nanometre boyutundaki parçacıklar ile kaplanmıştır. Şekil 3(c) ise düzensiz şekilli nanoparçacıkların daha detaylı incelenmesi için büyük büyütmelerde çekilmiş (X200000) SEM görüntüsünü göstermektedir.



**Şekil 3.** Hidrotermal yöntemle üretilen metalik nanoalaşımın (a) düşük ve (b-c) büyük büyütmelerde çekilmiş SEM görüntüleri. (d), (e) ve (f) sırasıyla Ni, Fe ve O elementlerine ait elemental haritalama görüntüleri.

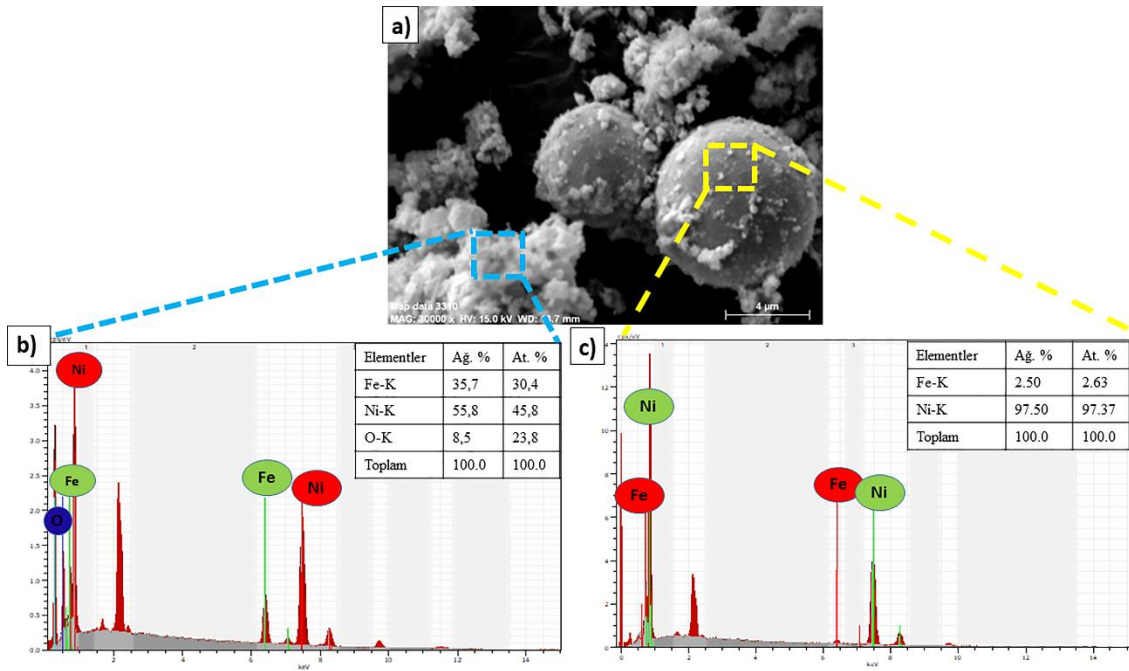
*Figure 3. SEM images of metallic nanoalloys produced by hydrothermal method at (a) low and (b-c) high magnifications. (d), (e) and (f) elemental mapping images of Ni, Fe and O elements, respectively.*

Hidrotermal yöntemle üretilen metalik nanoalaşımın kimyasal yapısının daha detaylı bir şekilde belirlenmesi için Şekil 3(b)'de verilen SEM görüntüsündeki bölgenin elemental haritalama analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3(d-f)'de sırası ile Ni, Fe ve O elementlerine ait elemental haritalama görüntülerini göstermektedir. Ni elementine ait elemental haritalama görüntülerine göre Ni elementi küresel parçacıklarda yoğun bir oranda bulunurken düzensiz şekilli nanoparçacıklar da ise daha az oranda bulunmaktadır. Fe ve O ise Ni'den farklı olarak hem küresel hem de düzensiz şekilli nanoparçacıkların yapısında bulunmaktadır. Ancak Fe ve O'nin her iki yapıda da Ni ile kıyaslandıklarında daha az oranda bulunduğu bu elementlerin renk şiddetlerindeki farklılıktan anlaşılmaktadır. Bu sonuçlara göre küresel parçacıkların  $\text{FeNi}_3$  olduğu ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparçacıkların bir yandan küresel şekilli  $\text{FeNi}_3$  parçacıkların yüzeylerini kaplarken bir yandan da kendilerinin nanoparçacık topakları oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Üretilen tozların SEM-EDS analizleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4(a)'da EDS alınan bölgenin SEM görüntüsü görülmektedir. Daha detaylı faz analizi sonuçları elde etmek amacıyla Şekil 4(a)'da düzensiz şekilli nanoparçacıkların yüzeyinden mavi ile ve küresel parçacıkların yüzeyinden sarı ile işaretlenmiş bölgelerden EDS spektrum analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerden alınan EDS sonuçları sırası ile Şekil 4(b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 4(b) mavi ile işaretlenmiş bölgenin EDS analizinden Fe:Ni:O elementlerinin % atomik olarak 30,4:45,8:23,8 oranında bulunduğu belirlenmiştir. Şekil 3(d-f)'de verilen elemental haritalama sonuçlarına göre ve Şekil 4(b)'de verilen Fe:Ni:O atomik oranlarına göre düzensiz nanoparçacıkların yapısında  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ile birlikte  $\text{FeNi}_3$ 'de bir arada bulunduğu anlaşılmaktadır. Sarı ile işaretlenmiş küresel parçacıkların olduğu bölgeden alınan EDX analiz sonucuna göre (Şekil 4(c)) % atomik olarak 2.6:97.4'luk Fe:Ni oranına sahip olduğu görülmüştür. EDX analiz sonucuna göre küresel parçacıkların metalik Ni fazı olduğu ve yüzeylerin bir miktar  $\text{FeNi}_3$  ile kaplandığı sonucuna

ulaşmaktadır.

Benzer şekilde Ding ve arkadaşlarının 2020 yılında yapmış oldukları çalışmada enerji dönüşümü ve depolama uygulama alanlarında kullanılabilir olan C bazlı MOF yapısı içerisinde dağılmış metalik Ni ve FeNi<sub>3</sub> nanoparçacıklarının termal dönüşüm yöntemiyle sentezini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada metalik Ni ve FeNi<sub>3</sub> fazlarının varlığını XRD, elemental haritalama ve EDX analiz yöntemine ek olarak XPS analiz tekniği ile doğrulamışlardır. XPS analizi sonucunda metalik Ni (Ni(0)) ile ilişkilendirilen 851,7 ve 870,1 eV'deki pikler ile metalik FeNi<sub>3</sub> ile ilişkilendirilen (Ni(II))'ye ait 855,3 ve 873,8 eV'de ortaya çıkan pikler yapıda metalik Ni ve metalik FeNi<sub>3</sub> fazlarının bir arada bulunduğunu göstermişlerdir (Ding ve ark., 2020).



Şekil 4. Hidrotermal yöntemle üretilen metalik nanoalaşımın EDS spektrumları.

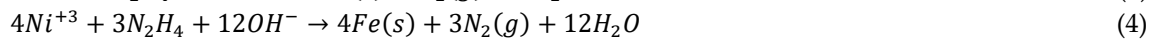
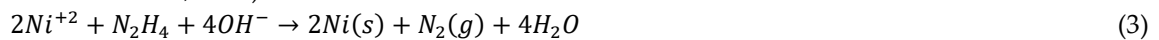
Figure 4. EDS spectra of metallic nanoalloys produced by hydrothermal method.

#### Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Metalik Nanoalaşımın Oluşum Mekanizmaları (Formation Mechanisms of Ni-FeNi<sub>3</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Metallic Nanoalloys)

Hidrotermal sentez süresince metalik nanoparçacıkların oluşum mekanizmasında ilk olarak, Fe (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O) ve Ni (NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) tuzlarına NaOH'un damla damla ilavesi ile katı M(OH)<sub>n</sub> (M=Ni, Fe) hidroksitler oluşmaktadır. Çözelti ortamında (Fe<sup>+3</sup>/Fe) ve (Ni<sup>+2</sup>/Ni) oranlarının yakın olması durumunda katı Fe(OH)<sub>2</sub> ve Ni(OH)<sub>2</sub>'ler Denklem 1 ve 2'de gösterilen rekasyonlarla Fe<sup>+3</sup> ve Ni<sup>+2</sup> iyonik formlarını oluşturacak şekilde aşağıdaki gibi ayrılmaktadır (Liu ve ark., 2010; Bouremana ve ark., 2018):



Daha sonra çözeltiliye ilave edilen hidrazin hidrat'ın (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O) etkisiyle Fe<sup>+3</sup> ve Ni<sup>+2</sup> iyonik formları Denklem 3 ve 4'de gösterildiği şekilde metalik Fe ve Ni atomlarını oluşturmaktadırlar (Liu ve ark., 2010; Bouremana ve ark., 2018).



Son olarak çözelti ortamındaki metalik atomlar etkileşime girerek Fe-Ni alaşım çekirdeklerini oluşturmaktadırlar (Liu ve ark., 2010; Bouremana ve ark., 2018).



Denklem (1-5)'e göre, FeNi<sub>3</sub> metal nanoparçacıkların büyüme işlemi sırasında demir ve nikel

tuzlarının konsantrasyon bazında bir ortamda hidrazin hidrat tarafından indirgenmesi sonucuna varabiliriz. Hidrazin hidratın ( $N_2H_4 \cdot H_2O$ ) bir Lewis bazı olduğu bilinmektedir. Hidrazin hidrat sulu ortamda aşağıdaki denklemde olduğu gibi ayrışmaktadır (Yu ve ark., 2003; Xiaomin ve ark., 2005):



Reaksiyon devam ederken, ortamdaki hidrazin hidratın Denklem 3 ve 4'de gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda tükenmesi durumunda ortamda bulunan  $OH^-$  iyonlarının konsantrasyonunda bir azalma söz konusu olacaktır. Bu durumda Denklem 1 ve 2'de verilen  $Ni(OH)_2$  ve  $Fe(OH)_3$ 'lerin çözünme dengesine bağlı olarak serbest  $Ni^{+2}$  ve  $Fe^{+3}$  iyon konsantrasyonlarında bir artış meydana gelecektir. Çözelti ortamına ilave edilen  $NaOH$ 'ın etkisiyle  $Fe(OH)_3$  ve  $Ni(OH)_2$ 'den  $Fe^{+3}$  ve  $Ni^{+2}$  iyonlarının salınım miktarı azalacaktır. (Zhou ve Wei, 2009).

Elde ettiğimiz sonuçlara göre sentezlenen numunelerde  $Fe_3O_4$  nanoparçacıkların oluşumu ise  $Ni^{+2}$ 'nin sulu çözeltide hidrazin hidrat tarafından  $Fe^{+2}$ 'den daha kolay indirgenmesi sonucunda metalik Ni fazının ayrışmasına ve buna bağlı olarak ortamda bulunan Ni miktarının azalmasıyla kalan metalik Fe'in  $FeNi_3$  oluşturmak yerine  $Fe_3O_4$  oluşmasıyla açıklanabilir (Sounart ve ark., 2006).

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hidrotermal yöntem kullanılarak metalik nanoalaşım (Ni- $FeNi_3$ - $Fe_3O_4$ ) başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. X-ışını kırınımı sonucuna göre elde edilen pikler Ni- $FeNi_3$ - $Fe_3O_4$  metalik nanoalaşımın JCPDS kart verileri ile örtüştüğü ve hedef malzemenin sentezlendiği gözlemlenmiştir. FTIR spektrumu sonucu metalik nanoalaşımın oluştuğunu gösteren Fe-Ni metalik bağı ve Fe-O bağlarındaki titreşimlerini gösteren pikler elde edilmiştir. SEM-EDS analizlerinden sentezlenen metalik nanoalaşımın ortalama 3,51  $\mu m$  tane boyutuna sahip metalik Ni ve ortalama 47,33 nm tane boyutuna sahip  $Fe_3O_4/FeNi_3$  nanoparçacıklarından oluştuğu belirlenmiştir.

## KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baylan, E. ve Yildirim, O. A., 2019, Highly efficient photocatalytic activity of stable manganese-doped zinc oxide (Mn: ZnO) nanofibers via electrospinning method, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 103, 104621.
- Biffis, A., Orlandi, N. ve Corain, B., 2003, Microgel-stabilized metal nanoclusters: Size control by microgel nanomorphology, *Advanced materials*, 15 (18), 1551-1555.
- Bouremana, A., Guittoum, A., Hemmous, M., Rahal, B., Sunol, J., Martínez-Blanco, D., Blanco, J., Gorria, P. ve Benrekaa, N., 2014, Crystal structure, microstructure and magnetic properties of Ni nanoparticles elaborated by hydrothermal route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 358, 11-15.
- Bouremana, A., Guittoum, A., Hemmous, M., Martínez-Blanco, D., Gorria, P., Blanco, J. ve Benrekaa, N., 2015, Microstructure, morphology and magnetic properties of Ni nanoparticles synthesized by hydrothermal method, *Materials Chemistry and Physics*, 160, 435-439.
- Bouremana, A., Guittoum, A., Hemmous, M., Martínez-Blanco, D., Gorria, P. ve Blanco, J., 2018, Low temperature hydrothermal synthesis of  $Ni_{75}Fe_{25}$  nanostructured powders: Microstructure, morphology and magnetic behaviour, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 466, 212-218.
- Chen, H., Xu, C., Zhao, G. ve Liu, Y., 2013, Template-free formation of urchin-like  $FeNi_3$  microstructures by hydrothermal reduction, *Materials Letters*, 91, 75-77.
- Chen, Y.-C., Zheng, F.-C., Min, Y.-L., Wang, T. ve Zhao, Y.-G., 2012, Synthesis and properties of magnetic  $FeNi_3$  alloyed microchains obtained by hydrothermal reduction, *Solid state sciences*, 14 (7), 809-813.
- Chen, Y., Luo, X., Yue, G.-H., Luo, X. ve Peng, D.-L., 2009, Synthesis of iron-nickel nanoparticles via a





- nonaqueous organometallic route, *Materials Chemistry and Physics*, 113 (1), 412-416.
- Chicinas, I., Geoffroy, O., Isnard, O. ve Pop, V., 2005, Soft magnetic composite based on mechanically alloyed nanocrystalline Ni<sub>3</sub>Fe phase, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290, 1531-1534.
- Chicinas, I., Pop, V., Isnard, O., Le Breton, J. ve Juraszek, J., 2003, Synthesis and magnetic properties of Ni<sub>3</sub>Fe intermetallic compound obtained by mechanical alloying, *Journal of alloys and compounds*, 352 (1-2), 34-40.
- Datta, A., Pal, M., Chakravorty, D., Das, D. ve Chintalapudi, S., 1999, Disorder in nanocrystalline Ni<sub>3</sub>Fe, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 205 (2-3), 301-306.
- Ding, J., Sun, Q., Zhong, L., Wang, X., Chai, L., Li, Q., Li, T.-T., Hu, Y., Qian, J. ve Huang, S., 2020, Thermal conversion of hollow nickel-organic framework into bimetallic FeNi<sub>3</sub> alloy embedded in carbon materials as efficient oer electrocatalyst, *Electrochimica Acta*, 354, 136716.
- Djekoun, A., Boudinar, N., Chebli, A., Otmani, A., Benabdeslem, M., Bouzabata, B. ve Greneche, J., 2009, Structure and magnetic properties of Fe-rich nanostructured Fe<sub>100</sub>-XNiX powders obtained by mechanical alloying, *Physics Procedia*, 2 (3), 693-700.
- Eroglu, S., Zhang, S. ve Messing, G., 1996, Synthesis of nanocrystalline Ni-Fe alloy powders by spray pyrolysis, *Journal of materials research*, 11 (9), 2131-2134.
- Estrader, M., López-Ortega, A., Estradé, S., Golosovsky, I. V., Salazar-Alvarez, G., Vasilakaki, M., Trohidou, K., Varela, M., Stanley, D. ve Sinko, M., 2013, Robust antiferromagnetic coupling in hard-soft bi-magnetic core/shell nanoparticles, *Nature communications*, 4 (1), 1-8.
- Fernández-García, M. P., Gorria, P., Blanco, J. A., Fuertes, A. B., Sevilla, M., Boada, R., Chaboy, J., Schmool, D. ve Grenèche, J.-M., 2010, Microstructure and magnetism of nanoparticles with  $\gamma$ -Fe core surrounded by  $\alpha$ -Fe and iron oxide shells, *Physical Review B*, 81 (9), 094418.
- Fernández-García, M. P., Gorria, P., Sevilla, M., Proenca, M. P., Boada, R., Chaboy, J., Fuertes, A. B. ve Blanco, J. A., 2011, Enhanced protection of carbon-encapsulated magnetic nickel nanoparticles through a sucrose-based synthetic strategy, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (13), 5294-5300.
- Golovin, Y. I., Stolyarov, R. ve Shuklinov, A., 2013, Morphology and growth kinetics of Ni nanoparticles on the surface of multiwalled carbon nanotubes at galvanostatic electrodeposition, *Technical Physics*, 58 (8), 1189-1193.
- Gong, T. ve Tang, Y., 2020, Preparation of multifunctional nanocomposites Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub>-EDTA and its adsorption of heavy metal ions in water solution, *Water Science and Technology*, 81 (1), 170-177.
- Guo, H., Li, M., Qin, Z., Li, F., Zhang, X., Wu, W. ve Cheng, H., 2021, Shape-controlled synthesis of flake-like FeNi<sub>3</sub> nanoparticles based on sodium lignosulfonate, *Advanced Powder Technology*, 32 (3), 755-763.
- Haviv, A. H., Grenèche, J.-M. ve Lellouche, J.-P., 2010, Aggregation control of hydrophilic maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles by surface doping using cerium atoms, *Journal of the American Chemical Society*, 132 (36), 12519-12521.
- Hongxia, G., Hua, C., Fan, L., Zhenping, Q., Suping, C. ve Zuoren, N., 2012, Shape-controlled synthesis of FeNi<sub>3</sub> nanoparticles by ambient chemical reduction and their magnetic properties, *Journal of materials research*, 27 (11), 1522-1530.
- Keles, E., Yildirim, M., Öztürk, T. ve Yildirim, O. A., 2020, Hydrothermally synthesized UV light active zinc stannate: tin oxide (ZTO: SnO<sub>2</sub>) nanocomposite photocatalysts for photocatalytic applications, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 110, 104959.
- Khodadadi, M., Panahi, A. H., Al-Musawi, T. J., Ehrampoush, M. ve Mahvi, A., 2019, The catalytic activity of FeNi<sub>3</sub>@ SiO<sub>2</sub> magnetic nanoparticles for the degradation of tetracycline in the heterogeneous Fenton-like treatment method, *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100943.
- Kim, S.-H., Sohn, H.-J., Joo, Y.-C., Kim, Y.-W., Yim, T.-H., Lee, H.-Y. ve Kang, T., 2005, Effect of saccharin addition on the microstructure of electrodeposited Fe-36 wt.% Ni alloy, *Surface and Coatings Technology*, 199 (1), 43-48.

- Liao, Q., Tannenbaum, R. ve Wang, Z. L., 2006, Synthesis of FeNi<sub>3</sub> alloyed nanoparticles by hydrothermal reduction, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110 (29), 14262-14265.
- Liu, J. ve Vipulanandan, C., 2017, Effects of Fe, Ni, and Fe/Ni metallic nanoparticles on power production and biosurfactant production from used vegetable oil in the anode chamber of a microbial fuel cell, *Waste Management*, 66, 169-177.
- Liu, L., Guan, J., Shi, W., Sun, Z. ve Zhao, J., 2010, Facile synthesis and growth mechanism of flowerlike Ni-Fe alloy nanostructures, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114 (32), 13565-13570.
- Liu, Y., Chi, Y., Shan, S., Yin, J., Luo, J. ve Zhong, C.-J., 2014, Characterization of magnetic NiFe nanoparticles with controlled bimetallic composition, *Journal of alloys and compounds*, 587, 260-266.
- Mao, Y., Parsons, J. ve McCloy, J. S., 2013, Magnetic properties of double perovskite La<sub>2</sub>BmO<sub>6</sub> (B= Ni or Co) nanoparticles, *Nanoscale*, 5 (11), 4720-4728.
- Moustafa, S. ve Daoush, W., 2007, Synthesis of nano-sized Fe-Ni powder by chemical process for magnetic applications, *Journal of materials processing technology*, 181 (1-3), 59-63.
- Nasseh, N., Arghavan, F. S., Rodriguez-Couto, S. ve Hossein Panahi, A., 2020a, Synthesis of FeNi<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/CuS magnetic nano-composite as a novel adsorbent for Congo Red dye removal, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-21.
- Nasseh, N., Barikbin, B. ve Taghavi, L., 2020b, Photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride by FeNi<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/CuS magnetic nanocomposite under simulated solar irradiation: Efficiency, stability, kinetic and pathway study, *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101035.
- Rinaldi-Montes, N., Gorria, P., Martínez-Blanco, D., Fuertes, A., Barquín, L. F., Fernández, J. R., de Pedro, I., Fdez-Gubieda, M., Alonso, J. ve Olivi, L., 2014, Interplay between microstructure and magnetism in NiO nanoparticles: breakdown of the antiferromagnetic order, *Nanoscale*, 6 (1), 457-465.
- Rinaldi-Montes, N., Gorria, P., Martínez-Blanco, D., Amghouz, Z., Fuertes, A. B., Barquín, L. F., de Pedro, I., Olivi, L. ve Blanco, J. A., 2015, Unravelling the onset of the exchange bias effect in Ni (core)@NiO (shell) nanoparticles embedded in a mesoporous carbon matrix, *Journal of Materials Chemistry C*, 3 (22), 5674-5682.
- Sahebdadzehi, Z., Khodadadi, M. ve Dorri, H., 2022, Synthesis and application of N-doped FeNi<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nano-photocatalyst in advanced oxidation process to remove reactive red 195 dye from aqueous medium.
- Sounart, T. L., Liu, J., Voigt, J. A., Hsu, J. W., Spoerke, E. D., Tian, Z. ve Jiang, Y., 2006, Sequential nucleation and growth of complex nanostructured films, *Advanced Functional Materials*, 16 (3), 335-344.
- Su, X., Zheng, H., Yang, Z., Zhu, Y. ve Pan, A., 2003, Preparation of nanosized particles of FeNi and FeCo alloy in solution, *Journal of materials science*, 38 (22), 4581-4585.
- Tan, L., Xu, J., Xue, X., Lou, Z., Zhu, J., Baig, S. A. ve Xu, X., 2014, Multifunctional nanocomposite Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>-mPD/SP for selective removal of Pb (ii) and Cr (vi) from aqueous solutions, *RSC advances*, 4 (86), 45920-45929.
- Tian, J. T., Gong, C. H., Yu, L. G., Wu, Z. S. ve Zhang, Z. J., 2008, Synthesis of dandelion-like three-dimensional nickel nanostructures via solvothermal route, *Chinese Chemical Letters*, 19 (9), 1123-1126.
- Tremel, W., Kleinke, H., Derstroff, V. ve Reisner, C., 1995, Transition metal chalcogenides: new views on an old topic, *Journal of alloys and compounds*, 219 (1-2), 73-82.
- Vitta, S., Khuntia, A., Ravikumar, G. ve Bahadur, D., 2008, Electrical and magnetic properties of nanocrystalline Fe<sub>100-x</sub>Ni<sub>x</sub> alloys, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (3-4), 182-189.
- Xiaomin, N., Xiaobo, S., Huagui, Z., Dongen, Z., Dandan, Y. ve Qingbiao, Z., 2005, Studies on the one-step preparation of iron nanoparticles in solution, *Journal of Crystal Growth*, 275 (3-4), 548-553.
- Yan, J.-M., Zhang, X.-B., Han, S., Shioyama, H. ve Xu, Q., 2009, Magnetically recyclable Fe-Ni alloy catalyzed dehydrogenation of ammonia borane in aqueous solution under ambient atmosphere,

- Journal of Power Sources, 194 (1), 478-481.
- Yang, K., Peng, H., Wen, Y. ve Li, N., 2010, Re-examination of characteristic FTIR spectrum of secondary layer in bilayer oleic acid-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles, *Applied Surface Science*, 256 (10), 3093-3097.
- Yıldırım, Ö. A., Unalan, H. E. ve Durucan, C., 2013, Highly efficient room temperature synthesis of silver-doped zinc oxide (ZnO: Ag) nanoparticles: structural, optical, and photocatalytic properties, *Journal of the American Ceramic Society*, 96 (3), 766-773.
- Yu, K., Kim, D. J., Chung, H. S. ve Liang, H., 2003, Dispersed rodlike nickel powder synthesized by modified polyol process, *Materials Letters*, 57 (24-25), 3992-3997.
- Yuan, M. L., Tao, J. H., Yu, L., Song, C., Qiu, G. Z., Li, Y. ve Xu, Z. H., 2011, Synthesis and magnetic properties of Fe-Ni alloy nanoparticles obtained by hydrothermal reaction, *Advanced Materials Research*, 748-753.
- Zhou, X.-M. ve Wei, X.-W., 2009, Single crystalline FeNi<sub>3</sub> dendrites: large scale synthesis, formation mechanism, and magnetic properties, *Crystal Growth and Design*, 9 (1), 7-12.
- Zhou, Y.-H., Harmelin, M. ve Bigot, J., 1989, Sintering behaviour of ultra-fine Fe, Ni and Fe-25wt% Ni powders, *Scripta metallurgica*, 23 (8), 1391-1396.



## KENTSEL DÖNÜŞÜM PLANLAMAVE UYGULAMA STRATEJİLERİNDE 5393 VE 6306 SAYILI KANUNLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Sıtkı Alper ÖZDEMİR , <sup>2</sup>Mustafa Tolga ÇÖĞÜRCÜ , <sup>3</sup>Mehmet Akif ARSLAN   
, <sup>4</sup>Mehmet UZUN 

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Hatay, TÜRKİYE

<sup>2,3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,  
TÜRKİYE

<sup>4</sup>Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman,  
TÜRKİYE

<sup>1</sup>salper.ozdemir@iste.edu.tr, <sup>2</sup>mtcogurcu@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>maarslan@ktun.edu.tr, <sup>4</sup>mehmetuzun@kmu.edu.tr

(Geliş/Received: 02.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.10.2022)

**ÖZ:** Kentsel dönüşüm, kentlerin sosyal, mekânsal ve ekonomik yönden sorunlu bölgelerini insanların sağlıklı ve güvenli şekilde yaşamlarına devam edebileceği hale getirmek amacıyla yapılan canlandırma, iyileştirme veya yeniden inşa gibi çalışmaların bütünü olarak tanımlanabilir. Eskiyen, köhneleşen, günlük yaşantıda aksamalara neden olan şehir yerleşim alanları ve deprem, sel ve heyelan gibi doğa olayları neticesinde afet durumlarının yaşanmasına neden olacak yapı stoku kentsel dönüşüm yasaları ile bertaraf edilmelidir. Bu sebeplerle ülkemizde geçmişten günümüze kentsel dönüşümün önünü açan ve avantajlı hale getiren birçok yasa hazırlanmıştır. Hazırlanan ve uygulamaya yön veren yasalar içerisinde 5393 Sayılı Belediye Kanunu 73. Maddesi ve ilgili maddeleri ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun en önemli, güncel uygulamada olan ve avantajlı yasalardır. Bu çalışmada kentsel dönüşüm konusunda rol oynayan ve afetlere önlem olacak bu kanunlar arasındaki farklar karşılaştırma yolu ile incelenmiştir. Kentsel dönüşüm veya riskli alanın ilan edilmesi, revizyon plan hazırlama ve onaylama aşamaları, parselasyon düzenlemesi ve onaylama aşamaları, konu ile ilgili belirlemeler, yıkım ve mülkiyetin kamuya aktarılması faaliyetleri, kira destekleri, uygulamadaki sorumluluklar, proje denetimi ve kabulü, ruhsat alınması ve muafiyetler konuları bu karşılaştırmalı incelemede ele alınan kriterlerdir.

**Anahtar Kelimeler:** Afet, Deprem, Kentsel Dönüşüm, Kanun

### Comparison of Laws No. 5393 and 6306 in Urban Renewal Planning and Implementation Strategies

**ABSTRACT:** Urban renewal is defined as the production and implementation of projects for demolishing, rebuilding, revitalizing, rehabilitating or restructuring in order to reconsider the urban development socially, economically and spatially and to make the problematic areas in the city healthy and livable. Urban settlements that become old, outdated and cause disruptions in daily life, and the building stock that will cause disasters as a result of natural events such as earthquakes, floods and landslides should be disposed of with urban renewal laws. For these reasons, many laws have been prepared in Turkey from past to present that pave the way for urban renewal and make it advantageous. Among the laws prepared and guiding the implementation, the 73rd article of the Municipal Law No. 5393 and its related articles and the Law No. 6306 on the Transformation of Areas under Disaster Risk are the most important, currently in practice and advantageous laws. In this study, the differences between these laws, which play a role in urban renewal and will be a measure against disasters, are examined by way of comparison. Publicity of urban renewal or risky area, plan making and approval processes, parceling, construction and approval processes, determinations, demolition and expropriation procedures, rental aids, authorizations



in implementation, project approval and license procedures and exemptions are the criteria discussed in this comparative study.

**Keywords:** Disaster, Earthquake, Urban Renewal, Law.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Afet, bir bölgede yaşayan insan popülasyonunun yaşamlarını etkileyen, maddi ve sosyal yönden hasar vererek yaşantının sona ermesine veya aksamasına sebep olan, doğal veya insan kaynaklı olaylara denilmektedir (Varol, 2019). Ülkemiz, büyük bölümü Asya kıtasında bulunan, 780 kilometrekare alana sahip, Asya kıtası ile Avrupa kıtasını birbirine bağlayan bir coğrafi konuma sahiptir. Türkiye'nin topoğrafik, jeolojik ve meteorolojik özellikleri sürekli olarak doğal afetlere maruz kalmasına neden olmaktadır (Özel ve Yalçiner Ercoşkun, 2019). Bu durum ülkemizi deprem, sel, heyelan gibi yıkıcı etkileri yüksek olan afetler ile karşı karşıya getirmekte ve can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır. 1980 – 2017 yılları arasında gerçekleşen afetler baz alındığında, milyonda 6-25 oranında insanın bu afetler sebebiyle yaşamlarının son bulduğu görülmektedir (AFAD, 2018). Dünya çapında 191 ülkenin doğal afet ve insan kaynaklı krizlerinin risk analizini yapan ve risk düzeylerini raporlayan kurum Avrupa Komisyonu'na bağlı INFORM Risk Yönetimi Endeksi'dir. Bu endekse göre INFORM riskleri aşağıdaki çizelge 1.'de gösterildiği gibi sınıflandırmaktadır.

### Çizelge 1. INFORM Risk Yönetim Endeks Puanları ve Risk Sınıfları ( Inter-Agency Standing Committee and the European Commission, 2020)

**Table 1.** INFORM Risk Management Index Scores and Risk Classes (Inter-Agency Standing Committee and the European Commission, 2020)

| Endeks Puan Aralığı | Risk Düzeyi |
|---------------------|-------------|
| 0 – 2               | Çok Düşük   |
| 2 – 3,5             | Düşük       |
| 3,5 – 5             | Orta        |
| 5 – 6,5             | Yüksek      |
| 6,5 – 10            | Çok Yüksek  |

2020 yılında INFORM tarafından yayınlanan rapora göre INFORM endeks puanı Türkiye için 5,0 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değere göre Türkiye yüksek risk sınıfında yer almaktadır. Ayrıca, son üç yıla ait verilere göre riskin düzeyinde artış görülmektedir (Inter-Agency Standing Committee and the European Commission, 2020). Ülkemizde doğal afetler sonucunda can ve mal kayıplarının %60'ı gibi yüksek bir orana deprem afeti neden olmaktadır (AFAD, 2018). Oluşan bu depremler neticesinde gerçekleşen bazı önemli durumlar aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır (Tan ve diğ., 2008);

- Türkiye coğrafyasının %90'ı deprem tehdidi altındadır. Yıllık millî gelirimizin ortalama %1'i son asırda gerçekleşen depremler nedeniyle kaybedilmiştir.
- 1939 senesinde gerçekleşen Erzincan Depremi'nde bir dakika içerisinde 33.000 insanımız hayatını kaybetmiştir.
- 1999 senesinde gerçekleşen Marmara Depremi'nde, 18 bin insanımız hayatını kaybetmiştir, ayrıca millî gelirimizin %10'u kaybedilmiştir.
- 2011 senesinde gerçekleşen Van Depremi'nde yaklaşık 30.000 konut kullanılamaz hale gelmiştir.

Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu Fay Hattı kesişiminde yer alan ve özellikle 1999 Marmara Depremi ile ciddi şekilde hasar gören İstanbul yapı stoku, önümüzdeki süreçte de 7 büyüklüğü üzerinde bir deprem ile karşı karşıya bulunmaktadır. Kentsel Dönüşüm ve Şehircilik Vakfı (KENTSEV)'in yapmış olduğu raporlamada İstanbul'da 7,5 büyüklüğünde bir deprem beklendiği belirtilmektedir. Ayrıca bu raporda olası İstanbul Depremi ile bölgede düşük hasar alacak bina sayısı 301 bin, orta hasar alacak bina

sayısı 137 bin, ağır hasar alacak bina sayısı 39,5 bin ve çok ağır hasar alacak bina sayısı 13,5 bin olarak öngörülmektedir (KENTSEV, 2021). Tüm bu veriler ışığında ülkemizin afetlere hazırlık sağlaması özellikle yıkıcı etkisi en yüksek olan deprem afeti karşısında ülkemizin yapı stokunun tespit edilip, risklerin en aza indirilmesi amacıyla kentsel dönüşüm kapsamında yenilenmesi önem arz etmektedir.

Afetlerin yanı sıra ülkemizde kırsal alanlardan kentlere de yoğun bir göç görülmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) paylaştığı verilere göre 2021 yılı itibarıyla kentsel alanlarda yaşayanlar (il ve ilçe merkezleri) toplam nüfusun %93,2'sini oluşturmaktadır. Ayrıca bu oran bir önceki yıla göre %0,2 artış göstermiştir (TÜİK, 2022). Kentlerde artan nüfus yoğunluğu çarpık kentleşme, artan gecekondular, sosyal uyumsuzluklar, kentlerde tarihi, kültürel ve doğal yapıda bozulmalar oluşmuştur (Tosun, 2019). Tüm bu sebepler sağlıklı, yaşanabilir, gelişmiş şehirler oluşturmak amacıyla kentsel dönüşüm konusunu gündeme getirmiştir.

Kentsel dönüşüm, kentteki sorunlu bölgelerin sağlıklı hale getirilmesi, canlandırılması ve günlük hayata dair sürdürülebilir hale getirilmesi için ilgili alanın toplumsal, mekânsal ve ekonomik açılarından revizyonunu sağlayacak projelerin üretilmesi ve sahada uygulanması işlemlerinin bütünüdür (Ertaş ve Bayındır, 2020). İlk defa İkinci Dünya savaşı sonrası savaşın şehirler üzerinde sebep olduğu tahribatı gidermek için ABD, Almanya, Fransa ve İngiltere'de bozulan kentsel yapıyı sosyal, ekonomik ve mekânsal olarak iyileştirmek amacıyla kentsel dönüşüm çalışmaları yapılmıştır (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2017). Ülkemizde ise 1950-80 yılları arasında gerçekleşen ekonomik büyümenin sonucu olarak kurulan fabrikaların yakınlarına yapılan gecekondular için bu bölgelerin düzenleme çalışmaları ilk kentsel dönüşüm uygulamaları olarak görülmektedir. Bununla beraber 1980 yılından sonra kamu özel sektör iş birlikleriyle şehirlerde terk edilmiş, köhne alanların ekonomik olarak hayat döndürülmesi amacıyla kentsel dönüşüm çalışmaları yapılmıştır (Ertaş ve Bayındır, 2020).

Eskiyen, köhneleşen, günlük yaşantıda aksamalara neden olan şehir yerleşim alanları ve deprem, sel ve heyelan gibi doğa olayları neticesinde afet durumlarının yaşanmasına neden olacak yapı stoku kentsel dönüşüm yasaları ile bertaraf edilmelidir. Bu sebeplerle ülkemizde geçmişten günümüze kentsel dönüşümün önünü açan ve avantajlı hale getiren birçok yasa hazırlanmıştır. Hazırlanan ve uygulamaya yön veren yasalar içerisinde 5393 Sayılı Belediye Kanunu 73. Maddesi ve ilgili maddeleri ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun en önemli, güncel uygulamada olan ve avantajlı yasalardır.

Türkiye'de planlanan ve gerçekleşen kentsel dönüşüm uygulamaları kimi yerel idareler (belediyeler) tarafından 5393 sayılı yasaya göre uygulanırken, kimi yerel idareler tarafından da 6306 sayılı yasaya göre uygulanmaktadır. Örneğin İzmir ili Karabağlar ilçesine bağlı bazı mahalleler 6306 sayılı kanuna göre kentsel dönüşüm alanı ilan edilirken, Gaziemir ilçesine bağlı bazı mahalleler ise 5393 sayılı kanunun 73. Maddesi hükümlerince kentsel dönüşüm ve gelişim alanı ilan edilmiştir (Tezcan ve Zengin Çelik, 2017). Bu farklı tercihlili uygulamaların sebepleri çoğu zaman teknik bilgi eksikliği ve yasalara hâkim olamama, avantaj ve dezavantajlarını bilmeme gibi durumlarla karşımıza çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda kentsel dönüşüm uygulamalarında hedeflenen kamu yararına ulaşılamaması ve ekonomik destekler başta olmak üzere birçok avantajdan mahrum kentsel dönüşüm projeleri gerçekleşmektedir. Kamu kaynaklarının etkin ve yetkin bir şekilde kullanılması ve ihtiyaca yönelik yapılacak kentsel dönüşüm uygulamalarında yasaların sağladığı avantajların kullanılması en önemli husustur. Bu nedenle 5393 Sayılı Belediye Kanunu ve ilgili maddeleri ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'un avantaj ve dezavantaj değerlendirilmesi ile karşılaştırılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada kentsel dönüşüm konusunda rol oynayan ve afetlere önlem olacak 5393 Sayılı Belediye Kanunu ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun arasındaki farklar karşılaştırma yolu ile incelenmiştir. Kentsel dönüşüm veya riskli alanın ilan edilmesi, revizyon plan hazırlama ve onaylama aşamaları, parselasyon düzenlemesi ve onaylama aşamaları, konu ile ilgili belirlemeler, yıkım ve mülkiyetin kamuya aktarılması faaliyetleri, kira destekleri, uygulamadaki sorumluluklar, proje denetimi ve kabulü, ruhsat alınması ve muafiyetler konuları bu karşılaştırmalı incelemede ele alınan kriterlerdir.

## KENTSEL DÖNÜŞÜM VE YASAL DÜZENLEMELER (URBAN TRANSFORMATION AND LEGAL REGULATIONS)

Türkiye’de yaşanan ve yaşanabilecek olan afet durumlarının başında deprem etkisinden kaynaklı afetler gelmektedir. Bu nedenle de Türkiye Cumhuriyeti Devleti’nin ilgili kamu kurumları zaman zaman yasal düzenlemelerle afetlerin önüne geçmeye çalışmaktadır. Deprem kaynaklı oluşabilecek afet durumlarını önlemenin en etkili yolu da mevcut yapılarımızın yani yapı stokumuzun durum tespitini yapılması ve onarım/güçlendirme ya da kentsel dönüşüm ile bina bazlı, alan bazlı depreme dayanıklı şehirler elde edilmesidir. Bununla beraber kentsel dönüşümün ülkemizde gerekliliğinin diğer sebepleri de dikkate alınmalıdır. Türkiye’de kentsel dönüşüm gerekliliği aşağıdaki maddelerde sıralanmaktadır (Çelik, 2017);

- Yurdumuzun Ana Fay Hatlarının etkisi altında olması ve nüfus yoğunluğu fazla olan, ülke ekonomisinde önemli yere sahip illerimizin deprem kuşağında yer alması,
- Yaşadığımız depremlerin etkisiyle çok fazla can ve mal kaybı görülmüş olması,
- Sağlıklı ve güvenilir yaşam çevrelerine ihtiyaç duyulması,
- Sosyal gelişmişliği az olan alanların güvenlik ve suç unsuru faaliyetlerde büyük tehlike arz etmesi,
- Riskli yapı stokunun fazlalığı (Uslu ve Uzun, 2014),
- Köhnemiş kent parçalarının kentlerin gelişimini olumsuz yönde etkilemesi,
- Kent merkezlerinde kalmış sanayi alanlarının taşınması gerekliliği,
- Geçmişimizi yansıtan tarihi kent alanlarımızın yok olma tehlikesi altında olması.

Kentlerin düzenlenmesi ve alan bazlı kent tasarımları yapılabilmesi için yasal altyapının bulunması gerekmektedir. Deprem kuşağında yer alan Türkiye, tarih boyu büyük depremlere maruz kalmış ve bu depremler neticesinde afet durumlarını yaşamıştır. Zarar gören yapı stokunun hem yapı onarımı ve güçlendirilmesi yapılabilmesi hem de bina ve alan bazlı yenilenme/dönüşüm gerçekleştirilebilmesi için mevzuat düzenlemeleri gerekmiştir. Gereken bu mevzuat düzenlemeleri ilgili kamu kurumları tarafından günün koşulları ve zaruretlerine göre hazırlanmıştır (Akman ve diğ., 2018).

Kentleşme sürecinde geçmişten günümüze Türkiye’ de hazırlanan ve yürürlüğe giren önemli yasalar;

- 775 Sayılı Gecekondu Kanunu
- İmar ve Gecekondu Mevzuatına Aykırı Yapılara Uygulanacak Bazı İşlemler ve 6785 Sayılı İmar Kanunu’nun Bir Maddesinin Değiştirilmesi Hakkında Kanun
- 5393 Sayılı Belediye Kanunu
- 5140 Sayılı Kuzey Ankara Girişi Kentsel Dönüşüm Projesi Kanunu
- 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanları Dönüştürülmesi Hakkında Kanun olarak mevzuat uygulamaları ve kentsel dönüşüm uygulamalarında yer almıştır.

Ülkemizde hazırlanan ve yürürlüğe giren bu yasaların kabul tarihleri ve amaçları aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 2. Ülkemizde Kentsel Dönüşüm ile Alakalı Yürürlüğe Giren Bazı Kanunlar ve Açıklamaları  
Table 2. Some Laws and Explanations Related to Urban Renewal in Turkey

| Kanun  | Tarih     | Açıklama  |
|--|-----------|---|
| 755 Sayılı Gecekondu Kanunu  | 20/7/1966 | "Mevcut gecekonduların ıslahı, tasfiyesi, yeniden gecekondu yapımının önlenmesi ve bu amaçlarla alınması gereken tedbirler hakkında bu kanun hükümleri uygulanır" (Resmi Gazete, 12362 (Temmuz 1966)).  |
| İmar ve Gecekondu Mevzuatına Aykırı Yapılara Uygulanacak Bazı İşlemler ve 6785 Sayılı İmar Kanunu'nun Bir Maddesinin Değiştirilmesi Hakkında Kanun | 24/2/1984 | "Bu Kanunun amacı; imar ve gecekondu mevzuatına aykırı olarak inşa edilmiş ve inşa halindeki bütün yapılar hakkında uygulanacak işlemleri düzenlemek ve bu işlemlere dair müracaat, tespit, değerlendirme, uygulama ve duyuru esaslarını ve ilgili diğer hususları belirlemektir." (Resmi Gazete, 18335 (Mart 1984))  |
| 5140 Sayılı Kuzey Ankara Girişi Kentsel Dönüşüm Projesi Kanunu   | 4/3/2004  | "Bu Kanunun amacı, kuzey Ankara girişi ve çevresini kapsayan alanlarda kentsel dönüşüm projesi çerçevesinde fiziksel durumun ve çevre görüntüsünün geliştirilmesi, güzelleştirilmesi ve daha sağlıklı bir yerleşim düzeni sağlanması ile kentsel yaşam düzeyinin yükseltilmesidir." (Resmi Gazete, 25400 (Mart 2004))   |
| 5393 Sayılı Belediye Kanunu  | 3/7/2005  | "Belediye, belediye meclisi kararıyla; konut alanları, sanayi alanları, ticaret alanları, teknoloji parkları, kamu hizmeti alanları, rekreasyon alanları ve her türlü sosyal donatı alanları oluşturmak, eskiyen kent kısımlarını yeniden inşa ve restore etmek, kentin tarihi ve kültürel dokusunu korumak veya deprem riskine karşı tedbirler almak amacıyla kentsel dönüşüm ve gelişim projeleri uygulayabilir." (Resmi Gazete, 25874 (Temmuz 2005)) |
| 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun   | 16/5/2012 | "Bu Kanunun amacı; afet riski altındaki alanlar ile bu alanlar dışındaki riskli yapıların bulunduğu arsa ve arazilerde, fen ve sanat norm ve standartlarına uygun, sağlıklı ve güvenli yaşama çevrelerini teşkil etmek üzere iyileştirme, tasfiye ve yenilemelere dair usul ve esasları belirlemektir." (Resmi Gazete, 28309 (Mayıs 2012))  |

#### KENTSEL DÖNÜŞÜM BAĞLAMINDA 5393 SAYILI KANUN İLE 6306 SAYILI KANUN ARASINDAKİ FARKLAR (DIFFERENCES BETWEEN LAW NO. 5393 AND LAW NO. 6306 IN THE CONTEXT OF URBAN TRANSFORMATION)

Türkiye'de kentsel dönüşüm uygulamalarında tarihi süreç içerisinde yasal düzenlemeler yapılmış, zaman zaman yürürlükte olan bu mevzuat hükümlerinde düzenlemelere gidilirken zaman zaman da yeni yasalar ile kentsel dönüşüm uygulamaları teşvik edilmeye, kolaylaştırılmaya çalışılmıştır. Deprem etkisinin yapı stoku üzerindeki baskısı şehirlerin süratle yenilenmesi gerektiği gerçeğini daha da ön plana çıkarmaktadır. Bu durum ile yasal düzenlemeler içerisinde avantajlı olanın uygulamadaki önemini de arttırmaktadır (Çelik, 2017). Bu açıdan değerlendirildiğinde yapılan kentsel dönüşüm uygulamalarında ülke genelinde 5393 Sayılı Belediye Kanunu 73. Maddesi ve bağlı maddeler ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun hükümlerinin çok daha uygulanabilir ve teşvik edici/destekleyici olduğu görülmektedir. Bu sebeple bu çalışmada iki kanun karşılaştırılmalı incelenmiştir. 5393 Sayılı Kanun ile 6306 Sayılı Kanun karşılaştırma kriterleri aşağıda yer almaktadır.

- Kentsel dönüşüm veya riskli alanın ilan edilmesi

- Plan yapım ve onama süreçleri
- Parselasyon yapım ve onama süreçleri
- Tespitler, yıkım ve kamulaştırma işlemleri
- Kira yardımları
- Uygulamadaki yetkiler
- Proje onayı ve ruhsat işlemleri
- Muafiyetler

**Kentsel dönüşüm veya riskli alanın ilan edilmesi bakımından kıyaslama (Comparison in terms of urban transformation or declaring a risky area)**

6306 sayılı kanunda;

- TOKİ ya da İdare, ilgili Bakanlıktan riskli alan belirlenmesini için istekte bulunabilir. Bakanlık tarafından, olur verilen talepler Cumhurbaşkanına sunulur.
- Hedef alanda bulunan taşınmaz maliki olan gerçek veya tüzel kişiler tarafından Bakanlık ya da İdareden riskli alan tespit isteminden bulunulabilir.
- İdareye iletilecek istekler Bakanlığa bildirilir.
- Bakanlık tarafından olur verilen talepler, Cumhurbaşkanına sunulur.
- Cumhurbaşkanı tarafından riskli alan ilan edilmesinden sonra karar Resmî Gazete de yayımlanır.

5393 sayılı kanunda ise;

- Belediye, belediye meclisi kararıyla;
- Konut, sanayi, ticaret alanları ve teknoloji parkları,
- Kamu hizmetine esas bölgeler, rekreasyon ve her nevi sosyal donatı alanları oluşturmak,
- Şehirleri eskiyen bölgelerini yeniden inşa ve/veya restore etmek,
- Deprem riskine dair önlemler almak ve kentin tarihi ve kültürel dokusunu korumak amacıyla Kentsel Dönüşüm ve Gelişim Projeleri oluşturur.

**Plan yapım ve onama süreçleri bakımında kıyaslama (Comparison in terms of plan making and approval processes)**

6306 sayılı kanunda;

- TOKİ, Riskli alan edildikten sonra planlama aşamasına geçilir.
- Belediyeler, plan yapma ve onama yetkilerini Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan talep edebilir.
- Plan yapma yetkisi belediye,
- Onama işlemi Bakanlık tarafından yapılır.

5393 sayılı kanunda ise;

- Kentsel dönüşüm ilan edilen bölgenin İmar plan onama aşamaları şu şekildedir:
- Büyükşehir Belediyesi sınırları içerisinde ise; ilçe belediyesi meclisinin onayını müteakip Büyükşehir Belediyesi meclisine sunulur. Daha sonra askı işlemleri için ilçe belediyesine gönderilir.
- Büyükşehirlerin dışındaki yerlerde, idarelerin kendi meclislerinden alacakları karara istinaden işlemler yapılır.

**Parselasyon yapım ve onama süreçleri bakımından kıyaslama (Comparison in terms of parceling and approval processes)**

6306 sayılı kanunda;

- Parselasyon Yapma ve Onama yetkisi Bakanlık tarafından ilgili belediyeye verilmez ise; Planlama işlemlerinde olduğu gibi Bakanlık yolu ile işlemler devam eder.

- İdareye verilmesi durumunda, İdarenin encümen kararından sonra askı süreci ve itiraz olmaması halinde onama işlemleri tamamlanır. Daha sonra onay süreçleri için Kadastro ve Tapu Müdürlüğü'ne iletilir.

5393 sayılı kanunda ise;

- Eğer Büyükşehir Belediyesi sınırlarında ise;
- İlçe belediyesi encümen kararından sonra Büyükşehir Belediyesi'ne gönderilir.
- Büyükşehir Belediyesi'nin encümen kararını müteakip, askı işlemleri için ilçe belediyesine gönderilir.
- Büyükşehirlerin dışındaki yerlerde ise,
- İdarelerin kendi encümeninden alacakları karara istinaden işlemler yapılır.
- Askı işlemlerinden sonra yine tescil işlemleri için Kadastro ve Tapu Müdürlüklerine gönderilir.

#### **Tespitler, yıkım ve kamulaştırma işlemleri bakımından kıyaslama (Comparison in terms of determinations, demolition and expropriation processes)**

6306 sayılı kanunda;

- İlk hedef olarak uzlaşmaya gidilerek yıkılma işlemi sağlanır.
- Riskli yapı var ise, maliklere ilk etapta en az altmış gün vakit verilir ve ilgili idareden yıkım ruhsatı alınarak riskli yapıların boşaltılması ve yıktırılması talep edilir.
- Hak sahiplerine yapılacak bildirimde, riskli yapıda kiracı oturuyorsa, hak sahibi tarafından kiracıya durumun bildirilmesi ve tahliye edilmesi gerektiği belirtilir.
- Hak sahibi aracılığıyla kiracıya tahliye durumunun bildirilmediği anlaşılması durumunda bildirim idare tarafından yapılır.
- İlerleyen süreçte riskli yapıların yıktırılıp yıktırılmadığına bakılır. Yıkımı gerçekleşmemiş olan yapılar, ilgili makamlarca yıktırılacağı belirtilerek en az otuz gün daha ek süre hakkı tanınarak durum tebliğ edilir.

5393 sayılı kanunda ise;

- Kentsel dönüşüm ve gelişim proje alanlarında yer alan yapıların tahliyesi, yıkılması ve mülkiyet hakkının kamuya geçirilmesinde uzlaşma esastır.
- Anlaşma yapılan yapılar yapı sahiplerince veya ilgili idaresince yıkılır, yıktırılır.
- Uygulamada çıkan en büyük sorun, mahkemeye intikal eden yapılarla ilgili, yargı süreçlerinin uzun sürmesidir.
- Taşınmazların kıymet takdiri; gayrimenkul değerlendirme uzmanı, kurum veya kuruluşların vereceği bilgiler doğrultusunda, 4/11/1983 tarihli ve 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu'nun 11'inci maddesindeki hükümlere istinaden belirlenir.

#### **Kira yardımları bakımından kıyaslama (Comparison in terms of rental benefits)**

6306 sayılı kanunda;

- Uzlaşma ile boşaltılan uygulama alanındaki mülklerin hak sahiplerine tahliye ya da yıkım sürecinden başlayacak şekilde Bakanlıkça belirlenecek aylık kira desteğinde bulunulabilir.
- Kira desteği, riskli alan haricindeki riskli yapılar için 18 ay olarak belirlenmiştir.
- Riskli alan ve rezerv yapı alanlarında kira desteği en fazla 48 ay olacak şekilde ilgili kurum tarafınca belirlenir.

5393 sayılı kanunda;

- Kira yardımı ile ilgili herhangi bir hüküm yoktur.
- Ancak, ilgili idare meclis kararı alarak taşınma veya kira bedeli adı altında yardımda bulunabilir.

#### **Uygulamadaki yetkiler bakımından kıyaslama (Comparison in terms of powers in the application)**

Her iki kanun (5393-6306) için de;

- Hem özel sektör aracılığı ile hem de TOKİ ile anlaşma yapıp uygulama yapılabilir.
- TOKİ'nin mevzuatında bulunan muafiyetler nedeniyle, genelde ilgili idareler TOKİ ile iş birliği seçeneğine gitmektedir.

#### **Proje onayı ve ruhsat işlemleri bakımından kıyaslama (Comparison in terms of project approval and license procedures)**

Her iki kanun (5393-6306) için de;

- 3194 sayılı İmar Yasası ve ilgili yönetmeliklerine göre yapıldığı için aynıdır.

#### **Muafiyetler bakımından kıyaslama (Comparison in terms of exemptions)**

6306 sayılı kanunda;

- Kanununun 7. maddesinin 10. fıkrasında, yeni inşaat alanı için fonksiyon değişikliğine bakılmadan, riskli alan, rezerv alan veya riskli yapının yer aldığı parsellerde dönüşüm işleminin gerçekleşmesi durumunda, ortaya çıkacak yapı inşaat alanı mevcut yapı inşaat alanının bir buçuk katından fazla olana dek harç ve ücret bedelleri alınmaz hükmü yer almaktadır.
- Muafiyet koşulları; konut ve işyerinin yapı alanı metrekaresi oranı kıstaslarıyla gerçekleştirilir.
- Tapu harç ve ücret muafiyetlerinde, riskli yapının yer aldığı parsel ile boş parsellerin tevhit uygulaması halinde, riskli yapının yer aldığı parsel alanı ile tevhit sonucunda ortaya çıkan yeni parselin alanı oranına göre faydalanılır.

Alınmaması gereken harç, vergi ve ücretler;

- Noter harçları,
- Tapu ve kadastro harçları,
- Belediyelerce alınan harçlar,
- Damga vergisi,
- Veraset ve intikal vergisi,
- Banka ve sigorta muameleleri vergisi,
- Döner sermaye ücreti kapsamında bulunan ücretler,
- Belediye meclisi kararı ile zorunlu kılınan tüm ücretler.

Mülkiyetin kamu olması durumunda alınmaması gereken harç, vergi ve ücretler;

- 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 26. Maddesi gereğince yapılan yapılarda, 2464 sayılı Kanun'un Ek Madde 2'ye istinaden bina inşaat harcından muafiyet vardır.

5393 sayılı kanunda ise; Mülkiyetin kamu olması durumunda,

- 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 26. Maddesi gereğince yapılan yapılarda, 2464 sayılı Kanun'un Ek Madde 2'ye istinaden bina inşaat harcından muafiyet vardır.
- Kentsel dönüşüm ve gelişim proje alanlarında dönüşümü gerçekleştirilecek tekil yapılarda alınması gereken vergi, resim ve harç bedellerinin dörtte biri tahsil edilir.
- Eğer TOKİ ise; harçlar minimum değerden ücretler ise muafıdır.

#### **SONUÇLAR (Results)**

Kentlerin köhneleşmiş, yıpranmış kesimlerini veya deprem esnasında afetlere sebep olabilecek riskli yapı sayısının fazla olduğu bölgeleri yaşanabilir, sağlıklı ve güvenli hale getirmek için kentsel dönüşümün gerekliliği tartışılmazdır. Ülkemizin coğrafi şartları gereği başta en fazla nüfusa sahip olan İstanbul ilimiz başta olmak üzere birçok kentimiz deprem ve diğer doğal afet risklerini barındırmaktadır. Bu sebeple doğal afetlerin felakete dönüşmesinin önüne geçmek için kentsel dönüşüm çalışmalarına hız verilmelidir. Geçmişten günümüze kadar kentsel dönüşüm ile ilgili birçok yasal mevzuat hazırlanmış ve yürürlüğe

girmiştir. Bu çalışmada 5393 Sayılı Belediye Kanunu'nun 73. Maddesi ve bağlı maddeler ile 6306 Sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun hükümlerinin daha önce hazırlanmış olan kanunlara göre çok daha uygulanabilir ve teşvik edici/destekleyici olması sebebiyle bu iki kanun karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki kanunda yer alan rezerv yapı alanı ve riskli alan uygulamaları ile hem yerel idarelerin hem de bakanlığın hareket alanını rahatlatmaktadır. Ayrıca kira yardımları ve harç muafiyetleri ile arsa sahipleri, yatırımcı, müteahhit ve yerel idareler ekonomik açıdan avantajlar yakalamaktadır. Kentsel dönüşüm uygulamalarında Bakanlık ve TOKİ gücü ile yerel idarelere merkezi yönetimin sağlamış olduğu avantajlar yansımaktadır. Bu duruma karşın, 5393 sayılı Belediye Kanunu'nun ilgili hükümlerine göre yapılan/yapılacak olan belediye Kentsel Dönüşüm ve Gelişim Alanları kararlarının ve uygulamalarının önü, Belediye Meclis kararları ile tıkanabilmektedir. Bu nedenlerle, 6306 sayılı Kanun hükümlerinin, 5393 sayılı Kanun hükümlerine göre uygulamada çok daha avantajlı ve sürdürülebilir durumdadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- AFAD. (2018). *TÜRKİYE'DE AFET YÖNETİMİ VE DOĞA KAYNAKLI AFET İSTATİSTİKLERİ*. [https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye\\_de\\_afetler.pdf](https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/35429/xfiles/turkiye_de_afetler.pdf)
- Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun (6306 S.K.), Resmi Gazete, 28309 (Mayıs 2012), (2012).
- Akman, E., CAN, Y., Yalçın, Ö. (2018). Bir Politika Uygulaması Olarak Kentsel Dönüşüm : Devlet Destekleri Çerçevesinde Bir Değerlendirme. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22, 2987–3009.
- Belediye Kanunu (5393 S.K.), Resmi Gazete, 25874 (Temmuz 2005)", (2005).
- Çelik, K. (2017). Kentsel Dönüşüm Alanlarının Seçimi ve Dönüştürülmesine Yönelik Örnek Bir Uygulama. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 221–235.
- Ertaş, M., Bayındır, Ö. (2020). Sürdürülebilir Kentsel Dönüşüm. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 2(1), 01–09.
- Gecekondu Kanunu (775 S.K.)", Resmi Gazete, 12362 (Temmuz 1966), Pub. L. No. 775, 2626 (1966).
- İmar ve Gecekondu Mevzuatına Aykırı Yapılara Uygulanacak Bazı İşlemler ve 6785 Sayılı İmar Kanunu'nun Bir Maddesinin Değiştirilmesi Hakkında Kanun (2981 S.K.), Resmî Gazete, 18335 (Mart 1984), (1984).
- Inter-Agency Standing Committee and the European Commission. (2020). *Inform Report 2020: Shared evidence for managing crises and disasters*. <https://doi.org/10.2760/87854>
- KENTSEV. (2021). *İstanbul'da 7,5'lik depremde 491 bin bina hasar görecektir*. <https://kentsev.org.tr/istanbulda-75lid-depremde-491-bin-bina-hasar-gorecek/> Ziyaret Tarihi: 18.05.2022
- Kuzey Ankara Girişi Kentsel Dönüşüm Projesi Kanunu (5104 S.K.), Resmi Gazete, 25400 (Mart 2004), (2004).
- Özel, Z., Yalçın Ercoşkun, Ö. (2019). Kentsel Dönüşüm Strateji Belgelerinde Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi: Kilis Örneği. *Resilience*, 3(2), 183–200. <https://doi.org/10.32569/resilience.598083>
- Tan, O., Tapırdamaz, M. C., Yörük, A. (2008). The earthquake catalogues for Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(2), 405–418.
- Tezcan, S., Zengin Çelik, H. (2017). İzmir Büyükşehir Belediyesi Tarafından Uygulanan Kentsel Dönüşüm Projeleri Üzerine Bir İnceleme. *Belediyelerin Geleceği ve Yeni Yaklaşımlar*. Cilt 3, Editör: Güler, M. ve Turan, A. M., (1. baskı, ss. 72–95).
- TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası. (2017). *Kentsel Dönüşüm Dönüşüm Nedir?* (N. Ersan, C. Gökçe, A. Emekli, E. Balcıoğlu, H. Çak, V. Bakar, ve Ş. Altan (ed.); 4. baskı). <https://izmir.imo.org.tr/Eklenti/7387,178775456pdf.pdf?0>
- Tosun, E. (2019). *Türkiye'de Kırdan Kente Göçün Nedenleri ve Sonuçları*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15505.99688>
- TÜİK. (2022). *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2021*. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2021->



45500. Ziyaret Tarihi: 20.05.2022

Uslu, G., Uzun, B. (2014). Kentsel Dönüşüm Projelerinde Deprem Etkisi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 1–11.

Varol, A. (2019). Afet Yönetimi, Afet Eğitimi Ve Afet Farkındalığı: Amerika Örneği. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 193–204. <https://doi.org/10.18069/firatsbed.538678>



## TRANSFORMATÖR-TABANLI EVRİŞİMLİ SİNİR AĞI MODELİ KULLANARAK TWITTER VERİSİNDE SALDIRGANLIK TESPİTİ

Erdal ÖZBAY

*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE*  
[erdalozbay@firat.edu.tr](mailto:erdalozbay@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 23.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.10.2022)

**ÖZ:** Çevrimiçi ortamlar, insanların sosyal etkileşimlerinde anti-sosyal davranışların artmasını kolaylaştırmaktadır. Sosyal medya kullanımının yaygınlaşmasıyla özellikle son yıllarda nefret söylemleri, siber zorbalık ve trolleme gibi davranışlar önemli ölçüde artmıştır. Saldırgan ve nefret içerikli söylemlerin tespiti siber zorbalıkların azaltılması ve engellenmesinde önemli bir adımdır. Siber zorbalık, sosyal medya üzerinden nefret dolu, saldırgan, kaba, aşağılayıcı ve alaycı ifadeler kullanarak diğer bireylere zarar vermek adına yapılan yorumlar olarak adlandırılmaktadır. Hızla büyüyen verilerin varlığı, bunun insan denetimiyle gerçekleştirilmeye çalışılması yavaş ve pahalı olduğundan saldırganlığın otomatik tespitiyle siber zorbalığın durdurulması sağlanabilir. Bu çalışmada Twitter veri seti olan Cyber-Trolls üzerinden saldırganlık tespitini otomatik olarak belirlenmesi ele alınmaktadır. LMTweets adında bir kodlayıcı, veri kümesinin özelliklerinin çıkarılması için 20001 adet tweet üzerinden eğitilmiştir. Çıkarılan öznitelikler, metni saldırgan / saldırgan olmayan olarak sınıflandırmak üzere evrişim sinir ağı modeline girdi olarak verilir. Ayrıca Naïve Bayes, Destek Vektör Makinesi, K-En Yakın Komşu, olmak üzere üç sınıflandırma algoritması uygulanmıştır. Bunun yanında, Evrişimli Sinir Ağı, Uzun Kısa-Süreli Bellek ve Kapılı Tekrarlayan Birim üç öğrenme algoritması ile birlikte BERT, XLNet ve ULMFIT olmak üzere üç transformatör modeli uygulanmıştır. Önerilen modelde Python, Keras API ve Tensorflow birlikte kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda elde edilen performans parametreleri doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F<sub>1</sub>-ölçütü ve AUC olarak belirlenmiş ve LMTweets + CNN modelinin kullanılan tüm modeller arasında daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Saldırganlık, CNN, Derin Öğrenme, Twitter, Transformatör Modeller

### Aggression Detection in Twitter Data Using Transformer-Based Convolutional Neural Network Model

**ABSTRACT:** Online environments facilitate the increase of anti-social behaviors in people's social interactions. Behaviors such as hate speech, cyberbullying, and trolling have increased significantly, especially in recent years, with the widespread use of social media. Detection of aggression and hateful speech is an important step in reducing and preventing cyberbullying. Cyberbullying is defined as comments made on social media to harm other individuals by using hateful, offensive, rude, humiliating, and sarcastic expressions. It is slow and expensive to try to achieve this with human control with the existence of rapidly growing data, so cyberbullying can be stopped by automatic detection of aggression. In this study, the automatic determination of aggression detection via Cyber-Trolls, which is the Twitter dataset, is discussed. A coder named LMTweets was trained on 20001 tweets to extract the features of the dataset. The extracted features are given as input to the convolutional neural network model to classify the text as aggressive / non-aggressive. In addition, three classification algorithms, namely Naïve Bayes, Support Vector Machine, K-Nearest Neighbors, were applied. In addition, three transformer models, BERT, XLNet, and ULMFIT were applied along with the Convolutional Neural Network, Long Short-Term Memory, and Gated Recurrent Unit three learning algorithms. Python, Keras

API, and Tensorflow are used together in the proposed model. The performance parameters obtained in the experimental results were determined as accuracy, precision, recall, F1-score, and AUC, and it was revealed that the LMTweets + CNN model performed better among all the models used.

**Keywords:** Aggression, CNN, Deep Learning, Twitter, Transformer Models

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Web son birkaç yıl öncesinden itibaren salt okunur bir platform olmaktan çıkıp kademeli olarak kullanıcılar tarafından oluşturulan bir web'e evrimleşmiştir. Kullanıcı yorumları bazı çevrimiçi forum, blog ve sosyal medya web sitelerinde yayınlanmakta ve diğer kullanıcılar ile etkileşime girmektedir. Erişim kolaylığı ve çevrimiçi topluluğun büyümesi küresel iletişimin artışına neden olmuştur. Günümüzde, Twitter ve Facebook gibi sosyal medya platformları aracılığıyla çeşitli ürünler, hizmetler ve bilgi birikimleri küresel olarak insanlarla paylaşılabilir hale gelmiştir. Ancak bu özgürlük beraberinde büyük bir risk doğurmaktadır. İnsanlar paylaştığı çok daha az kişisel bilgiyle veya anonim olarak çeşitli yorumlarda bulunup saldırgan bir tutum sergileyebilmektedir (Grigg ve diğ., 2010).

Çeşitli sosyal medya platformlarındaki siber zorbalığın etkisinin artmasındaki en önemli neden güvenlik açıklarıdır (Smit ve diğ., 2015). Bunun yanında, sahte kimliklerin varlığı ve online hesaplardaki anonimlik, saldırganlığın kontrol edilemez bir hızla artmasına sebep olmuştur. Bu olaylar milyonlarca insanın hayatını psikolojik veya zihinsel travmalarla etkilemenin yanında kişilerin intihar etmesine kadar gitmektedir. Siber saldırganlık, kişilere kasıtlı olarak zarar vermeyi hedefleyen, bir birey veya grubun elektronik ortamda saldırgan, istenmeyen veya zararlı olmak üzere tekrarlanan düşmanca davranışlar olarak nitelendirilmektedir (Grigg ve diğ., 2010). Saldırganlık, cinsiyet, ırk, renk, milliyet, etnik köken ve din gibi özellikler temelindeki nefret söylemlerini içermektedir (John ve diğ., 2000).

Günümüzde Twitter üzerindeki aktif bir kullanıcı günde ortalama 500 milyon tweet ile çeşitli hizmetler, ürünler ve devlet politikaları ve şirketler/kuruluşlar, politikacılar için ana inceleme / öneri / geri bildirim bakımından etkileşimde bulunmaktadır. Pazar payını artırmak ya da güncel politikalar tasarlayabilmek adına gerekli adımları atabilmeleri için sosyal medya üzerinden mevcut görüşlerin analizine başvurulur. Twitter kullanıcıları görüşlerini, tweet adı verilen 280 karakter uzunluğunda kısa mesajlar vasıtasıyla iletmektedir. Tweetler, gerçek (literal) veya mecazi / gerçek olmayan (non-literal) tweetler olmak üzere iki ayrı sınıfta değerlendirilmektedir (Abulaish ve diğ., 2020). Mecazi ifadeler insanların düşüncelerini yanıltmak amacıyla yazılmış aslında yazıldığı gibi olmayan ifadelerdir. Gerçek tweetlerin duygu analizi, yorumlarda standart kelimeler bulunduğundan daha kolaydır. Ancak gerçek olmayan tweetlerin duygu analizi yorumlardaki mecazi dilin varlığı nedeniyle nispeten zordur. Figüratif dil, fikir ve düşüncelerin, gramer ve mantıksal ifade tarzlarının dışındaki türevleriyle, canlılık ve güçle aktarılması olarak tanımlanmaktadır (Hepburn, 1875).

Sosyal medya üzerinde günlük tüketilen veri miktarı her geçen gün artmakla birlikte çok büyük bir veri birikimi oluşmaktadır. Saldırganlık içeren davranışların tespitini elle işletilerek (manual) gerçekleştirmek büyük veri dezavantajından dolayı pratik değildir. Bu durum bizleri otonom veya yarı otonom sistemleri geliştirmeye yöneltmektedir. Saldırganlık önleyici tedbirler her ne kadar sosyal medya ağı ve devletler aracılığıyla alınmaya çalışılsa da bu davranışların azaltılması adına etkili çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorun Twitter'da çeşitli doğal dil işleme araçları, metin madenciliği ve çeşitli makine öğrenmesi yaklaşımları ile giderilmeye çalışılsa da dilbilgisi ve sözdizimsel kusurlar ile birlikte kısa tweet uzunluklarının varlığı nedeniyle özniteliklerin çıkarılmasında zorluklar yaşanmaktadır (Van der Walt ve diğ., 2018). Sosyal medyada tacizci kullanıcıları filtrelemek zorlu bir görev olabilir çünkü trolleme ya da alaycılık gibi yollarla saldırganlık ve zorbalık göstermenin farklı yolları bulunmaktadır. Çevrimiçi sosyal medyadaki mecazi dil kategorilerinden bazıları alaycılık, ironi, benzetme, metafor, hiciv, komedi ve abartıdır (Joshi ve diğ., 2017).

Doğal dil işleme görevleri arasında saldırganlık tespiti önemlidir ve temel adımı metni işleyerek nihai hedefe göre analiz etmek ve beklenmedik bir şekilde bilgi çıkarmaktır. Günümüzde metin sınıflandırma, Makine öğrenmesi sınıflandırıcılarında en iyi özellik çıkarımı hakkında bilgi talep

etmektedir. Bir cümleyi kelime torbası kullanarak örnekleme, ardından Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine - SVM) veya Naïve Bayes (NB) aracılığıyla sınıflandırma yapmaya yönelik çok geleneksel yöntemler bulunmaktadır (Joachims ve diğ., 1998). Ancak yüz ifadesi ve ses tonu olmadan bu duyguları anlamak zordur. Metinsel verilerden duyguları anlamının bu zorluğu aynı zamanda sınıf dengesizliğinden, Twitter'da sınırlı metin uzunluklarından, internet argosunun kullanımından, alaycılık ve doğal dil belirsizliklerinden de kaynaklanmaktadır. Ancak sağlam derin öğrenme algoritmaları ile bu sorunun üstesinden gelinebilir. Özellikle son birkaç yıldır Evrişimli Sinir Ağı (Convolutional Neural Network - CNN) büyük veri kümeleri için karmaşık modeller geliştirmede büyük ilerleme kaydetmiştir. Derin Sinir Ağı (Deep Neural Network - DNN) teknikleri, sınıflandırmada öznelilik çıkarma yöntemlerini hayata geçirmektedir. Bir belgedeki kelime dizileri, DNN yöntemlerinde ağırlıkla çarpıldıktan sonra sıcak vektörler (hot vectors) olarak temsil edilmektedir. Girdi aldıktan sonra, sinir ağları sıcak vektörleri sıralı gizli katmanlarla besleyerek tahminlerde bulunmaktadır (Shen ve diğ., 2014). Sinir ağı modelleri, Çok-katmanlı Algılayıcı (Multi-layer Perceptron - MLP), CNN, Tekrarlayan Sinir Ağı (Recurrent Neural Network - RNN) ve bunların türevleri, doğru modeli seçerek ve hiper parametre ayarları ile metin sınıflandırmasında sağlam sonuçlar elde etmektedirler.

Bu çalışmada Twiter metin verileri üzerinden saldırganlık tespiti ele alınmaktadır. Transformatörlerden çift yönlü kodlayıcı temsilleri (Bidirectional Encoder Representations from Transformers - BERT) tabanlı mimariye dayalı Linguistics-Models (LMTweets) adlı alana özgü bir transformatör modeli önerilmektedir. LMTweets, bir dizi bağlamsal yerleşim oluşturmak ve dizideki her bir kelime için bir öz-dikkat mekanizması aracılığıyla bağlamsal bilgiyi elde etmede kullanılmaktadır. LMTweets tarafından oluşturulan bu kelime yerleştirmeleri, metni sınıflandırmak için CNN'e iletilmektedir. Literatürdeki mevcut çalışmaların dezavantajları arasında; esas olarak büyük veri kümeleri ile çalışmaları, modellerini kıyaslamada veri kümeleri yerine uygulama programlama arayüzü kullanarak oluşturdukları veri kümeleriyle deneysel sonuçları elde etmeleridir (Kumar ve diğ., 2019). Bu nedenlerle onların modellerini karşılaştırmak ve değerlendirmek pek sağlıklı değildir. Birçok yaklaşım, kelimeleri büyük sözlükler içerisinde aramaktadır, bu durum daha fazla zaman harcanmasına neden olduğundan pratik değildir (Potamias ve diğ., 2019). Bu çalışmada metin ön işlemenin gerekli olmadığı, alana özgü transformatör tabanlı bir kodlayıcı geliştirerek bu sınırlamaları kaldırmaktayız.

Bu çalışmamızın başlıca katkıları şöyledir; CNN ile LMTweets adlı bir model önerilerek Twitter veri kümesinde saldırganlık tespiti performansı iyileştirilmektedir. Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve transformatör tabanlı olmak üzere farklı modeller ile önerilen yöntemin performansı veri seti üzerinde test edilerek kıyaslanmaktadır. Önerilen model (LMTweets + CNN), literatürde sunulan modellerden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Makalenin geri kalan kısımları şöyle düzenlenmiştir; 2. bölümde konuyla ilgili çalışmalara, 3. bölümde önerilen yöntemin açıklanmasına, 4. bölümde deneysel sonuçlar ve tartışmaya, 5. bölümde sonuçlara yer verilmiştir.

## İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORKS)

Sosyal medyada nefret ifadeleri, saldırganlık ve zorbalık gibi tüm davranışlar trolleme olarak ifade edilmektedir. Bir metin içerisinde saldırganlığı ele almak karmaşık bir olgudur ve birçok alanda bu konuyla ilgili çözüm yolları ortaya konmuştur. Bilimsel topluluklarda saldırganlığı temsil etmek için farklı terminolojiler kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan biri olan siber zorbalık Dinakar ve diğ. tarafından modellenmiştir (Dinakar ve diğ., 2012). Bunun yanında, trolleme (Mihaylov ve diğ., 2015), ırkçılık (Greevy ve diğ., 2004), müstehcenlik (Su ve diğ., 2017), aşırılık (Prentice ve diğ., 2011), hakaret (Bansal ve diğ., 2012), küfürlü dil (Mubarak ve diğ., 2017) ve nefret söylemi (Schmidt ve Wiegand, 2017) gibi konularda da mevcut yaklaşımlar ortaya konmuştur.

Semeval-2019 etkinliğindeki katılımcıların İngilizce ve İspanyolca Twitter mesajlarından geleneksel makine öğrenmesi ve çoğunlukla derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak kadın ve göçmenlere yönelik nefret söylemlerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Basile ve diğerlerinin çalışmasında girdi olarak

kullanılan tweet'lerde önceden eğitilmiş kelime gömme (word embedding) ve model olarak RNN tercih edilmiştir (Basile ve diğ., 2019).

Sözlü saldırganlık, açık veya gizli saldırganlık olarak ifade edilebilmektedir. Açık saldırganlık bazı sözdizimsel yapılar tarafından doğrudan ifade edilirken, gizli saldırganlık dolaylı bir saldırı şeklindedir. Coling-2018'de saldırganlığın belirlenmesinde, kullanıcı gönderilerinin saldırganlık düzeylerini sınıflandırmak için trollük, saldırganlık ve siber zorbalık konulu bir çalıştay yapılmıştır. Bu görev için sınıflandırıcı, açık saldırganlık, gizli saldırganlık ve saldırgan olmayan metinler arasında ayırım yapmaktadır. Veri seti olarak saldırganlık açıklamalı 15000 adet Facebook yorumu veya gönderisi kullanılmıştır. Geliştirilen sistemlerin performansları, saldırganlık tespitinin zorlu bir görev olduğunu ortaya koymaktadır (Kumar ve diğ., 2018). Otomatik saldırganlık ve siber zorbalık algılama / sınıflandırma problemlerinde, çevrimiçi kullanıcı yorumları ve metinleri çoğunlukla zorbalık ve zorbalık dışı olarak ayırt edilmektedir (Salawu ve diğ., 2017). Salawu ve diğ. bir sosyal medya veri akışındaki bireysel saldırgan mesajların belirlenmesi, saldırganlığın ciddiyetinin değerlendirilmesi, ilgili bireylerin rollerinin belirlenmesi ve saldırganlık olayının bir sonucu olarak meydana gelen olayların sınıflandırılması gibi siber zorbalık tespitindeki dört farklı görevi içeren bir çalışma ortaya koymuşlardır (Salawu ve diğ., 2017).

Siber zorbalığın otomatik tanımlanmasında birinci adım olarak saldırganlık tespitini içermektedir. Chatzakou ve diğ. tarafından yapılan bir çalışmada Twitter üzerindeki zorbalık ve saldırganlık içeren davranışlar gösterilmektedir (Chatzakou ve diğ., 2017). Önerilen yaklaşımda üç aylık süreçle edinilen 1,6 milyon tweet üzerinden deney sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Kullanıcı tabanlı, metin tabanlı ve ağ tabanlı özelliklerle makine öğrenmesi algoritmasını kullanarak %90 Eğri Altında Kalan Alan (Area Under Curve - AUC) elde etmişlerdir. Kullanıcı söylemlerini kabadayı, saldırgan, spam ve normal kullanıcılar olarak sınıflandırmışlardır. Saldırganların diğer gruplar arasında en popüler olduğunu ve nefret dolu yorumlar ve troller yayınlamaları olumsuzlukları yaydıklarını ortaya koymuşlardır.

Bir diğer çalışmada Nobata ve diğ. Yahoo!'nın 2 milyon çevrimiçi yorumundaki nefret söylemini tespit etmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada finans ve haber içeriklerinden dilbilimsel, sözdizimsel, n-gramlar ve gömülü anlamsal özellikler bakımından dört tür özellik dikkate alınmıştır. Buradaki yorumlar ve sayıları normalleştirilerek, bilinmeyen sözcükler aynı simgeyle değiştirilerek, tekrarlanan noktalama işaretleri değiştirilerek ön-işlenmiştir. Deneysel sonuçlar, tüm özelliklerin birleştirilmesinin en iyi F-ölçütü sonuçlarını elde ettiğini göstermiştir (Nobata ve diğ., 2016). Benzer şekilde, Chavan ve diğ. saldırganlık ve saldırganlık içermeyen yorumları ayırt etmek üzere seçilen özellikleri, TF-IDF ağırlıklı n-gramlar, ve zamirler içermekteydi. Chavan ve diğerlerinin yaptığı çalışmada yalnızca en yüksek 3000 adet özellik seçilmiştir. Deneysel sonuçlar, içeriği belirsiz bir siteden gelen yaklaşık 6500 yoruma dayanmaktadır. Yorumlardaki kelime sayılmayacak karakterler, kısa çizgiler ve noktalama işaretleri kaldırılarak ön-işlenmiştir. Beraberinde, olası yazım hatalarını düzeltmek adına bir yazım denetleyicisi uygulanmıştır. Deneyler, zamirler ve atlama gramları dikkate alındığında en iyi performansın elde edildiğini göstermiştir (Chavan ve diğ., 2015).

Karakter düzeyinde metin sınıflandırması Xiao ve diğ. tarafından üst düzey özellikleri öğrenmek için CNN ve RNN kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Xiao ve diğ., 2016). Benzer bir görevi Tai ve diğ. metin anlambilimini geliştirmek için Uzun Kısa-Süreli Bellek (Long Short-Term Memory - LSTM) ile cümle düzeyinde gerçekleştirmiştir (Tai ve diğ., 2015). Tai ve diğerlerinin önerdiği CNN, cümlelerdeki ardışık sıradaki ifadelerden veya kelimelerden yerel özellikleri çıkarmaktadır. Tweet sayısı, takipçi sayısı ve kullanıcı sözleri gibi metinsel özellikler, saldırganlığın otomatik tespitini geliştirmektedir (Al-Garadi ve diğ., 2016). Kullanıcıların kişilik özellikleri ayrı ayrı birleştirilmesinde Rastgele Orman (Random Forest - RF) kullanılarak siber saldırganlığın daha iyi tespit edilebildiğini ortaya koymuşlardır (Balakrishnan ve diğ., 2019). Balakrishnan ve diğerleri çalışmalarında Big-Five ve Dark-Triad modellerini kullanmışlardır. Saldırgan, spam gönderen, zorba ve normal olmak üzere dört farklı rolü ele alarak kullanıcı kişiliği ile siber saldırganlık tutumu arasında güçlü bir ilişki olduğunu kanıtlamışlardır.

Doğal dil işleme görevleri de DNN tabanlı modeller tarafından gerçekleştirilmektedir. Saldırganlık tespiti önem kazandıkça bu sorun da derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak çözülmeye

çalışılmaktadır. Gambäck ve Sikdar tarafından nefret söylemini sınıflandırmak için derin öğrenme yaklaşımı olan Max-Pooling'li CNN'den faydalanılmıştır (Gambäck ve Sikdar, 2017). Karakter n-gramları ile kelime vektörleri öznitelik olarak kullanılmıştır. Madisetty ve Desarkar tarafından CNN, LSTM ve Çift-Yönlü (Bi-LSTM) birleştirilerek topluluk yöntemi (çoğunluk oyu) kullanılmıştır (Madisetty ve Desarkar, 2018). Deneysel sonuçlarını Facebook ve sosyal medya yorumları üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Sosyal medya gönderilerindeki saldırganlığın otomatik tespitinde CNN, LSTM, Bi-LSTM, LSTM-CNN, CNN-LSTM, Bi-LSTM-CNN, CNN-Bi-LSTM olmak üzere yedi derin öğrenme modeli ile farklı deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre LSTM'e dayalı sınıflandırıcı, en iyi ağırlıklı F<sub>1</sub> ölçütü olarak 0,6425 değerini elde etmiştir (Aroyehun ve Gelbukh., 2018).

Literatürde birçok çalışmada Twitter verileri kullanılarak saldırganlık ve türevlerinin tespitinde makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. RF, SVM, NB ve Lojistik Regresyon (LR)'un Twitter'da saldırganlığın tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan algoritmalar olduğu ortaya konmuştur (Farías ve diğ., 2018, Chia ve diğ., 2019, Sarsam ve diğ., 2020). Bununla birlikte yine birçok çalışmada transformatör tabanlı yaklaşımlar ele alınmıştır. Bunlardan birinde metin gösterimi için RoBERTa transformatör modeli kullanılmış ve metnin sınıflandırılması için Bi-LSTM modeli bunun üzerine uygulanmıştır. Önerilen model dört farklı veri kümesine uygulanmış ve NB, SVM, XLNet, Bert-tabanlı, RoBERTa, ELMo ve Fast-Text olmak üzere çeşitli modellerle karşılaştırılmıştır (Potamias ve diğ., 2020). Avvaru ve diğ. Twitter ve Reddit'te LSTM modellerinin (LSTM, yığılmış (stacked) LSTM, Bi-LSTM ve CNN-LSTM) ve BERT ve XLNet transformatör modellerinin çeşitli versiyonlarını uygulamışlardır (Avvaru ve diğ., 2020). Bir başka çalışmada ise Twitter ve Reddit veri kümelerinde alaycılığın tespit edilmesi için LSTM modeli, BERT, XLNet, ALBERT ve RoBERTa gibi çeşitli transformatör modelleri ile birleştirilmiştir. Transformatör topluluğu modelinin uygulanan tüm modellerden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Gregory ve diğ., 2020). Mevcut çalışmaların özeti Çizelge 1'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Khan ve diğ.'nın 2022 yılında yaptığı bir çalışmada, saldırganlık tespiti için Cyber-Troll veri kümesi kullanılarak word embedding ve sekiz farklı duygusal özelliğin birleşimiyle oluşan beslemeyle yürüttükleri DNN ile 97% F<sub>1</sub> ölçütü sonucunu elde etmişlerdir (Khan ve diğ., 2022). Aynı yıl yapılan bir diğer çalışmada, sosyal medya üzerinden saldırganlık tespiti için CNN ve Bi-LSTM ve olmak üzere iki farklı sınıflandırmanın kullanıldığı bir derin öğrenme modeli önerilmiştir (Pareek ve diğ., 2022).

Başka bir çalışmada, Bengalce'deki saldırgan metinleri tanımlamak ve sınıflandırmak için temel sınıflandırıcılar olarak m-BERT, distil-BERT, Bangla-BERT ve XLM-R'yi içeren ağırlıklı bir topluluk tekniği önerilmiştir. Bu çalışmada %93.43 ile en yüksek F<sub>1</sub> ölçütü sonucuna ulaşılmıştır (Sharif ve Hoque., 2022).

**Çizelge 1.** Siber Saldırganlık / Zorbalık tespiti çalışmaları*Table 1. Cyber Aggression / Bullying detection studies*

| Yazar                       | Yöntem           | Veri Kümesi    | Özellik Gösterimi              |
|-----------------------------|------------------|----------------|--------------------------------|
| Tulkens ve diğ., 2016       | SVM              | Yahoo!         | Sözdizimsel, anlamsal, gömme   |
| Al-Garadi ve diğ., 2016     | NB, RF , KNN     | Manual tweet   | Ağ, aktivite ve kullanıcı      |
| Saravananaraj ve diğ., 2016 | NB ve RF         | Tweet          | Word2vec                       |
| Djuric ve diğ., 2015        | NL modeli        | Yahoo!         | Paragraph2vec                  |
| Chatzakou ve diğ., 2017     | RF               | Rastgele tweet | Kullanıcı, metin ve ağ tabanlı |
| Balakrishnan ve diğ., 2019  | RF               | Twitter        | Big-five and dark-triad        |
| Gambäck ve Sikdar, 2017     | CNN              | Tweet          | Word2vec, character, 4-gram    |
| Davidson ve diğ., 2017      | LR-L2 reg        | Rastgele tweet | TF-IDF                         |
| Risch ve Krestel., 2018     | LR ve SA         | Facebook post  | Gömme, n-gram, sözdizimsel     |
| Aroyehun ve Gelbukh, 2018   | CNN,LSTM,Bi-LSTM | Facebook post  | Fast-Text model                |
| Khan ve diğ., 2022          | DNN              | Twitter        | TF-IDF, Word2Vec               |

Özet olarak literatürdeki mevcut çalışmalarda yazarlar, çevrimiçi saldırganlık tespiti için çeşitli makine öğrenmesi, derin öğrenme, topluluk yöntemleri ve önceden eğitilmiş transformatör modellerini kullanmışlardır. Etki alanına özgü veriler için hiçbir çalışmada transformatör modelleri eğitilmemiştir. Alana özel metinle ilgili olarak burada önerilen transformatör modeli, saldırganlık algılama performansını iyileştirebilmektedir. Bu boşluğu gidermek için, verileri sayısal değerlere dönüştürmede yalnızca sosyal medya metnine dayalı bir LMTweets dönüştürücü (kodlayıcı) modeli hazırlanmıştır. Daha sonra bunları saldırgan / saldırgan olmayan olarak sınıflandırmak için CNN modeli uygulanmıştır.

#### MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Sosyal medya kullanıcı telaffuzlarında, argo, kaba sözler ve gerçek olmayan kelimelerin yaygın olarak bulunması nedeniyle saldırganlık içeriklerinde, metafor gibi mecazi bir dil kullanımı yaygındır. Bu nedenle bu çalışmada en çok kullanılan sosyal medyalarından en önde geleni Twitter veri seti kullanılmıştır. Bu bakımdan önce deneyler için kullanılan veri seti sunulmakta, ardından önerilen mimarinin uygulaması ve tüm parametre ayarları tartışılmaktadır. Daha sonra, deneysel sonuçlar ve tartışmayı ele almaktayız, ardından önerilen yaklaşım saldırganlık tespiti alanındaki en gelişmiş metodolojiler ile karşılaştırılmaktadır.

#### Cyber-Trolls Veri Seti (Cyber-Trolls Dataset)

Cyber-Trolls veri seti, Data Turks tarafından metin sınıflandırma amacıyla oluşturulmuştur. Saldırgan trollere yardım etmek veya onları önlemek için tweet'leri saldırgan veya saldırgan olmayan olarak sınıflandırmada kullanılan bir veri setidir. Kaggle platformu üzerinden genel paylaşıma açık olan bu veri setinde iki ayrı kategoriden oluşmaktadır:

- Siber Saldırgan (SS) - 1
- Siber Saldırgan Olmayan (SSO) - 0

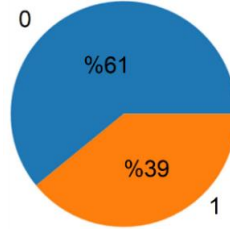
Veri kümesi, Çizelge 2'de gösterildiği gibi 7822'si Siber Saldırgan ve 12179'u Siber Saldırgan Olmayan olmak üzere toplamda 20001 adet tweet'e sahiptir. Şekil 1'de tüm veri setinin pasta olarak gösterildiği üzere Siber Saldırgan tweet oranı %39 ve Siber Saldırgan Olmayan tweet oranı %61'dir. Bu veri kümesi elle işletilmiş insan etiketli bir veri kümesidir. Siber Saldırgan: Tweet'in içeriği (kelimeleri) siber saldırganlık davranışı göstermektedir. Sosyal medya kullanıcılarından birinin, başkalarına zarar verme veya hakaret etme niyetiyle olumsuz anlamlar içeren paylaşımlarda bulunduğu anlamına

gelmektedir. Siber Saldırgan Olmayan: Tweet'in içeriği (kelimeleri) siber saldırganlık davranışı göstermemektedir. Kullanıcının, başkaları için olumsuz bir anlamı veya hakareti olmayan yorumlarını yayınlamaktadır.

**Çizelge 2.** Cyber-Troll veri kümesi

*Table 2. Cyber-Troll Dataset*

| Veri Seti    | Toplam Tweet | Siber Saldırgan - 1 | Siber Saldırgan Olmayan - 0 |
|--------------|--------------|---------------------|-----------------------------|
| Cyber-Trolls | 20001        | 7822                | 12179                       |

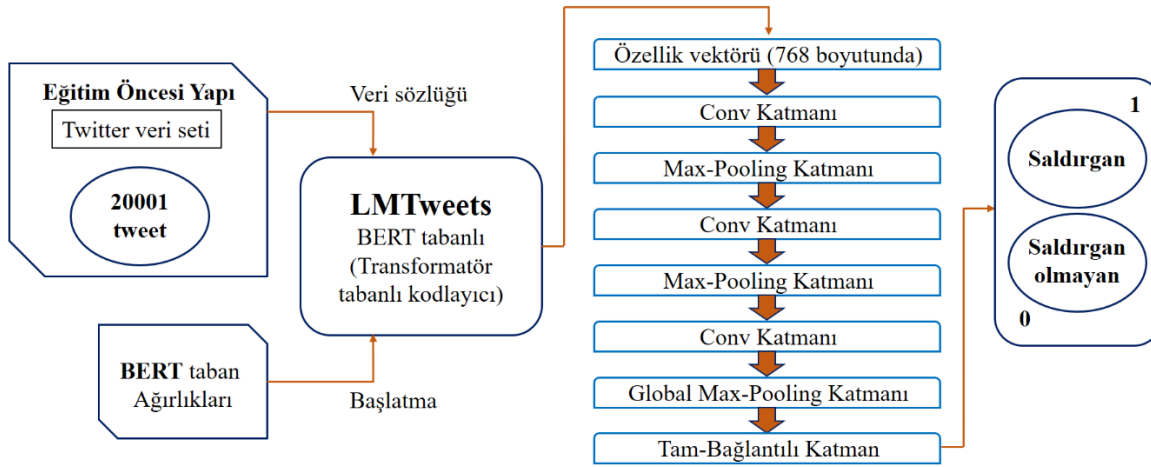


**Şekil 1.** Cyber-Troll veri kümesi dağılımı

*Figure 1. Cyber-Troll dataset distribution*

### Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Önerilen yöntem bu bölümde açıklandığı üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Önerilen modelin mimarisine Şekil 2'de yer verilmiştir.



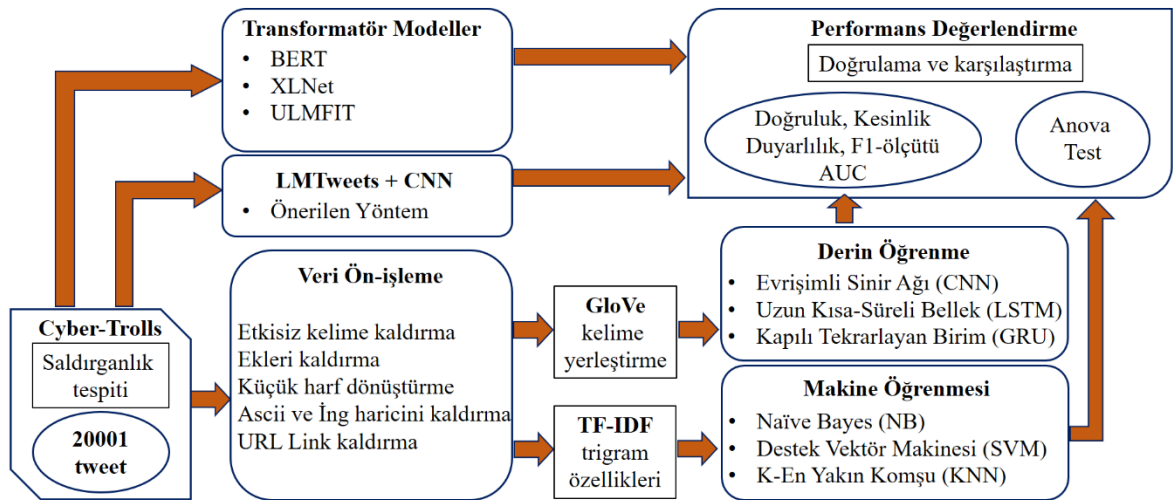
**Şekil 2.** Önerilen yöntemin LMTweets mimarisi

*Figure 2. LMTweets architecture of the proposed method*

İki aşamadan oluşan önerilen yöntemin mimarisinin ilk aşamasında LMTweets modelinin tasarlanması yer almaktadır. Bu aşamada yer alan LMTweets, yalnızca çok katmanlı transformatör tabanlı çift yönlü dil modeli olan bir kodlayıcıdan oluşmaktadır. Bu yaklaşım bir bakıma BERT mimarisine benzeşmektedir. BERT, İngilizce Wikipedia ve Books Corpus'un genel bilgi külliyatı üzerinden önceden eğitildiğinden, sosyal medya, tıbbi ve bilimsel metinler gibi alana özgü görevlerde genellikle düşük performans göstermiştir. Bu durum kısmen, alana özgü ve genel belgeler arasındaki sözcüklerdeki, tümceciklerdeki ve diğer dilsel özelliklerdeki büyük farklılıklardan kaynaklanmaktadır. LMTweets temel modelinin eğitimi için 20001 tweet kullanılmıştır. BERT tarafından ima edilen ön eğitimin hedefi, bir sonraki cümlenin tahmin görevi ile birlikte maskeli bir dil modeli oluşturmaktır. Aynı konfigürasyonu kullanmak yerine, eğitim verilerini daha doğru bir şekilde tamamlayan farklı bir eğitim prosedürü kullanılmıştır. Temel model ilk olarak, BERT tabanlı kontrol noktaları ile başlatılmış



ve bu ön eğitim için başlangıç noktası olarak belirlenmiştir. Modelin konfiürasyonu şöyledir; transformatör block sayısı: 12, hidden layers: 768, self-attention heads sayısı:12. Sözcük boyutunun küçültülmesinde, sözcük dağarcığındaki sözcüklerin verimli bir şekilde işlenebilmesi için hızlı Bayt-Çifti Kodlayıcı (Byte-Pair Encoding - BPE) tokenizer kullanılmıştır. Ön eğitim aşamasında, BERT'deki gibi sözcükleri rastgele maskelemek yerine, maskeleme düzeninin rastgele metin parçaları için değiştirildiği ve ayrıca maskelenmiş belirteçlerin yüzdesinin %30 ile %50 aralığında değiştirildiği alternatif bir strateji kullanılmıştır. Daha düşük maskeleme aralıkları modelin dili anlama kapasitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Geniş maskeleme aralıklarında ise ön eğitim ve ince ayar görevleri arasında uyumsuzluklara yol açabilmektedir. Bu bakımdan cümlenin öğrenilmesi için sonraki cümle tahmini görevi cümle benzerliği göreviyle değiştirilmiştir. Bu durumda, bu iki cümlenin bağlamsallaştırılmış yerleştirmelerinin kosinüs benzerliği belirlenen bir eşik değerinin üzerinde seyrederse, çıktının '1' olacağı, aksi takdirde '0' olacağı bir ikili sınıflandırma görevi yerine getirilmiştir. Eşik değeri  $t$ 'nin 0,75 gibi yüksek bir değere ayarlanması, cümle benzerliği görevi için güvenilir tahminlerle sonuçlanacağını garanti etmektedir. Model, 20001 adım için 512 parti boyutu (batch-size) kullanılarak eğitilmiştir. Giriş metni 256 token uzunluğunda doldurulmaktadır. Derin öğrenme modellerini eğitmek için Olasılıksal Dereceli Azalma (Stochastic Gradient Descent - SGD) için bir yedek optimizasyon algoritması olan Adam kullanılmıştır. Adam optimize edicinin eğitim sırasında kullandığı hiper parametreler  $\beta_1=0,90$ ,  $\beta_2=0,80$  ve öğrenme oranı (learning rate) 0,0005'e ayarlanmıştır. Eğitim sırasında modelin otomatik olarak uyarlanabilmesi ve farklı bir ortalama ve varyansa sahip olacak şekilde kaydırılabilmesi için eğitilmiş ağırlık vektörleri uygulanmaktadır. Farklı örnekler arasındaki ortalama ve standart sapma bağımsız olarak hesapladığından, normalizasyonun parti boyutu boyunca ve dolayısıyla partideki diğer örneklerle bağlı olduğu şekilde gerçekleştirilir. BERT için önceden eğitilmiş ağırlıklar, transformatör kitaplığında bulunmaktadır. Bu görev için BERT uygulamasında önceden eğitilmiş ağırlıklar kütüphane içerisine dahil edilmiştir ve bu önceden eğitilmiş ağırlıklar, modelin veri kümesi üzerinde ince ayar yapabilmesi adına kullanılmıştır. Bu LMTweets modeli bir öz-dikkat mekanizması aracılığıyla bir dizi bağlamsal yerleştirme oluşturarak dizideki her bir kelime için bağlamsal bilgiyi almakta ve eğitim verilerinin sözdizimsel, sözcüksel ve anlamsal özelliklerini belirgin bir şekilde yakalamaktadır. Böylece önceki eğitim yinelemesi sırasında edinilen bilgiler aracılığıyla yeni görevlerde en iyi performansı gösterebilir.



Şekil 3. Saldırganlık tespiti için kullanılan metodoloji ve veri kümesi üzerinde analizi

Figure 3. The methodology used for aggression detection and analysis on dataset

Önerilen yöntemin ikinci aşaması olarak LMTweets'lerinin CNN modeliyle birleştirilmesi yer almaktadır. Eğitim ve değerlendirme setindeki tüm cümle çiftleri için LMTweet'lerden bağlamsallaştırılmış yerleştirmeler çıkarılmaktadır. Bunlar, son transformatör bloğunun son gizli

durumlarıdır ve bu, CNN modelinin girdisi olacaktır. Geliştirilen model, CNN içindeki yerel mekansal yapıyı kullanarak, yakındaki kelimelerin zamansal ilişkisini tanımlayabilmektedir, yani birlikte görünen kelimeler, ister saldırganlık ister duygu ifadeleri olsun, belirli bir türün tespiti için önemli bilgiler içermektedir. Bu şekilde CNN, elle işletilerek veya geleneksel özelliklerden daha üstün olan özellikleri öğrenebilmekte ve bu da mevcut yaklaşımlara kıyasla genelleme kabiliyetini artırmaktadır. Kullanılan CNN modeli, üç katmanlı (her biri 64 gizli birimden oluşan) ve filter-size'ı üç olan 1-B CNN'dir. Her CNN katmanından sonra filter-size=2 olan Max-Pooling katmanı uygulanmıştır. Son CNN katmanı, 128 unit'li tam-bağlantılı bir katmandır ve ikili çapraz entropi (binary cross-entropy) ile eğitilmiştir. Bu çalışmada, 0,003 learning rate oranına sahip Adam optimizer kullanılarak 10 dönem (epochs) için 256 batch-size kullanılmıştır.

---

#### Algoritma-1: LMTweets-CNN

---

**Girdi:** Veri seti (Metin)

**Çıktı:** Saldırgan / Saldırgan olmayan

1. her bir text  $t_i$  girdisi için;
    - Simgeleştirilmiş sözcük ( $S_{tokens}$ )  $\leftarrow t_i$  simgeleştirme
    - Sözcük temsili (boyut 768)  $\leftarrow$  LMTweets (Simgeleştirilmiş sözcükler)
  2. CNN ( $\ddot{O}_1$ )  $\leftarrow$  Her sözcük için sözcük temsili
  3. Max-Pooling ( $MH_1$ )  $\leftarrow$  CNN ( $\ddot{O}_1$ )
  4. CNN ( $\ddot{O}_2$ )  $\leftarrow$  Max-Pooling ( $MH_1$ )
  5. Max-Pooling ( $MH_2$ )  $\leftarrow$  CNN ( $\ddot{O}_2$ )
  6. CNN ( $\ddot{O}_3$ )  $\leftarrow$  Max-Pooling ( $MH_2$ )
  7. Global Max-Pooling (KMH)  $\leftarrow$  CNN ( $\ddot{O}_3$ )
  8. Dropout Katmanı (SK)  $\leftarrow$  Global Max-Pooling (KMH)
  9. Dense Katmanı (YK)  $\leftarrow$  Dropout Katmanı (SK)
  10. Olasılıklar ( $O_1$  ve  $O_2$ )  $\leftarrow$  Dense Katmanı (YK)
  11. eğer ( $O_1 \geq 0,5$ ) ise Saldırgan,  
değilse Saldırgan olmayan
- 

Önerilen model olan LMTweets + CNN'in çalışması Algoritma-1'de sözde kod olarak verilmiştir. Algoritma başlangıç sürecinde, tweet metinlerini girdi biçiminde almakta ve metnin saldırgan / saldırgan olmayan olup olmadığına bakılmaksızın çıktı üretmektedir. Algoritmada kullanılan sembollerden  $t_i$ : yorumları,  $S_{tokens}$ : sözcük belirteçlerini,  $\ddot{O}_1$ : CNN'in birinci katmanını,  $\ddot{O}_2$ : CNN'in ikinci katmanını,  $\ddot{O}_3$ : CNN'in üçüncü katmanını,  $MH_1$ : birinci Max-Pooling katmanını,  $MH_2$ : ikinci Max-Pooling katmanını, KMH: Global Max-Pooling katmanını, SK: Dropout Katmanını,  $O_1$ : Metnin saldırgan olma olasılığını,  $O_2$ : Metnin saldırgan olmama olasılığını ifade etmektedir.

#### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Çeşitli makine öğrenmesi, derin öğrenme ve transformatör tabanlı modeller incelenmiş ve Şekil 3'te gösterilen kriterler doğrultusunda önerilen modelin deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Performans değerlendirmesi için, doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F<sub>1</sub>-ölçütü ve eğri altındaki alan olarak ifade edilen AUC değeri olmak üzere beş ayrı kriter ile analiz edilmiştir.

Bu çalışmada, Cyber-Trolls veri seti kullanılarak aşağıdaki verilen temel modeller önerilen yaklaşım ile karşılaştırılmıştır.

- (i) Makine öğrenmesi modelleri: NB, SVM ve K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors -KNN)
- (ii) Derin öğrenme modelleri: CNN, LSTM ve Kapılı Tekrarlayan Birim (Gated Recurrent Unit - GRU)
- (iii) Transformatör modeller: BERT, XLNet ve ULMFIT

Metin analizinde gerçekleştirilen ilk adım, verileri ön işleme adımlarından geçirmek olmuştur. Sosyal medya sitelerinde bulunan veriler genellikle yapılandırılmamış ve çok fazla gürültü içermektedir. Gürültünün varlığı duygu analizi performansını olumsuz etkilemektedir (Jianqiang ve diğ., 2017). Bu sebeple öznitelikler çıkarılmadan önce çeşitli ön işleme teknikleri uygulanmaktadır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları için verileri önceden işlemek gerekmektedir. Uygulanan ön işleme teknikleri şunlardır; (i) etkisiz kelime kaldırma, (ii) ekleri kaldırma, (iii) küçük harf dönüştürme, (iv) Ascii ve İngilizce haricini kaldırma, (v) URL Link kaldırma. Veri ön işleme sonrasında veri seti, makine öğrenmesi modellerinde TF-IDF yaklaşımı kullanılarak sayısal özelliklere dönüştürülmüştür. Derin öğrenme modelleri için, metni sayısal özelliklere dönüştürmek için GloVe word embedding adımı kullanılmıştır. Transformatör modellerinde bir ön işleme ve özellik gösterimi tekniklerinin uygulanmasına ihtiyaç yoktur.

**Çizelge 3.** Önerilen modelin Cyber-Troll veri kümesi ile mevcut modellerle performans karşılaştırması

*Table 3. Performance comparison of the proposed model with existing models with Cyber-Troll Dataset*

| Model   | Doğruluk | Kesinlik | Duyarlılık | F <sub>1</sub> -ölçütü | AUC  |
|---|----------|----------|------------|------------------------|------|
| <b>Makine Öğrenmesi (TF-IDF (n-gram = 3))</b> |          |          |            |                        |      |
| NB  | 0,68     | 0,42     | 0,45       | 0,42                   | 0,74 |
| SVM   | 0,67     | 0,51     | 0,43       | 0,44                   | 0,80 |
| KNN   | 0,53     | 0,34     | 0,30       | 0,32                   | 0,69 |
| <b>Derin Öğrenme (GloVe (Boyut = 300))</b>    |          |          |            |                        |      |
| CNN   | 0,83     | 0,70     | 0,69       | 0,69                   | 0,69 |
| LSTM  | 0,85     | 0,70     | 0,73       | 0,71                   | 0,73 |
| GRU   | 0,88     | 0,80     | 0,78       | 0,78                   | 0,71 |
| <b>Transformatör Modeller</b>                 |          |          |            |                        |      |
| BERT  | 0,83     | 0,56     | 0,70       | 0,62                   | 0,80 |
| XLNet   | 0,85     | 0,53     | 0,74       | 0,62                   | 0,80 |
| ULMFIT  | 0,79     | 0,57     | 0,72       | 0,64                   | 0,69 |
| <b>Mevcut Yaklaşımlar</b>                     |          |          |            |                        |      |
| Sadiq ve diğ., 2021                           | 0,86     | 0,93     | 0,78       | 0,85                   | -    |
| Singh ve diğ., 2018                           | 0,73     | -        | -          | -                      | 0,58 |
| Gambäck ve Sikdar, 2017                       | -        | 0,86     | 0,70       | 0,77                   | -    |
| Risch ve Krestel, 2018                        | -        | -        | -          | -                      | 0,63 |
| <b>Önerilen (LMTweets + CNN)</b>              | 0,96     | 0,91     | 0,96       | 0,93                   | 0,96 |

Tüm modellerin makine öğrenmesi, derin öğrenme, transformatör modellerinin, mevcut yaklaşımların ve önerilen yaklaşımın nicel analizine Çizelge 3'te yer verilmiştir. Klasik makine öğrenmesi algoritmalarıyla sınıflandırma işlemi için yani NB, SVM ve KNN uygulamak için Python programlama dili kullanılmıştır. Bu algoritmalar, saldırganlık tespitinde en sık uygulanan algoritmalar olduğundan tercih edilmiştir. Cyber-Trolls veri seti üzerinde yürütülen makine öğrenmesi algoritmalarının sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir. En yüksek performans doğruluk değeri 0,68, kesinlik değeri 0,51, duyarlılık değeri 0,45, F<sub>1</sub>-ölçütü değeri 0,44 ve AUC değeri 0,80 ile rapor edilmiştir. SVM algoritması NB ile karşılaştırılabilir şekilde performans göstermiştir. Doğruluk değeri 0,53, kesinlik değeri 0,34, duyarlılık değeri 0,30, F<sub>1</sub>-ölçütü değeri 0,32 ve AUC değeri 0,69 olan KNN algoritmasında düşük performans gözlenmiştir.

Günümüzde, duygu analizi ve benzeri çeşitli doğal dil işleme problemlerinde derin öğrenme modelleri en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Yakın zamana kadar, RNN modellerinden LSTM ve GRU en popüler yaklaşımlardı, ancak son yıllarda RNN modellerinden daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkan bazı dikkat mekanizmalarına rastlanmıştır. Derin öğrenme algoritmalarını uygulamak için arka uç olarak tensör akışına sahip Keras API kullanılmıştır. Burada uygulanan derin öğrenme algoritmalarından CNN parametreleri için (filters=128, filter-size=5, activation='ReLU', dropout=0,5,

batch-size=256, epoch=40, optimizer='Adam') değerlerine ayarlanmıştır. LSTM parametreleri için (dropout=0,3, activation='Relu', unit=128, epoch=40, optimizer='Adam') değerlerine ayarlanmıştır. GRU parametreleri için (dropout=0,3, activation='ReLU', unit=128, epoch=40, optimizer='Adam') değerlerine ayarlanmıştır. Cyber-Trolls veri seti üzerinde yürütülen derin öğrenme sonuçları sırasıyla Çizelge 3'te gösterilmiştir. Buna göre GRU, 0,88 doğruluk, 0,80 kesinlik, 0,78 duyarlılık ve F<sub>1</sub>-ölçütü ile en iyi performansı göstermiştir. Bunun yanında LSTM ve CNN modelleri, karşılaştırmalı olarak neredeyse eşit performans göstermiştir.

Son yıllarda transformatörler, duygu analizi görevi için tüm modellerden daha iyi performans göstermiştir (Maslej ve diğ., 2020). Uygulama için bilinen transformatör modellerinden BERT, XLNet ve ULMFIT olmak üzere üç transformatör modeli kullanılmıştır (Liu ve diğ., 2019). Cyber-Trolls veri seti üzerinde yürütülen transformatör modellerinin sonuçları sırasıyla Çizelge 3'te gösterilmiştir. Buna göre en yüksek performans 0,85 doğruluk, 0,53 kesinlik, 0,74 duyarlılık, 0,62 F<sub>1</sub>-ölçütü, 0,80 AUC değerleri ile XLNet ile elde edilmiştir. BERT modeli ile ULMFIT modeli yaklaşık olarak eşit performans göstermiştir. Transformatör modellerinde kullanılan hiper parametreler train-epochs=3, learning rate= 2e-6, max-seq=32, batch-size=32, Adam-epsilon=1e-9'dur. Veri seti için maksimum dizi uzunluğu 1024'e ayarlanmıştır. Önerilen LMTweets + CNN modelinin sonuçları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Saldırganlık tespiti için önerilen bu model, literatürde bildirilen temel değerler ve yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Literatürde bildirilen yaklaşımların sonuçları ilgili araştırma makalelerinden edinilmiştir. Sadiq ve diğ. tarafından önerilen yaklaşım mevcut yöntemler arasında en iyi performansa sahip olan modeldir. Buna göre 0,86 doğruluk, 0,93 kesinlik, 0,78 duyarlılık, 0,85 F<sub>1</sub>-ölçütü ile en iyi sonuçları elde etmiştir. Önerilen model ile 0,96 doğruluk, 0,91 kesinlik, 0,96 duyarlılık, 0,93 F<sub>1</sub>-ölçütü ve 0,96 AUC değeri elde edildiği göz önüne alındığında, bu modelin konuyla ilgili yapılmış son teknolojik çalışmaların deneysel sonuçlarına kıyasla yaklaşık %8 oranında daha yüksek performansa ulaştığı söylenebilir.

Önerilen model, bağlamsal bilgileri çıkarmak için BERT-tabanlı mimariye dayalı bir LMTweets modelini tasarlamaya dayanmaktadır. GloVe ve Word2Vec gibi statik sözcük yerleştirmeleri, bağlamlarından bağımsız olarak sözcükleri temsil etmektedir. Ancak LMTweets ve BERT, bağlama dayalı olarak kelime yerleştirme üreterek kelime bankası için farklı kelime yerleştirmeleri üretecektir. LMTweets, bu modellerin eğitildiği alan ve eğitim prosedürü açısından BERT'den farklıdır. BERT, alana özgü ve genel belgeler arasındaki sözcüklerdeki, tümceciklerdeki ve diğer dilsel özelliklerdeki büyük farklılıklar nedeniyle bu veri kümelerinde düşük performans göstermiştir. Ayrıca, LMTweets tarafından oluşturulan yerleştirmelerde, yakındaki kelimelerin zamansal ilişkisini belirlemek için CNN modeli uygulanmıştır.

Sonuçlar, önerilen modelin performansında her iki bileşenin (LMTweets ve CNN) önemini göstermektedir. Saldırgan içerikli metin, dilbilimsel, örüntü temelli, noktalama temelli, edimbilim, sözdizimsel ve kutupsallık temelli özellikler gibi çeşitli özelliklerle temsil edilebilmektedir. Modelimiz, kalıp tabanlı özelliklere sahip olanların (# işareti içeren) saldırganlığını tespit edememiştir. NB'in tüm makine öğrenmesi algoritmaları arasında daha iyi performans gösterdiği gözlemlenebilir. GRU'nun tüm derin öğrenme algoritmaları arasında daha iyi performans gösterdiği gözlemlenebilir. XLNet, tüm transformatör modelleri arasında daha iyi performans göstermiştir. Sonuçlar, yaklaşımımızın literatürde bildirilen tüm makine öğrenimi, derin öğrenme, transformatör modelleri ve modellerinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

### **Kombinasyon Çalışması (Combination Study)**

Önerilen model üzerinde gerçekleştirilen kombinasyon çalışması ve sonuçları Çizelge 4'te sunulmuştur.

**Çizelge 4.** Önerilen modelin CNN kombinasyonu çalışma sonuçları*Table 4. Combination study results of the proposed model*

| Model                          | Doğruluk | Kesinlik | Duyarlılık | F <sub>1</sub> -ölçütü | AUC  |
|--------------------------------|----------|----------|------------|------------------------|------|
| <b>Kombinasyon Çalışmaları</b> |          |          |            |                        |      |
| LMTweets + CNN                 | 0,96     | 0,91     | 0,96       | 0,93                   | 0,96 |
| LMTweets olmadan               | 0,83     | 0,70     | 0,69       | 0,69                   | 0,69 |
| CNN olmadan                    | 0,94     | 0,86     | 0,94       | 0,90                   | 0,95 |

Derinlemesine bir analiz için, her bileşenin önemini belirlemek adına LMTweets + CNN modeli üzerinde bir kombinasyon çalışması yapılmıştır. Bu kombinasyon çalışmasının detayları aşağıdaki gibidir:

(i) LMTweets olmadan: LMTweets kısmı modelden kaldırılmıştır. Metni sayısal forma dönüştürmek için LMTweets yerine GloVe metin gösterimi tekniği kullanılmıştır.

(ii) CNN olmadan: CNN kısmı, LMTweets + CNN modelinden çıkarılmıştır ve sınıflandırma için LMTweets kısmı kullanılmıştır.

Kombinasyon çalışmasının sonuçlarına Çizelge 4'te yer verilmiştir. Modelin sadece CNN kısmı GloVe word embedding birlikte ele alındığında, performansın ortalama %13 oranında düştüğü görülmektedir. Bu durum LMTweets'in etkili performans üzerindeki önemini göstermektedir. Buna karşın CNN kısmı çıkarıldığı takdirde, modelin performansı ortalama %2 oranında azalmıştır.

Özetle bu çalışmada önerilen LMTweets + CNN yaklaşımı daha önce Çizelge 3'ün derin öğrenme modelleri arasında bulunan ve Çizelge 4'te "LMTweets olmadan" olarak adlandırılan CNN (GloVe ile birlikte) yöntemi ve LMTweets + CNN yaklaşımından CNN kısmının çıkarıldığı "CNN olmadan" olarak adlandırılan yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Burada amaç LMTweets + CNN yaklaşımının farklı şekillerdeki kombinasyonlarına olan üstünlüğünü vurgulamaktır.

#### Anova Testi (Anova Test)

Tek yönlü varyans analizi (Anova) normal dağılımlı bir seride iki veya daha fazla bağımsız ortalama arasındaki farkın manidarlığının hesaplanmasıyla deneysel sonuçların anlamlı olup olmadığını bulan istatistiksel bir testtir. Anova tek başına iki veya daha fazla grubun aritmetik ortalamalarını kümülatif olarak karşılaştırmakta, bu karşılaştırmalardan en az birisi anlamlı olduğunda Anova sonucu da anlamlı bulunmaktadır. Olgumuzda sadece bir bağımsız değişken bulunduğundan tek yönlü Anova testi uygulanmıştır. Bu testte, boş hipotez "Grup ortalamasında fark yoktur" ve alternatif hipotez "Grup ortalamasında fark vardır" şeklindedir. Anova testi, gruplar arasındaki ve bir grup içindeki varyasyonları karşılaştırarak gerçekleştirilmektedir. Dördüncü bölümde sunulan sonuçların istatistiksel anlamlılığını değerlendirmek için Python istatistik modelleri kitaplığı kullanılarak tek yönlü Anova testi uygulanmıştır. Üçüncü bölümde önerilen yöntemin Anova testi ile elde edilen olasılık değeri (O) sonuçları, yöntemin etkinliğine istatistiksel olarak karar vermek için kullanılmıştır. Boş hipotezin doğru olduğunda reddedilme olasılığı olan anlamlılık düzeyi 0,05'tir. O değeri, bir Anova testi yapılarak elde edilmektedir. O değeri anlamlılık düzeyinden küçükse, boş (null) hipotez reddedilir. Anova testinin doğruluk için veri seti üzerindeki çıktısı Çizelge 5'te verilmiştir. Anova testi sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bir olasılık değeri olan (O) değeri elde edilmektedir. Elde edilen O-değeri  $1.586 \times 10^{-7}$  dir. Bu olasılık değeri gruplar arasında fark olduğunun ortaya konması bakımından  $O < 0,05$  şeklinde bir karşılaştırma yapılmaktadır. F değeri ile karşılaştırılmak üzere elde edilen olasılık sonucu 0.0000001586 değerini ifade etmektedir. Bu bakımdan anlamlılık seviyesi olan 0,05 değerinden çok daha küçük bir sonuçtur.

**Çizelge 5.** Anova testinin sonuçları (Tek-yönlü)*Table 5. Results of Anova Test (One-way)*

| Kaynak                  | Serbestlik Derecesi (df) | Kareler toplamı (sum sq) | Ortalamalar toplamı (mean sq) | F1 ölçütü | Olasılık<F             |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------|------------------------|
| <b>Doğruluğa Dayalı</b> |                          |                          |                               |           |                        |
| Sınıflandırma           | 3,00                     | 0,24                     | 0,08                          | 16,33     | 1.586×10 <sup>-7</sup> |
| Artık (Residual)        | 50,00                    | 0,24                     | 0,005                         | -         | -                      |

Çizelge 5'teki satır ifadeleri Anova testinin Sınıflandırma (Classification) veya Artık (Residual) parametreleri tercih edilerek Serbestlik derecesi (degree of freedom), Kareler toplamı (sum of square), Ortalamalar toplamı (mean square), F1 ölçütü (F-measure) ve Doğruluk (Accuracy) metrikleri üzerinden hesaplandığını ifade etmektedir. Bu test bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın var olup olmadığını ölçmek için kullanılmaktadır. Bu test ile genellikle 0,00 ve 1,00 arasında değişkenlik gösteren sonuçların elde edilmesindeki amaç sadece istatistiksel farkın ortaya konulmasıdır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile ilgili bir çıkarım yapılamamaktadır.

Burada, Anova testinin deneysel sonuçları makine öğrenmesi, derin öğrenme, transformatör modellerinin ve önerilen modelin istatistiksel olarak farklı performans gösterebildiğini ortaya koymuştur.

## SONUÇLAR (RESULTS)

Özellikle sosyal medya mikro blog platformlarında, dilin sürekli değişen doğası nedeniyle saldırganlık tespiti zordur. Bu çalışmada, LMTweets ve CNN'den oluşan bir mimari önerilmiştir. LMTweets, sosyal medya platformlarından gelen verilerle eğitilmiş BERT-tabanlı transformatöre dayalı bir kodlayıcıdır. Özellikler LMTweets tarafından çıkarılmaktadır ve sınıflandırma için CNN modeline iletilmektedir. Cyber-Trolls veri kümesine üç makine öğrenmesi, üç derin öğrenme ve üç transformatör tabanlı model uygulanmıştır. Tüm modeller arasında en iyi performansı LMTweets + CNN'in gösterdiği gözlemlenmiştir. Önerilen model ile 0,96 doğruluk, 0,91 kesinlik, 0,96 duyarlılık, 0,93 F<sub>1</sub>-ölçütü ve 0,96 AUC sonuçları elde edilmiştir. Bu, duruma göre sonuçlar son teknoloji yöntemlere kıyasla %8 daha yüksek performans göstermiştir. Saldırganlık tespiti geniş ve ilgi çekici bir alan olduğu için gelecekteki çalışmalar takip edilebilir. Gelecekte, hinglish gibi makaronik dillerden çok modellenen veri kümelerini kullanmayı düşünebiliriz. Uygulanan modellerin yanında grafik sinir ağı veya kapsül ağları da uygulanabilir. Bununla birlikte RNN ve CNN mekanizmalarını dikkate alan hibrit modeller de araştırılabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abulaish, M., Kamal, A., Zaki, M., 2020, "A survey of figurative language and its computational detection in online social networks." 14(1): 1-52.
- Al-Garadi, M. A., Varathan, K. D., Ravana, S. D. J. C. i. H. B., 2016, "Cybercrime detection in online communications: The experimental case of cyberbullying detection in the Twitter network." 63: 433-443.
- Aroyehun, S. T., & Gelbukh, A., 2018. "Aggression detection in social media: Using deep neural networks, data augmentation, and pseudo labeling. In Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying" (TRAC-2018) (pp. 90-97).
- Avvaru, A., Vobilisetty, S., & Mamidi, R., 2020, "Detecting sarcasm in conversation context using transformer-based models. In Proceedings of the second workshop on figurative language processing" (pp. 98-103).
- Balakrishnan, V., Khan, S., Fernandez, T., Arabnia, H. R. J. P., 2019, "Cyberbullying detection on twitter using Big Five and Dark Triad features." 141: 252-257.

- Bansal, A., Sharma, S. M., Kumar, K., Aggarwal, A., Goyal, S., Choudhary, K., 2012, "Classification of flames in computer mediated communications."
- Basile, V., Bosco, C., Fersini, E., Deborja, N., Patti, V., Pardo, F. M. R., 2019, "Semeval-2019 task 5: Multilingual detection of hate speech against immigrants and women in twitter." 13th International Workshop on Semantic Evaluation, Association for Computational Linguistics.
- Chatzakou, D., Kourtellis, N., Blackburn, J., De Cristofaro, E., Stringhini, G., & Vakali, A., 2017, "Mean birds: Detecting aggression and bullying on twitter." Proceedings of the 2017 ACM on web science conference.
- Chavan, V. S., & Shylaja, S., 2015, "Machine learning approach for detection of cyber-aggressive comments by peers on social media network." 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), IEEE.
- Chia, Z. L., Ptaszynski, M., & Masui, F., 2019, "Exploring machine learning techniques for irony detection." Proceedings of the Annual Conference of JSAI 33rd Annual Conference, 2019, The Japanese Society for Artificial Intelligence.
- Davidson, T., Warmusley, D., Macy, M., & Weber, I., 2017, "Automated hate speech detection and the problem of offensive language." Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media.
- Dinakar, K., Jones, B., Havasi, C., Lieberman, H., & Picard, R. J. A. T., 2012, "Common sense reasoning for detection, prevention, and mitigation of cyberbullying." 2(3): 1-30.
- Djuric, N., Zhou, J., Morris, R., Grbovic, M., Radosavljevic, V., & Bhamidipati, N., 2015, "Hate speech detection with comment embeddings." Proceedings of the 24th international conference on world wide web.
- Fariás, D. I. H., Montes-y-Gómez, M., Escalante, H. J., Rosso, P., & Patti, V., 2018, "A knowledge-based weighted KNN for detecting Irony in Twitter." Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Springer.
- Gambäck, B., & Sikdar, U. K., 2017, "Using convolutional neural networks to classify hate-speech." Proceedings of the first workshop on abusive language online.
- Greevy, E., & Smeaton, A. F., 2004, "Classifying racist texts using a support vector machine." Proceedings of the 27th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval.
- Gregory, H., Li, S., Mohammadi, P., Tarn, N., Draelos, R., & Rudin, C., 2020, "A Transformer approach to contextual Sarcasm detection in Twitter." Proceedings of the Second Workshop on Figurative Language Processing.
- Grigg, D. W., 2010, "Cyber-aggression: Definition and concept of cyberbullying." Journal of Psychologists and Counsellors in Schools, 20(2), 143-156.
- Hepburn, A. D., 1875, Manual of English Rhetoric, American Book Company.
- Jianqiang, Z., & Xiaolin, G. J. I. A., 2017, "Comparison research on text pre-processing methods on twitter sentiment analysis." 5: 2870-2879.
- Joachims, T., 1998, "Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features." European conference on machine learning, Springer.
- John, T. N., 2000, "Hate Speech." In Encyclopedia of the American Constitution (2nd ed., edited by Leonard, W. L., Kenneth, L. K. et al., New York: Macmillan), pp. 1277-1279.
- Joshi, A., Bhattacharyya, P., & Carman, M. J. J. A. C. S., 2017, "Automatic sarcasm detection: A survey." 50(5): 1-22.
- Khan, U., Khan, S., Rizwan, A., Atteia, G., Jamjoom, M. M., & Samee, N. A. 2022. "Aggression Detection in Social Media from Textual Data Using Deep Learning Models." Applied Sciences, 12(10), 5083.
- Kumar, A., Sangwan, S. R., Arora, A., Nayyar, A., & Abdel-Basset, M. J. I. a., 2019, "Sarcasm detection using soft attention-based bidirectional long short-term memory model with convolution network." 7: 23319-23328.

- Kumar, R., Ojha, A. K., Malmasi, S., & Zampieri, M., 2018, "Benchmarking aggression identification in social media." *Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018)*.
- Liu, Y., Ott, M., Goyal, N., Du, J., Joshi, M., Chen, D., 2019, "Roberta: A robustly optimized bert pretraining approach."
- Madisetty, S., & Desarkar, M. S., 2018, "Aggression detection in social media using deep neural networks." *Proceedings of the first workshop on trolling, aggression and cyberbullying (TRAC-2018)*.
- Maslej-Krešňáková, V., Sarnovský, M., Butka, P., & Machová, K. J. A. S., 2020, "Comparison of deep learning models and various text pre-processing techniques for the toxic comments classification." *10(23): 8631*.
- Mihaylov, T., Georgiev, G., & Nakov, P., 2015, "Finding opinion manipulation trolls in news community forums." *Proceedings of the nineteenth conference on computational natural language learning*.
- Mubarak, H., Darwish, K., & Magdy, W., 2017, "Abusive language detection on Arabic social media." *Proceedings of the first workshop on abusive language online*.
- Nobata, C., Tetreault, J., Thomas, A., Mehdad, Y., & Chang, Y., 2016, "Abusive language detection in online user content." *Proceedings of the 25th international conference on world wide web*.
- Pareek, K., Choudhary, A., Tripathi, A., Mishra, K. K., & Mittal, N. 2022. "Hate and Aggression Detection in Social Media Over Hindi English Language." *International Journal of Software Science and Computational Intelligence (IJSSCI)*, 14(1), 1-20.
- Potamias, R.-A., Siolas, G., & Stafylopatis, A., 2019, "A robust deep ensemble classifier for figurative language detection." *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, Springer.
- Potamias, R. A., Siolas, G., Stafylopatis, A.-G. J. N. C., 2020, "A transformer-based approach to irony and sarcasm detection." *32(23): 17309-17320*.
- Prentice, S., Taylor, P. J., Rayson, P., Hoskins, A., & O'Loughlin, B. J. I. S. F., 2011, "Analyzing the semantic content and persuasive composition of extremist media: A case study of texts produced during the Gaza conflict." *13(1): 61-73*.
- Risch, J., & Krestel, R., 2018, "Aggression identification using deep learning and data augmentation." *Proceedings of the First Workshop on Trolling, Aggression and Cyberbullying (TRAC-2018)*.
- Sadiq, S., Mehmood, A., Ullah, S., Ahmad, M., Choi, G. S., & On, B.-W. J. F. G. C. S., 2021, "Aggression detection through deep neural model on twitter." *114: 120-129*.
- Salawu, S., He, Y., & Lumsden, J. J. I. T. o. A. C., 2017, "Approaches to automated detection of cyberbullying: A survey." *11(1): 3-24*.
- Saravanaraj, A., Sheeba, J., Devaneyan, S. P. J. I. J. o. C. S., 2016, "Automatic detection of cyberbullying from twitter."
- Sarsam, S. M., Al-Samarraie, H., Alzahrani, A. I., & Wright, B. J. I. J. o. M. R., 2020, "Sarcasm detection using machine learning algorithms in Twitter: A systematic review." *62(5): 578-598*.
- Schmidt, A., & Wiegand, M., 2017, "A survey on hate speech detection using natural language processing." *Proceedings of the fifth international workshop on natural language processing for social media*.
- Sharif, O., & Hoque, M. M. 2022. "Tackling cyber-aggression: Identification and fine-grained categorization of aggressive texts on social media using weighted ensemble of transformers." *Neurocomputing*, 490, 462-481.
- Shen, Y., He, X., Gao, J., Deng, L., & Mesnil, G., 2014, "Learning semantic representations using convolutional neural networks for web search." *Proceedings of the 23rd international conference on world wide web*.



- Singh, V., Varshney, A., Akhtar, S. S., Vijay, D., & Shrivastava, M., 2018, "Aggression detection on social media text using deep neural networks." Proceedings of the 2nd Workshop on Abusive Language Online (ALW2).
- Smit, D. J. S. A. J. o. E., 2015, "Cyberbullying in South African and American schools: A legal comparative study." 35(2): 1-11.
- Su, H.-P., Huang, Z.-J., Chang, H.-T., & Lin, C.-J., 2017, "Rephrasing profanity in chinese text." Proceedings of the First Workshop on Abusive Language Online.
- Tai, K. S., Socher, R., & Manning, C. D. J. a. p. a., 2015, "Improved semantic representations from tree-structured long short-term memory networks."
- Tulkens, S., Hilte, L., Lodewyckx, E., Verhoeven, B., & Daelemans, W. J. a. p. a., 2016, "A dictionary-based approach to racism detection in dutch social media."
- Van der Walt, E., Eloff, J. H., Grobler, J. J. C., 2018, "Cyber-security: Identity deception detection on social media platforms." 78: 76-89.
- Xiao, Y. and Cho, K. J. a. p. a., 2016, "Efficient character-level document classification by combining convolution and recurrent layers."



## TEPEKENT (KONYA-ORTA ANADOLU) YÖRESİNDEKİ VOLKANİK KAYALARIN PETROGRAFİSİ, JEOKİMYASI VE PETROLOJİSİ

<sup>1</sup>Büşra ERYİĞİT , <sup>2</sup>Hüseyin KURT , <sup>3</sup>Kürşad ASAN ,  
<sup>4</sup>Gülin GENÇOĞLU KORKMAZ 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,  
Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>bsraerygt1994@gmail.com, <sup>2</sup>hkurt@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>kasan@ktun.edu.tr, <sup>4</sup>ggkorkmaz@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 23.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.10.2022)

**ÖZ:** Bu çalışmada, Tepekent yöresi (Konya-Orta Anadolu) yüzeyleyen Miyosen yaşlı riyolitik, dasitik ve bazaltik lav akıntıları ve bunların piroklastiklerinin petrografisi, mineralojisi, jeokimyası ve petrolojisi incelenmiştir. İncelenen kayalar Toplam alkali-silika (TAS) diyagramına göre yüksek potasyum içerikli bazaltik traki-andezit, dasit ve riyolit bileşiminde kayalardır. Bununla birlikte incelenen bazaltik traki-andezitler  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  içeriklerine göre şoşonit olarak da adlandırılmaktadır. Dasitik kayalar yer yer mm'den dm'ye değişen boyutta anklav içermektedir. Anklavlar TAS diyagramında traki-bazalt alanına düşmekte olup ana kayalarından daha mafik bir bileşim sergilemektedir. Bazaltik traki-andezitler holokristalin porfirik doku gösterirken, dasitler değişen volkanik cam içerikleri ile hipokristalin porfirik doku sergilemektedir. Bazaltik traki-andezitler olivin, klinopiroksen, plajiyoklaz ve Fe-Ti oksit içermekte, nadiren zeolitlenme ve olivinlerde iddingsitleşmeler göstermektedir. Dasitler amfibol, biyotit, plajiyoklaz, Fe-Ti oksit ve nadiren de kuvars mikro fenokristallerinin içerisine dağıldığı, aynı minerallerin mikrokristallerine ilaveten volkanik camdan oluşan hamur içeriğine sahiptir. Dasitik ana kayalarda yer alan anklavlar ana mafik mineral olarak amfibol içermekte olup, magma mixing anklavlarında sık sık rastlanan ince taneli dokuya sahiptir, bununla birlikte, bıçaksı biyotit, söndürülmüş amfibol ve elek dokulu plajiyoklaz gibi dokusal özellikler sergilemektedir. Riyolitler ise kuvars, plajiyoklaz ve Fe-Ti oksit mikrofenokristalinin yanı sıra önemli derecede sanidin ve biyotit içermektedir. Bununla birlikte dasitlere göre daha fazla volkanik cam içeriğine sahip olup, hipohyalin porfirik doku sergilemektedir. İncelenen kayaların Okyanus Ortası Sırtı Bazaltları'na (OOSB) göre normalize iz element diyagramında, büyük iyon yarıçaplı litofil element bileşiminde (BİYE, Sr, K, Rb, U ve Th) bir zenginleşme izlenirken, yüksek alan enerjili elemente (YAEE, Nb, Ta, Ti) bileşiminde ise bir fakirleşme görülmektedir. Kondrite göre normalize nadir toprak element dağılımları,  $(\text{La}/\text{Lu})_N$  genel olarak 14-15 arasında değişim göstermektedir ve amfibol fraksiyonlaşmasını anlatan kaşık desenli bir dağılım sunmaktadır. Riyolitlerde ise plajiyoklaz fraksiyonlaşmasını ifade eden belirgin biçimde negatif Eu anomalisi ve sanidin fraksiyonlaşmasına işaret eden önemli derecede negatif Ba anomalisi gözlemlenmektedir. Elde edilen veriler ışığında, incelenen volkanik kayaların yitim izi taşıyan çarpışma sonrası bimodal volkanizmanın ürünleri olduğu ve zenginleşmiş litosferik mantodan türemiş oldukları önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Anklav, Dasit, Bazalt, Bimodal, Kalkalkalen, Litosferik, Şoşonit

## Petrography, Geochemistry and Petrology of Volcanic Rocks in Tepekent Region (Konya-Central Anatolia)

**ABSTRACT:** In this study, the petrography, mineralogy, geochemistry and petrology of Miocene aged rhyolitic, dacitic and basaltic lava flows and their pyroclastics cropping out in the Tepekent region (Konya-Central Anatolia) were investigated. The investigated rocks are basaltic trachy-andesite, andesite, dacite and rhyolite rocks with high potassium content according to the Total Alkali-Silica (TAS) diagram. However, the basaltic trachy-andesites examined are also called shoshonite according to their Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O content. Dacitic rocks contain enclaves varying in size from mm to dm. The enclaves fall into the trachy-basalt area in the TAS diagram and exhibit a more mafic composition than the host-rocks. Basaltic trachy-andesites show holocrystalline porphyric texture, while dacites display hypocrySTALLINE porphyric texture with varying volcanic glass contents. Basaltic trachy-andesites contain olivine, clinopyroxene, plagioclase and Fe-Ti oxide, show zeolitisation in places and iddingsitization in olivines. Dacites have a paste content consisting of volcanic glass in addition to microcrystals of the same minerals, in which amphibole, biotite, plagioclase, Fe-Ti oxide and occasionally quartz micro-phenocrysts are dispersed into it. Enclaves located in dacitic host-rocks have the fine-grained texture often found in magma mixing enclaves, however, they are composed of bladed biotite, quenched amphibole and sieve-textured plagioclase. Rhyolites contain significant amounts of sanidine and biotite as well as quartz, plagioclase and Fe-Ti oxide microphenocryst. However, they have more volcanic glass content than dacites and exhibit hypohyaline porphric texture. In the Mid-Ocean Ridge Basalts (MORB) normalized trace element diagram an enrichment is observed within large ion radius lithophile elements (LILE, Sr, K, Rb, U and Th) composition, while a depletion is observed. within the high field strength elements (HFSE, Nb, Ta, Ti) contents. Rare earth element distributions normalized to chondrite, (La/Lu)<sub>N</sub> generally vary between 14-15 and present a spoon-patterned distribution describing amphibole fractionation. In the rhyolites, on the other hand, a clearly negative Eu anomaly, which expresses the plagioclase fractionation, is observed. In the light of the obtained data, it is suggested that the investigated volcanic rocks are post-collisional bimodal volcanism products bearing subduction marks and are derived from the enriched lithospheric mantle.

**Keywords:** Basalt, Bimodal, Calc-Alkaline, Dacite, Enclave, Lithospheric, Shohonite

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dalma-Batma zonu volkanizması esas olarak çok aşamalı, çok kaynaklı ve çok süreçlidir, bu da farklı kökende ve bileşimde magmaların oluşmasına ve bir arada bulunmasına neden olur. Türkiye'nin Geç Mezozoyik-Neojen jeolojisi Neotetis Okyanusu'nun açılması ve kapanması ile yakından ilişkilidir. Orta Anadolu'da Neotetis okyanusunun açılıp kapanmaları ile ilişkili olarak yaygın bir Senozoyik volkanizması hâkimdir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Senozoyik yaşlı volkanizma Orta Anadolu'da çarpışma sonrası volkanik provens ve volkanik kompleksler ile temsil edilmektedir (Galatya Volkanik Provensi (GVP), Kapadokya Volkanik Provensi (CVP), Sulutaş Volkanik Kompleksi (SVC) ve Erenlerdağ Alacadağ Volkanik Kompleksi (EAVC), Karapınar Volkanik Alanı (KPVF) ve Karacadağ Volkanik Kompleksi (KCVC); Gencoğlu Korkmaz ve diğ. (2022) (Sekil 1a). Tepeköy civarında yüzeyleyen volkanitler Konya ili güney batısında yüzeyleyen Sulutaş Volkanik kompleksine (SVC) aittir. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar yaş analizlerinin SVC için 11-16 My yaş verisi verdiği SVC nin şoşonitik, kalk-alkalen, yüksek K kalk-alkalen Na-alkalen bileşimde kayalardan oluştuğu ve bimodal volkanizmanın görüldüğü önemli bir volkanik kompleks olduğu bilinmektedir (Asan ve diğ., 2021). Bimodal volkanizma, nadiren ortaç bileşimli ürünlerin görüldüğü veya hiç görülmeyeceği, genel olarak mafik ve felsik bileşimli ürünler ile karakterize edilen ve çok çeşitli volkanik ortamlarda

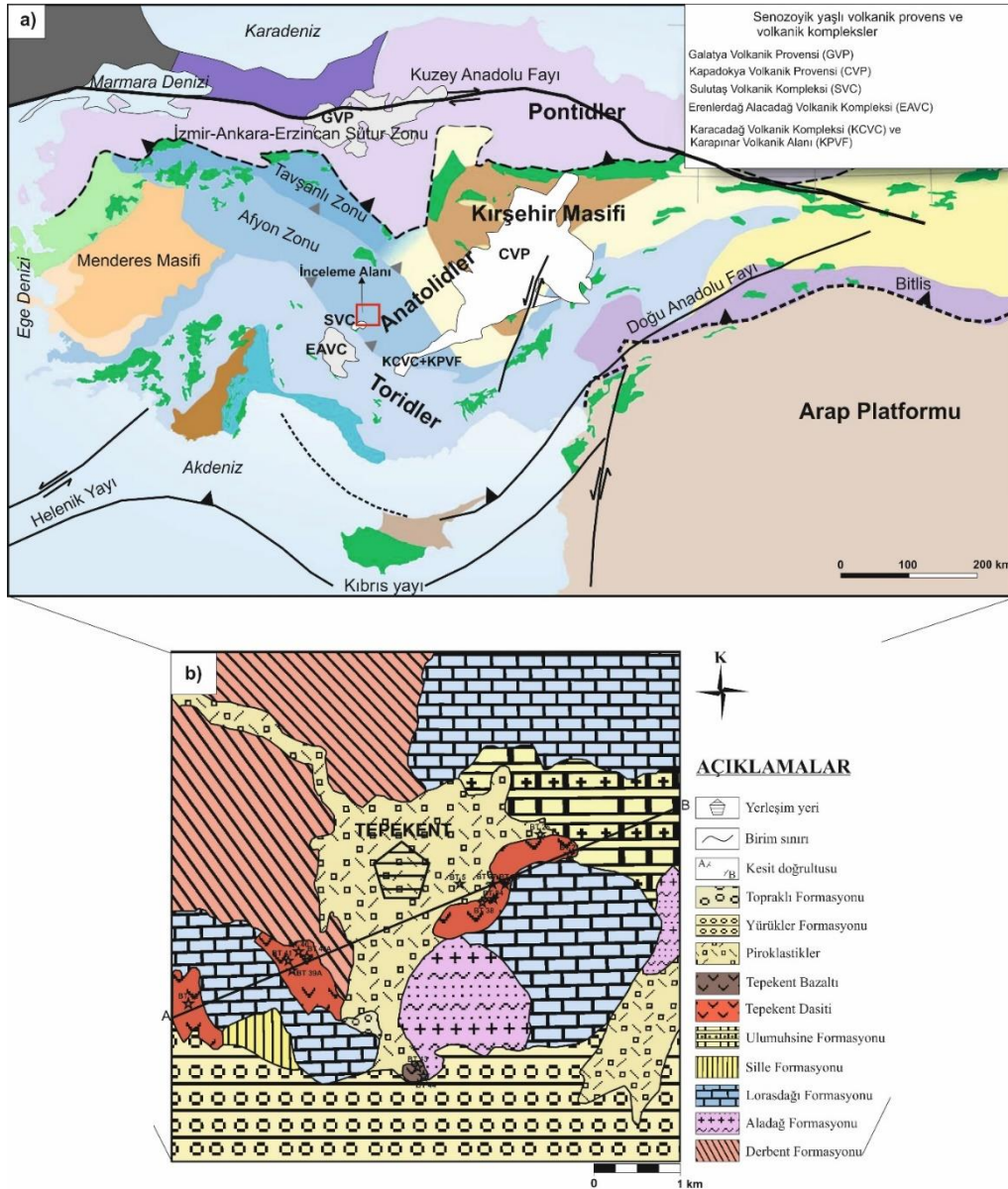
görülebilir bir volkanizma çeşitidir ve daha önce detayları ile Gençoğlu Korkmaz ve diğ. (2017) tarafından detaylarıyla tartışılmıştır. Ayrıca, hem kabuk kirliliğinin hem de kaynak alan zenginleşmelerinin, SVC'nin bileşimsel çeşitliliğinde önemli derece rol aldığı çeşitli modellemeler ile Asan ve diğ. (2021) tarafından ileri sürülmüştür.

Çalışma alanının temelini Üst Permian-Alt Kretase yaşlı Gökçeyurt grubu oluşturmaktadır (Şekil 1b ve 2). En altta Üst Permian yaşlı metakarbonatlardan oluşan Derbent formasyonu, Üst Permian-Üst Triyas yaşlı Aladağ formasyonu ile yanal-düşey geçiş göstermektedir. Üst Triyas-Alt Kretase yaşlı kristalize kireçtaşı, dolomit, dolomitik kireçlerinden oluşan Lorasdağı formasyonu ise en üst birimdir. Bu temelin üzerine Üst Miyosen- Alt Pliyosen yaşlı Dilekçi grubu, alttan üste doğru alüvyal malzemeden oluşmuş Sille formasyonu; görsel kireçtaşlarından oluşan Ulumuhsine formasyonu; tuf, tüfit, volkanik breş gibi piroklastik ürünlerden oluşan Küçükmuhsine formasyonu; volkanik kayalardan oluşmuş Sulutaş volkanikleri (bazalt, dasit) ile alüvyal malzemelerden oluşmuş Yürükler formasyonundan oluşmaktadır. Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı alüvyal örtü çökellerinden oluşan Topraklı formasyonu ise kendinden daha yaşlı birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Neojen yaşlı volkanik kayalar çalışma alanının doğu ve batısında özellikle Çimenlerpınar mevkinde yer yer farklı boyutlarda anklav içerebilen dasitik kayalar ile bölgenin güneyinde Ortayalı Tepe yakın civarında bazaltik kayalar ile temsil edilmektedir. Dasitler lav akıntısı ve volkanik boyun, bazaltlar ise lav akıntısı olarak yüzeylemekte ve Neojen öncesi birimleri kesmektedirler. Bununla birlikte inceleme alanında bazaltik ve dasitik lavlar arasında fiziksel bir kontakt bulunmamaktadır (Şekil 1b ve 2). Son yapılan çalışmalarda Asan ve diğ. (2021) 'de Ulumuhsine-Küçükmuhsine bölgesindeki yüzeyleyen dasit ve bazaltlardan alınan örneklerde  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  yöntemiyle  $12.07 \pm 0.06$  ile  $12.21 \pm 0.32$  My ve  $11.01 \pm 0.42$  ile  $11.05 \pm 0.64$  My plato ve ters izokron yaşları elde etmişlerdir.

Volkanik kayalar bölgesel jeolojik evrimi ve jeodinamik olayları aydınlatmada önemli yere sahiptir. Bu çalışma ile Tepekent yöresinde yüzeyleyen ve SVC' ait olduğu düşünülen Miyosen yaşlı volkanik kayaların mineralojik, petrografik ve jeokimyasal özellikleri incelenerek bölgesel jeoloji açısından önemleri ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Arazi çalışmaları ile, çalışma konusunu oluşturan volkanik kayalar ile çevre kayalarından örnekler alınarak MTA dan derlenen 1/25000 ölçekli jeolojik haritalar yeniden modifiye edilmiştir. Bu kapsamda derlenen örneklerden hiç alterasyon göstermeyen veya çok az gösteren örnekler belirlenerek üstü açık ince kesitler Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM) İnce Kesit Laboratuvarında yaptırılmıştır. Örneklerin ayrıntılı petrografik incelemeleri (modal mineralojik bileşim, doku, adlama, alterasyon) ve mikrofotograflarının çekimi Konya Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Mikroskop laboratuvarında polarizan mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Jeokimyasal analizler için numunelerin hazırlanma işlemleri ve petrografik incelemeleri tamamlanmış en taze 10 adet volkanik kaya örneğinin tüm kaya major oksit, iz element ve nadir toprak elementi analizleri ALS GLOBAL Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Şti.'de gerçekleştirilmiştir. Tüm kaya jeokimyası analizleri ICP-MS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm kaya jeokimyası analizleriyle volkanik kayaların major oksit ve iz element içerikleri belirlenerek kaya adlamaları yapılmış, tektonik ortamları yorumlanmış, kayaları oluşturan magmaların kökeni, gelişimi ve kayaların birbirleriyle ilişkisi irdelenmiştir.

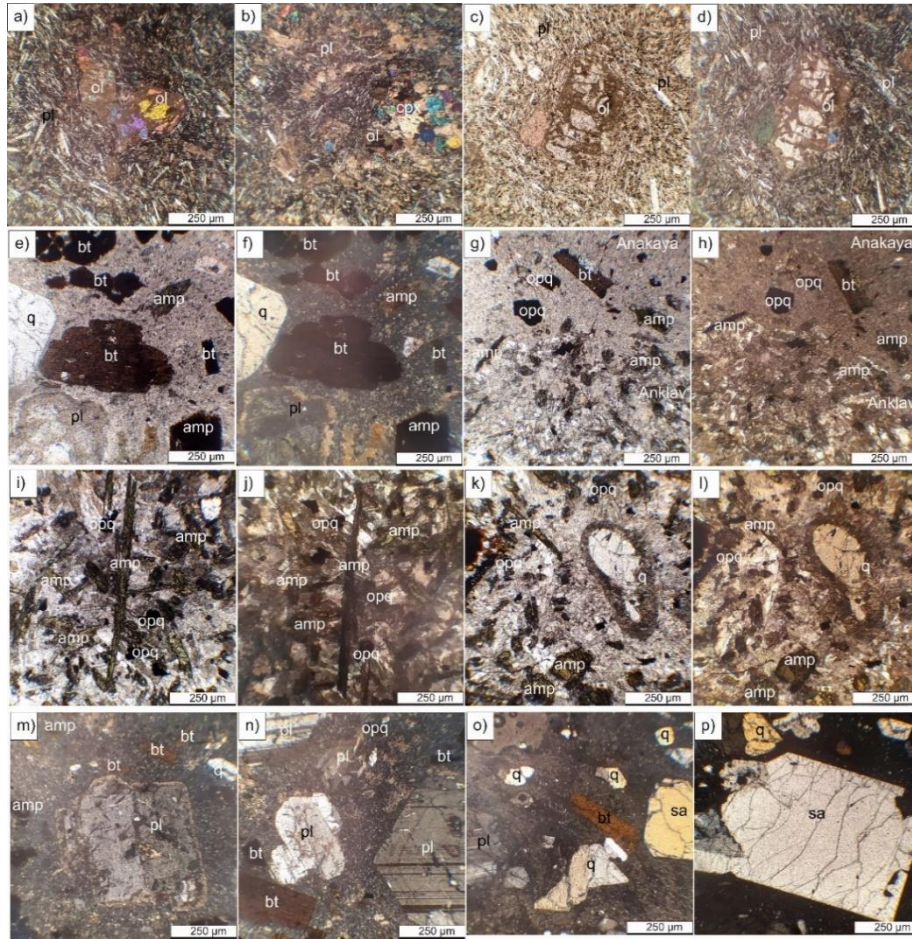


**Şekil 1.** Çalışma alanının (a) Türkiye'nin tektonik birliklerini gösterir harita Van Hinsbergen ve diğ. (2016)'dan sadeleştirilmiş ve modifiye edilmiştir, (b) jeolojik haritası (MTA 1/25.000 paftalarından ve Eren, 1993'den modifiye edilmiştir. Jeoloji haritası üzerinde örnek lokasyonları siyah yıldız işareti ile gösterilmiştir.

**Figure 1.** Map showing the tectonic units of Turkey was simplified and modified from Van Hinsbergen et al. (2016), (b) geological map of the study area was modified from MTA 1/25.000 sheets and Eren, 1993. Sample locations on the geological map are indicated with a black asterisk.



plajiyoklaz, amfibol, biyotit ve opak mineral nadiren de kuvars mikro-fenokristalleri içermektedir (Şekil 3 e, f, m, n). Bazı amfibollerde opasitleşme, plajiyoklazlarda ise serizitleşme/killeşme türü alterasyonlar ile birlikte sıklıkla elek dokusu da gözlenmektedir. Bazı dasitik kayalarda ince taneli, hipokristalin porfirik dokulu, tipik magma karışımını ifade eden dengesizlik dokularının hakim olduğu anklavlar yer almaktadır (Şekil 3 g-l). Bu anklavlarda baskın olarak söndürülmüş amfibol, bıçaksı biyotit, kirli-yoğun ince taneli ve kaba taneli elek dokulu plajiyoklaz ve osellar dokulu kuvars mineralleri görülmekte, bununla birlikte killeşme, zeolitleşme ve karbonat oluşumları da göze çarpmaktadır (Şekil 3 k, l). Anklavlarda gözlenen bu dokusal ve mineralojik özellikler incelenen anklavların magma karışımı anklavı (MMA) olduklarını göstermektedir. Riyolitik kayalar ise volkanik cam içeriği yüksek olmakla birlikte yaygın olarak kuvars, sanidin, biyotit, plajiyoklaz ve opak mineral içermekte ve hipohyalin porfirik doku göstermektedir (Şekil 3 o, p). Kuvarslar nadiren çatlaklanma ve magma korozyonu dokusu göstermektedir (Şekil 3 o, p).



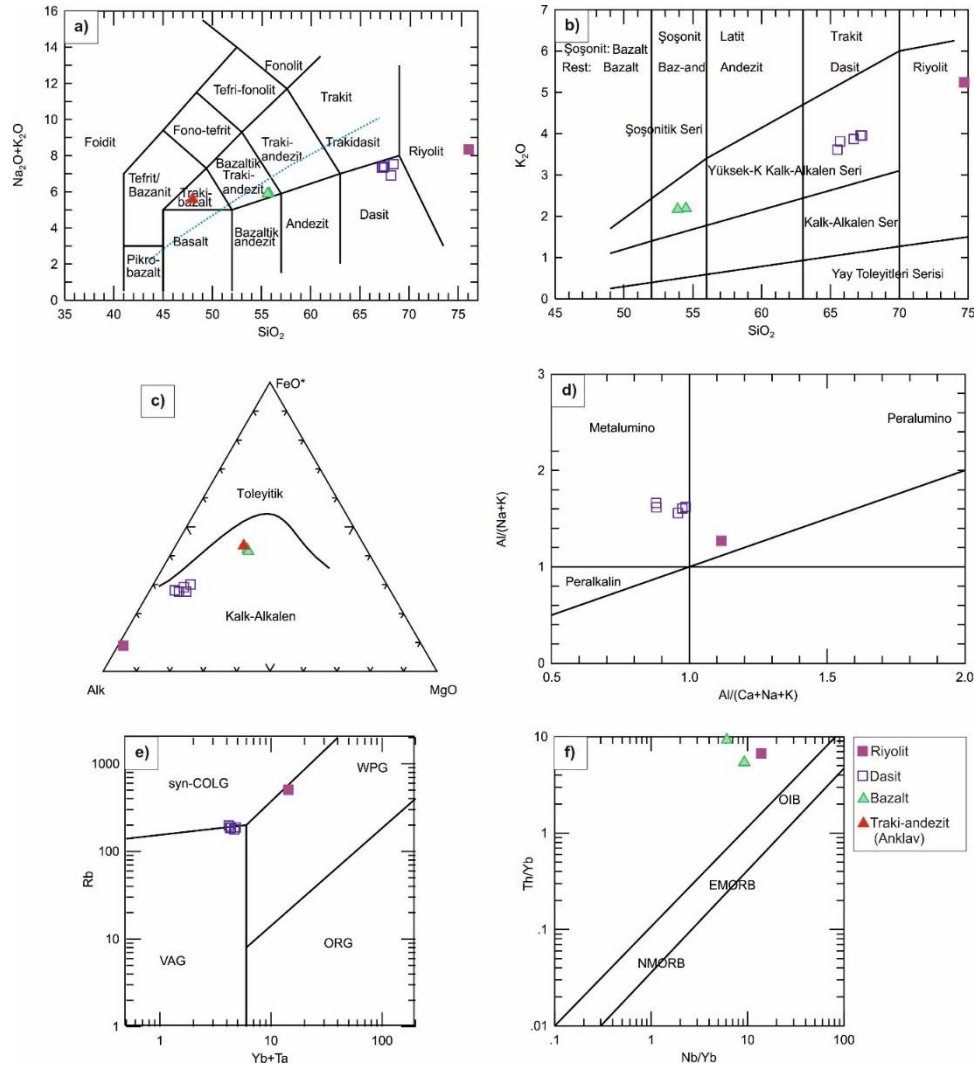
**Şekil 3.** İncelenen (a)-(d) bazaltik kayaların, (e), (f) Dasitik bileşimli ana kayanın, (g), (h) Dasitik bileşimli ana kaya ve magma karışımı anklavının, (i)-(l) dengesizlik dokuları sergileyen magma karışımı anklavının, (m), (n) Dasit bileşimli kayaların, (o), (p) riyolitik kayaların mikrofotografı. Mineral isimlerinin kısaltmaları Whitney ve Evans (2009)'e göre.

**Figure 3.** Microphotographs of the investigated (a)-(d) basaltic rocks, (e), (f) dacitic host-rock, (g), (h) dacitic host-rock and magma mixing enclave (i)-(l) the disequilibrium textured enclave, (m), (n) and (o), (p) rhyolitic rocks. The abbreviations of the mineral names are based on Whitney and Evans (2009).

**Tüm Kaya Jeokimyası(Whole-Rock Geochemistry)****Kayaların Sınıflandırılması (Classification of the Rocks)**

İncelenen volkanik kayalara ait 10 adet örneğinin ana oksit, iz ve nadir toprak element analizleri Çizelge 1 de verilmiştir. Örneklerde SiO<sub>2</sub> ağırlıkça %39.6-74.7, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %13.35-16.55, K<sub>2</sub>O %2,76-3,23, Na<sub>2</sub>O %1,99- 3,49, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %0.9-7.34 ve MgO içerikleri %0.86-3.63 arasında, değişmektedir. İncelenen volkanik kayaları adlandırmak için IUGS tarafından (Le Maitre, 2002) önerilen Le Bas ve diğ. (1986), Toplam Alkali-Silis (TAS) diyagramı kullanılmıştır (Şekil 4a). İncelenen kayalar TAS diyagramına göre yüksek potasyum içerikli bazaltik traki-andezit, dasit ve riyolit bileşiminde kayalardır. Bununla birlikte incelenen bazaltik traki-andezitler Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O içeriklerine göre şoşonit olarak da adlandırılmaktadır (Çizelge 2). TAS diyagramı taze volkanik kayalar için uygundur. Kimyasal analizle elde edilen ateşte kayıp (LOI) değeri alterasyonun bir göstergesi olarak kullanılabilir. Genel olarak LOI değerinin % 2.5 olması durumunda kaya taze olarak değerlendirilmektedir. LOI değerine bakıldığında, kimyasal analizi yapılan volkanik kayaların bazılarında özellikle anklav ve anklav içeren ana kayada bu değeri aştığı (LOI=2.5-12%) gözlenmektedir. LOI ve major oksit içeriklerinde gözlenen bu anormal farklılık magma karışımı prosesi ile açıklanabilmektedir. Bu durum anklavın içermiş olduğu amfibol ve biyotitlerde yer yer gözlenen opasitleşmeler, feldisptalarda gözlenen killeşmeler ve kaya içerisinde gözlenen karbonatlaşmalar ile uyum içindedir. İncelenen volkanik kayalar şoşonitten yüksek-K kalk-alkalene değişen bileşim sergilemektedir (Şekil 4 b, c). Bütün bunlarla birlikte, incelenen ortaç-asidik kayalar riyolitler hariç metalümino karakterli olup, volkanik yay kayaçları özelliği göstermektedir (Şekil 4 d, e). Ayrıca bazaltlar yitim bileşeni özelliği göstermektedir (Şekil 4f).





**Şekil 4** (a) Le Bas ve diğ. (1986)'a göre Toplam alkali-silika diyagramı. Mavi kesikli çizgi Alkalen-Subalkalen karakter ayırımını göstermektedir (Irvine ve Baragar, 1971). (b) Peccerillo ve Taylor (1976)'e göre  $K_2O$ - $SiO_2$  kaya sınıflama diyagramı, (c) Irvine ve Baragar (1971)' e göre AFM diyagramı (d) Asidik kayaların Maniar ve Piccoli (1989)'e göre alüminyum doygunluk diyagramları (e) Asidik kayaların Pearce ve diğ. (1984)'e göre tektonik ortam diyagramı (f) İncelenen kayaların Pearce (2008)'e göre tektonik ortam diyagramı

**Figure 4** (a) Total alkali-silica diagram according to Le Bas et al (1986). The blue dashed line shows the Alkaline-Subalkaline character distinction (Irvine and Baragar, 1971)., (b)  $K_2O$ - $SiO_2$  rock classification diagram according to Peccerillo and Taylor (1976), (c) AFM according to Irvine and Baragar (1971) diagram, (d) Aluminum saturation diagrams of acidic rocks according to Maniar and Piccoli (1989), (e) Tectonic setting diagram of the acidic rocks according to Pearce et al. (1984) (f) Tectonic setting diagram of the investigated rocks according to Pearce (2008)

**Çizelge 1.** İncelenen volkanik kayaların ana oksit ve iz element sonuçları (A: Anklav, AK: Ana kaya)

*Table 1. Major oxide and trace element analysis results of the investigated volcanic rocks(A:Enclave, AK: Host-rock)*

|                                | Dasit       | Dasit       | Dasit       | Dasit        | Andezit     | Dasit+anklav | Dasit       | Riyolit     | Bazalt      | Bazalt      |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Örnek                          | BT-27       | BT-34       | BT-37       | BT-38        | BT-39A      | BT-40        | BT-41 AK.   | BT-42       | BT-43       | BT-44       |
| <b>Major Oksitler (%)</b>      |             |             |             |              |             |              |             |             |             |             |
| SiO <sub>2</sub>               | 65.7        | 66.7        | 67.3        | 67.2         | 39.6        | 50.8         | 65.5        | 74.7        | 54.5        | 53.9        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.6        | 15.7        | 15.5        | 16.1         | 14.6        | 15.4         | 14.8        | 13.4        | 16.6        | 16.5        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.5         | 4.1         | 3.6         | 3.7          | 6.1         | 4.8          | 3.5         | 0.9         | 7.6         | 7.3         |
| CaO                            | 4.4         | 3.5         | 3.4         | 3.5          | 14.3        | 10.8         | 4.4         | 0.8         | 9.0         | 9.1         |
| MgO                            | 1.0         | 1.4         | 0.9         | 1.3          | 2.6         | 1.6          | 1.0         | 0.2         | 3.6         | 3.6         |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.4         | 3.4         | 3.5         | 3.4          | 2.3         | 2.5          | 3.0         | 3.0         | 3.6         | 3.5         |
| K <sub>2</sub> O               | 3.8         | 3.9         | 4.0         | 4.0          | 2.4         | 3.0          | 3.6         | 5.2         | 2.2         | 2.2         |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0          | 0.0         | 0.0          | 0.0         | 0.0         | 0.0         | 0.0         |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.4         | 0.5         | 0.4         | 0.5          | 0.9         | 0.8          | 0.4         | 0.1         | 1.1         | 1.1         |
| MnO                            | 0.1         | 0.1         | 0.1         | 0.1          | 0.2         | 0.2          | 0.1         | 0.1         | 0.1         | 0.2         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.2         | 0.2         | 0.2         | 0.2          | 0.2         | 0.2          | 0.2         | 0.0         | 0.3         | 0.3         |
| SrO                            | 0.1         | 0.1         | 0.1         | 0.1          | 0.1         | 0.1          | 0.1         | <0.01       | 0.1         | 0.1         |
| BaO                            | 0.1         | 0.1         | 0.1         | 0.1          | 0.1         | 0.1          | 0.1         | 0.0         | 0.1         | 0.1         |
| LOI                            | 2.0         | 1.8         | 1.6         | 1.8          | 10.9        | 7.8          | 2.5         | 3.3         | 2.6         | 2.4         |
| <b>Total</b>                   | <b>98.2</b> | <b>99.6</b> | <b>98.9</b> | <b>100.1</b> | <b>83.3</b> | <b>90.2</b>  | <b>96.6</b> | <b>98.3</b> | <b>98.6</b> | <b>97.8</b> |
| <b>İz elementler (ppm)</b>     |             |             |             |              |             |              |             |             |             |             |
| Co                             | 8.0         | 7.0         | 6.0         | 7.0          | 18.0        | 10.0         | 6.0         | 1.0         | 26.0        | 27.0        |
| Cu                             | 6.0         | 10.0        | 6.0         | 6.0          | 21.0        | 15.0         | 6.0         | 2.0         | 34.0        | 33.0        |
| Li                             | 50.0        | 30.0        | 50.0        | 20.0         | 30.0        | 40.0         | 50.0        | 30.0        | 20.0        | 20.0        |
| Mo                             | 1.0         | 2.0         | 1.0         | 2.0          | 1.0         | 1.0          | 1.0         | 1.0         | 2.0         | 1.0         |
| Ni                             | 1.0         | 2.0         | 1.0         | 1.0          | 8.0         | 4.0          | 1.0         | <1          | 41.0        | 38.0        |
| Pb                             | 53.0        | 41.0        | 38.0        | 36.0         | 18.0        | 27.0         | 34.0        | 81.0        | 16.0        | 18.0        |
| Sc                             | 7.0         | 7.0         | 7.0         | 7.0          | 20.0        | 16.0         | 7.0         | 6.0         | 21.0        | 20.0        |
| Zn                             | 76.0        | 55.0        | 53.0        | 51.0         | 61.0        | 55.0         | 48.0        | 28.0        | 82.0        | 82.0        |
| Ba                             | 885.0       | 999.0       | 1,010.0     | 1,030.0      | 847.0       | 916.0        | 743.0       | 96.7        | 817.0       | 825.0       |
| Ce                             | 89.4        | 88.7        | 84.1        | 81.7         | 71.6        | 91.0         | 85.0        | 38.8        | 68.2        | 68.7        |
| Cr                             | 20.0        | 10.0        | 10.0        | 10.0         | 10.0        | 10.0         | 10.0        | 10.0        | 150.0       | 150.0       |
| Cs                             | 10.0        | 14.1        | 9.7         | 13.8         | 8.0         | 8.7          | 10.5        | 65.4        | 7.3         | 11.2        |
| Dy                             | 4.7         | 4.1         | 3.4         | 3.5          | 4.8         | 4.4          | 3.5         | 6.7         | 4.2         | 4.2         |
| Er                             | 3.0         | 2.6         | 2.1         | 2.2          | 2.9         | 2.6          | 2.1         | 4.7         | 2.6         | 2.5         |
| Eu                             | 1.2         | 1.2         | 1.0         | 1.1          | 1.4         | 1.3          | 1.1         | 0.3         | 1.5         | 1.5         |
| Ga                             | 18.7        | 19.2        | 19.0        | 19.6         | 18.7        | 18.7         | 18.3        | 21.6        | 18.8        | 19.0        |
| Gd                             | 4.8         | 4.4         | 3.7         | 4.0          | 5.5         | 4.9          | 3.9         | 5.2         | 4.4         | 4.5         |
| Hf                             | 5.1         | 5.1         | 6.2         | 5.6          | 4.2         | 4.7          | 5.2         | 3.9         | 4.5         | 4.7         |
| Ho                             | 0.9         | 0.8         | 0.7         | 0.7          | 1.0         | 1.0          | 0.7         | 1.4         | 0.9         | 0.9         |
| La                             | 54.1        | 50.8        | 48.6        | 48.0         | 38.2        | 53.3         | 50.9        | 20.6        | 37.8        | 38.2        |
| Lu                             | 0.4         | 0.4         | 0.3         | 0.3          | 0.4         | 0.4          | 0.4         | 0.8         | 0.4         | 0.4         |
| Nb                             | 20.6        | 23.4        | 22.0        | 21.8         | 10.2        | 14.5         | 21.2        | 74.4        | 21.7        | 21.8        |
| Nd                             | 31.4        | 31.0        | 28.0        | 28.0         | 31.0        | 33.5         | 28.5        | 16.0        | 25.6        | 26.3        |
| Pr                             | 9.0         | 8.7         | 8.0         | 8.1          | 7.7         | 9.1          | 8.2         | 4.3         | 6.9         | 6.9         |
| Rb                             | 188.5       | 178.5       | 189.0       | 185.0        | 103.5       | 147.0        | 197.0       | 505.0       | 69.5        | 75.2        |
| Sm                             | 5.6         | 5.5         | 4.8         | 4.8          | 5.8         | 5.9          | 4.6         | 4.8         | 4.8         | 4.8         |
| Sn                             | 3.0         | 4.0         | 3.0         | 3.0          | 3.0         | 3.0          | 3.0         | 9.0         | 2.0         | 2.0         |
| Sr                             | 508.0       | 608.0       | 538.0       | 621.0        | 664.0       | 628.0        | 453.0       | 48.8        | 736.0       | 765.0       |
| Ta                             | 2.0         | 2.3         | 2.2         | 2.1          | 0.8         | 1.3          | 2.0         | 9.0         | 1.5         | 1.5         |
| Th                             | 29.6        | 29.6        | 30.0        | 29.7         | 12.2        | 22.0         | 29.3        | 36.1        | 12.7        | 12.8        |
| Tm                             | 0.5         | 0.4         | 0.3         | 0.3          | 0.4         | 0.4          | 0.3         | 0.8         | 0.4         | 0.4         |
| U                              | 8.7         | 11.9        | 11.9        | 12.7         | 9.3         | 6.6          | 9.5         | 33.7        | 4.1         | 4.2         |
| V                              | 67.0        | 81.0        | 76.0        | 80.0         | 211.0       | 162.0        | 70.0        | 11.0        | 168.0       | 172.0       |
| W                              | 3.0         | 4.0         | 3.0         | 3.0          | 4.0         | 5.0          | 3.0         | 7.0         | 1.0         | 1.0         |
| Y                              | 30.6        | 25.2        | 21.0        | 21.8         | 32.5        | 31.9         | 24.5        | 51.4        | 24.4        | 25.0        |
| Yb                             | 2.8         | 2.4         | 2.2         | 2.2          | 2.5         | 2.4          | 2.2         | 5.4         | 2.4         | 2.4         |
| Zr                             | 190.0       | 190.0       | 230.0       | 211.0        | 156.0       | 170.0        | 195.0       | 76.0        | 195.0       | 197.0       |

**Çizelge 2.** IUGS'ye göre TAS diyagramında Trakibazalt, Bazaltik Trakiandezit ve Trakiandezit alanlarına düşen kayaların alt sınıflaması.

**Table 2.** Subclassification of rocks falling into Trachybasalt, Basaltic Trachyandesite and Trachyandesite areas in TAS diagram according to IUGS.

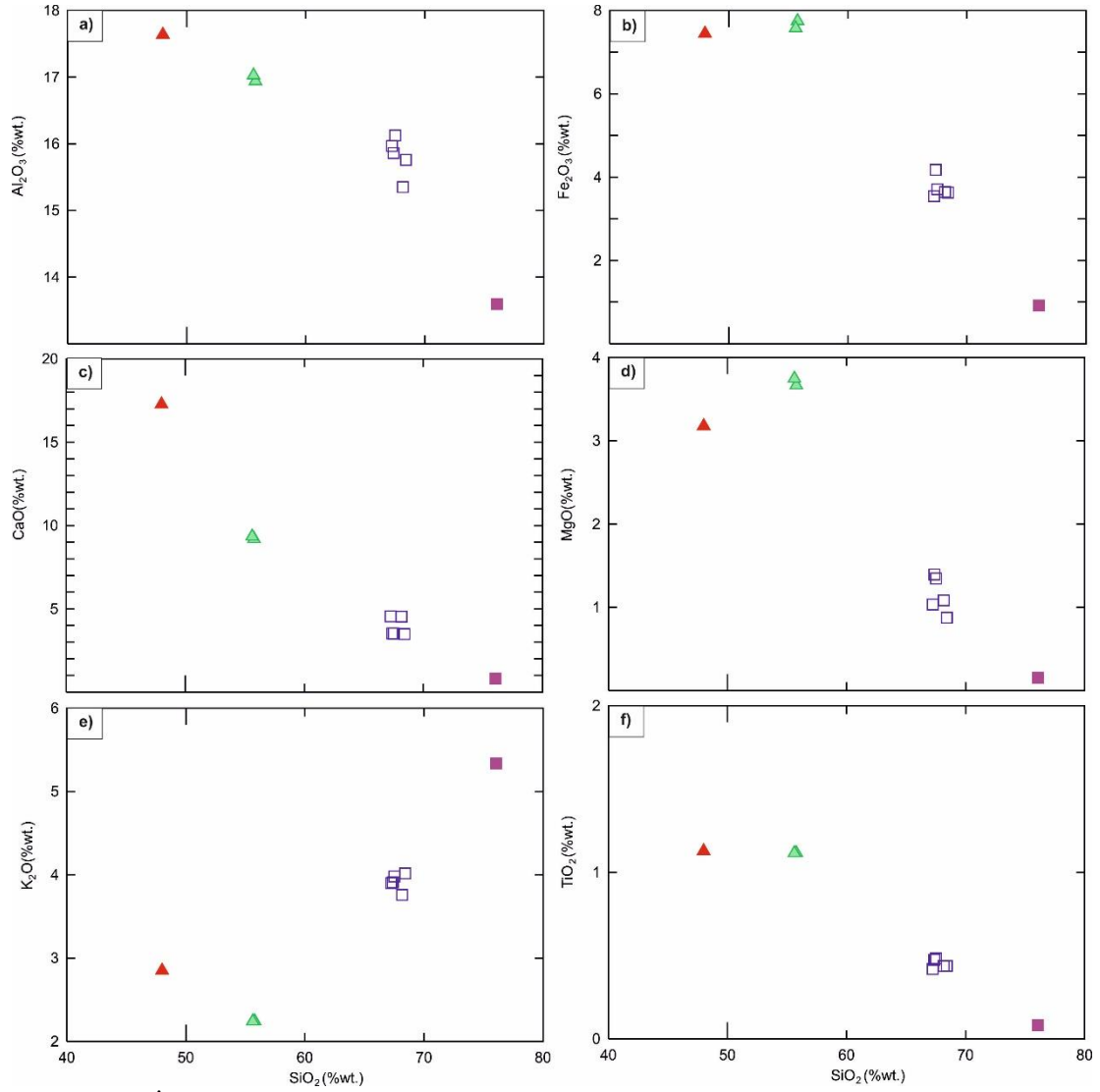
|                         | Trakibazalt          | Bazaltiktraki-andezit | Trakiandezit |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|
| $Na_2O - 2.0 \geq K_2O$ | Havayit              | Mujearit              | Benmorit     |
| $Na_2O - 2.0 < K_2O$    | Potasik traki-bazalt | Şoşonit               | Latit        |

**Kayaların Majör İz Element İçerikleri Ve Dağılımları (Major-Trace Element Contents of the Rocks and Their Distribution)**

İncelenen volkanitlerde  $SiO_2$ 'e karşı ana oksit ve iz elementlerdeki değişimler kayaların içerisinde gözlemlenen ana fenokristal fazlarının ayrılaşmasıyla ilişkilidir. Ana ve iz elementlerin değişim diyagramları incelendiğinde elementlerin birbirleriyle olan ilişkileri fraksiyonel kristalleşme, asimilasyon, kontaminasyon veya magma karışım olayları ile açıklanabilir. LOI değeri  $>2$  olan kayaların (Anklav ve anklav içerikli ana kaya)  $SiO_2$ 'ye karşı ana-iz element değişimlerinin doğru sonuç vermeyeceği bilindiğinden bunların değerlendirilmemesi onların yerine bazalt ve dasitik kayaların kimyasal içeriklerinin değerlendirilmesinin daha doğru olacağı düşünülmektedir. En mafik üye olan bazaltlarda  $SiO_2$  artışıyla  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Zr$  içerikleri azalarak negatif bir ilişki  $K_2O$  artışıyla pozitif bir ilişki gözlenmektedir (Şekil 5 ve 6).  $TiO_2$  ve  $Fe_2O_3$  azalışı magnetit kristalleşmesini göstermektedir.  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Ni$  ve  $Sc$ 'nin azalması olivin ve klinopiroksenin,  $MgO$ ,  $CaO$  ve  $Al_2O_3$  azalması büyük ölçüde plajiyoklaz kristallenmesini gösterir.  $SiO_2$  artışıyla kristallenme basıncı ile klinopiroksen ve plajiyoklaz azalmakta, magmadaki su içeriği artmaktadır.  $SiO_2$  artışına karşı  $Al_2O_3$  azalışı volkanik kayaların gelişiminde hornblend fraksiyonlaşmasının da etkili olabileceğini göstermektedir.

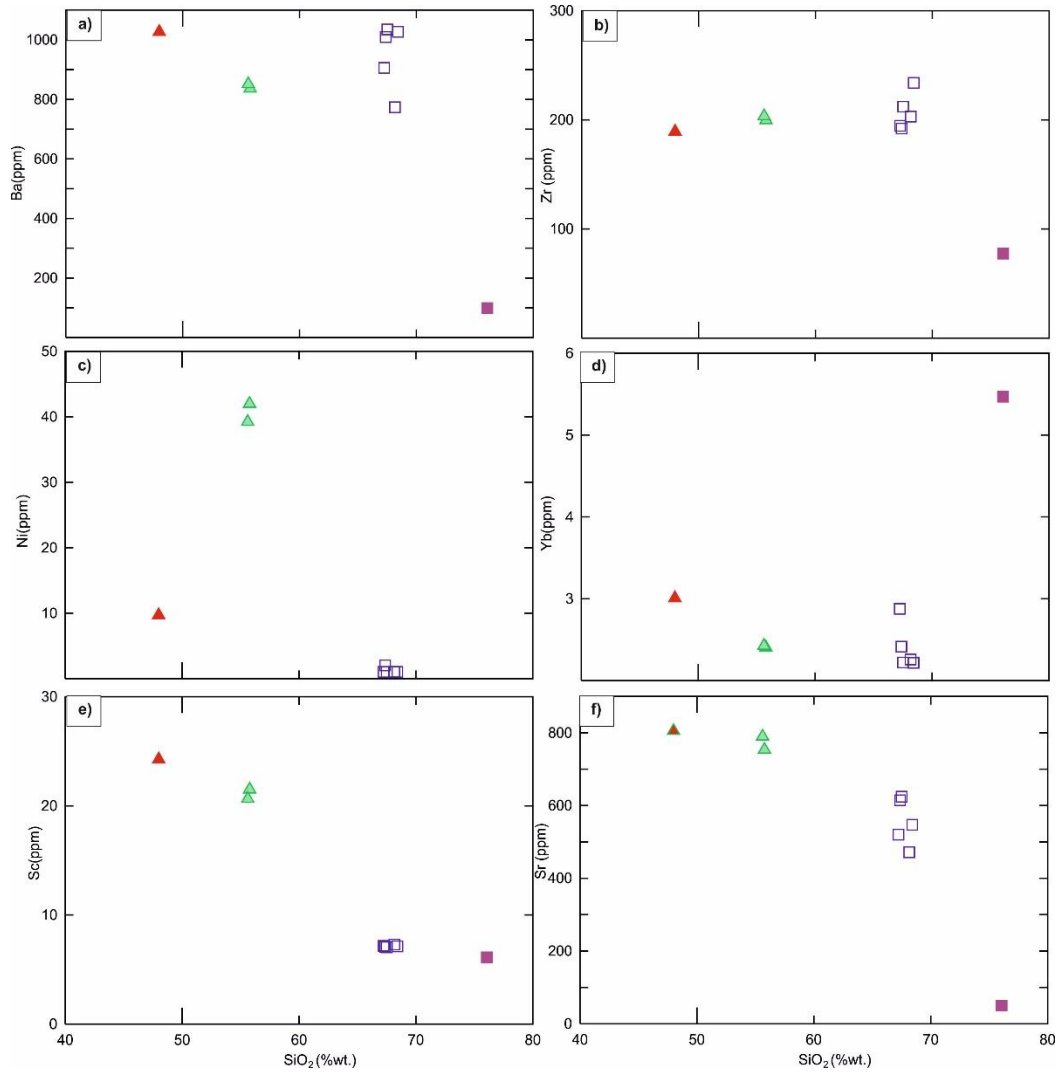
İncelenen dasitlerde ve riyolitlerde ise  $SiO_2$  ye karşı  $K_2O$ ,  $Zr$  içeriklerinde görünür biçimde artma ve pozitif bir ilişki,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Ba$ ,  $Sr$  içeriğinde kısmen azalma ve negatif bir ilişki görülmektedir (Şekil 5 ve 6).  $SiO_2$  artarken  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Co$ 'ın kısmen azalması amfibolün,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$  ve  $Sr$ 'nin azalması plajiyoklazların,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  azalması  $Fe-Ti$  oksitlerin fraksiyonlaşmasını yansıtmaktadır.

İncelenen kayaların N-MORB (Normal Okyanus Ortası Sırtı Bazaltı-N-OOSB) normalize (Hofmann, 2008) edilmiş iz element desenleri tipik olarak orojenik kayalarda gözlenen, yitim bileşeninin veya kabuk kontaminasyonunun varlığı ile ilişkili negatif  $Nb$ ,  $Ta$  ile karakteristiktir (Şekil 7a). İncelenen örneklerin kondrit'e (Nakamura, 1974) göre normalleştirilmiş nadir toprak element dağılımlarında (Şekil 7b), Hafif Nadir Toprak Elementlerin (HNTE) Ağır Nadir Toprak Elementlerden (ANTE) daha fazla zenginleştiği görülmektedir ( $La_N/Lu_N = 2.6-15.09$ ;  $Gd_N/Yb_N = 0.75-1.72$ ). HNTE'lerin ANTE'lere göre zenginleşmesiyle oluşan konkav şeklindeki dağılım, klinopiroksen ve/veya hornblend fraksiyonlaşmasına (Thompson ve diğ., 1984), işaret etmektedir. İncelenen kayalarda riyolitler hariç gözlemlenen konkav şekilli – kaşık şekilli ANTE desenleri klinopiroksen ve amfibol fraksiyonlaşmasının kayalarının gelişiminde önemli rol oynadığını göstermektedir (Arslan ve diğ., 2013). Bununla birlikte riyolitlerde bu desenin görülmeşi, riyolitlerin mafik faz olarak piroksen ve amfibol içermeyişi ile uyum içindedir.



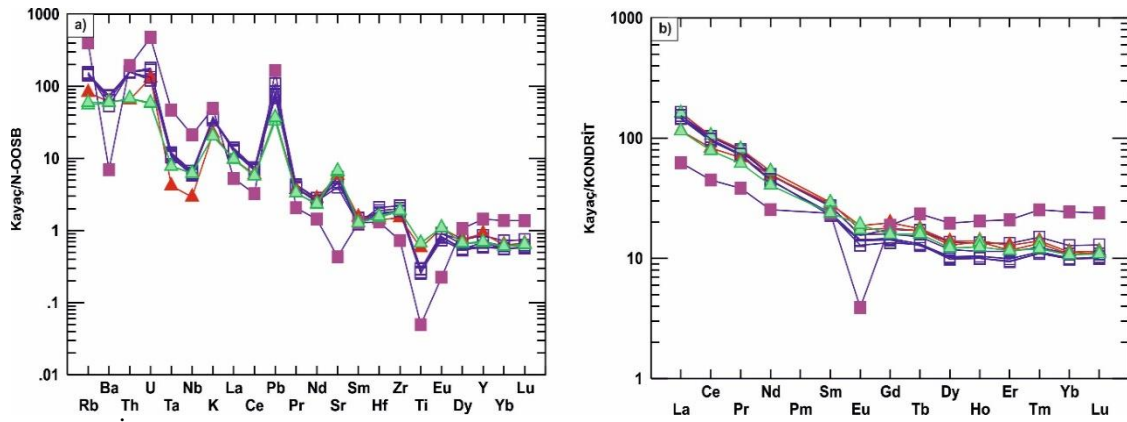
**Şekil 5.** İncelenen volkanik birimlerin SiO<sub>2</sub>'ye karşı seçilmiş ana oksit (ağ. %) değişim diyagramları. Semboller Şekil 4 ile aynıdır.

*Figure 5.* Variation diagrams of the selected major oxide (wt%) versus SiO<sub>2</sub> of the studied volcanic units. Symbols are the same as in Figure 4.



Şekil 6. incelenen volkanik birimlerin  $\text{SiO}_2$ 'ye karşı seçilmiş iz element (ppm) değişim diyagramları. Semboller Şekil 4 ile aynıdır.

Figure 6. Selected trace element (ppm) variation diagrams against  $\text{SiO}_2$  of the investigated volcanic units. Symbols are the same as in Figure 4.



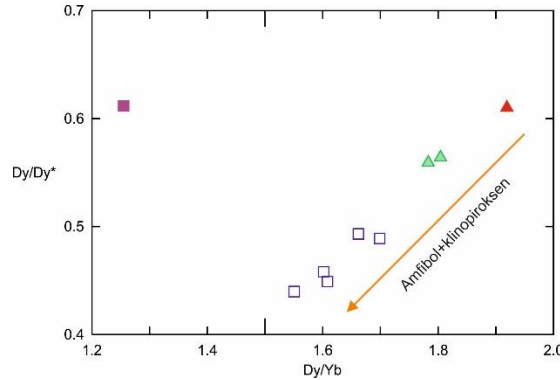
Şekil 7. İncelenen kayaların (a) Hofmann (1988)'a göre NMORB (N-OOSB-Normal Okyanus Ortası Sirt Bazaltları) normalize edilmiş ve (b) Nakamura (1974)' e göre Kondrite normalize edilmiş diyagramları

Figure 7. (a) NMORB (NMORB-Normal-Mid-Ocean Ridge Basalts) normalized according to Hofmann (1988) and (b) Chondrite normalized according to Nakamura (1974) diagrams of the investigated rocks

## SONUÇLARIN İRDELENMESİ (DISCUSSION)

Genel olarak inceleme alanındaki kayaların BİYE (Büyük İyon Yarıçaplı Elementler; özellikle Sr, K, Rb, Ba, Th) zenginleşmekte olduğu gözlenmektedir (Şekil 7a). Volkanik kayalarda BİYE içeriğinde zenginleşme kabuk kontaminasyonuna veya magma karışımına işaret etmektedir. Nb de gözlenen negatif anomali kayaların ana magmasının gelişiminde yitim bileşeninin etkili bir şekilde rol oynadığını göstermektedir (Pearce, 1983). BİYE konsantrasyonları sulu akışkan faz tarafından kontrol edilirken, YAEE (yüksek alan enerjili element)'ler kaynak kayacın kimyası ve kristal/eriyik prosesleri tarafından kontrol edilirler (Rollinson, 1993). Riyolit ve dasitlerin kondrite normalize edilmiş değerleri irdelendiğinde önemli derecede negatif Eu anomalisi ( $Eu/Eu^* = 0.18-0.78$ ) gözlenmektedir. Bu durum dasitlerin gelişiminde plajiyoklaz fraksiyonlaşmasının önemli oranda etkili olduğunu ve kayacın plajiyoklaz doğasıyla uyum içinde olduğunu göstermektedir. Bazaltlarda ise önemli bir Eu anomalisi görülmemekle birlikte  $Eu/Eu^*$  oranı 0.96-0.97 dir ( $Eu/Eu^* = E_{CN}/(S_{mCN} \cdot G_{dCN})^{0.5}$ ) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır (CN: Kondrit normalize değeridir (Sun ve McDonough, 1989)). İncelenen kayalardaki tüm negatif Ti anomalisi Fe-Ti oksitlerin fraksiyonlaşmasını göstermektedir. Riyolitlerde gözlenen belirgin negatif Ba anomalisi ise sanidinlerin fraksiyonlaşması ile ilişkilidir ve petrografik incelemelerinde gözlenen sanidin mikrofeno kristallerinin varlığı ile örtüşmektedir. Bununla birlikte  $SiO_2$ -iz element değişim diyagramlarında riyolitlerde gözlenen belirgin şekilde Zr tüketimi ve Yb zenginleşmesi zirkon fraksiyonlaşmasını göstermektedir.

Bütün bunların yanında, kayaçların kondrite göre normalize edilmiş nadir toprak element dağılım diyagramları ve okyanus ortası sırt bazaltlarına normalize edilmiş iz element diyagramlarında riyolitler hariç tüm örneklerin birbirlerine paralellik gösterdiği, dolayısıyla bu kayaçların aynı kökenden türeyebilecekleri söylenebilir. Riyolitlerde Ba, Sr, Eu, ve Ti desenlerinde önemli derecede farklılık gözlenmektedir. ANTE de gözlenen kaşık şekilli desen ile birlikte  $Dy/Dy^*$  oranının  $>1$  olması ( $Dy/Dy^* = D_{yCN}/(L_{aCN}^{4/13}) \cdot (Y_{bCN}^{9/13})$ ) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır) amfibol fraksiyonlaşmasına işaret etmektedir (Davidson ve diğ., 2013). İncelenen kayalarda riyolitlerde  $Dy/Dy^*$  oranı 0.62 iken bu oran diğer tüm kayalarda 0.44-0.56 arasında değişim göstermektedir (Şekil 8). İncelenen volkanik kayaların  $Dy/Yb$  karşı  $Dy/Dy^*$  oranlarının ilişkisini gösteren bir diyagram üzerinde riyolitlerin ve diğer kaya gruplarının iki farklı alana düştüğü, bazalt ve dasitlerin klinopiroksen ve amfibollerin birlikte fraksiyonlaşabileceği (Şekil 8) bir trend sergiledikleri görülmektedir (Davidson ve diğ., 2013). Bu durum riyolitlerin diğer kayalardan daha farklı bir diferansiyasyon hikayesine sahip olduğunu göstermektedir.



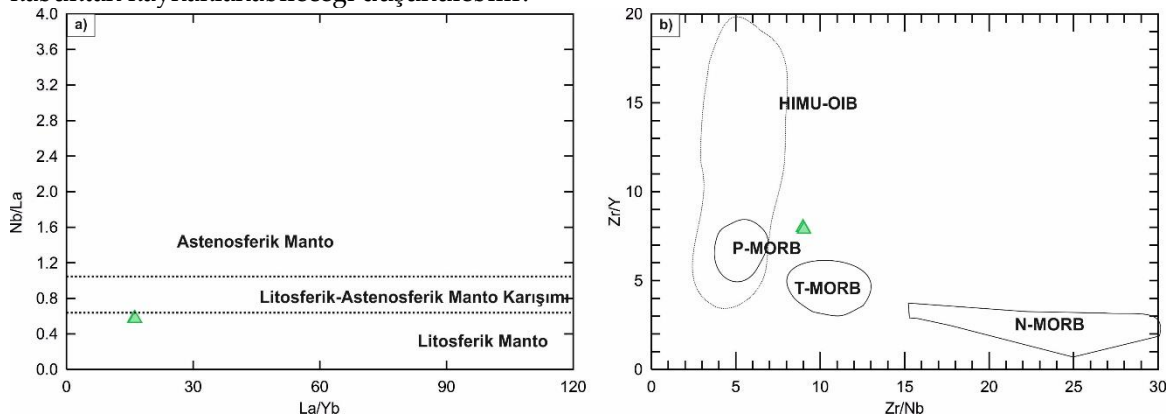
**Şekil 8.** İncelenen volkanik kayaların  $Dy/Yb$  karşı  $Dy/Dy^*$  oranlarının ilişkisini gösterir diyagram. Amfibol+klinopiroksen fraksiyonlaşma trendi Davidson ve diğ. (2013)'e göredir.

*Figure 8. Diagram showing the relationship of  $Dy/Yb$  versus  $Dy/Dy^*$  ratios of the investigated volcanic rocks.*

*Amphibole+clinopyroxene fractionation trend is based on Davidson et al. (2013).*

Özellikle Th ve K içeriklerinin zenginleşmesi kabuktan oluşan kirlenmeyi göstermektedir (Thompson ve diğ., 1984; Pearce ve Peate, 1995; Elburg, 1996). İncelenen volkanik kayaların HNTE ve BİYE'lerce zenginleşmesi, buna karşın özellikle negatif Nb-Ta anomalisi göstermesi yitim sonucu dalan levhanın kaynağa olan katkısı ile veya kabuksal bileşenlerin etkisiyle açıklanabilmektedir. Litosferik mantodan oluşan kayaların La/Nb oranının genelde 1'den büyük, astenosferik mantodan oluşan kayaların La/Nb oranlarının ise 0,7 seviyesinde olduğu bilinmektedir (DePaolo ve Daley, 2000). İncelenen volkanik kayalarda en evrimleşmiş örnek olan riyolitler hariç La/Nb oranı 1.75–3.75 arasında olup, litosferik mantodan türediklerine işaret etmektedir. Bununla birlikte, örneklerin Zr/Sm oranları da riyolitler hariç genel itibarıyla 30 ile 48 arasında değişmektedir bu da zenginleşmiş litosferik manto kökenli olduklarına işaret etmektedir (Wilson, 1989). Bu nedenle, incelenen volkanik kayalar zenginleştirilmiş litosferik mantodan türemiş olabilir.

Mafik kayaların bileşimi ( $MgO > \text{ağırlıkça } \%4$ ; Peccerillo (2005)), üst mantodan türetilen birincil eriyiklere en yakın bileşime sahip oldukları için manto kaynak bileşimleri hakkında en doğru bilgiyi verir. 1000 ppm Cr, 400 ppm Ni, %8 MgO (Best, 2003) ve düşük BİYE/YAEE/HFSE değerleri (Weaver, 1991) içeren bazaltlar, birincil manto kaynağından türetildiğini gösterir. İncelenen bazaltik kayaların MgO, Cr, Ni değerleri ilksel bileşimi yansıtmadıklarından (Çizelge 2) oldukça diferansiye ürünler olduklarını göstermektedir. Bu nedenle kaynak alan belirlenmesi ile ilgili yapılacak petrolojik modelleme çalışmalarında kullanılamamaktadırlar. Ancak zenginleşmiş içerikleri nedeniyle Nb/La-La/Yb diyagramı ve Zr/Y ve Zr/Nb diyagramlarında zenginleşmiş doğalarının belirlenmesi için kullanılmışlardır (Şekil 9). Yüksek Zr/Y ve düşük Zr/Nb değerleri "düşük ergime derecelerini" göstermektedir. Diğer taraftan, yüksek Zr/Nb ve düşük Zr/Y değerleri ise "yüksek ergime derecelerini" gösterir (Menzies ve Kyle, 1990). Ayrıca bu diyagram üzerine tüketilmiş manto kaynağının yüksek dereceli ergiyiklerini temsil eden N-MORB (N-OOSB), zenginleşmiş manto sorguçlarının düşük dereceli kısmi ergiyiklerini temsil eden P-MORB (P-OOSB) ve bunlar arasındaki geçisi temsil eden T-MORB alanları da gösterilmektedir. HIMU-OIB lavları üst manto malzemesinin plume yerleşiminden kaynaklanan düşük derecede kısmi ergimesini temsil eder (Halliday ve diğ., 1988). İncelenen bazaltlar (şoşonitler) bu diyagram üzerinde geçisi temsil eden P-MORB ve T-MORB arasındaki zenginleşmeyi karakterize eden alana düşerler ve nispeten düşük Zr/Y ile düşük Zr/Nb değerleriyle karakterize olurlar. Düşük Zr/Y (4.8-10,9) ve Zr/Nb (8.11-15,29) oranları litosferik manto kaynağının düşük derecede kısmi ergimesine işaret etmektedir. Kaynakta gözlenen bu nispeten zenginleşmenin dalma-batma ile geri dönen yaşlı okyanusal kabuktan kaynaklanabileceği düşünülebilir.



Şekil 9 En ilkel örneklerin (bazaltlar) (a) La/Yb - Nb/La ve (b) Zr/Nb - Zr/Y diyagramları

Figure 9 (a) La/Yb versus Nb/La and (b) Zr/Nb versus Zr/Y diagrams of the most primitive samples (basalts)

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İncelenen volkanik kayalar kalkalkalen karakterli, yüksek-K kalk-alkalen ve şoşonitik lavlardan oluşmaktadır. Jeokimyasal açıdan bazaltik traki-andezit, dasit ve riyolit biçiminde olan kayalardan bazı dasitler boyutları mm-den dm-ye değişen boyutta bol miktarda anklav içermektedir. Anklavlar dokusal özellikleri (söndürülmüş amfibol, bıçaksı biyotit, elek dokulu plajiyoklaz mineralleri ile ince taneli kaya dokusu) ve mineralojik açıdan ana kayalarına benzemeleri nedeniyle magma karışımı anklavlarına benzemektedirler. Anklav ve anklav içerikli kayaların LOI değerleri magma mixing süreçleri nedeniyle oldukça yüksektir.

Ana ve iz element değişimleri, incelenen bazaltik kayaların gelişiminde olivin, klinopiroksen, plajiyoklaz ve Fe-Ti oksit, dasitik kayaların gelişiminde plajiyoklaz, klinopiroksen, hornblend ve Fe-Ti oksit fraksiyonlaşmasının etkili olduğunu göstermektedir. Riyolitlerde ise biyotit, sanidin, plajiyoklaz, Fe-Ti oksit ve tali mineral olarak da zirkon fraksiyonlaşmasından söz edilebilir. İncelenen kayaların N-MORB (N-OOSB) normalize diyagramlarında tipik orojenik desen sergilemektedirler. BİYE ve HNTE ile zenginleşme gösteren bu kayalar yitim bileşeni etkisi ve kabuk kontaminasyonu etkisi göstermektedir. İncelenen kayalarda, riyolitler hariç Dy/Dy\* oranı 0.44-0.56 arasında değişim göstermektedir ve bu durum ANTE desenlerindeki kaşık desen ile birlikte kayaların gelişiminde hem amfibol hem de piroksen fraksiyonlaşmasının teorik olarak mümkün olabileceğini göstermektedir. Major-iz element değişim diyagramları ve örümcek diyagramları göz önünde bulundurulduğunda riyolitlerin diğer kaya grubundan farklı bir fraksiyonlaşma hikayesine sahip olduğu düşünülmektedir. Kondrit normalize NTE ve OOSB normalize iz element diyagramları incelendiğinde riyolitlerin diğer kaya gruplarından farklı kökenden türemiş olabilecekleri söylenebilir.

Elde edilen veriler ışığında Tepeköy yöresinde yüzeyleyen Miyosen yaşlı kayaların gelişiminde fraksiyonel kristalleşme, kontaminasyon ve magma mixing süreçlerinin önemli ölçüde etkili olduğu ileri sürülmektedir. Bununla birlikte bu makaleden elde edilen veriler ışığında kayaların zenginleşmiş litosferik manto kaynaklı olduğu ve çarpışma sonrası yüksek K içerikli bimodal volkanizmanın ürünleri oldukları öne sürülmektedir.

## TEŞEKKÜR VE KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT AND CONTRIBUTIONS)

Bu çalışma Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü BAP211007061 numaralı proje tarafından finanse edilmektedir. Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğü'ne katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Arslan, M., Temizel, İ., Abdioğlu, E., Kolaylı, H., Yücel, C., Boztuğ, D., and Şen, C., 2013, 40Ar–39Ar dating, whole-rock and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of post-collisional Eocene volcanic rocks in the southern part of the Eastern Pontides (NE Turkey): implications for magma evolution in extension-induced origin: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 166, no. 1, 113-142.
- Asan, K., Kurt, H., Gündüz, M., Gençoğlu Korkmaz, G., and Morgan, G., 2021, Geology, geochronology, and geochemistry of the Miocene Sulutas volcanic complex, Konya-Central Anatolia: genesis of orogenic and anorogenic rock associations in an extensional geodynamic setting: International Geology Review, 1-32.
- Best, M. G., 2003, Igneous and metamorphic petrology, John Wiley & Sons.
- Davidson, J., Turner, S., and Plank, T., 2013, Dy/Dy\*: Variations Arising from Mantle Sources and Petrogenetic Processes: Journal of Petrology, v. 54, no. 3, 525-537.



- DePaolo, D. J., and Daley, E. E., 2000, Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension: *Chemical Geology*, v. 169, no. 1-2, 28.
- Elburg, M. A., 1996, Genetic significance of multiple enclave types in a peraluminous ignimbrite suite, Lachlan Fold Belt, Australia: *Journal of Petrology*, v. 37, no. 6, 1385-1408.
- Eren, Y., 1993, Konya Kuzeybatısında Bozdağlar Masifinin Otokton ve Örtü Birimlerinin Stratigrafisi: *Geological Bulletin of Turkey*, v. 36, 7-23.
- Gençoğlu Korkmaz, G., Asan, K., Kurt, H., and Morgan, G., 2017,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of the Neogene bimodal volcanism in the Yükselen area, NW Konya (Central Anatolia, Turkey): *Journal of African Earth Sciences*, v. 129, 427-444.
- Gençoğlu Korkmaz, G., Kurt, H., Asan, K., and Leybourne, M., 2022, Ar-Ar Geochronology and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Systematics of the Post-collisional Volcanic Rocks from the Karapınar-Karacadağ Area (Central Anatolia, Turkey): An Alternative Model for Orogenic Geochemical Signature in Sodic Alkali Basalts: *Journal of Geosciences*, v. 67, no. 1, 53-69.
- Halliday, A., Dickin, A., Fallick, A., and Fitton, J., 1988, Mantle dynamics: a Nd, Sr, Pb and O isotopic study of the Cameroon line volcanic chain: *Journal of Petrology*, v. 29, no. 1, 181-211.
- Hofmann, A. W., 1988, Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 90, no. 3, 297-314.
- Hofmann, A.W., 2008, 2.03 - Sampling Mantle Heterogeneity through Oceanic Basalts: Isotopes and Trace Elements. In: Holland HD, Turekian KK (eds) *Treatise on Geochemistry*. Pergamon, Oxford, pp 1-44
- Irvine, T., and Baragar, W. R. A., 1971, A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 8, 523-548.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., and Zanettin, B. A., 1986, A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram: *J. Petrol*, v. 127, 745.
- Le Maitre, R. W., 2002, A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. : Cambridge University press Cambridge University press, 236.
- Maniar, P. D., and Piccoli, P. M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids: *Geological society of America bulletin*, v. 101, no. 5, 635-643.
- Menzies, M. A., and Kyle, P. R., 1990, Continental volcanism: a crust-mantle probe: *Continental mantle*, 157-177.
- Nakamura, N., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 38, no. 5, 757-775.
- Pearce, J., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margin: *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, 230-249.
- Pearce, J., Harris, N., and G. Tindle, A., 1984, Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks, *Journal of Petrology*, 956-983.
- Pearce, J. A., 2008, Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust: *Lithos*, v. 100, no. 1-4, 14-48.
- Pearce, J. A., and Peate, D. W., 1995, Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 23, no. 1, 251-285.

- Peccerillo, A., 2005, Plio-Quaternary Volcanism in Italy: Petrology, Geochemistry, Geodynamics, 443.
- Peccerillo, A., and Taylor, S., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey: Contributions to mineralogy and petrology, v. 58, no. 1, 63-81.
- Rollinson, H. R., 1993, Using geochemical data: evaluation: Presentation, interpretation. Singapore. Ongman.
- Şengör, A. C., and Yilmaz, Y., 1981, Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach: Tectonophysics, v. 75, no. 3-4, 181-241.
- Sun, S., and McDonough, W., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: Geological Society, London, Special Publications, v. 42, no. 1, 313-345.
- Thompson, R., Morrison, M., Hendry, G., and Parry, S., 1984, An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, v. 310, no. 1514, 549-590.
- Van Hinsbergen, D. J., Maffione, M., Plunder, A., Kaymakçı, N., Ganerød, M., Hendriks, B. W., Corfu, F., Gürer, D., de Gelder, G. I., and Peters, K., 2016, Tectonic evolution and paleogeography of the Kırşehir Block and the Central Anatolian Ophiolites, Turkey: Tectonics, v. 35, no. 4, 983-1014.
- Weaver, B. L., 1991, The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints: Earth and Planetary Science Letters, v. 104, no. 2-4, 381-397.
- Whitney, D. L., and Evans, B. W., 2009, Abbreviations for names of rock-forming minerals: American Mineralogist, v. 95, no. 1, 185-187.
- Wilson, B. M., 1989, Igneous petrogenesis a global tectonic approach, Springer Science & Business Media.



## APPLICATION OF THE BEES ALGORITHM UPON HYDRAULIC CYLINDER DESIGN AND OPTIMIZATION

<sup>1</sup>Betül SÖZEN , <sup>2</sup>Ömer Sinan ŞAHİN , <sup>3</sup>Mete KALYONCU 

<sup>1</sup>Selcuk University, Akşehir Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Akşehir/Konya, TÜRKİYE

<sup>2,3</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>betul.sozen@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>ossahin@ktun.edu.tr, <sup>3</sup>mkalyoncu@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 14.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.10.2022)

**ABSTRACT:** In this study, mass minimization of a simple double-acting hydraulic cylinder has been studied using The Bees Algorithm (BA) for a specific force and known material, considering the buckling and pressure constraints. A Hydraulic cylinder is a hydraulic actuator that creates linear movement by converting hydraulic energy back to a mechanical movement. Hydraulic-driven working machines are widespread in the industry today. Hydraulic cylinders are used in mobile applications such as container lifting devices, excavators, dump trucks, loaders, graders and dozers. Weight reduction in these cylinders plays a fundamental role in the performance of the machine in terms of lifting capacity, speed, costing, etc. The Bees Algorithm is a metaheuristic algorithm that mimics the natural foraging behavior of honey bees to find the optimum solutions. The advantages over other algorithms are its ability to search both locally and globally and being applicable for several optimization problems with the chance to be integrated with other algorithms. In this study, it is also aimed to determine the optimal parameters of the bees algorithm for minimum computation cost.

**Keywords:** The Bees Algorithm, Hydraulic Cylinder, Mass Minimization, Optimization

### Hidrolik Silindir Tasarımı Ve Optimizasyonunda Arı Algoritmasının Uygulanması

**ÖZ:** Bu çalışmada, belirli bir kuvvet ve bilinen bir malzeme için, basit bir çift etkili hidrolik silindirin kütle minimizasyonu, burkulma ve basınç kısıtlmaları da dikkate alınarak, Arı Algoritması kullanılarak incelenmiştir. Hidrolik silindir, hidrolik enerjiyi tekrar mekanik harekete dönüştürerek doğrusal hareket oluşturan bir hidrolik aktüatördür. Hidrolik tahrikli iş makineleri günümüzde endüstride oldukça yaygındır. Hidrolik silindirler; konteyner kaldırma cihazları, ekskavatörler, damperli kamyonlar, yükleyiciler, greyderler ve dozerler gibi mobil uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu silindirlerdeki ağırlık azaltımı, kaldırma kapasitesi, hız, maliyet vb. açılardan makinenin performansında önemli bir rol oynar. Arı Algoritması, optimum çözümleri bulmak için bal arılarının doğal yiyecek arama davranışını taklit eden metasezgisel bir algoritmadır. Hem lokal hem de global arama yapabilmesi ve diğer algoritmalar ile entegre olabilme şansı, diğer algoritmalara göre avantajlarını oluşturur ve bu sayede birçok optimizasyon problemine uygulanabilir. Ayrıca bu çalışmada, minimum hesaplama maliyeti için Arı Algoritmasının optimum parametrelerinin belirlenmesi de amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Arı Algoritması, Hidrolik Silindir, Kütle Minimizasyonu, Optimizasyon

## 1. INTRODUCTION

The aim of optimization is **to find** the minimum or maximum value of a function consisted one or more dependent variables. This function is named **an** objective function. According to being a single or multiple objective function, problem is called a single function and multi-objective optimization problem respectively (Pham and Ghanbarzadeh, 2007).

The Bees Algorithm (BA) is a population-based search algorithm that was devised by Pham et al in 2005. BA involves a swarm intelligence approach and focuses on problem-solving behavior of the swarm to improve effective metaheuristic methods. This algorithm is inspired by the food foraging behavior of honeybees and it is a multivariable global search algorithm (Pham et al., 2005). The basic form of the BA algorithm performs a kind of neighborhood search combined with a global search (Pham et al., 2006).

The efficiency and specific abilities of BA have been proven in several studies:

Pham et al. have solved the constrained optimization problem about welded beams designed using the BA. In terms of the accuracy of the result, BA has outperformed other optimization techniques. They have notified that a number of parameters must be chosen as a challenge of **the** algorithm. After a few trials, setting these parameters' values is possible, fortunately (Pham et al., 2008). Pham et al. **have** utilized BA to optimize parameters of fuzzy logic parameters for vibration analysis and thanks to **the** algorithm efficiency and robustness of the system have been improved (Pham and Kalyoncu, 2009).

Fahmy and Kalyoncu have used BA to solve a problem that **has** complicated parameters for robot manipulator control. Their study consists of two cases one of them is modeling of inverse kinematics of a robot arm and **the** second one is **the** minimization of connection weight between nodes to minimize positional inaccuracies and vibrations. As a result of **the** number of trials, PID controllers designed using BA have predominated **over** robot controllers designed using manual approaches (Fahmy et al., 2012). Bilgic et al. have used BA for **the** optimal setting of a linear quadratic regulator (LQR) for a linear inverted pendulum. They optimized the weight matrix of LQR to move the cart's desired location with a minimum pendulum angle. As a result of **the** study, **the** performance of **the** LQR controller has been improved (Bilgic et al., 2016). Sen et al. **have** studied earthquake excitation based on BA. They optimized the gain coefficient of **the** PID controller and compared experimental results with a genetic algorithm(GA) (Arif Şen et al., 2018). Dat et al. **have** studied nanocomposite multilayer solar cells that are exposed to axial compressive load and carried out BA to maximize the value of buckling load ( (Dat et al., 2020).

A hydraulic cylinder or actuator uses liquid pressure to obtain linear movement. Hydraulic-driven working machines are widespread in the industry today. Hydraulic cylinders are used in mobile applications such as container lifting devices, excavators, dump trucks, loaders, graders, and dozers (Shah and Upadhyay). Weight reduction in these cylinders plays a fundamental role in the performance of the machine in terms of lifting capacity, speed, cost, energy saving, etc. Mass optimization of cylinders has been investigated with different algorithms and theoretical or experimental approaches by many researchers. For instance, Solazzi et al. have focused on the weight optimization problem of hydraulic actuator that has many parameters with the help of a classical mechanic and finite element analysis (Solazzi et al., 2020). Ghasemi et al. studied on minimum mass **cost** and maximum buckling pressure of cylinders using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) Ghasemi et al., 2017).

Xu et al. have studied on disassembly that is key step of remanufacturing to improve resource utilization rate and reduce manufacturing cost. For disassembly process, they used BA to find optimal disassembly sequence. Thus, efficiency of disassembly has been increased (Xu et al., 2020).

Shouran et al. have focused tuning parameters of various controllers to stabilize and balance the frequency in the Great Britain (GB) power system and they applied BA algorithm for the problem. As a result of the studies, it has been observed that BA can significantly reduce the deviation in the frequency (Shouran et al., 2021).

Baronti et al. have searched mathematical analysis of BA's search capabilities and treated it as a mathematical description beyond the qualitative biological metaphor. They found that local search is mainly influenced by neighbourhood size rather than the number of sent foragers (Baronti et al., 2020).

Unal et al. have investigated on the cost-effective optimal dimensions of a solar chimney with BA and they determined sizes of collector diameter and chimney height that can be useful in the optimal design of solar chimney systems (Unal et al., 2022).

In the literature studies, various problems are defined and generally different optimization process has been applied depending on these problems. However, the number of studies examining the effect of algorithm parameters on optimization problem is insufficient. To fill this gap, firstly this study deals with the application of the BA for the optimum design of hydraulic cylinders and then effect of BA parameters on the optimization problem in terms of inside diameter, thickness, mass and elapsed time for solving the problem is compared via response surface design that is used for parameter optimization of algorithm. According to inferences, it is focused on the determination of the best parameter set for minimum computation time by using the response surface method and analysis of variance.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Cylinder Components

Generally, structural steel is used in the pipe part of hydraulic cylinders, and tempered steel is used in other components. In this study, it is assumed that the specified materials are used. Cylinder components that are involved in the weight optimization problem are the barrel and piston rod. A schematic representation of cylinder components is given in Figure 1.

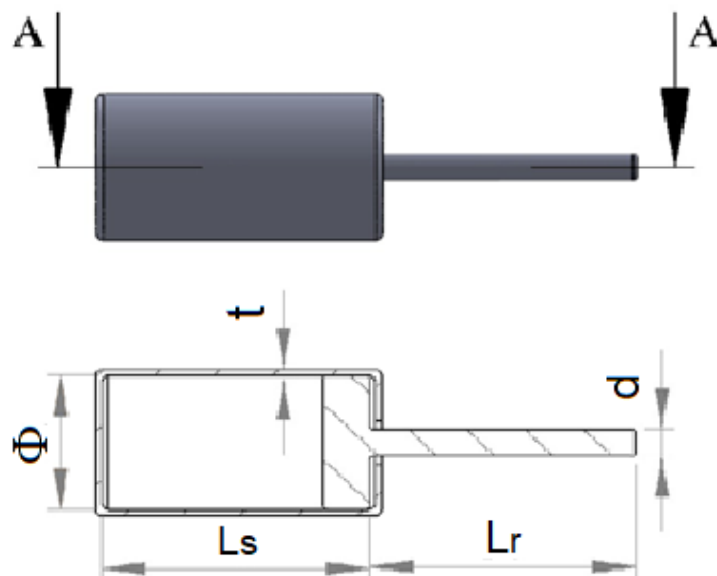


Figure 1. Schematic representation of cylinder

### 2.2. Obtaining Objective Function and Constraints

In this paper, weight optimization of the hydraulic cylinder has been carried out depending on the cylinder's inner diameter and wall thickness. The material of the cylinder is St37 steel. Constants and variables of the optimization problem are given in Tables 1-2.

**Table 1.** Given values of the optimization problem (Dengiz et al.,2018)

| Constant                                 | Symbol     | Value |
|--|------------|-------|
| Density of material (kg/m <sup>3</sup> ) | $\rho$     | 7800  |
| Elasticity modulus (GPa)                 | E          | 210   |
| Yield strength (MPa)                     | $\sigma_y$ | 235   |
| Force (kN)                               | F          | 500   |
| Length of stroke (m)                     | $L_s$      | 0,5   |
| Length of the rod (m)                    | $L_r$      | 0,5   |
| Safety factor (plastic deformation)      | m          | 2,5   |
| Safety factor (buckling)                 | n          | 4     |

**Table 2.** Variables of the optimization problem

| Variable                            | Symbol |
|-------------------------------------|--------|
| Inside diameter of the cylinder (m) | $\Phi$ |
| Wall thickness of cylinder (m)      | t      |
| Pressure of liquid (Pa)             | P      |
| Rod diameter (m)                    | d      |

There are some physical equations in optimization problems to obtain objective functions and constraints. Force-pressure equality is given as in Equation 1.

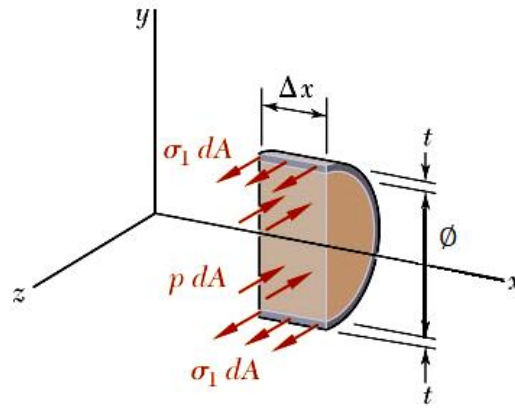
$$F = \frac{P\pi\Phi^2}{4} \quad 1$$

Tangential stress in a pressurized cylinder (given in Figure 2) can be found in Equations 2 – 4 (Beer et al., (2017)).

$$\sum Fz = 0 = \sigma_1 dA - pdA \quad 2$$

$$\sum Fz = 0 = \sigma_1 2t \Delta x - p\Phi \Delta x \quad 3$$

$$\sigma_1 = \frac{p\Phi}{2t} \quad 4$$



**Figure 2.** Tangential stress at the pressurized cylinder (Beer et al., (2017)).

Tangential stress should be lower than the yield stress of the material. It is given in Equation 5:

$$\frac{P\phi}{2t} \leq \frac{\sigma_y}{m} \tag{5}$$

The mass equation and volume calculation of the cylinder tube are given in Equations 6-8 respectively (Beer et al., (2017)).

$$m = \rho V \tag{6}$$

$$V = \left( \frac{\pi(\phi + 2t)^2}{4} - \frac{\pi\phi^2}{4} \right) L \tag{7}$$

$$V = \pi t L (\phi + t) \tag{8}$$

The objective function of the optimization problem is obtained as in Equation 9.

$$m = \rho \pi t L (\phi + t) \tag{9}$$

If it is written  $P\phi = \frac{4F}{\phi\pi}$  in Equation 1 and substituted in Equation 5, then Equation 10 is obtained:

$$\frac{4F}{2\pi\phi t} \leq \frac{\sigma_y}{m} \tag{10}$$

The critical buckling load of the cylinder rod according to Euler’s approach can be found in Equation 11 (Beer et al., (2017)).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_B^2} \tag{11}$$

$L_B$  is taken  $L_R + L_s = 1m$ .  $I$  is the moment of inertia of the rod and found as in Equation 12 (Beer et al., (2017)). The diameter of the rod can be found in the relation between critical buckling load and force.

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{12}$$

Force acting on the cylinder should be lower than **the** critical buckling load as in Equation 13.

$$F \leq \frac{P_{cr}}{n} \tag{13}$$

The constraints of the optimization problem are the following:

$$\begin{aligned}
C1 \Rightarrow \frac{4F}{2\pi\emptyset t} &\leq \frac{\sigma_y}{m} & 14 \\
C2 \Rightarrow 20000000 - P &\leq 0 & 15 \\
C3 \Rightarrow \frac{P\emptyset}{2t} &\leq \frac{\sigma_y}{m} & 16 \\
C4 \Rightarrow F &\leq \frac{P_{cr}}{n} & 17
\end{aligned}$$

### 2.3. The Bees Algorithm (BA)

Solution strategies of classical optimization algorithms generally depend on the objective function, types of constraints (linear, nonlinear, etc.), and types of variables. So classical optimization algorithms don't offer general solution strategies for optimization problems that have different types of variables, objective functions and constraints (Baykasoglu, 2006). Researchers have endeavored to adapt different optimization problems to classical optimization problems and it hasn't been easy. To overcome these shortcomings of classical optimization techniques, nature-inspired, heuristic optimizing algorithms are recommended. These techniques are both effective and more flexible and can be customized according to specific problems (Muhammed Arif, 2014).

BA algorithm which is a global search algorithm mimics honey bees' foraging method to obtain the best solution. It is one of the metaheuristic optimization types for learning, remembering, sharing information, searching for resources and obtaining optimum results by moving away from the penalty area (Pham et al., 2006).

The basic BA requires a number of parameters to be set and these are as follows: the number of explorer or scout bees ( $n$ ), number of the most suitable sites among the  $n$  points visited ( $m$ ), number of top rated (elite) sites among the  $m$  selected sites ( $e$ ), number of bees recruited for the best  $e$  sites ( $nep$ ), the number of bees sent to the remaining ( $m-e$ ) area ( $nsp$ ), the region size ( $ngh$ ) and stopping criterion ( $itr$ ) (Ilgen et. al., 2022). The flowchart of the BA is given in Figure 3. Boundary conditions for  $\emptyset$  and  $t$  variables are determined as follows:

$$\begin{aligned}
\emptyset &= [0.1 \quad 0.6] m \\
t &= [0.001 \quad 0.03] m
\end{aligned}$$

The searching area of the bees is shown in Figure 4.



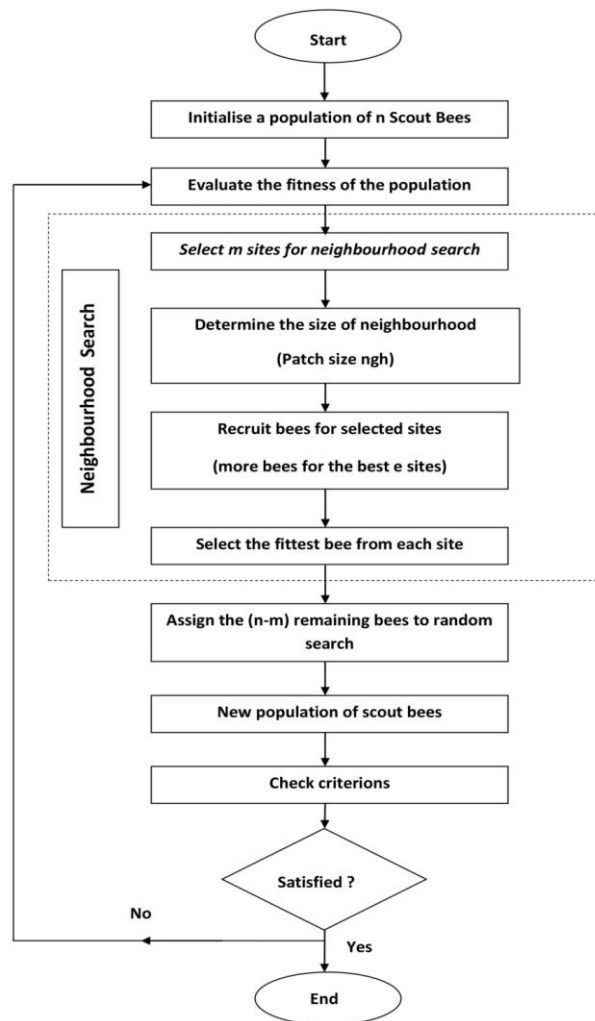


Figure 3. Flowchart of BA (Sen et al., 2015).

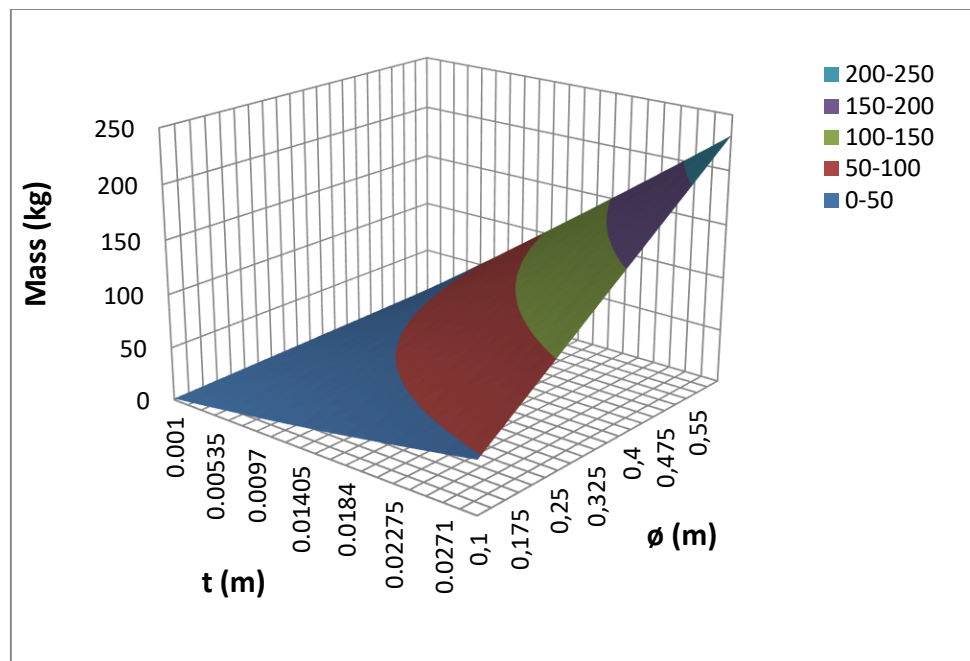


Figure 4. Searching area of the bees

BA parameters that are used in optimization problem solutions are given in Table 3.

**Table 3.** Parameters of BA that are used in optimization problem solution

| n  | m | e | nep | nsp | ngh | itr |
|----|---|---|-----|-----|-----|-----|
| 20 | 8 | 5 | 20  | 10  | .01 | 20  |

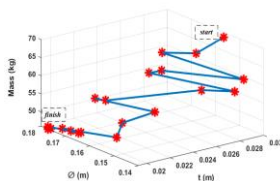
Each parameter is applied for five different values as given in Table 4 and the effect of BA parameters on the optimization problem in terms of inside diameter, thickness, mass and elapsed time for solving the problem is compared via response surface design that is used for parameter optimization. Eighty-eight experimental designs were performed for a combination of seven BA parameters.

**Table 4.** Parameters of BA

| n   | m  | e | nep | nsp | ngh | itr |
|-----|----|---|-----|-----|-----|-----|
| 20  | 8  | 3 | 20  | 5   | .01 | 10  |
| 40  | 10 | 4 | 30  | 10  | .02 | 20  |
| 60  | 12 | 5 | 40  | 15  | .03 | 30  |
| 80  | 14 | 6 | 50  | 20  | .04 | 40  |
| 100 | 16 | 7 | 60  | 25  | .05 | 50  |

### 3. RESULT AND DISCUSSION

The mass optimization problem of the cylindrical tube is created and solved using Matlab R2020b. Intel Core i7-2670QM CPU 2.20 GHz processor is used for analysis. The optimum mass that depends on the inside diameter ( $\emptyset$ ) and wall thickness (t) value of the cylinder is obtained. Data obtained from each of the 20 bees at the end of the 20<sup>th</sup> iteration according to the Matlab solution is shown in Figure 5.

**Figure 5.** Obtained data from the bees

When the integer value of the wall thickness is preferred for the accessibility of cylindrical metallic pipes, optimum  $\emptyset$  and t parameter values that provide mass minimization are given in Table 5.

**Table 5.** Optimum parameter values for mass minimization

| $\phi$ (mm) | t (mm) | Mass (kg) |
|-------------|--------|-----------|
| 171,2       | 20     | 46,8      |

Cylinder components that are involved in mass minimization are cylinder tubes and piston rods. Tube's mass optimization is provided with basic BA. The rod diameter of the cylinder is calculated considering buckling load as in Equation 13 and found that it should be larger than 66,3 mm. If it is chosen simply 67 mm, the mass of the rod is found 27,5 kg according to Equation 18.

$$m_{rod} = \rho \frac{\pi d^2}{4} L_r \quad 18$$

The required fluid pressure that is needed for opening the cylinder for  $\phi = 0,177$  m is found at 202,7 Bar according to Equation 19.

$$P_o = \frac{4F}{\pi \phi^2} \quad 19$$

Required fluid pressure that needed for closing cylinder for  $\phi = 0,177$  m and  $d = 0,067$  m is found 236,6 Bar according to equation 20.

$$P_c = \frac{4F}{\pi(\phi^2 - d^2)} \quad 20$$

With the choice of 250 bar pump, the active opening ( $F_{AO}$ ) and closing force ( $F_{AC}$ ) of the cylinder can be determined.  $F_{AO}$  and  $F_{AC}$  should be greater than the opening and closing force values and can be calculated as equations 21-22.

$$F_{AO} = \frac{P_{pump} \pi \phi^2}{4} \quad 21$$

$$F_{AC} = \frac{P_{pump} \pi (\phi^2 - d^2)}{4} \quad 22$$

$F_{AO}$  and  $F_{AC}$  are obtained at 616,5 and 528,4 kN respectively. These values are greater than the opening and closing force values that are given and calculated as 500 and 428,4 kN.

After the mass optimization process is completed, the effects of BA parameters on mass, inside diameter, thickness and solution time are achieved by Response Surface Method. For this, eighty-eight experimental designs are performed using different combinations of parameters as in Table 6. As can be seen from Table 6, although the parameters of the algorithm are changed, the minimum mass value remains the same with a small standard deviation. However, the time required for a solution varies widely.

Table 6. Experimental designs data depend on all BA parameters

| n  | itr | m  | e | nsp | nep | ngh  | ∅<br>(m) | t<br>(m) | mass<br>(kg) | time<br>(s) |
|----|-----|----|---|-----|-----|------|----------|----------|--------------|-------------|
| 80 | 40  | 14 | 6 | 10  | 50  | 0,02 | 0,1779   | 0,019    | 45,946       | 384,9       |
| 60 | 30  | 16 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1769   | 0,0192   | 46,0248      | 169,3       |
| 40 | 20  | 10 | 6 | 10  | 30  | 0,02 | 0,1775   | 0,0191   | 46,0277      | 67,3        |
| 80 | 40  | 10 | 4 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1778   | 0,0191   | 45,9728      | 391,1       |
| 40 | 20  | 14 | 6 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1764   | 0,0192   | 46,0205      | 70,5        |
| 80 | 40  | 10 | 6 | 20  | 30  | 0,04 | 0,1773   | 0,0191   | 46,0089      | 401,7       |
| 80 | 40  | 14 | 4 | 10  | 50  | 0,04 | 0,1775   | 0,0191   | 45,9692      | 394,5       |
| 80 | 40  | 10 | 4 | 20  | 50  | 0,04 | 0,1778   | 0,0191   | 45,9936      | 422,2       |
| 40 | 40  | 10 | 4 | 20  | 50  | 0,02 | 0,1774   | 0,0191   | 45,9667      | 159,9       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,01 | 0,1777   | 0,0191   | 46,0178      | 170,1       |
| 40 | 40  | 14 | 4 | 10  | 50  | 0,02 | 0,1779   | 0,019    | 45,9533      | 160,7       |
| 40 | 20  | 10 | 4 | 20  | 30  | 0,02 | 0,1776   | 0,0191   | 46,0615      | 65,3        |
| 80 | 20  | 14 | 6 | 10  | 50  | 0,04 | 0,1768   | 0,0192   | 46,0726      | 140,2       |
| 40 | 40  | 14 | 6 | 20  | 50  | 0,02 | 0,1770   | 0,0191   | 45,9971      | 169         |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 20  | 0,03 | 0,1772   | 0,0191   | 45,9799      | 172,4       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1770   | 0,0191   | 45,9899      | 174         |
| 40 | 40  | 10 | 4 | 20  | 30  | 0,04 | 0,1774   | 0,0191   | 46,0084      | 156,8       |
| 80 | 20  | 14 | 4 | 20  | 50  | 0,04 | 0,1783   | 0,019    | 46,0068      | 142,7       |
| 60 | 30  | 12 | 3 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1746   | 0,0194   | 46,135       | 179,2       |
| 40 | 40  | 10 | 6 | 10  | 50  | 0,02 | 0,1778   | 0,0191   | 45,9563      | 163,8       |
| 80 | 20  | 14 | 6 | 10  | 30  | 0,02 | 0,1780   | 0,019    | 45,9414      | 133,7       |
| 80 | 40  | 10 | 6 | 10  | 30  | 0,02 | 0,1766   | 0,0192   | 46,0583      | 396,7       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1780   | 0,0191   | 46,0294      | 169,4       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1779   | 0,0191   | 45,9685      | 174,9       |
| 80 | 40  | 14 | 6 | 20  | 30  | 0,02 | 0,1782   | 0,019    | 45,9752      | 399         |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1781   | 0,019    | 45,9282      | 172,9       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 25  | 40  | 0,03 | 0,1783   | 0,019    | 45,9148      | 167,7       |
| 40 | 40  | 10 | 4 | 10  | 30  | 0,02 | 0,1764   | 0,0192   | 46,0546      | 164         |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1777   | 0,0191   | 45,9532      | 170,2       |
| 80 | 20  | 10 | 4 | 10  | 30  | 0,02 | 0,1753   | 0,0193   | 46,1121      | 132,6       |
| 40 | 40  | 14 | 4 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1769   | 0,0192   | 46,0053      | 156         |
| 80 | 20  | 10 | 4 | 20  | 30  | 0,04 | 0,1781   | 0,0191   | 46,0515      | 130,8       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1782   | 0,0191   | 46,0376      | 172         |
| 80 | 20  | 14 | 4 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1760   | 0,0192   | 46,0465      | 131,9       |
| 20 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1754   | 0,0193   | 46,0648      | 61,5        |
| 80 | 40  | 14 | 6 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1755   | 0,0193   | 46,0697      | 406,4       |
| 40 | 40  | 10 | 6 | 20  | 50  | 0,04 | 0,1776   | 0,0191   | 45,9661      | 158,3       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1776   | 0,0192   | 46,0172      | 170,9       |
| 60 | 30  | 12 | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1751   | 0,0194   | 46,1244      | 175,5       |
| 80 | 40  | 14 | 4 | 20  | 50  | 0,02 | 0,1769   | 0,0191   | 45,9816      | 394,9       |
| 80 | 40  | 10 | 6 | 20  | 50  | 0,02 | 0,1777   | 0,0191   | 46,0277      | 387,5       |
| 80 | 20  | 14 | 6 | 20  | 50  | 0,02 | 0,1778   | 0,019    | 45,9454      | 134,9       |
| 80 | 40  | 10 | 6 | 10  | 50  | 0,04 | 0,1783   | 0,019    | 46,0415      | 380,2       |
| 80 | 20  | 14 | 4 | 10  | 50  | 0,02 | 0,1765   | 0,0192   | 45,9992      | 135,2       |
| 60 | 30  | 8  | 5 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1763   | 0,0192   | 46,0257      | 166,9       |
| 60 | 30  | 12 | 7 | 15  | 40  | 0,03 | 0,1784   | 0,0191   | 46,1091      | 165,1       |
| 40 | 40  | 10 | 6 | 10  | 30  | 0,04 | 0,1774   | 0,0191   | 46,0021      | 158,7       |

|     |    |    |   |    |    |      |        |        |         |       |
|-----|----|----|---|----|----|------|--------|--------|---------|-------|
| 40  | 20 | 14 | 6 | 10 | 50 | 0,02 | 0,1776 | 0,0191 | 46,0542 | 70,6  |
| 80  | 20 | 10 | 6 | 10 | 30 | 0,04 | 0,1776 | 0,0192 | 46,1976 | 134,2 |
| 80  | 40 | 10 | 4 | 10 | 50 | 0,02 | 0,1772 | 0,0191 | 46,0178 | 376,1 |
| 80  | 20 | 10 | 6 | 10 | 50 | 0,02 | 0,1773 | 0,0191 | 45,9814 | 133   |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1760 | 0,0193 | 46,0644 | 164,8 |
| 40  | 40 | 10 | 6 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1779 | 0,019  | 45,9535 | 159   |
| 40  | 20 | 10 | 4 | 10 | 50 | 0,02 | 0,1759 | 0,0193 | 46,0748 | 64,9  |
| 40  | 20 | 14 | 4 | 20 | 50 | 0,02 | 0,1772 | 0,0191 | 46,0248 | 70    |
| 80  | 40 | 10 | 4 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1778 | 0,019  | 45,9341 | 370,3 |
| 40  | 40 | 14 | 4 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1782 | 0,0191 | 46,0745 | 164,4 |
| 80  | 20 | 10 | 4 | 10 | 50 | 0,04 | 0,1764 | 0,0192 | 46,0366 | 160,8 |
| 40  | 40 | 14 | 6 | 10 | 30 | 0,02 | 0,1781 | 0,019  | 45,9695 | 160,3 |
| 80  | 20 | 10 | 6 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1783 | 0,019  | 45,9222 | 140,2 |
| 40  | 20 | 14 | 4 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1789 | 0,0192 | 46,3856 | 64,1  |
| 80  | 20 | 14 | 4 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1759 | 0,0193 | 46,0627 | 136,4 |
| 40  | 20 | 10 | 6 | 20 | 50 | 0,02 | 0,1780 | 0,019  | 45,9342 | 68,8  |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 5  | 40 | 0,03 | 0,1773 | 0,0191 | 45,9864 | 169,2 |
| 40  | 40 | 10 | 4 | 10 | 50 | 0,04 | 0,1769 | 0,0191 | 45,9823 | 154,5 |
| 40  | 20 | 10 | 6 | 10 | 50 | 0,04 | 0,1780 | 0,019  | 45,9443 | 66,3  |
| 80  | 20 | 10 | 6 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1781 | 0,019  | 45,957  | 134,2 |
| 80  | 40 | 14 | 6 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1784 | 0,019  | 46,0551 | 382,9 |
| 60  | 50 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1771 | 0,0191 | 46,0127 | 362,2 |
| 40  | 20 | 14 | 4 | 10 | 50 | 0,04 | 0,1779 | 0,0191 | 46,0371 | 69,9  |
| 40  | 20 | 14 | 6 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1752 | 0,0193 | 46,0784 | 66,4  |
| 40  | 20 | 14 | 4 | 10 | 30 | 0,02 | 0,1774 | 0,0191 | 45,9797 | 65,8  |
| 40  | 40 | 14 | 6 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1773 | 0,0192 | 46,1751 | 162,5 |
| 40  | 40 | 14 | 4 | 20 | 30 | 0,02 | 0,1772 | 0,0191 | 45,9785 | 163,4 |
| 40  | 20 | 10 | 4 | 10 | 30 | 0,04 | 0,1761 | 0,0192 | 46,0529 | 65,2  |
| 80  | 20 | 14 | 6 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1777 | 0,0191 | 46,0106 | 135   |
| 40  | 40 | 14 | 6 | 10 | 50 | 0,04 | 0,1776 | 0,0191 | 45,9472 | 157,7 |
| 100 | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1759 | 0,0193 | 46,1607 | 328,5 |
| 80  | 20 | 10 | 4 | 20 | 50 | 0,02 | 0,1768 | 0,0192 | 45,9843 | 130,6 |
| 60  | 10 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1781 | 0,019  | 45,9429 | 43,1  |
| 40  | 20 | 14 | 6 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1748 | 0,0194 | 46,2542 | 67,1  |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 60 | 0,03 | 0,1759 | 0,0192 | 46,0314 | 166,5 |
| 40  | 20 | 10 | 4 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1755 | 0,0193 | 46,1437 | 66,4  |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1777 | 0,0191 | 45,9506 | 166,6 |
| 40  | 20 | 10 | 6 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1757 | 0,0193 | 46,0755 | 67,3  |
| 80  | 40 | 14 | 4 | 10 | 30 | 0,02 | 0,1780 | 0,019  | 45,9463 | 408,5 |
| 80  | 40 | 14 | 4 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1775 | 0,0191 | 45,9736 | 407,9 |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,05 | 0,1761 | 0,0192 | 46,0477 | 176,1 |
| 40  | 20 | 14 | 6 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1748 | 0,0194 | 46,2542 | 67,1  |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 60 | 0,03 | 0,1759 | 0,0192 | 46,0314 | 166,5 |
| 40  | 20 | 10 | 4 | 20 | 50 | 0,04 | 0,1755 | 0,0193 | 46,1437 | 66,4  |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,03 | 0,1777 | 0,0191 | 45,9506 | 166,6 |
| 40  | 20 | 10 | 6 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1757 | 0,0193 | 46,0755 | 67,3  |
| 80  | 40 | 14 | 4 | 10 | 30 | 0,02 | 0,1780 | 0,019  | 45,9463 | 408,5 |
| 80  | 40 | 14 | 4 | 20 | 30 | 0,04 | 0,1775 | 0,0191 | 45,9736 | 407,9 |
| 60  | 30 | 12 | 5 | 15 | 40 | 0,05 | 0,1761 | 0,0192 | 46,0477 | 176,1 |

According to the results, it is observed that the number of bees (n) and the number of iterations (itr) have a remarkable effect over the solution time. The main effects and interaction plots of all algorithm parameters over time are given in Figures 6-7. As seen in the figures, n and itr have a clear effect on the solution time. However, it is seen that other parameters don't have a clear effect on the solution time.

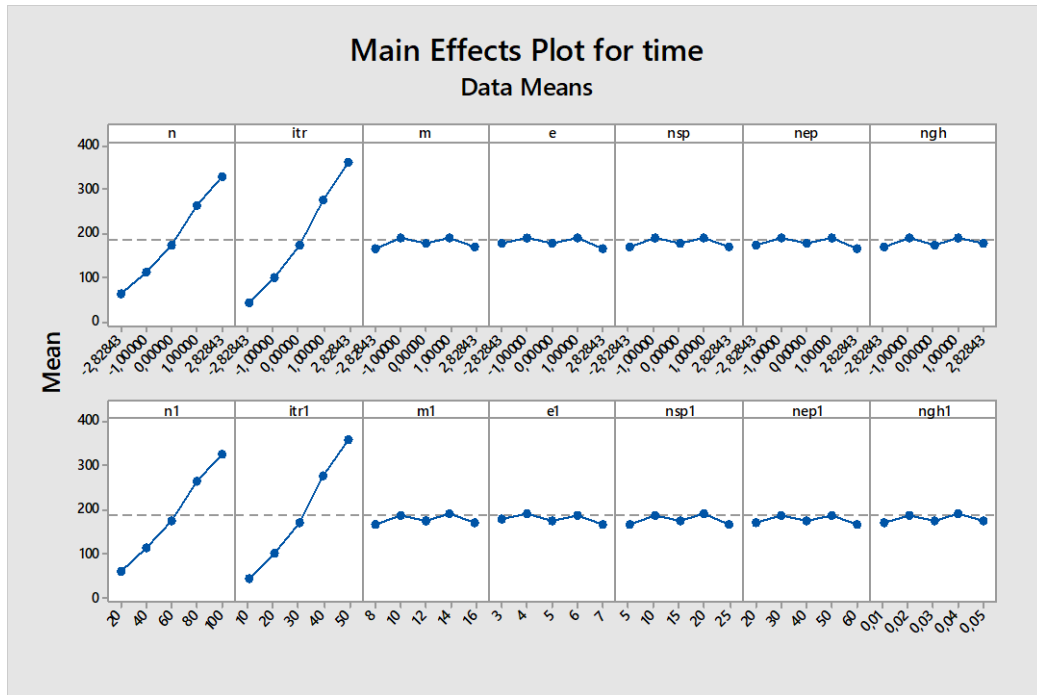


Figure 6. Main effects of BA parameters over time

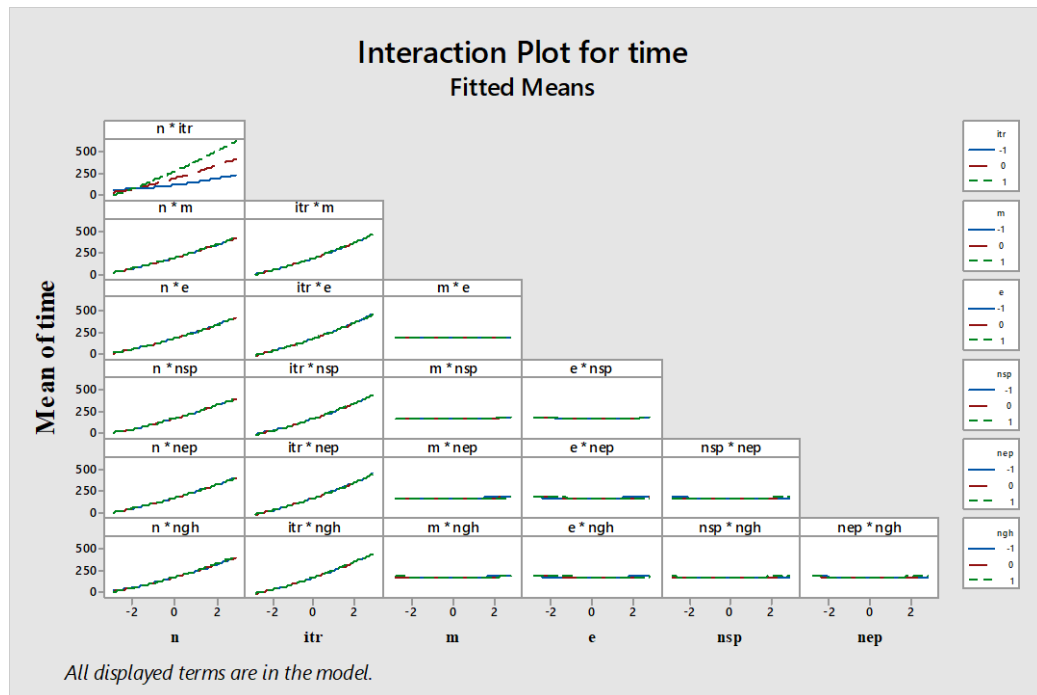


Figure 7. Interaction effects of BA parameters over time

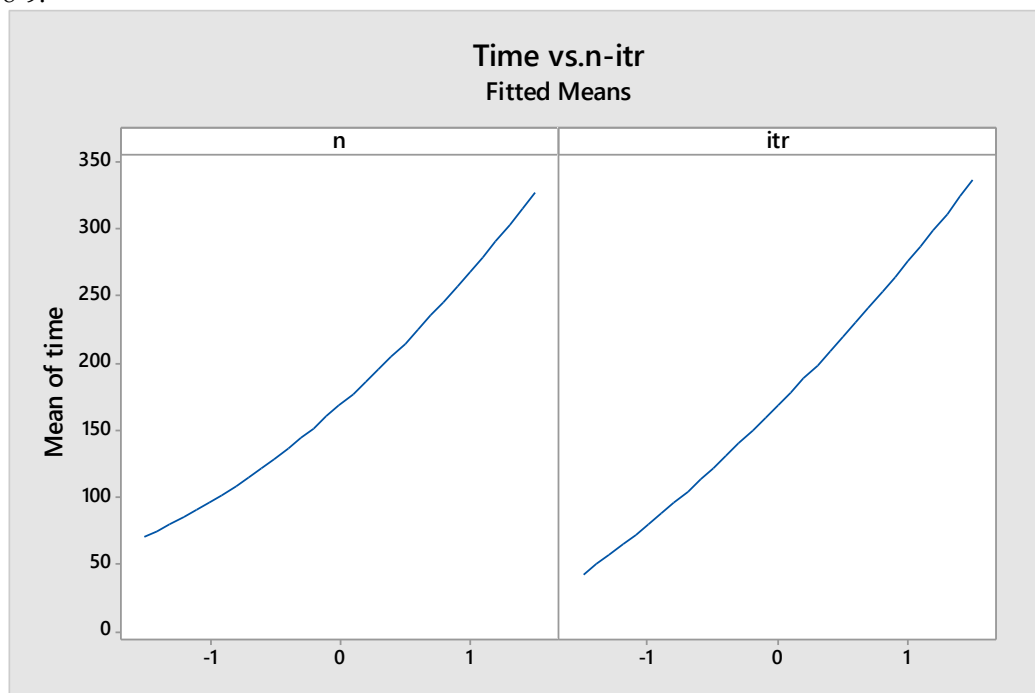
After determining the most effective parameters over time (n, itr or their interaction), the pure effect

of  $n$  and  $itr$  parameters on solution time is analyzed, keeping the other five BA parameters ( $m$ ,  $e$ ,  $nsp$ ,  $nep$ ,  $ngh$ ) constant. For this, thirteen experimental designs are performed using different combinations of  $n$  and  $itr$  parameters as can be seen in Table 7.

**Table 7. Experimental design data depend on  $n$  and  $itr$  parameters**

| <b>n</b> | <b>itr</b> | <b><math>\emptyset</math></b><br>(m) | <b>t</b> | <b>mass</b> | <b>time</b> |
|----------|------------|--------------------------------------|----------|-------------|-------------|
| 60       | 30         | 0,1769                               | 0,0192   | 46,0231     | 197,09      |
| 60       | 10         | 0,1735                               | 0,0195   | 46,2288     | 44,18       |
| 80       | 40         | 0,1779                               | 0,019    | 45,955      | 389,52      |
| 60       | 30         | 0,1767                               | 0,0192   | 46,0215     | 164,29      |
| 40       | 40         | 0,1779                               | 0,019    | 45,946      | 162,77      |
| 40       | 20         | 0,1782                               | 0,019    | 45,9315     | 64,5        |
| 100      | 30         | 0,178                                | 0,0191   | 46,0508     | 341,56      |
| 60       | 50         | 0,1783                               | 0,019    | 45,9864     | 341,39      |
| 60       | 30         | 0,1784                               | 0,019    | 45,9784     | 156,2       |
| 20       | 30         | 0,1757                               | 0,0193   | 46,1319     | 60,24       |
| 60       | 30         | 0,1781                               | 0,019    | 46,0142     | 159,28      |
| 80       | 20         | 0,1779                               | 0,0191   | 46,0028     | 126,51      |
| 60       | 30         | 0,178                                | 0,019    | 45,9784     | 165,38      |
| 60       | 30         | 0,1769                               | 0,0192   | 46,0231     | 197,09      |
| 60       | 10         | 0,1735                               | 0,0195   | 46,2288     | 44,18       |
| 80       | 40         | 0,1779                               | 0,019    | 45,955      | 389,52      |

The main effects and interaction plots of  $n$  and  $itr$  algorithm parameters over time are given in Figures 8-9.



**Figure 8. Main effects of  $n$  and  $itr$  parameters' over time**

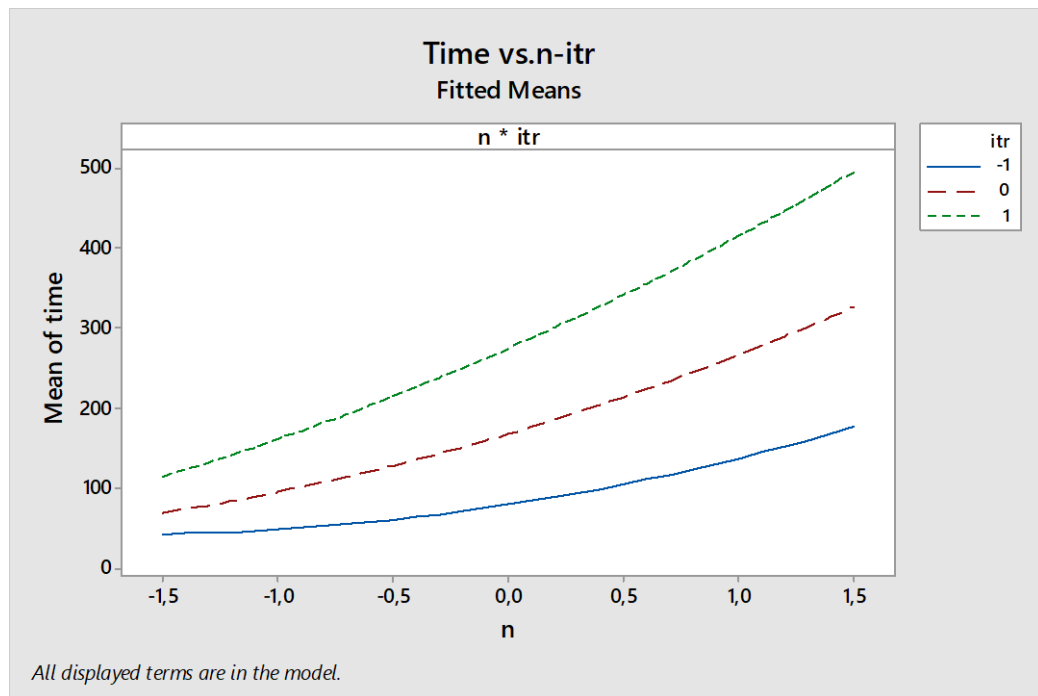


Figure 9. Interaction effects of n and itr parameters' over time

The variance analysis table obtained as a result of the statistical calculations mentioned above is presented in Table 8. As can be seen in the table, the number of bees(n) and the number of iterations (itr) have a significant effect on the solution time. It is evaluated that this significant effect is linear and cross interactions and/or quadratic terms also, but remains outside the level of significance. In the light of the obtained data, it is evaluated that the time required for the solution can be expressed with equation 23, the relative effects of the number of iterations and the number of bees on total time are 52% and 40% respectively, and that the other parameters contribute around 8% in total.

$$\text{Time} = 168,45 + 85,83 n + 97,7 \text{ itr} + 13,47 n^2 + 9,41 \text{ itr}^2 + 41,2 n \cdot \text{itr}$$

23

Table 8. Results of variance analysis

| Source                   | DF | Adj SS | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|--------------------------|----|--------|---------|---------|---------|
| <b>Model</b>             | 5  | 143753 | 28750,6 | 61,98   | 0       |
| <b>Linear</b>            | 2  | 135291 | 67645,3 | 145,83  | 0       |
| <i>n</i>                 | 1  | 58929  | 58928,6 | 127,04  | 0       |
| <i>itr</i>               | 1  | 76362  | 76362   | 164,62  | 0       |
| <b>Square</b>            | 2  | 1677   | 838,7   | 1,81    | 0,233   |
| <i>n</i> * <i>n</i>      | 1  | 1263   | 1262,5  | 2,72    | 0,143   |
| <i>itr</i> * <i>itr</i>  | 1  | 617    | 616,5   | 1,33    | 0,287   |
| <b>2-way interaction</b> | 1  | 6785   | 6784,8  | 14,63   | 0,007   |
| <i>n</i> * <i>itr</i>    | 1  | 6785   | 6784,8  | 14,63   | 0,007   |
| <b>Error</b>             | 7  | 3247   | 463,9   |         |         |
| <b>Lack-of-Fit</b>       | 3  | 2166   | 722     | 2,67    | 0,183   |
| <b>Pure Error</b>        | 4  | 1081   | 270,3   |         |         |
| <b>Total</b>             | 12 | 147000 |         |         |         |



#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the availability of the Bees Algorithm is investigated to optimize the geometry of hydraulic cylinders. Required objective functions and constraints are presented for the hydraulic cylinder to have a minimum weight without buckling under a certain opening and closing load. Since BA has many parameters, the issue of which parameters should be selected is also examined. For this purpose, experimental design is carried out with the response surface method and the problem is solved by using a total of 88 parameter sets. Obtained optimum geometric parameters and the required time to achieve this result is evaluated. In light of the findings, it has been shown that BA can be used in the solution of the problem in question. In addition, it is observed that the results for the specified 88 different sets are the same with a very small standard deviation, but the time required to reach the result is directly related to the parameters of the selected algorithm. It has been shown that the solution time is directly related to the number of bees and the number of iterations, but the other parameters of the algorithm don't have a significant effect on the solution time.

#### 5. REFERENCES

- Arif Şen, M., Tinkir, M., & Kalyoncu, M. (2018). Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 37(1), 107-127.
- Baronti, L., Castellani, M., & Pham, D. T. (2020). An analysis of the search mechanisms of the bees algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 59, 100746.
- Baykasoglu, A. (2006). Applying multiple objective tabu search to continuous optimization problems with a simple neighbourhood strategy. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(3), 406-424.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2017). *Statics and mechanics of materials*. New York: McGraw-Hill Education.
- Bilgic, H. H., Sen, M. A., & Kalyoncu, M. (2016). Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on The Bees Algorithm. *Journal of Vibroengineering*, 18(6), 3684-3694.
- Dat, N. D., Anh, V. M., Quan, T. Q., Duc, P. T., & Duc, N. D. (2020). Nonlinear stability and optimization of thin nanocomposite multilayer organic solar cell using Bees Algorithm. *Thin-Walled Structures*, 149, 106520.
- Dengiz, C. G., Şenel, M. C., Yıldızlı, K., & Koç, E. (2018). Design and analysis of scissor lifting system by using finite elements method. *Universal Journal of Materials Science*, 6(2), 58-63.
- Fahmy, A., Kalyoncu, M., & Castellani, M. (2012). Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 226(4), 497-508.
- Ghasemi, A. R., & Hajmohammad, M. H. (2017). Multi-objective optimization of laminated composite shells for minimum mass/cost and maximum buckling pressure with failure criteria under external hydrostatic pressure. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(3), 1051-1062.
- İlgen, S., Durdu, A., Gülbahçe, E., Çakan, A., & Kalyoncu, M. (2022). The Bees Algorithm Approach to Determining SMC Controller Parameters for the Position Control of a SCARA Robot Manipulator. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33), 267-273.
- Muhammed Arif, Ş. (2014). İki Tekerlekli Robot İçin Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü Tasarımı Ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 77s, Konya, Haziran.
- Pham, D., & Ghanbarzadeh, A. (2007). *Multi-objective optimisation using the bees algorithm*. Paper presented at the 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems.
- Pham, D., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. (2005). The bees algorithm. *Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK*.

- Pham, D., & Kalyoncu, M. (2009). *Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm*. Paper presented at the 2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics.
- Pham, D. T., Castellani, M., Sholedolu, M., & Ghanbarzadeh, A. (2008). *The Bees Algorithm and Mechanical Design Optimisation*. Paper presented at the ICINCO-ICSO.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., & Zaidi, M. (2006). The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems *Intelligent production machines and systems* (pp. 454-459): Elsevier.
- Sen, M. A., & Kalyoncu, M. (2015). Optimisation of a PID controller for an inverted pendulum using The Bees Algorithm. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 789, pp. 1039-1044). Trans Tech Publications Ltd.
- Shah, U., & Upadhyay, G. Optimization of Hydraulic Cylinder Design used for container lifting device using Genetic Algorithm.
- Shouran, M., Anayi, F., Packianather, M., & Habil, M. (2021). Load frequency control based on the bees algorithm for the great britain power system. *Designs*, 5(3), 50.
- Solazzi, L., Buffoli, A., & Formicola, R. (2020). *The Multi-Parametric Weight Optimization of a Hydraulic Actuator*. Paper presented at the Actuators.
- Unal, R. E., Guzel, M. H., Sen, M. A., Kose, F., & Kalyoncu, M. (2022). Investigation on the cost-effective optimal dimensions of a solar chimney with the Bees Algorithm. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1-11.
- Xu, W., Tang, Q., Liu, J., Liu, Z., Zhou, Z., & Pham, D. T. (2020). Disassembly sequence planning using discrete Bees algorithm for human-robot collaboration in remanufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 62, 101860.



## SPECIFIC NET WORK AND MEAN EFFECTIVE PRESSURE BASED THERMODYNAMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF IDEAL ATKINSON CYCLE

<sup>1</sup>Emre ARABACI , <sup>2</sup>Bayram KILIÇ 

<sup>1</sup>Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Denizli, TÜRKİYE  
<sup>2</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Bölümü, Burdur, TÜRKİYE

<sup>1</sup>earabaci@pau.edu.tr, <sup>2</sup>bayramkilig@mehmetakif.edu.tr

(Geliş/Received: 23.05.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.10.2022)

**ABSTRACT:** In this study, the criteria for maximum values of specific net work and mean effective pressure in the air standard Atkinson cycle, which is the ideal thermodynamic cycle of internal combustion engines used in hybrid electric vehicles, were examined. For this, it was assumed that the cycle operates in a certain temperature range. Thus, while the maximum temperature of the cycle is constant, the compression ratio was optimized for maximum specific net work and maximum mean effective pressure. A case study was conducted for this study. For the case study, assuming the geometric expansion ratio of 12, the maximum temperature value of the cycle was determined as 1961.923 K. Based on this maximum temperature value, the maximum values of the specific net work and the ambient effective pressure were determined as 580.139 kJ/kg and 373.857 kPa, respectively. In addition, the geometric compression ratios for the maximum values of the specific net work and the ambient effective pressure were determined as 15.462 and 31.063, respectively. Looking at the geometric compression ratio values of today's engines, it was seen that these values were closer to the compression ratio at which the maximum specific net work was achieved. It was observed that the thermal efficiency increased when the compression ratio was optimized for the conditions where the maximum average effective pressure was achieved. The results obtained from this study are particularly attractive to engine designers.

**Keywords:** Atkinson Cycle, Optimal Compression Ratio, Mean Effective Pressure, Specific Net Work

### İdeal Atkinson Çevriminin Özgül Net İş ve Ortalama Efektif Basınç Temelli Termodinamik Analizi ve Optimizasyonu

**ÖZ:** Bu çalışmada, hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorların ideal termodinamik çevrimi olan hava standart Atkinson çevriminde özgül net işi ve ortalama efektif basıncının maksimum değerleri için kriterler incelenmiştir. Bunun için çevrimin belirli sıcaklık aralığında çalıştığı varsayılmıştır. Böylelikle çevrimin maksimum sıcaklığı sabit iken maksimum özgül net iş ve maksimum ortalama efektif basınç için sıkıştırma oranı optimize edilmiştir. Çalışma için bir durum çalışması yapılmıştır. Vaka çalışması için geometrik sıkıştırma oranının 12 olduğu varsayılarak çevrimin maksimum sıcaklık değeri 1961.923 K olarak belirlenmiştir. Bu maksimum sıcaklık değeri referans alınarak özgül net işin ve ortamala efektif basıncın maksimum değerleri sırasıyla 580.139 kJ/kg ve 373.857 kPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca özgül net işin ve ortamala efektif basıncın maksimum değerleri için geometrik sıkıştırma oranları ise sırasıyla 15.462 ve 31.063 olarak belirlenmiştir. Günümüz motorlarının geometrik sıkıştırma oranı değerlerine bakıldığında, bu değerlerin maksimum özgül net işin elde edildiği sıkıştırma oranına daha yakın olduğu görülmüştür. Maksimum ortalama efektif basıncın elde edildiği koşullar için sıkıştırma

oranı optimize edildiğinde termal verimin de arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmadan elde edilen bulguların özellikle motor tasarımcılarının dikkatini çekecek niteliktedir.

*Anahtar Kelimeler:* Atkinson Çevrimi, Optimum Sıkıştırma Oranı, Ortalama Efektif Basınç, Özgül Net İş

## 1. INTRODUCTION

Internal combustion engines are today primary energy conversion machines for both mobile systems and stationary systems (Grohe, 2003). The main reason for the widespread use of internal combustion engines is undoubtedly the ease of supply and storage of energy. However, when evaluated in terms of energy conversion efficiencies, internal combustion engines have dramatically lower energy conversion efficiencies compared to electric motors.

Today, internal combustion engines working with gasoline or diesel fuel are widely used (Halderman and Mitchell, 2014). In classical thermodynamics, internal combustion engines are idealized as air standard closed cycles. Internal combustion engines running on gasoline fuel are known as spark ignition engines and are idealized as the Otto cycle in classical thermodynamics. In the ideal Otto cycle, both the heat input and heat output processes take place under constant volume conditions. Internal combustion engines running on diesel fuel are known as compression ignition engines and are idealized as the Diesel cycle in classical thermodynamics (Ferguson and Kirkpatrick, 2015). In the ideal diesel cycle, the heat input process takes place under the constant pressure condition, and the heat output process takes place under the constant volume condition (Rajput, 2009-1). Today, however, there are also engines operating according to the principle of different thermodynamic cycles. The most well-known of these is the Atkinson cycle engine used in hybrid-electric vehicles. In the ideal Atkinson cycle, the heat input process takes place under the constant volume condition as in the Otto cycle, and the heat output process takes place under the constant pressure condition. The reason why Atkinson cycle engines are preferred in hybrid-electric vehicles is their low power density (maximum power per unit engine volume) and high thermal efficiency compared to the Otto cycle engine (Boggs et al., 1995). In other words, Atkinson cycle engines can operate in more economic conditions than Otto cycle engines.

In the Atkinson cycle, the power stroke is longer than the compression stroke because the heat output process takes place at constant pressure. The fact that the power stroke was longer than the compression stroke in the early version of the Atkinson-cycle engine, invented in 1882, was realized thanks to the complex mechanism proposals. Today, instead of these complex mechanisms, modern Atkinson cycle engines can be obtained more practically with valve timing regulation (Zhao et al. 2012). Thermodynamic analysis of heat engines is included in the thermodynamics textbooks under the heading "Gas Power Cycles". When a few of these thermodynamics textbooks were examined, it was seen that the Otto, Diesel and Dual cycles, which are the ideal cycles of piston engines, and the Brayton cycle, which was the cycle of gas turbine engines, are mentioned (Borgnakke and Sonntag, 2020; Ganesan, 2018; Whitman, 2020; Cengel et al., 2011; Pauken, 2011; Potter and Somerton, 2014; Rajput, 2009-2; Schmidt, 2019; Balmer, 2011; Wu, 2007; Nag, 2013; Moran et al., 2010). In these books, it was seen that the effect of compression and expansion ratio on thermal efficiency for ideal cycles of reciprocating engines is examined and these cycles are compared. However, the thermal efficiency expressions are presented only depending on the compression and expansion ratio. But, in the ideal Carnot cycle with maximum thermal efficiency, the expression of thermal efficiency is expressed depending on the temperatures of the cold and hot heat source. For this reason, when examining the ideal cycles of reciprocating engines, it may be more appropriate to make an analysis by analogy with the Carnot cycle for the case where the heat source temperatures are constant. However, the cycle analyzes in the thermodynamics textbooks are made for constant heat input. Thus, although it is not very realistic, the thermal efficiency converges to 100% as the compression ratio and expansion ratio increase for constant heat input. In response to this rising thermal efficiency, the maximum temperature and pressure of the cycle increase immeasurably. However, as the compression ratio and expansion ratio increase, the specific net work and mean effective pressure values become concepts that increase with the same characteristic as the thermal efficiency. In other words, since

the specific net work and mean effective pressure values have the same tendency as the thermal efficiency, it is observed that these values increase with the compression ratio and expansion ratio. If the maximum temperature is kept constant instead of the heat input in the cycle, the maximum values for specific net work and mean effective pressure are also limited (Figure 1).

For any gas power cycle, as long as the compression ratio increases, the theoretical maximum thermal efficiency converges to the thermal efficiency of the Carnot cycle operating within the same temperature limits. For extremely high compression ratio the thermal efficiency is extremely high and its limit is the Carnot cycle efficiency. However, under these conditions, the specific net work of the cycle converges to zero. The mean effective pressure, which is related to the power density (maximum power per unit engine volume) of the engine, is also very low at a very high compression ratio. This shows that considering only thermal efficiency in the evaluation of gas power cycles does not really mean anything. For this reason, it is seen that it would be more accurate to consider maximum specific net work or maximum mean effective pressure values instead of high thermal efficiency conditions for gas power cycles.

Researchers have studied systems consisting of reversible, endoreversible or irreversible models for gas power cycles. Although it has been assumed that the cycles work according to the idealizations in classical thermodynamics in many studies, it was also seen that quasi-realistic assumptions are applied, such as the cycles occur in a finite time interval and the specific heats change with temperature (Palaci and Gonca, 2020; Ebrahimi, 2021; Chen et al., 2007; Ding et al., 2011). Palaci and Gonca (2020), made a performance evaluation by limiting the maximum cylinder temperature for a diesel engine cycle (dual cycle) according to the melting degrees of various materials. Of course, as expected, performance improves as the maximum temperature increases. In this case, it is concluded that the engine must reach high temperature in order to improve its performance. This also applies to the improvement of the Carnot cycle efficiency. Ebrahimi (2021), presented a method for the comparison of engine cycles under the condition of maximum thermal efficiency in his study. Here, the temperature range of 2600-3000 K, which is the metallurgical temperature limit, is considered as the maximum temperature and a cycle is compared according to the maximum thermal efficiency. In this study, it was concluded that increasing the maximum temperature increases the thermal efficiency and the concepts of specific net work and mean effective pressure are ignored. Chen et al. (2007), made optimizations based on power, thermal efficiency and entropy generation rate for irreversible universal heat engines in their study. In this study, power cycles operating between two heat sources are investigated by considering irreversibility. Thus, the performances of the cycles were compared on the basis of thermal efficiency. Ding et al. (2011) presented an optimization for reversible cycles in terms of economy and efficiency in their study. In this study, the thermal efficiency parameter has been the focus. It is very interesting that in these studies (Palaci and Gonca, 2020; Ebrahimi, 2021; Chen et al., 2007; Ding et al., 2011) a systematic analysis of a model that maximizes specific cycle net work and mean effective pressure values was not envisaged. Gonca and Şahin (2022), a new high performance engine cycle consisting of five processes and a constant temperature process was developed using new numerical methods and compared with the classical double cycle. Şahin and Gonca (2021) performed thermodynamic analyzes for a reversible dual cycle in their study. Wang et al. (2021) derived the expressions of power output and thermal efficiency for the model by creating an irreversible continuous flow Lenoir cycle model using the theory of finite time thermodynamics. Kim et al. (2022), in this study, ideal cycles with finite heat capacity ratios are theoretically investigated to maximize power generation using an sequential Carnot cycle model. Costea et al. (2021) modeled the irreversible Carnot cycle motor operating as a closed system using the direct method for finite speed and the first law of thermodynamics. When these studies are examined in detail, thermal efficiency is focused on as a performance criterion.

Gas power cycles are expected to output work or power through cycles, and it is desirable that this output work or power be as much as possible from a unit fuel or unit engine displacement point of view. These performance parameters are directly related to the concepts of specific net work or mean effective pressure. Also, boundary conditions for the maximum value of specific net work and mean effective pressure are rarely discussed. However, it is interesting that in all thermodynamics textbooks the topic of

gas power cycles is explained with a focus on high thermal efficiency. Although true for internal combustion engines, this unrealistic approach is misleading, with the sole aim of increasing thermal efficiency. As it is known, it is desirable for hybrid electric vehicles to be more economical than conventional vehicles. However, it is known that the thermal efficiency of the ideal Atkinson cycle is higher than the ideal Otto cycle under the same conditions. However, it is unrealistic to evaluate the Atkinson cycle solely on the thermal efficiency focus. Therefore, as a different approach, it is more accurate to determine the optimal value of the compression (or expansion) ratio for the maximum specific net work or maximum mean effective pressure of the Atkinson cycle. In this study, the compression (or expansion) ratio is optimized for both maximum specific net work and maximum mean effective pressure for the ideal Atkinson cycle. In the study, firstly, the classical thermodynamic solution was presented and then the equations for maximum specific net work and maximum mean effective pressure are obtained. Here, the ideal Atkinson cycle operating in the same two constant temperature ranges is used for comparison. In this way, it was possible to evaluate the Atkinson cycle as the equivalent of the Carnot cycle. Thus, the compression ratio was optimized for maximum specific net work and maximum average effective pressure while the maximum temperature of the cycle is constant.

## 2. THEORETICAL MODEL

In Figure 1, the Temperature-Entropy and Pressure-Volume diagrams of the ideal Atkinson cycle are presented. In studies where parametric comparisons are made, idealizing the cycle as much as possible is an accepted method in the literature to simplify the calculations. Therefore, this method was also applied in this study. Constant specific heat was assumed for the theoretical model. It was also assumed that the working fluid is ideal air. Compression and expansion processes were assumed to occur isentropically.

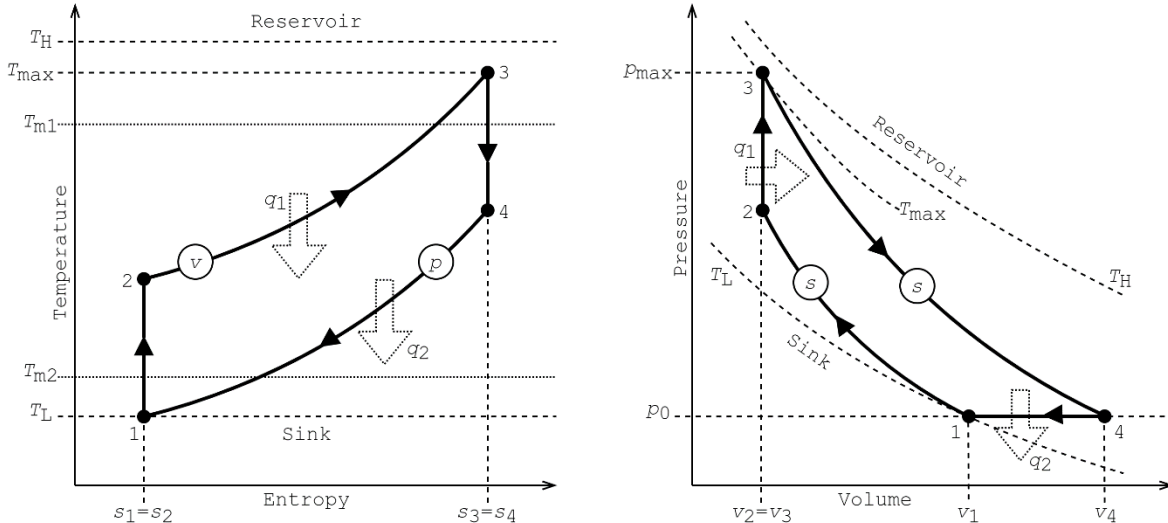


Figure 1. Ideal Atkinson cycle

In Figure 1, an Atkinson cycle operating in the  $T_L$  (sink temperature) and  $T_H$  (reservoir temperature) temperature range was created. While  $T_L$  value was accepted as ambient temperature,  $T_H$  is determined as a value slightly higher than  $T_{max}$  value, which is the maximum temperature of the cycle. In this section, first of all, classical thermodynamic expressions for the ideal Atkinson cycle were presented, and then the necessary equations for optimization were created.

### 2.1. Ideal Atkinson cycle

$q_1$  and  $q_2$  are specific heat transfers for input and output, respectively:

$$q_1 = \int_{T_2}^{T_3} du = \int_{T_2}^{T_3} c_v dT = c_v(T_3 - T_2) > 0 \quad (1)$$

$$q_2 = \int_{T_4}^{T_1} dh = \int_{T_4}^{T_1} c_p dT = c_p(T_1 - T_4) < 0 \quad (2)$$

Accordingly,  $w_{\text{net}}$ , which is the specific net work of the cycle, can be expressed as:

$$w_{\text{net}} = q_1 - |q_2| = c_v(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_1) \quad (3)$$

The following entropy equation is used for the processes taking place in the cycle:

$$\int ds = \int c_v \frac{dT}{T} + \int R \frac{dv}{v} = \int c_p \frac{dT}{T} + \int R \frac{dp}{p} \quad (4)$$

To simplify the formulation,  $v_1/v_2 = \varepsilon_1$  and  $v_4/v_3 = \varepsilon_2$  relationships are created between the volumes. Here,  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_2$  are compression ratio and expansion ratio, respectively. While various mechanisms are used to obtain these ratios in classical Atkinson-cycle engines, these ratios are obtained by valve timing in today's modern Atkinson-cycle engines. For this reason, while  $\varepsilon_2$  is the geometric compression ratio,  $\varepsilon_1$  is also expressed as the compression ratio obtained due to valve timing. As it will be remembered, while  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  in the ideal Otto cycle, it becomes  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$  in the ideal Atkinson cycle. According to Equation 4, the entropy change in the heat input and heat output processes in the cycle is expressed  $s_3 - s_2 = c_v \ln(T_3/T_2) > 0$  and  $s_1 - s_4 = c_p \ln(T_1/T_4) < 0$ .

Accordingly, the mean temperatures  $T_{m1}$  and  $T_{m2}$  are expressed as follows:

$$T_{m1} = \frac{q_1}{s_3 - s_2} \quad (5)$$

$$T_{m2} = \frac{q_2}{s_1 - s_4} \quad (6)$$

The mean temperature expressions here describe the ideal Carnot cycle equivalent temperature range of the ideal Atkinson cycle. In other words, this Atkinson cycle can be accepted as an ideal Carnot cycle operating in the temperature range of  $T_{m1}$  and  $T_{m1}$ . As a result, as the numerical difference between  $T_{m1}$  and  $T_{m1}$  increases, the thermal efficiency also increases.

The thermal efficiency expression for the ideal Atkinson cycle is as follows:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = 1 - \frac{k}{\varepsilon_1^{k-1}} \frac{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1}{\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^k - 1} = 1 - \frac{T_{m2}}{T_{m1}} \quad (7)$$

As seen here, the thermal efficiency of the ideal Atkinson cycle,  $\eta_{\text{th}}$  is related to  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_2$ . However, the  $\varepsilon_2/\varepsilon_1$  value is related to the  $T_3/T_2$  value. In addition, the  $T_2$  value is only related to  $\varepsilon_1$ . In this case, it is the  $\varepsilon_1$  or  $\varepsilon_2$  value that is the main determinant. Because  $\varepsilon_2$  and  $\varepsilon_1$  are related to each other.

The mean effective pressure can be defined as:

$$p_{\text{me}} = \frac{w_{\text{net}}}{v_4 - v_2} \quad (8)$$

The following equations are defined for the exergy destruction occurring in the heat input and heat output processes in the ideal Atkinson cycle:

$$x_{\text{dest},1} = T_0 \left[ (s_3 - s_2) - \frac{q_1}{T_H} \right] \quad (9)$$

$$x_{\text{dest},2} = T_0 \left[ (s_1 - s_4) + \frac{q_2}{T_L} \right] \quad (10)$$

$$x_{\text{dest}} = x_{\text{dest},1} + x_{\text{dest},2} \quad (11)$$

The expended exergy for a heat engine is the reduction in the exergy of heat transferred to the engine, which is the difference between the exergy of heat supplied and the exergy of heat dissipated. The following equation is used for the expended exergy:

$$x_{\text{exp}} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right) q_1 \quad (12)$$

Accordingly, the thermodynamic efficiency can be expressed as:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{x_{\text{dest}}}{x_{\text{exp}}} \quad (13)$$

## 2.2. Optimization of $\varepsilon_2$ for maximum $w_{\text{net}}$

Assuming an ideal Atkinson cycle operating in the range  $T_1$  to  $T_3$ , shown in Figure 1, the relationship between these two temperatures can be defined as  $T_3/T_1 = \varepsilon_2^k/\varepsilon_1 = \tau$ . Here, if the independent variable is  $\varepsilon_2$ , the first and second derivatives of  $w_{\text{net}}$  with respect to  $T_4$  are as follows:

$$\frac{dw_{\text{net}}}{dT_4} = c_p \left( \frac{T_3 T_1^k}{T_4^{k+1}} - 1 \right) \quad (14)$$

$$\frac{d^2 w_{\text{net}}}{dT_4^2} = -c_p (k+1) \frac{T_3 T_1^k}{T_4^{k+2}} < 0 \quad (15)$$

Here, the first derivative expression is set to 0 and the optimal  $T_4$  expression, which maximizes the  $w_{\text{net}}$ , is obtained as follows:

$$T_{4,\text{opt}} = (T_3 T_1^k)^{\frac{1}{k+1}} = T_1 \tau^{\frac{1}{k+1}} \quad (16)$$

Accordingly, optimal  $\varepsilon_2$  and optimal  $\varepsilon_1$  expressions for maximum  $w_{\text{net}}$  are obtained as follows:

$$\varepsilon_{2,\text{opt}} = \tau^{k/(k^2-1)} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{1,\text{opt}} = \varepsilon_{2,\text{opt}}^{1/k} = \tau^{\frac{1}{k^2-1}} \quad (18)$$

Accordingly, the optimal  $T_2$  value for maximum  $w_{\text{net}}$  is obtained as follows:



$$T_{2,\text{opt}} = (T_3 T_1^k)^{\frac{1}{k+1}} = T_1 \tau^{\frac{1}{k+1}} = T_{4,\text{opt}} \quad (19)$$

Here it can be seen that the maximum  $w_{\text{net}}$  can be achieved when  $T_{2,\text{opt}} = T_{4,\text{opt}}$ . Accordingly, the following expression for the maximum  $w_{\text{net}}$  ( $w_{\text{net,max}}$ ) can be obtained:

$$w_{\text{net,max}} = c_v T_1 \left[ \tau + k - (k+1) \tau^{\frac{1}{k+1}} \right] \quad (20)$$

Here, the optimal  $w_{\text{net}}$  value only changes depending on the  $T_3$  temperature. Thus, the optimal thermal efficiency for  $w_{\text{net,max}}$  can be expressed as follows:

$$\eta_{\text{th,opt}} = 1 - k \frac{\tau^{1/(k+1)} - 1}{\tau - \tau^{1/(k+1)}} \quad (21)$$

### 2.3. Optimization of $\varepsilon_2$ for maximum $p_{\text{me}}$

The following equation can also be written for the variation of the previously expressed mean effective pressure with respect to the unknown value  $T_4$ :

$$p_{\text{me}} = \frac{p_1}{k-1} \frac{\tau \left(1 - \frac{T_4}{T_1}\right)^{-k} - k \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\frac{T_4}{T_1} \left(1 - \frac{1}{\tau} \frac{T_4}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}} \quad (22)$$

$p_{\text{me}}$  is an indicator of work potential independent of piston displacement for reciprocating engines. Now the following equation can be written for the variation of the mean effective pressure with respect to the unknown value  $\varepsilon_2$ :

$$p_{\text{me}} = \frac{p_1 \tau \varepsilon_2^k}{(k-1)(\varepsilon_2 - 1)} \left( \tau - \tau^{k-1} \varepsilon_2^{k^2-k} - k \frac{\varepsilon_2^{1-k}}{\tau} + k \right) \quad (23)$$

Derivatives of the mean effective pressure expressions written here with respect to  $T_4$  and  $\varepsilon_2$ , respectively, are obtained as follows:

$$\begin{aligned} \frac{dp_{\text{me}}}{dT_4} = & - \frac{T_1 p_1 \left( \frac{T_4}{(1 - T_4/T_1)^k} - k(T_4/T_1 - 1) \right)}{(k-1)T_4^2 \left(1 - \frac{T_4}{\tau T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}} \\ & + \frac{p_1 \left(1 - \frac{T_4}{\tau T_1}\right)^{-\frac{k}{k-1}} \left( \frac{\tau}{(1 - T_4/T_1)^k} - k \left(\frac{\tau}{T_1} - 1\right) \right)}{\tau T_4 (k-1)^2} \\ & + \frac{T_1 p_1 \left( \frac{\tau k (1 - T_4/T_1)^{-k-1}}{T_1} - \frac{k}{T_1} \right)}{(k-1)T_4 \left(1 - \frac{T_4}{\tau T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_{me}}{d\varepsilon_2} = & -\frac{\tau p_1 \varepsilon_2^k (-\tau^{k-1} \varepsilon_2^{k^2-k} - k \varepsilon_2^{1-k} + k + \tau)}{(k-1)(\varepsilon_2-1)^2} + \frac{\tau k p_1 \varepsilon_2^{k-1} (-\tau^{k-1} \varepsilon_2^{k^2-k} - k \varepsilon_2^{1-k} + k + \tau)}{(k-1)(\varepsilon_2-1)} \\ & + \frac{\tau p_1 \varepsilon_2^k \left( -\tau^{k-1} (k^2 - k) \varepsilon_2^{k^2-k-1} + \frac{k^2 - k}{\varepsilon_2^k} \right)}{(k-1)(\varepsilon_2-1)} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Here the above equations are implicit in  $T_4$  and  $\varepsilon_2$ . Therefore, an equation solver or trial-and-error approach should be applied here. Thus, the  $\varepsilon_2$  value obtained by solving these two equations is determined as the value at which the maximum  $p_{me}$  ( $p_{me,max}$ ) is obtained. Once the  $\varepsilon_2$  value has been determined, other performance parameters can also be calculated. In this study, Equations 24 and 25 were solved with the help of Matlab to determine  $p_{me,max}$ .

### 3. CASE STUDY

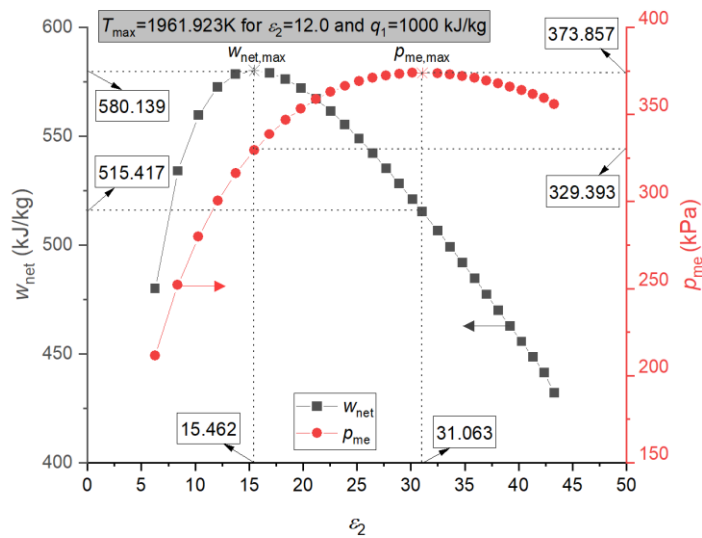
For the case study, first of all, the classical thermodynamic example was solved.  $T_{max} = 1961.923$  K was calculated for the assumptions  $\varepsilon_2 = 12:1$ ,  $q_1 = 1000$  kJ/kg,  $T_1 = 300$  K,  $p_1 = 100$  kPa and  $k = 1.005/0.718 = 1.4$ . Here,  $T_H$  temperature is assumed to be 2000 K for the second law calculations. The results obtained for the reference condition and other conditions are compared in Table 1. Here,  $\varepsilon_2$  value is equivalent to the geometric compression ratio of Atkinson engines in hybrid electric vehicles used today.  $q_1$  value was chosen as an average value in terms of ease of calculation.

The value of  $\varepsilon_2$ , at which the maximum  $w_{net}$  ( $w_{net,max}$ ) is obtained in an ideal Atkinson cycle operating in the temperature range of 300 K to 1961.923 K ( $\tau = 6.54$ ), was calculated as  $\varepsilon_{2,opt}^{w_{net}} = 6.54^{1.4/(1.4^2-1)} = 15.462$  with the help of Equation 17. Accordingly,  $\varepsilon_1$  was calculated as  $\varepsilon_{1,opt}^{w_{net}} = 15.462^{1/1.4} = 7.07$  with the help of Equation 18. Thus, the maximum  $w_{net}$  was calculated as  $w_{net,max} = 0.718 \times 300 [6.54 + 1.4 - (1.4 + 1) \times 6.54^{1/2.4}] = 580.139$  kJ/kg with the help of Equation 20. For the case where the maximum  $w_{net}$  was obtained, the  $\eta_{th}$  can be calculated as  $\eta_{th,opt}^{w_{net}} = 1 - 1.4(6.54^{1/2.4} - 1)/(6.54 - 6.54^{1/2.4}) = 0.619$  with the help of Equation 21. Thus it was calculated as  $T_{m1} = 1193.704$  K,  $T_{m2} = 481.977$  K,  $x_{dest} = 214.149$  kJ/kg,  $x_{exp} = 794.289$  kJ/kg. For this case,  $\eta_{II}$  was calculated as  $\eta_{II} = 1 - 214.149/794.289 = 0.730$  with the help of Equation 13. Other parameters were calculated as  $p_3 = 4623.599$  kPa,  $T_2 = T_4 = 656.105$  K,  $q_2 = 357.529$  kJ/kg,  $p_{me} = 329.392$  kPa. For an ideal Atkinson cycle operating in the temperature range of 300 K to 1961.923 K, the  $\varepsilon_2$  value at which the maximum  $p_{me}$  was obtained as a result of solving Equations 24 and 25 with the help of Matlab is determined as 31.063.

Table 1 is presented to compare of the calculated values for  $w_{net,max}$  and  $p_{me,max}$  cases. The variation of  $w_{net}$  and  $p_{me}$  with respect to  $\varepsilon_2$  for constant  $T_{max}$  is shown in Figure 2. When  $w_{net}$  reaches its maximum value ( $w_{net,max}$ ),  $p_{me}$  is not yet at its maximum value. For  $p_{me,max}$  it is necessary to create  $\varepsilon_2$  higher than  $w_{net,max}$ 's. Increasing  $\varepsilon_2$  after  $p_{me,max}$  is reached decreases both  $w_{net}$  and  $p_{me}$ . As can be seen in Figure 2, it is advantageous to choose the  $\varepsilon_2$  range where  $w_{net,max}$  and  $p_{me,max}$  values are obtained for an engine running with an ideal Atkinson cycle.

**Table 1.** Comparison of calculated parameters

| Parameter             | For $\varepsilon_2 = 12$ | For $w_{net,max}$ | For $p_{me,max}$ |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|------------------|
| $T_3 = T_{max}$ (K)   | 1961.923                 | <u>1961.923</u>   | <u>1961.923</u>  |
| $P_3 = P_{max}$ (kPa) | 3242.307                 | 4623.6            | 12278.58         |
| $T_2$ (K)             | 569.165                  | 655.978           | 969.518          |
| $P_2$ (kPa)           | 940.612                  | 1545.92           | 6067.678         |
| $\varepsilon_1$       | 4.958                    | 7.070             | 18.775           |
| $\varepsilon_2$       | <u>12.000</u>            | 15.462            | 31.063           |
| $q_1$ (kJ/kg)         | <u>1000</u>              | 937.669           | 712.546          |
| $q_2$ (kJ/kg)         | 428.252                  | 357.529           | 197.129          |
| $w_{net}$             | 571.748                  | 580.139           | 515.417          |
| $P_{me}$ (kPa)        | 299.297                  | 329.393           | 373.857          |
| $\eta_{th}$           | 0.572                    | 0.619             | 0.723            |
| $T_4/T_2$             | 1.276                    | <u>1.000</u>      | 0.512            |
| $x_{dest}$ (kJ/kg)    | 275.341                  | 214.149           | 88.173           |
| $x_{exp}$ (kJ/kg)     | 847.089                  | 794.289           | 603.590          |
| $\eta_{II}$           | 0.675                    | 0.730             | 0.854            |
| $T_{m1}$ (K)          | 1125.45                  | 1193.70           | 1409.868         |
| $T_{m2}$ (K)          | 481.978                  | 455.155           | 390.046          |


**Figure 2.** Optimization of  $\varepsilon_2$  for  $w_{net}$  and  $p_{me}$ 

The variation of  $w_{net}$  and  $p_{me}$  depending on  $T_4/T_2$  when  $T_{max}$  is constant is shown in Figure 3. It was explained above that  $T_2 = T_4$ . should occur for  $w_{net}$  to be maximum. As seen here,  $w_{net,max}$  should be  $T_2 = T_4$  while  $p_{me,max}$  should be  $T_2 < T_4$ . As seen in Figure 3, both  $w_{net}$  and  $p_{me}$  decrease when  $T_4 > T_2$ .

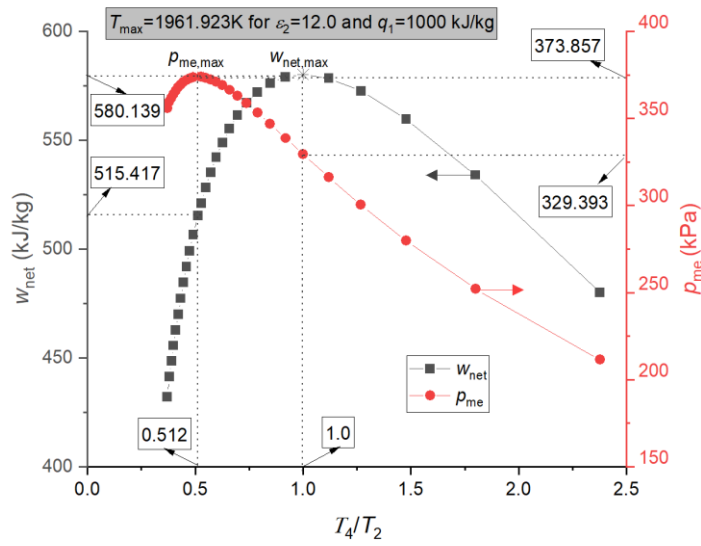


Figure 3. Optimization of  $T_4/T_2$  for  $w_{net}$  and  $p_{me}$

The variation of  $w_{net}$  and  $p_{me}$  with respect to  $\eta_{th}$  according to a constant  $T_{max}$  temperature is shown in Figure 4. As it is known,  $\eta_{th}$  is a function of  $\epsilon_1$  and  $\epsilon_2$  as expressed in Equation 7. Figure 4 shows that  $\eta_{th}$  is higher at  $p_{me,max}$  when a comparison is made for  $w_{net,max}$  and  $p_{me,max}$ . When evaluated in terms of thermal efficiency, it is more advantageous for the  $\epsilon_2$  value to be chosen between  $w_{net,max}$  and  $p_{me,max}$  and even close to the value from which  $p_{me,max}$  is obtained for the ideal Atkinson cycle.

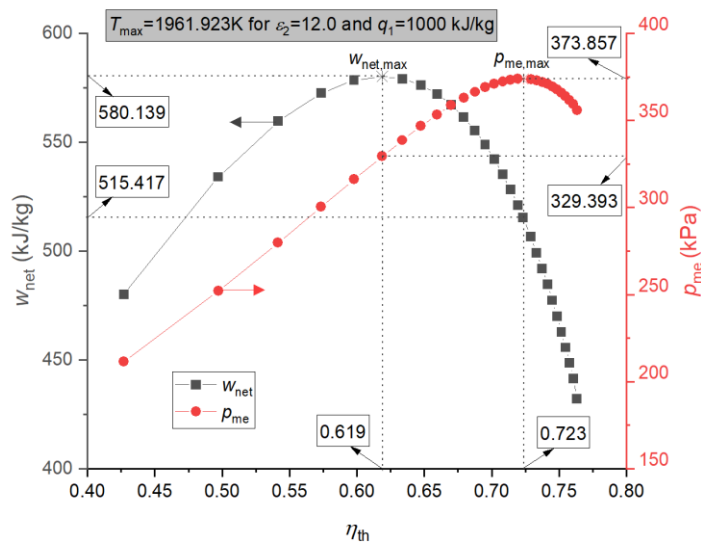


Figure 4. Optimization of  $\eta_{th}$  for  $w_{net}$  and  $p_{me}$

Although it shows that it is necessary to approach the  $p_{me,max}$  value for high thermal efficiency, this may not be possible in reality. Because the ideal compression ratio of today's spark ignition engines varies between 8 to 11 (Ferguson and Kirkpatrick, 2015). Accordingly, the variation of  $\epsilon_1$  and  $\eta_{th}$  with respect to  $\epsilon_2$  according to a constant  $T_{max}$  is shown in Figure 5. Here,  $\epsilon_2$  varies in the range of 17.621 to 22.828, corresponding to the ideal  $\epsilon_1$  value in the range of 8 to 11. However, the ideal  $\epsilon_1$  region is closer to the condition in which  $w_{net,max}$  is obtained, not the condition in which  $p_{me,max}$  is obtained. Therefore, the maximum values of  $\eta_{th}$  and  $p_{me}$  are also limited due to the ideal  $\epsilon_1$  region.

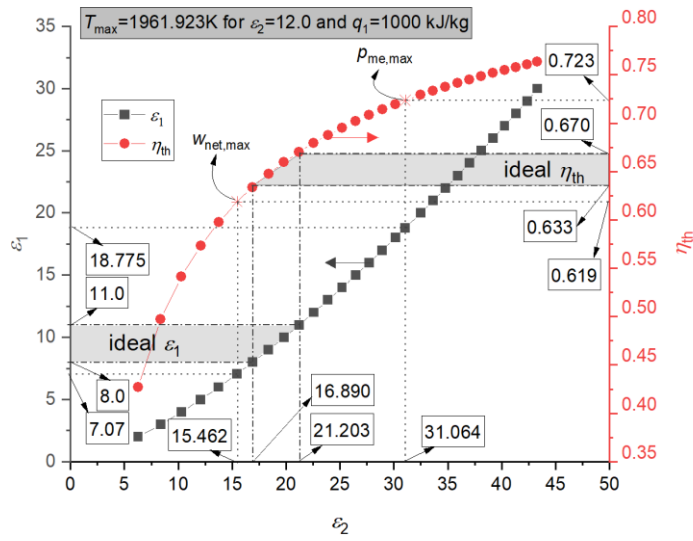


Figure 5. Variation of  $\epsilon_1$  and  $\eta_{th}$  compared to  $\epsilon_2$

The variation of  $T_{m1}$  and  $T_{m2}$  with respect to  $\eta_{th}$  according to a constant  $T_{max}$  is shown in Figure 6.  $T_{m1}$  and  $T_{m2}$  are important in expressing the ideal Atkinson cycle as the Carnot cycle equivalent. Here, as expected,  $T_{m1} - T_{m2}$  value increases as we approach from the  $w_{net,max}$  condition to the  $p_{me,max}$  condition, that is,  $\eta_{th}$  increases.

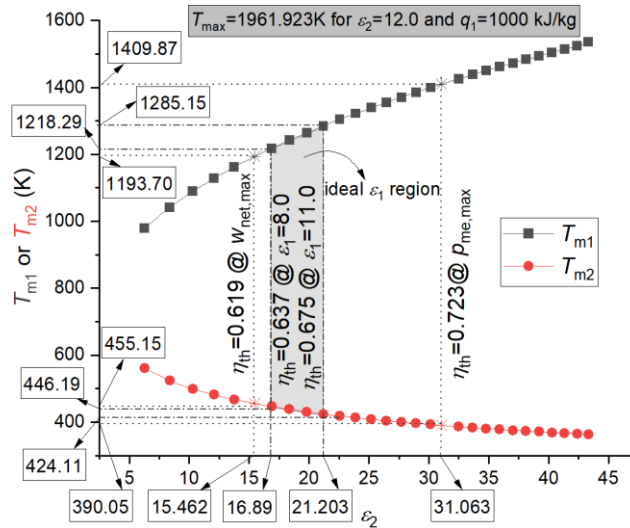


Figure 6. Variation of  $T_{m1}$  and  $T_{m2}$  compared to  $\epsilon_2$

The variation of  $x_{dest}$  and  $x_{exp}$  with respect to  $\epsilon_2$  according to a constant  $T_{max}$  is shown in Figure 7. Here, as we approach from  $w_{net,max}$  condition to  $p_{me,max}$  condition, the  $x_{exp} - x_{dest}$  value increases, that is,  $\eta_{II}$  increases.

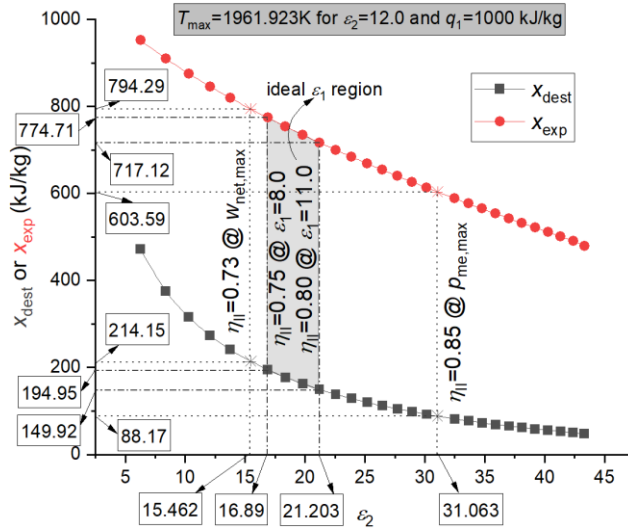


Figure 7. Variation of  $x_{dest}$  and  $x_{exp}$  compared to  $\epsilon_2$

In Figure 8, the relationship between  $p_{me}$  and  $w_{net}$  is shown for both constant  $T_{max}$  and constant  $q_1$ . Here  $p_{me}$  and  $w_{net}$  tend to increase continuously for constant  $q_1$ . However, in the case of constant  $T_{max}$ , there are situations where  $p_{me}$  and  $w_{net}$  are maximum. For this reason, it is advantageous to optimize the compression ratio for situations where the  $p_{me}$  or  $w_{net}$  values are maximum while designing the engine.

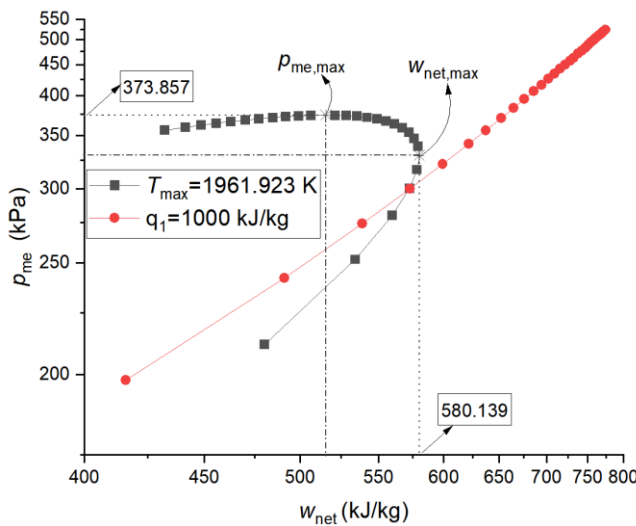


Figure 8. Comparison of  $p_{me}$  and  $w_{net}$

#### 4. CONCLUSION REMARKS

In this study, a case study was conducted using the equations obtained for the maximum specific net work and maximum mean effective pressure for the ideal Atkinson cycle. Considering the compression ratio values of today's engines, it has been seen that these values are closer to the compression ratio at which the maximum specific net work is achieved. However, when the compression ratio is optimized for conditions where the maximum mean effective pressure is obtained, it has been observed that the thermal

efficiency also increases. However, in practice, it has also been seen that optimizing today's engines to achieve maximum mean effective pressure is not appropriate due to the fuel properties used. For this reason, it has been seen that it is more valid to choose the compression ratio of Atkinson cycle engines according to the maximum specific net work. Although a solution is discussed in this study with the focus of the ideal Atkinson cycle, this presented method can also be used for other gas power cycles. In addition, the model has been developed for the ideal conditions of the cycle. This model can be reformulated for realistic engine cycles by taking into account parameters such as irreversibility, friction loss and combustion efficiency.

## 5. REFERENCES

- Balmer, R. T, 2011, *Modern engineering thermodynamics-textbook with tables booklet*. Academic Press.
- Boggs, D. L., Hubert, H. S., & Schechter, M. M., 1995, The Otto-Atkinson cycle engine-fuel economy and emissions results and hardware design. *SAE transactions*, 220-232.
- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E., 2020,. *Fundamentals of thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M., 2011, *Thermodynamics: an engineering approach*. New York: McGraw-hill.
- Costea, M., Petrescu, S., Feidt, M., Dobre, C., & Borcila, B. (2021). Optimization modeling of irreversible Carnot engine from the perspective of combining finite speed and finite time analysis. *Entropy*, 23(5), 504.
- Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T., 2015, *Internal combustion engines: applied thermosciences*. John Wiley & Sons.
- Ganesan, V., 2018, *Thermodynamics: basic and applied*. McGraw-Hill Education.
- Gonca, G., & Sahin, B. (2022). Performance investigation and evaluation of an engine operating on a modified dual cycle. *International Journal of Energy Research*, 46(3), 2454-2466.
- Grohe, H., 2003, Otto-und Dieselmotoren, 13. Auflage, *Vogel Fachbuch*.
- Halderman, J. D., & Mitchell, C. D., 2014, *Automotive technology*. Pearson.
- Kim, S., Baik, Y. J., & Kim, M. (2022). Thermodynamic analysis of general heat engine cycle with finite heat capacity rates for power maximization. *Case Studies in Thermal Engineering*, 35, 102067.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B., 2010, *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Nag, P. K., 2013, *Engineering thermodynamics*. Tata McGraw-Hill Education.
- Palaci, Y., & Gonca, G., 2020, The effects of different engine material properties on the performance of a diesel engine at maximum combustion temperatures. *Thermal Science*, 24(1 Part A), 183-191.
- Pauken, M., 2011, *Thermodynamics for dummies*. John Wiley & Sons.
- Potter, M. C., & Somerton, C. W., 2014, *Schaum's outline of thermodynamics for engineers*. McGraw-Hill Education.
- Rajput, R. K., 2009, *Applied thermodynamics*. Laxmi Publications, Ltd.
- Rajput, R. K., 2009, *Engineering thermodynamics: A computer approach (si units version)*. Jones & Bartlett Publishers.
- Şahin, H., & Gonca, G. (2021). Endoreversible Performance Analysis of a modified dual cycle and comparison with the classical engine cycles. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (27), 1003-1009.
- Schmidt, A., 2019, *Technical thermodynamics for engineers*. Springer Nature: Cham, Suisse.
- Wang, R., Ge, Y., Chen, L., Feng, H., & Wu, Z. (2021). Power and thermal efficiency optimization of an irreversible steady-flow lenoir cycle. *Entropy*, 23(4), 425.
- Whitman, A. M., 2020, *Thermodynamics: Basic Principles and Engineering Applications*. Springer.
- Wu, C., 2007, *Thermodynamics and heat powered cycles: a cognitive engineering approach*. Nova Publishers.
- Zhao, J., Xu, M., Li, M., Wang, B., & Liu, S., 2012, Design and optimization of an Atkinson cycle engine with the Artificial Neural Network Method. *Applied energy*, 92, 492-502.



## ANALYSIS OF PERFORMANCE COEFFICIENTS IN MAXIMUM ELECTRICAL POWER EXTRACTION FROM STAND-ALONE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

Emre Hasan DURSUN

Konya Technical University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, Konya, TÜRKİYE  
[ehdursun@ktun.edu.tr](mailto:ehdursun@ktun.edu.tr)

(Received: 30.08.2022; Accepted in Revised Form: 19.10.2022)

**ABSTRACT:** Increasing performance and improving efficiency in maximum power extraction from Wind Energy Conversion Systems (WECS) is a quite important research topic. Today, in the large-scale WECS, it is widely aimed to extract the maximum mechanical power from the wind turbine using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) unit. Similarly, it can also be targeted to achieve maximum mechanical power in small-scale WECS applications. However, losses occur in structural subsystems and electrical subunits located in WECS. Due to these losses, the overall system efficiency decreases and the characteristic of the system is also affected. The operation of these systems can also be performed via maximum electrical output power extraction, which is one of the most up-to-date ideas. Thus, the overall WECS rather than the wind turbine can be optimally controlled. Eventually, maximum electrical power tracking (MEPT) based designs can provide higher power extraction with higher efficiency than MPPT-based ones. In this paper, considering the system operating concepts with MPPT and MEPT for a stand-alone Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) based WECS, the changes in performance coefficients at defined focus points in terms of system efficiency are evaluated. Technical and theoretical comparative analyzes are also made for each specific wind speed between 8m/s and 12m/s.

**Keywords:** Maximum Electrical Power Tracking (MEPT), Maximum Power Point Tracking (MPPT), Performance Coefficients, Permanent-Magnet Synchronous Generator (PMSG), Wind Energy Conversion System (WECS)

### Şebeke-Bağlantısız Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminden Maksimum Elektriksel Güç Eldesinde Performans Katsayılarının Analizi

**ÖZ:** Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (WECS)'nden maksimum güç yakalanmasında performansın artırılması ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi oldukça önemli bir araştırma konusudur. Günümüzde büyük-ölçekli WECS'lerde Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) birimi kullanılarak rüzgar türbininden maksimum mekanik gücün elde edilmesi yaygın olarak amaçlanmaktadır. Benzerce küçük-ölçekli WECS uygulamalarında da maksimum mekanik güce ulaşmak amaçlanabilir. Ancak WECS'de yer alan yapısal alt sistemler ve elektriksel alt birimlerde kayıplar meydana gelir. Bu kayıplardan dolayı tüm sistemin verimi düşer ve sistemin karakteristiği de ayrıca etkilenir. En güncel fikirlerden biri olan maksimum elektriksel çıkış gücünün yakalanması ile de bu sistemlerin çalışması gerçekleştirilebilmektedir. Böylece, rüzgar türbininden ziyade WECS'in tamamı optimal olarak kontrol edilebilir. Nihai olarak da Maksimum Elektriksel Güç Takibi (MEPT)'li tasarımlar MPPT'li tasarımlarından daha yüksek verimlilik ile daha yüksek gücün elde edilmesini sağlayabilmektedir. Bu çalışmada, şebeke bağlantısız Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (PMSG) temelli WECS için MPPT'li ve MEPT'li sistem çalışma konseptleri düşünülerek, sistem verimliliği açısından belirli odak noktalarındaki performans katsayılarının



değişimleri değerlendirilmektedir. Ayrıca 8m/s ve 12m/s arasında her bir belirli rüzgar hızı için de teknik ve teorik olarak karşılaştırmalı analizler yapılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Maksimum Elektriksel Güç Takibi, Maksimum Güç Noktası İzleme, Performans Katsayıları, Kalıcı Miknatıslı Senkron Generator, Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri

## 1. INTRODUCTION

With the increasing population, the quality of life and development level of societies, and technological advances in industrialization, the world's energy demand is increasing day by day (Dursun and Kulaksiz, 2020b). On the other hand, fossil fuel-based sources were widely used in power generation until recently. However, some serious social problems also arise due to the low energy efficiency of these resources, limited reserve capacity, decrease in usability, environmental pollution and greenhouse gas effect. However, low energy efficiency, limited reserve capacity and reduced availability of these resources cause environmental pollution and greenhouse gas effects, and thus serious social problems arise (Dursun et al., 2020; Kumar et al., 2018). Today, there is a great interest in renewable energy-based power generation systems using renewable energy resources such as solar, wind, hydroelectric, biomass and geothermal, which have attractive advantages to cope with these problems, and developed countries also make serious investments in such energy production systems (Lee and Kim, 2016). Among these energy resources, solar and wind attract more attention due to some of their advantages. In fact, while solar-based power generation systems were more popular in the recent past, this trend has now changed to wind-based power generation systems (Singh et al., 2022). The main reasons for this trend are that energy production can be made when the wind has aerodynamic flow regardless of day and night, and that wind energy is clean, infinite has zero-carbon emission and can provide greater power generation with less space occupation (Hussain and Mishra, 2016; Pranupa et al., 2022). Besides, it is known from the data of the Global Wind Energy Council (GWEC) that the global total wind power installation reached approximately 837GW with new installations in 2021 and has an annual growth of 12% (GWEC, 2022). Moreover, it is predicted among various scenarios that it can reach approximately 2100GW levels by 2030 and meet 20% of the world's needs (Pranupa et al., 2022).

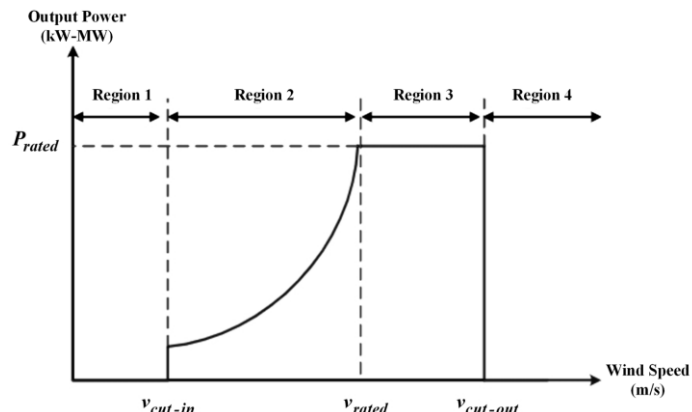
Wind Energy Conversion System (WECS) is a device that mainly consists of wind turbine (WT), generator, power converter and controller units. While the kinetic energy of the wind is converted to mechanical energy by wind turbine, the conversion of mechanical energy into electrical energy is provided by the generator. Also, the electrical output suitable for consumer demand is regulated by the power converter and control units.

Various types of WECS structures have been proposed for the literature and used in industrial applications. Considering two different focuses, these classifications can be made in relation to WT orientation and WT operating speed type. Depending on the classification type of WT orientation, there are two broad families of wind turbines in the world today: vertical-axis WT (VAWT) and horizontal-axis WT (HAWT) systems. In the VAWT systems, axial rotation is perpendicular to the ground, while in HAWTs it is parallel to the ground (Hossain and Ali, 2015). Furthermore, VAWT systems are simpler in design and have the advantage of positioning the main equipment at ground level. However, it has a low tip speed ratio (TSR) and also has major disadvantages such as uncontrollable output power and low overall performance. On the other hand, three-blades (HAWTs) are widely used in modern industrial WECSs with the advantages of improved efficiency, controllability, high rotational speeds, lower mechanical stress and lower cost (Pao and Johnson, 2011).

WECSs are mainly divided into two types with the classification related to operating speed type; fixed-speed WECS and variable-speed WECS (Mousa et al., 2021). Fixed-speed WECSs are simple and cheaper, while variable-speed WECSs are more efficient thanks to the Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control. Because the nature of the wind has a climatically non-linear and time-varying characteristic related to the flow of air. Therefore, the output power of WECS is also always fluctuating

and variable (Nasiri et al., 2014). In addition, large fluctuations in power cause tensions and high mechanical stresses in the mechanical parts. Thus, fixed-speed WECSs can be operated in a very limited range, while variable-speed WECSs can be operated at optimal operating points in the whole wind speed range by full controllability in accordance with the nature of the wind, and higher energy can be captured from the flow of the wind (Hussain and Mishra, 2016).

Operating regions of WECS are classified into four regions by wind speed as shown in Figure 1 (Kumar and Chatterjee, 2016).



**Figure 1.** Operating Regions of WECS.

First one is Region 1 that represents wind speed is lower than cut-in wind speed ( $v_{cut-in}$ ) and it is also known as the parking-mode. Power generation is not carried out in this region and grid-connected WECSs are disconnected from the utility grid. The section between the  $v_{cut-in}$  and rated wind speed ( $v_{rated}$ ) is called as Region 2. Herein, various MPPT algorithms and control strategies are operated during a fixed pitch-angle, and WECS is controlled to capture as much power as possible. Region 3 is the section between the  $v_{rated}$  and the cut-out wind speed ( $v_{cut-out}$ ) and the mechanical power generation is limited to its nominal value by performing stall control and pitch-angle control in here. Thus, damage to the turbine system is prevented at wind speeds above the  $v_{rated}$ . The last one is Region 4 where there are extreme wind speeds. To prevent damage from unsafe airflow, WECS is disabled by braking, and power generation is stopped. Grid-connected WECSs are also completely disconnected from the utility grid.

Examining the literature and industrial applications, it can be seen that various generator types are used in fixed-speed and variable-speed WECS structures depending on the development technologies over time. These generators can be listed as Squirrel Cage Induction Generator (SCIG), Wound Rotor Induction Generator (WRIG), Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), Wound Rotor Synchronous Generator (WRSG) and Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) (Chinmaya and Singh, 2018; Mousa et al., 2021; Vijayakumar et al., 2015; Yang et al., 2016; Yaramasu et al., 2015). Also, considering variable-speed WECS applications, power electronics converters are needed for controllability. In the SCIG-based WECS, while speed control can be provided at a limited level in fixed-speed applications, full variable-speed operation can be realized with a full-scale power converter. Nevertheless, it can still suffer from large mechanical stress. On the other hand, WRIG-based WECS can take place in semi-variable speed and full-variable speed applications regarding the used converter type. In the semi-variable speed operation, it suffers from high maintenance costs due to slip rings and brushes, and high initial investment costs due to an additional power converter. Also, external resistance causes losses and reduces reliability. Besides, full-variable speed operation is provided by a full-scale power converter. DFIG-based WECS can employ 30% semi-variable speed operation by needing a partial-scale power converter (Cheng and Zhu, 2014). However, due to the fact that slip rings and brushes require regular maintenance, their use in offshore wind farms is limited. Finally, the usage of PMSG-based WECS has attracted a great deal of attention worldwide with its advantages such as efficiency, reliability, fault ride through (FRT) compatibility, power density, low maintenance cost as well as direct-driven operation and no DC

excitation current (Dursun and Kulaksiz, 2020b; Mousa et al., 2021). As a result of the mentioned advantages, various types of PMSGs related to phase number and generation power have also been developed and are used in small-scale, medium-scale, or large-scale WECS applications.

Many different types of converter structures can be used in WECS applications regarding the type of generator used. Some of these are back-to-back converter (BTBC) (Youssef et al., 2019), matrix converter (Barakati et al., 2009; Melício et al., 2010), rectifier and inverter (Yaramasu et al., 2015), rectifier and various DC-DC converters (Dursun and Kulaksiz, 2020b; Fathabadi, 2017; Hussain and Mishra, 2016). However, power converters are expected to meet several technical and operational requirements in order to achieve the desired type of application. These are initial cost, reliability, modularity and maintenance cost, efficiency, power quality, grid-code compliance, high-power density/small-weight and easy controllability (Yaramasu et al., 2015). Given merits and demerits, Power converters used in research and industrial applications are mainly of two types: BTBC structure and a combination of the rectifier and DC-DC converters. BTBC consists of two voltage source converters called the machine-side converter (MSC) and the grid-side converter (GSC) and is generally more advantageous for medium-scale and large-scale applications. On the other hand, uncontrolled rectifier and DC-DC boost converter (BC) are widely used in stand-alone and small-scale WECS applications with the merits of efficiency, simplicity, cost, and easy controllability. Therefore, this type of power converter is used in this paper.

Efficiency and higher power extraction are crucial issues for WECSs. An efficient WECS should be able to provide maximum power extraction by operating at a certain optimal point corresponding to each instantaneous changing wind speed over time. This type of operation is known in the literature as MPPT control or MPPT operation. Evaluating in general, MPPT operation consists of two parts: MPPT algorithms and MPPT controller designs. While the optimal operating point is determined by MPPT algorithms, WECS is brought to this operating point by appropriate switching of the power converter by MPPT controllers.

Examining the literature, it can be seen that different types of MPPT algorithms are utilized in WECS applications. Some of them are perturbation and observation (P&O) (Cheng and Zhu, 2014), modified P&O (Youssef et al., 2019), tip speed ratio (TSR) (Dursun and Kulaksiz, 2020a), power signal feedback (PSF) (Barakati et al., 2009), optimal torque control (OTC) (Ganjefar et al., 2014), optimum relation based (ORB) as well as incremental conductance (IC) (Kumar et al., 2018). Also, there are some structures in which these algorithms are hybridized. In addition, intelligent structures such as the fuzzy logic controller (FLC) (Yaakoubi et al., 2019), the neural network (NN) (Yin et al., 2020), and other soft computing-based MPPT algorithms are used. Besides, meta-heuristic-optimization algorithms using PSO and its derivatives have also been recently proposed for MPPT search.

In the MPPT controller design, which is the second subject, various techniques such as proportional-integral (PI) control, FLC, fractional-order PI, back-stepping, model-reference adaptive control and different sliding mode control types have been examined by researchers (Dursun and Kulaksiz, 2020b). However, all these mentioned structures have merits and demerits relative to each other. Therefore, unified framework designs created by hybridizing techniques have also been used in current studies (Dursun et al., 2020).

Traditionally, MPPT operation aims to achieve maximum turbine output mechanical power. However, losses occur in conversion units in WECS and situations that affect the efficiency are revealed. The system operating point is also affected. Therefore, among current perspectives, the maximum electrical output power tracking (MEPT) method becomes a more efficient structure (Fathabadi, 2017). It is aimed to achieve maximum efficiency and maximum power extraction at the end-point.

The main subject of this paper consists of detailed analysis of the changes in performance coefficients in both the MPPT operation and the MEPT operation for the stand-alone PMSG-based WECS. For each specific wind speed between 8m/s and 12m/s, the changes in the characteristics of the WECS are presented theoretically by investigating at different inspection points. Thus, changes in the power coefficient of wind turbine, power coefficient turbine-generator output, power coefficient of turbine-generator-rectifier output and power coefficient of turbine-generator-rectifier-converter output are expressed respectively.

Examining the literature, it can be seen that a similar analysis has been made for the vertical-axis WT based WECS structure in (Fathabadi, 2017). However, in this paper, entire analyzes are performed for the horizontal-axis WT based WECS. Thus, the results of the detailed analyzes in this study are included in the literature and constitute the main contribution of this paper. Nonetheless, the details of the algorithm and controller design for MPPT and MEPT operation fall outside the main focus of this study. Interested researchers can access the details of these parts from other studies of the author (Dursun et al., 2020; Dursun and Kulaksiz, 2020b).

The rest of this paper is presented as follows: In Section 2, the WECS configuration is given in detail. Similarly, Section 3 presents a detailed analysis of the changes in performance coefficients and discussion. Finally, conclusions are provided in Section 4.

## 2. WECS CONFIGURATION

The schematic diagram of the WECS configuration designed for this study is presented in Figure 2. This configuration basis on the small-scale stand-alone PMSG-based WECS, which consists of the wind turbine, PMSG, three-phase uncontrolled rectifier, connection capacitor, BC, load, MPPT algorithms, and SMC-based MPPT controller. Moreover, MPPT algorithms are presented in two different types, which are maximum mechanical power tracking (MMPT) and maximum electrical power tracking (MEPT). For such a configuration structure, MEPT operation provides economy and efficiency.

As can be seen from Figure 2, by taking some measurements from WECS, the MPPT algorithm is operated and thus the optimal operating point, which is BC reference voltage, is determined. Herein, the BC input voltage, BC reference voltage and BC output voltage are transferred to the MPPT controller. Moreover, the controller generates the switching signal of the BC to bring the WECS to the specified operating point to extract the maximum electrical output power. In addition, BC input voltage  $V_{in}$ , BC output voltage  $V_o$  and reference voltage  $V_{in\_opt}$  ( $V_{ref}$ ), which is the optimal operating point corresponding to maximum electrical output power, are indicated herein.

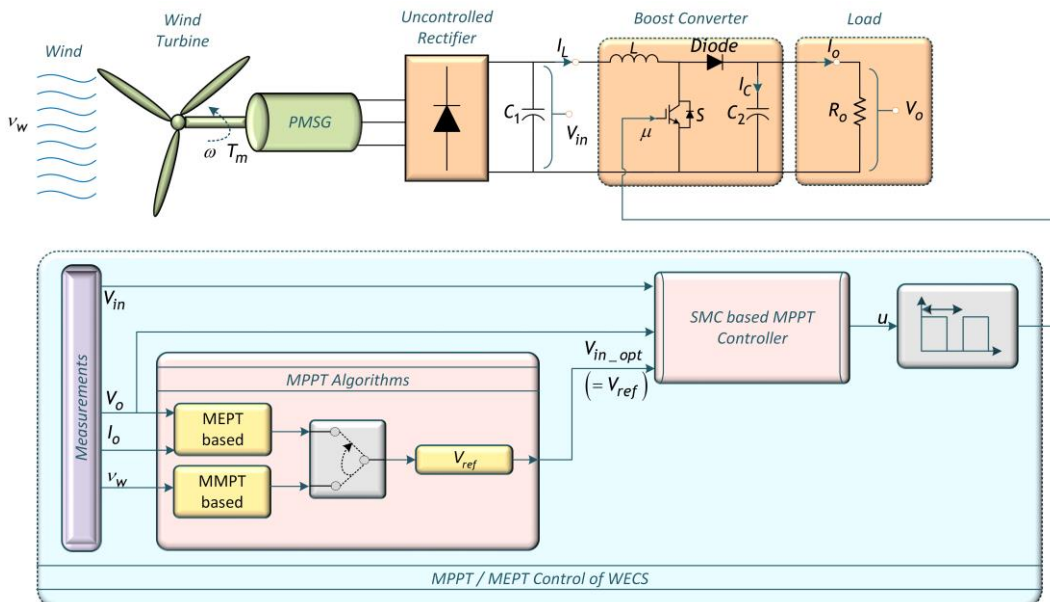


Figure 2. WECS Configuration.

The wind power ( $P_w$ ) arising from the aerodynamic flow of the wind can be defined as given below.

$$P_w = 0.5\rho Av_w^3 \tag{1}$$

Besides, the mechanical power ( $P_m$ ) extracted from the wind turbine can be expressed as:

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) P_w = 0.5 \rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (2)$$

where  $v_w$  is the wind speed,  $\rho$  is the air density,  $A$  is swept area by blades of WT,  $C_p(\lambda, \beta)$  is the power coefficient of WT,  $\lambda$  is the tip speed ratio and  $\beta$  is the pitch-angle of blades ( $\beta = 0$  for the MPPT operating region). Also,  $C_p(\lambda, \beta)$  used in this paper can be denoted as follows:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-(C_5/\lambda_i)} + C_6 \lambda \quad (3)$$

$$\lambda_i^{-1} = (\lambda + 0.08\beta)^{-1} - 0.035(\beta^3 + 1)^{-1}$$

where  $C_1$ - $C_6$  are specific parameters of WT. Variable-speed WECS should run at MPPT operation to obtain the maximum power while  $\beta = 0$ , so that,  $C_p(\lambda)$  depends only on  $\lambda$ , which is given as:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \quad (4)$$

where  $R$  and  $\omega_m$  are the radius and angular speed of WT, respectively. From here, considering the optimal values of  $\lambda_{opt}$  and  $C_{pmax}$ , they can be calculated as 8.1 and 0.48 respectively, by way of differentiating to respect to  $\lambda$ . In addition, the  $C_p$  vs.  $\lambda$  characteristic of WT in this paper is shown in Figure 3. On the other hand, wind turbine output power (mechanical) vs. turbine speed characteristics for different wind speed conditions are presented in Figure 4. As can be inferred from here, there is a specific operating speed that extracts maximum mechanical power from the wind turbine for each wind speed.

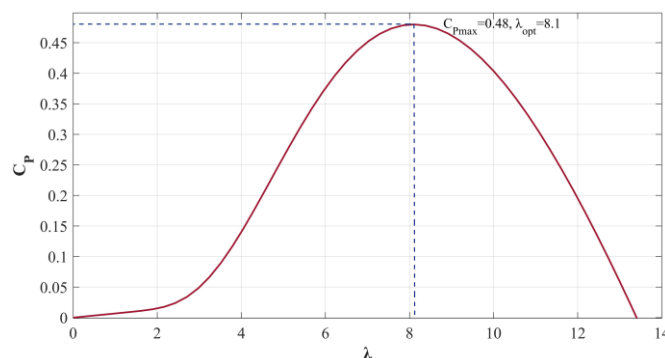


Figure 3.  $C_p$  vs.  $\lambda$  characteristic of WT.

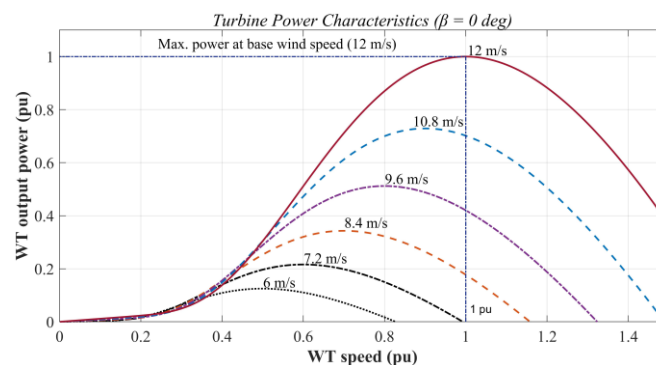


Figure 4. Wind turbine output power vs. turbine speed characteristics for wind speeds.

As it can be understood from the WECS configuration given in Figure 2, mechanical power extracted from the wind turbine is converted to electrical form over the generator and regulated by the converter unit and the controller, and then transferred to the load. Therefore, it should be taken into account that

there are losses in electrical and mechanical components in the real world. Since losses also occur in structural subsystems and electrical subunits located in WECS. However, these losses in the generator and converter are not constant and change related to generator speed during the operation (Fathabadi, 2017). Also, the characteristic of the system is also affected by these losses. Considering the aforementioned, it would make it more reasonable to evaluate the MPPT searching on the end-point that is load-side. From here, the electrical output power on the load can be defined as below:

$$P_L = P_m \eta_{gen} \eta_{conv} \tag{5}$$

where,  $\eta_{gen}$  and  $\eta_{conv}$  express the efficiency of the generator and the power converter unit, respectively. Specifications for the WECS model are given in Table 1. In order to access more detailed information for BC and PMSG, interested researchers can examine references of (Dursun et al., 2020; Dursun and Kulaksiz, 2020b).

**Table 1.** Specifications for WECS.

| Description |   | Value   | Description                | Value                      |      |
|-------------|---|---|----------------------------|----------------------------|------|
|             | Optimal TSR                                       | $\lambda_{opt} = 8.1$   | Phase number               | 3                          |      |
|             | Maximum power coefficient                         | $C_{P,max} = 0.48$  | Stator Phase resistance    | 1 ohm                      |      |
| WT          | Pitch angle                                       | $\beta = 0$   | Armature inductance        | $L_d,$<br>$L_q=0.00153H$   | PMSG |
|             | Rotor Radius                                      | $R = 2$   | Inertia, J                 | 0.013 (kg.m <sup>2</sup> ) |      |
|             | The coefficients C <sub>1</sub> to C <sub>6</sub> | $C_1=0.5176$ $C_2=116$ $C_3=0.4$<br>$C_4=5$ $C_5=21$ $C_6=0.0068$ | Viscous damping, F         | 0.0425 (N.m.s)             |      |
|             | Switching Frequency, $f_{sw}$                     | 5 kHz   | Inductor Resistance, $R_L$ | 0.15 Ω                     |      |
| BC          | Inductor, L                                       | 310 μH  | Capacitor ESR, $R_c$       | 0.07 Ω                     |      |
|             | Capacitor, C                                      | 240 μF  | Load Resistance, R         | 36 Ω                       |      |

### 3. PERFORMANCE COEFFICIENTS ANALYSIS AND DISCUSSION

In this section, the changes in performance coefficients during the system operating concepts with MPPT and MEPT for a stand-alone PMSG-based WECS are investigated. In addition, changes in the performance characteristics of the WECS are presented for each specific wind speed from 8 m/s to 12 m/s. Overall system modeling and all detailed analyses are carried out based on MATLAB/Simulink simulation environment and also given to validate the theoretically mentioned.

In this study, performance coefficients are acquired by evaluating them through four different focus points. These are  $C_P$ ,  $C_{tg}$ ,  $C_{tgr}$  and  $C_{tgrl}$ . Herein,  $C_P$  is the power coefficient of the turbine and  $C_{tg}$  is the turbine-generator power coefficient that is used by evaluating the efficiency of the turbine together with the PMSG generator. Moreover,  $C_{tgr}$  is the turbine-generator-rectifier power coefficient and the output of the rectifier is taken into account as the focus point. The last performance evaluation is made by examining the converter output. Thus,  $C_{tgrl}$  denotes the power coefficient of turbine-generator-rectifier-converter output. Therefore, these coefficients can be written mathematically.

Considering the losses on the generator,  $C_{tg}$  which defines the relationship between generator power and wind power, is as follows:

$$C_{tg} = \frac{P_g}{P_w} \quad ; \{ P_g = P_m - P_{g,loss} \} \tag{6}$$

$$C_{tg} = \frac{P_m - P_{g,loss}}{0.5\rho A v_w^3}$$

where  $P_g$  indicates generator-output power and  $P_{g\_loss}$  denotes power losses on the generator. From here, considering that the output of three-phase uncontrolled rectifier and filter capacitor is connected to the converter (BC), the input power of the converter  $P_{in\_conv}$  and coefficient  $C_{tgr}$  are obtained as:

$$C_{tgr} = \frac{P_{in\_conv}}{P_w} \quad ; \{ P_{in\_conv} = P_g - P_{rec\_loss} \} \quad (7)$$

$$C_{tgr} = \frac{P_g - P_{rec\_loss}}{0.5\rho A v_w^3}$$

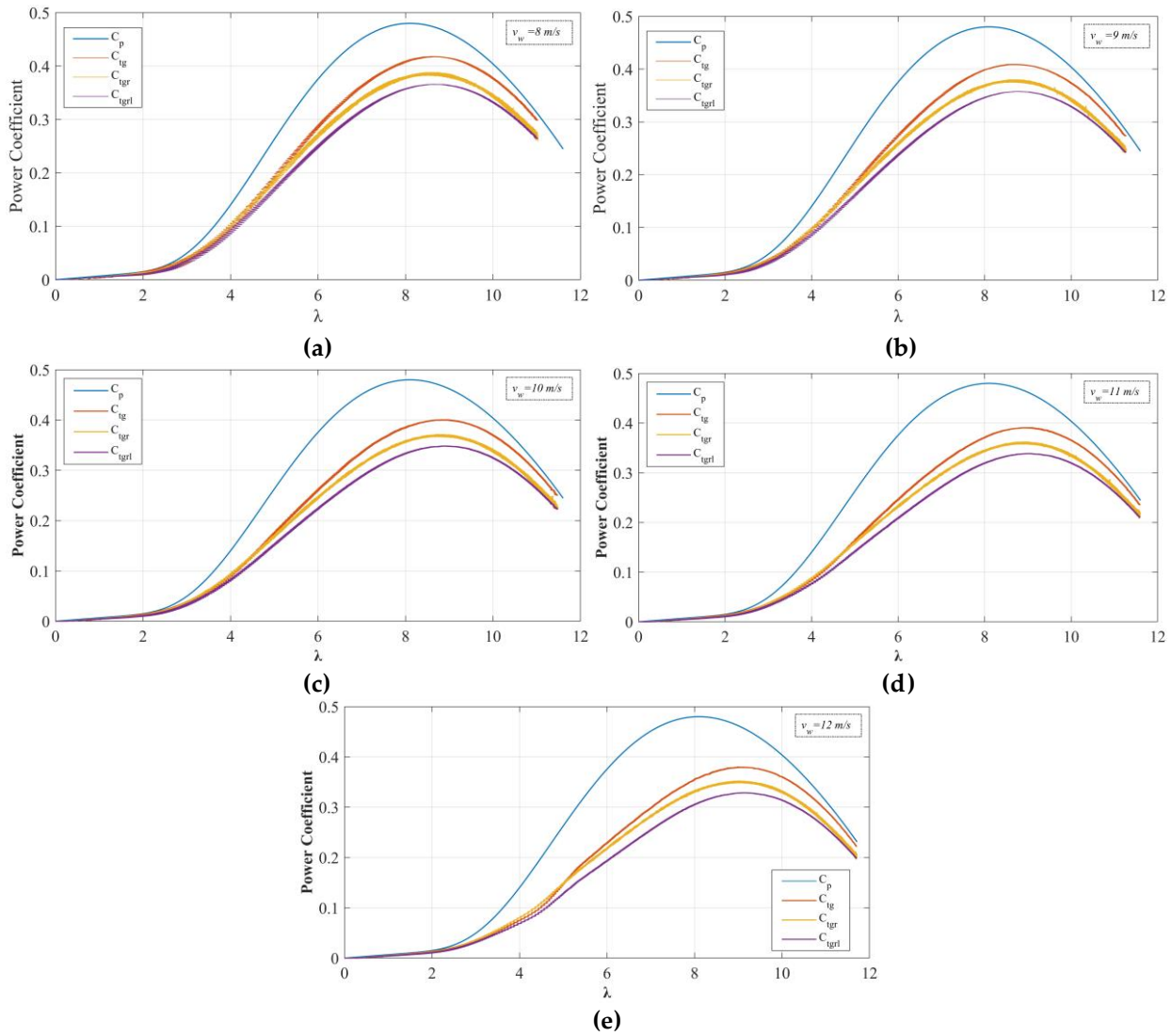
Herein,  $C_{tgr}$  demonstrates the relationship between the input power of the converter and wind power by taking into account rectifier power loss. Furthermore, converter loss is variable according to the operating condition. From here, the output power of converter  $P_{out\_conv}$  ( $P_L$ : power on load) is obtained by subtracting power loss on the converter  $P_{conv\_loss}$  and  $C_{tgrl}$  can be written by relating as below:

$$C_{tgrl} = \frac{P_{out\_conv}}{P_w} \quad ; \{ P_{out\_conv} = P_{in\_conv} - P_{conv\_loss} \} \quad (8)$$

$$C_{tgrl} = \frac{P_{in\_conv} - P_{conv\_loss}}{0.5\rho A v_w^3}$$

$C_P$ ,  $C_{tgr}$ ,  $C_{tgr}$  and  $C_{tgrl}$  vs.  $\lambda$  characteristics of used WECS are presented in Figure 5 (a-e) at different specific wind speeds from 8 m/s to 12 m/s. From here, it can be seen that  $C_P$  characteristics remain the same for whole wind speeds. Since it is a known fact that  $C_P$  characteristic occurs depending on the design of the turbine and has a unique structure. On the other hand, it can be inferred here that the other aforementioned characteristics don't reach their maximum values at the same  $\lambda$  values. Also, as the wind speed increases, the generator operating speed increases related to this situation. Thus, the characteristics of the performance coefficients are changed as a result of the increase and change in losses. In addition, it can be understood that maximum values of  $C_{tgr}$ ,  $C_{tgr}$  and  $C_{tgrl}$  characteristics decrease as the wind speed increases. For these specific wind speeds, obtained results through MMPT and MEPT-based control are given in Table 2, which is arranged in relation to this figure. According to this table, while  $\lambda$  is maintained at 8.1 in the MMPT-based implementation and, MEPT-based methodology by operating on the load-side keeps  $\lambda$  between about 8.7 and 9.2 for the determined wind speed range. Moreover, MMPT-based control aims to keep  $C_P$  at 0.48 while MEPT-based one intends to maximize the  $C_{tgrl}$ . Regarding to mentioned this perspective, data for  $C_{tgrl}$  and  $\lambda$  values, which correspond to the optimal operating point for both methodologies, listed in this table.

As can be understood from Equation in (8),  $C_{tgrl}$  indicates the relationship between the output power of the converter and wind power. Furthermore, it can be interpreted that  $C_{tgrl}$  is an indicator of the overall efficiency change of the whole WECS system. Besides, it can be seen that the MEPT-based one achieves a higher value of  $C_{tgrl}$  for all wind speeds compared to the MMPT-based one. Therefore, it can be understood that WECS is operated with higher efficiency and higher power extraction is obtained from the end-point.



**Figure 5.**  $C_p$ ,  $C_{tg}$ ,  $C_{igr}$  and  $C_{tgrl}$  vs.  $\lambda$  characteristics of WECS at different wind speeds. (a) Changes at wind speed 8 m/s. (b) Changes at wind speed 9 m/s. (c) Changes at wind speed 10 m/s. (d) Changes at wind speed 11m/s. (e) Changes at wind speed 12 m/s.

**Table 2.** Results of MMPT and MEPT control.

| $v_w$        | MMPT      |       |            | MEPT      |            |
|--------------|-----------|-------|------------|-----------|------------|
|              | $\lambda$ | $C_p$ | $C_{tgrl}$ | $\lambda$ | $C_{tgrl}$ |
| $v_w=8$ m/s  | 8.1       | 0.48  | 0.356      | 8.7       | 0.365      |
| $v_w=9$ m/s  | 8.1       | 0.48  | 0.350      | 8.8       | 0.357      |
| $v_w=10$ m/s | 8.1       | 0.48  | 0.337      | 8.9       | 0.348      |
| $v_w=11$ m/s | 8.1       | 0.48  | 0.323      | 9         | 0.338      |
| $v_w=12$ m/s | 8.1       | 0.48  | 0.309      | 9.2       | 0.328      |

Besides, changes occurred these characteristics can be interpreted from another viewpoint and each one is compared in relation to every specific wind speed, which is demonstrated in Figure 6-8. Figure 6(a,b) presents changes in  $C_{tg}$  vs.  $\lambda$  characteristics with regard to all of the wind speed ranges and results in a zoomed-in view. Similarly,  $C_{igr}$  vs.  $\lambda$  characteristics and zoomed results, and  $C_{tgrl}$  vs.  $\lambda$  characteristics and zoomed results are indicated in Figure 7(a,b) and Figure 8(a,b) respectively. Therefore, the change of the optimal operating points for each specific wind speed and also the maximum values of  $C_{tg}$ ,  $C_{igr}$  and  $C_{tgrl}$  can be expressed more clearly in Figure 6-8. In addition, the results and explanations presented for



Figure 5 can thus be clearer and more understandable. In Figure 6, it is seen that the maximum value of  $C_{tg}$  has decreased from approximately 0.418 to 0.380 as the wind speed increases from 8 m/s to 12 m/s. This situation arises in relation to the increase in the losses on the generator with the increasing operating speed. In addition, as mentioned before, a similar interpretation can be made for Figures 7 and 8. Investing from the end-point, it is understood from Figure 8 that the maximum value of and  $C_{tgrl}$  reduces from nearly 0.365 to 0.328 levels. On the other hand, maximum values of  $C_p$ ,  $C_{tg}$ ,  $C_{tgr}$  and  $C_{tgrl}$  coefficients in these characteristics for each specific wind speed are also listed in Table 3.

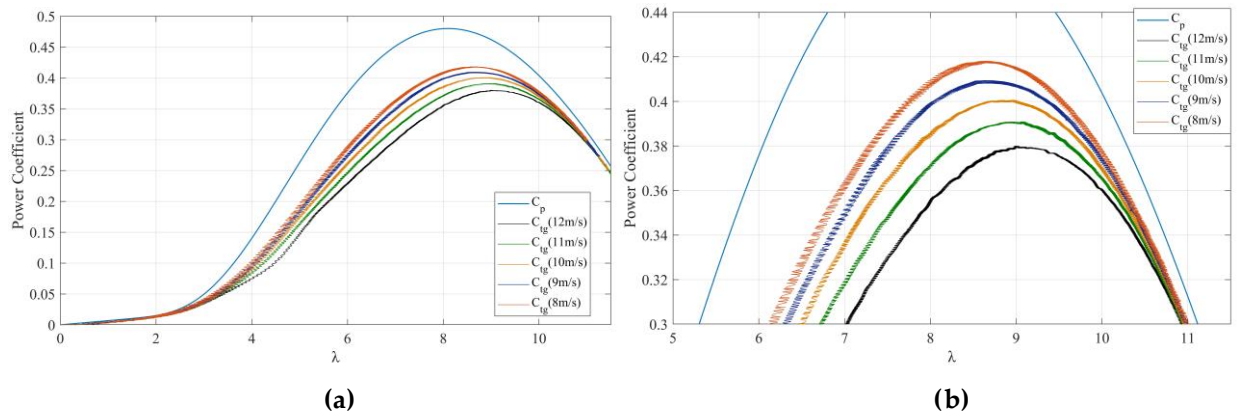


Figure 6. (a) Changes of  $C_{tg}$  vs.  $\lambda$  characteristics at different wind speeds. (b) zoomed results.

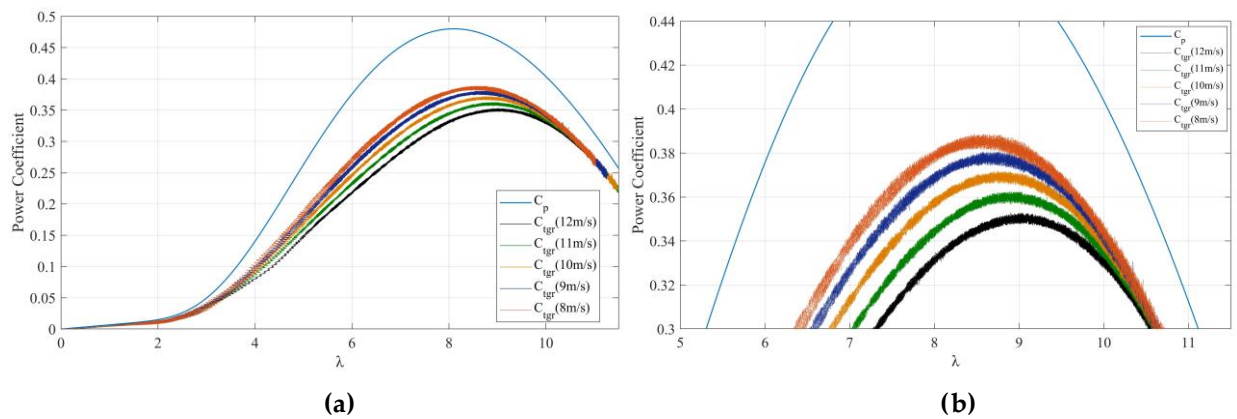


Figure 7. (a) Changes of  $C_{tgr}$  vs.  $\lambda$  characteristics at different wind speeds. (b) zoomed results.

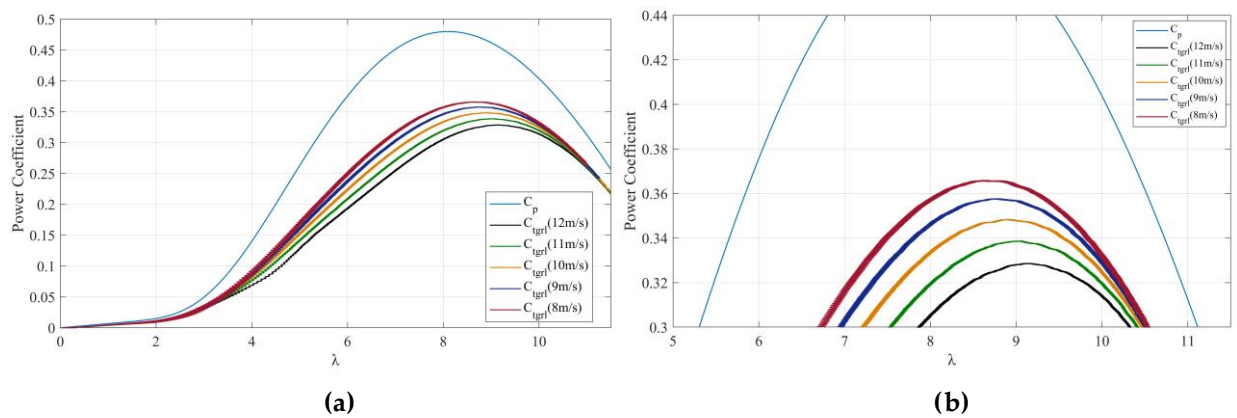


Figure 8. (a) Changes of  $C_{tgrl}$  vs.  $\lambda$  characteristics at different wind speeds. (b) zoomed results.

**Table 3.** Maximum values for  $C_p$ ,  $C_{tg}$ ,  $C_{tgr}$  and  $C_{tgrl}$ .

|              | $C_p$ | $C_{tg}$ | $C_{tgr}$ | $C_{tgrl}$ |
|--------------|-------|----------|-----------|------------|
| $v_w=8$ m/s  | 0.48  | 0.418    | 0.386     | 0.365      |
| $v_w=9$ m/s  | 0.48  | 0.409    | 0.377     | 0.357      |
| $v_w=10$ m/s | 0.48  | 0.400    | 0.368     | 0.348      |
| $v_w=11$ m/s | 0.48  | 0.391    | 0.360     | 0.338      |
| $v_w=12$ m/s | 0.48  | 0.380    | 0.353     | 0.328      |

#### 4. CONCLUSION

In this paper, MMPT and MEPT-based system operating concepts are performed to extract maximum power from a stand-alone PMSG-based WECS. While maximum mechanical power is obtained by the MMPT-based implementation, maximum electrical output power extraction is carried out by the MEPT-based one. Therefore, losses that occur in structural subsystems and electrical subunits in WECS are taken into account by the second methodology and the overall WECS can be optimally controlled. Moreover, for the specific wind speeds from 8 m/s to 12 m/s, characteristics of performance coefficients and the occurred changes have been presented. Technical and theoretical analyzes are also carried out with comparison. Herein, obtained results with the simulation validation are put forward in detail. Also,  $\lambda$ ,  $C_p$  and  $C_{tgrl}$  coefficients for MMPT and MEPT-based implementations are given both numerically and graphically. According to the obtained results, the maximum value of the  $C_{tgrl}$  coefficient decreases from approximately 0.356 to 0.309 with MMPT-based applications for this wind speed range. On the other hand, with the MEPT-based ones, the maximum value of the  $C_{tgrl}$  coefficient is nearly between 0.365 and 0.328. Therefore, it can be understood that WECS is operated with higher efficiency and higher power is extracted from the end-point with the MEPT implementation. The findings of this study indicate that losses or efficiency of each unit occurs changes on characteristics of the overall system. As a result, the performance characteristic that is viewed on the end-point is more different from the characteristic of  $C_p$  coefficient.

#### 5. REFERENCES

- Barakati, S. M., Kazerani, M., Aplevich, J. D., 2009, "Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No. 3, pp. 705-713, doi:10.1109/TEC.2008.2005316.
- Cheng, M., Zhu, Y., 2014, "The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review", Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 332-347, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.037.
- Chinmaya, K., Singh, G. K., 2018, "Performance evaluation of multiphase induction generator in stand-alone and grid-connected wind energy conversion system", IET Renewable Power Generation, Vol. 12, No. 7, pp. 823-831, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0791.
- Dursun, E. H., Koyuncu, H., Kulaksiz, A. A., 2020, "A novel unified maximum power extraction framework for PMSG based WECS using chaotic particle swarm optimization derivatives", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 24, No. 1, pp. 158-170, doi:10.1016/j.jestch.2020.05.005.
- Dursun, E. H., Kulaksiz, A. A., 2020a, "MPPT control of PMSG based small-scale wind energy conversion system connected to DC-bus", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 1-13, doi: 10.1515/ijeeps-2019-0188.
- Dursun, E. H., Kulaksiz, A. A., 2020b, "Second-order sliding mode voltage-regulator for improving MPPT efficiency of PMSG-based WECS", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 121, pp. 1-9, doi:10.1016/j.ijepes.2020.106149.

- Fathabadi, H., 2017, "Novel Maximum Electrical and Mechanical Power Tracking Controllers for Wind Energy Conversion Systems", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 5, No. 4, pp. 1739-1745, doi:10.1109/JESTPE.2017.2727978.
- Ganjefar, S., Ghassemi, A. A., Ahmadi, M. M., 2014, "Improving efficiency of two-type maximum power point tracking methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network", *Energy*, Vol. 67, pp. 444-453, doi:10.1016/j.energy.2014.02.023.
- GWEC, Global Wind Energy Council, 2022, "Global Wind Report 2022", Retrieved from <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf>.
- Hossain, M. M., Ali, M. H., 2015, "Future research directions for the wind turbine generator system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 481-489, doi:10.1016/j.rser.2015.04.126.
- Hussain, J., Mishra, M. K., 2016, "Adaptive maximum power point tracking control algorithm for wind energy conversion systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 31, No. 2, pp. 697-705, doi: 10.1109/TEC.2016.2520460.
- Kumar, D., Chatterjee, K., 2016, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 957-970, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.013.
- Kumar, M. B. H., Saravanan, B., Sanjeevikumar, P., Blaabjerg, F., 2018, "Review on control techniques and methodologies for maximum power extraction from wind energy systems", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 14, pp. 1609-1622, doi:10.1049/iet-rpg.2018.5206.
- Lee, J., Kim, Y., 2016, "Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 10, No. 2, pp. 194-202, doi:10.1049/iet-rpg.2015.0250.
- Melício, R., Mendes, V. M. F., Catalão, J. P. S., 2010, "Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation", *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 10, pp. 2165-2174, doi:10.1016/j.renene.2010.03.009.
- Mousa, H. H., Youssef, A.-R., Mohamed, E. E., 2021, "State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 126, pp.1-25, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106598.
- Nasiri, M., Milimonfared, J., Fathi, S., 2014, "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines", *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 892-900, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.055.
- Pao, L. Y., Johnson, K. E., 2011, "Control of wind turbines", *IEEE Control systems magazine*, Vol. 31, No. (2), pp. 44-62, doi: 10.1109/MCS.2010.939962.
- Pranupa S., Sriram A. T., Rao, S. N., 2022, "Wind energy conversion system using perturb & observe-based maximum power point approach interfaced with T-type three-level inverter connected to grid", *Clean Energy*, Vol. 6, No. 4, pp. 534-549, doi:10.1093/ce/zkac034.
- Singh, U., Rizwan, M., Malik, H., García Márquez, F. P., 2022, "Wind energy scenario, success and initiatives towards renewable energy in India – A review", *Energies*, Vol. 15, No. 6, pp. 1-39, doi: 10.3390/en15062291.
- Vijayakumar, K., Kumaresan, N., Ammasaigounden, N., 2015, "Speed sensor-less maximum power point tracking and constant output power operation of wind-driven wound rotor induction generators", *IET Power Electronics*, Vol. 8, No. 1, pp. 33-46, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0700.
- Yaakoubi, A. E., Amhaimar, L., Attari, K., Harrak, M. H., Halaoui, M. E., Asselman, A., 2019, "Non-linear and intelligent maximum power point tracking strategies for small size wind turbines: Performance analysis and comparison", *Energy Reports*, Vol. 5, pp. 545-554, doi: 10.1016/j.egy.2019.03.001.
- Yang, B., Jiang, L., Wang, L., Yao, W., Wu, Q. H., 2016, "Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 74, pp. 429-436, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.036.

- Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S., Narimani, M., 2015, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies" *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 5, pp. 740-788, May 2015, doi:10.1109/JPROC.2014.2378692.
- Yin, X., Jiang, Z., Pan, L., 2020, "Recurrent neural network based adaptive integral sliding mode power maximization control for wind power systems", *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 1149-1157, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.098.
- Youssef, A.-R., Ali, A. I. M., Saeed, M. S. R., Mohamed, E. E. M., 2019, "Advanced multi-sector P&O maximum power point tracking technique for wind energy conversion system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 107, pp. 89-97, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.034.



## SERAMİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE UYGULANAN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

<sup>1</sup>İsmail Aykut KARAMANLI , <sup>2</sup>Mustafa GÜNAY 

<sup>1</sup>Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun MYO, Motorlu Taşıt Teknolojileri Bölümü, Yozgat, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

<sup>1</sup>i.aykut.karamanli@yobu.edu.tr, <sup>2</sup>mgunay@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 22.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.09.2022)

**ÖZ:** Bu derleme çalışmada, seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan alışılmamış imalat yöntemlerinin detaylı analizi yapılarak elde edilen kazanımlar ve eksiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu yöntemler arasında, aşındırıcı jet ile işleme ve aşındırıcı su jeti ile işleme, ultrasonik işleme ve döner ultrasonik işleme, elektro erozyon ve tel erozyon ile işleme en çok kullanılanlardır. Aşındırıcı jet ve aşındırıcı su jeti ile işleme diğer yöntemlere göre bazı üstün özelliklere sahip olması nedeni ile tercih sebebidir. Kesme bölgesinde çok az miktarda ısı üretmesi, metal, metal olmayan, kompozit, seramik gibi her türlü malzemenin kesilip işlenebilmesi, tel erozyon ile işleme işleminden daha yüksek bir malzeme çıkarma oranı ve lazer ile işleme işleminden daha iyi yüzey bütünlüğü sağlaması bu özelliklerden birkaçıdır. Ultrasonik ve döner ultrasonik işleme yöntemiyle, özellikle sert ve kırılğan malzemelerin hassas olarak işlenebilmesi ile diğer yöntemlere göre üstündür. Elektro erozyon ve tel erozyon ile işleme yönteminin tercih edilmesinin nedenleri, elektrik iletken her parça işlenebilmesi ve çok karmaşık şekillerde işleme sağlanabilmesi, takım ile iş parçası arasında temas olmadığı için fiziksel deformasyonun az olması, ısıl işlemde etkilenmiş bölgenin az olması olarak sıralanabilir. Gelecekteki araştırmalarda, talaş kaldırma hızı, yüzey kalitesi, enerji tüketimi ve işleme maliyetlerini içeren çok amaçlı optimizasyon çalışmalarına odaklanılması yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik noktasında önemli katkılar sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Seramikler, Alışılmamış İmalat, Elektro Erozyonla İşleme, Abrasive Jet İşleme, Ultrasonik İşleme

### Unconventional Manufacturing Methods Applied in Machining of Ceramic Materials

**ABSTRACT:** In this review study, it is aimed to determine the gains and deficiencies obtained by making a detailed analysis of the unconventional manufacturing methods used in the machining of ceramics. The most used of these methods can be listed as abrasive jet machining and abrasive water jet machining, ultrasonic machining and rotary ultrasonic machining, electro erosion and wire erosion machining. Machining with abrasive jet and abrasive water jet is preferred with some superior features. Some of these features are that it generates very little heat in the cutting zone, can be cut and machined of all kinds of materials such as metal, non-metal, composite, ceramic, a higher material removal rate than wire erosion machining and better surface integrity than laser machining. With the ultrasonic and rotary ultrasonic processing method, it is superior to other methods, especially with the precision processing of hard and brittle materials. The reasons for choosing the electrical discharge machining and wire electrical discharge machining can be listed as the fact that every piece that conducts electricity can be processed, very complex shapes can be formed, physical deformation is less and the area affected by heat treatment is less since there is no contact between the tool and the workpiece. In future research, focusing on multi-purpose optimization studies including metal removal rate, surface quality and energy

consumption and machining costs will make significant contributions to high productivity and sustainability.

**Keywords:** *Ceramics, Unconventional Manufacturing, Electrical Discharge Machining, Abrasive Jet Machining, Ultrasonic Machining*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstriyel anlamda seramikler gevrek, sert, ısıya ve korozyona karşı dayanıklı, zor sıkıştırılabilir, erime sıcaklığı yüksek malzemelerdir. Seramiklerin basma mukavemetleri oldukça yüksek iken çekme mukavemetlerinden dolayı toklukları düşüktür. Özellikle erime sıcaklığının yüksek oluşu, ısıya ve korozyona karşı dayanım performansı ile imalat sanayinde tercih sebebidir (Okumuş, 2017). Gelişmiş seramikler, modern otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, enerji, çevre ve makine mühendisliğinde, elektronik ve tıbbi uygulamalarda çok ihtiyaç duyulan malzemeler arasında üst sıralarda yer almaktadır. Bunun nedeni, bu malzemelerin üstün kimyasal eylemsizlik, optik, elektriksel ve manyetik özellikler, korozyon ve oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda yüksek aşınma direnci ve sertlik gibi mekanik özellikler sergilemesidir (Gorin ve Reddy 2014). Kimyasal bileşime göre endüstriyel seramikler oksitler, karbürler, nitrürler, borürler, silikatlar ve cam seramikler olarak sınıflandırılır. Bunlardan, SiC, WC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, zımpara taşlarında aşındırıcı olarak kullanılır. Ateşe dayanıklı tuğlalarda şamot, alümina, zirkonya (ZrO<sub>2</sub>), magnezya (MgO) vb. kullanılmaktadır. Pota yapmak için ultra yüksek sıcaklık seramiği olan zirkonyum diborid (ZrB<sub>2</sub>) ve bor nitrür kullanılır. SiC ve silisyum nitrür yüksek aşınma direnci ve yük taşıma özelliklerine sahiptir, bu nedenle aşınmaya dayanıklı yüzeyler, yataklar, turbo şarj rotorları vb. yapımında kullanılır. Uranyum oksit nükleer reaktörlerde yakıt olarak kullanılır. TiC, uzay mekiği için ısı kalkanı olarak kullanılır. Motor ve türbin parçalarında sialon gibi yüksek performanslı seramikler kullanılmaktadır. Kurşun titanat (PT), baryum titanat (BT) ve kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi piezo elektrik seramiklerinin ultrasonik testler, gerinim ölçerler ve mikro elektromekanik sistemler (MEMs) cihazlarında geniş uygulamaları vardır. Ayrıca, seramikler, kesici takımlar ve kalıplar (Rakshit ve Das, 2019), uzay araçlarında yakıt sistemleri ve valfler, otomobil motoru, askeri silah sistemleri, nükleer endüstriler, biyolojik endüstriler, ısı eşanjörü ve mikrodalga cihazı için elektronik altyapı elemanlarının yapımında kabul görmektedir (Liang ve Dutta, 2001).

Seramiklerin yukarıda belirtilen iyi özelliklerinin yanı sıra yine bu özelliklerinden kaynaklanan kullanımını ve şekillendirilmesini zorlaştıran veya sınırlayan bazı etmenler mevcuttur. Yüksek sertlik ve kırılma direnci nedeniyle bu malzemeler kırılmaya karşı daha hassastır. Gevrek oluşu, şekillendirme ve işleme sırasında çatlama, kırılma ya da şekil bozuklukları oluşma riskini arttırmaktadır (Sayar 2017). Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile hasarsız kesme veya işlemler yapılamaz ve dolayısıyla bu malzemelerin mukavemetini azaltan yüzeyde mikro çatlaklar, parça kenarlarında ufalanma ile birlikte yüzey bütünlüğünde bozulmalara yol açar. Ayrıca geleneksel yöntemlerle yapılan işlemlerde kesici takımlar ve işleme aparatları zarar görebilmekte ve ekonomik ömrünü daha kısa sürelerde tamamlayabilmektedir (Rakshit ve Das, 2019). Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak veya azaltmak için çeşitli işleme ve imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel olmayan bu yöntemlerin tamamına alışılmamış imalat yöntemleri (UMM) denilmektedir. İmalatı yapılan malzeme türüne göre çok çeşitli UMM teknolojisi mevcuttur. Seramik malzemelerin talaşlı imalatında en sık kullanılan UMM yöntemleri; aşındırıcı jet ile işleme (AJM), aşındırıcı su jeti ile işleme (AWJM), elektrokimyasal işleme (ECM) (Chiles ve diğ., 1996), elektro erozyon ile işleme (EDM), ultrasonik işleme (UM), lazer ışını ile işleme (LBM) olarak sıralanabilir. Bu yöntemler dışında başka seramik işleme yöntemleri olduğu gibi birkaç yöntemin beraber kullanılmasıyla elde edilen hibrit yöntemler de mevcuttur (Samanta ve Chakraborty, 2011).

Seramiklerin işlenmesindeki bir başka konu ise işleme verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından en uygun yöntemin belirlenmesidir (Gupta ve Gupta 2019). En uygun işleme yöntemi, verime etki eden parametreler ve bunların etki oranlarının belirlenmesi, işlenebilirlik göstergelerinin tahmini için matematiksel modelleme üzerine araştırmalar yapılmaktadır (Parmar ve James, 2018). Bu çalışmalarda,

genellikle Taguchi metodolojisi (Pramanick ve diğ., 2016), yüzey yanıt yöntemi (RSM) gibi deney tasarımı ve analiz yöntemleri kullanılmaktadır (Liu ve diğ., 2014). Bu yöntemler aynı zamanda doğruya çok yakın sonuçlara, daha az deney ile ulaşılmasını sağlamaktadır. Böylece hem işleme zamanı hem de ekonomisi açıdan sağlanan tasarruf artmaktadır (Rao ve Kalyankar, 2014). Diğer yandan, alışılmamış imalat yöntemlerinde malzeme kaldırmanın karmaşık mekanizması nedeniyle bireysel parametrelerdeki küçük bir değişiklik işleme performansını karmaşık bir şekilde etkilediğinden, bu yöntemlerin çok değişkenli optimizasyon süreçleri ile iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir (Bilal ve diğ., 2018). Bu bağlamda, Taguchi-Gri (Chaudhury ve Samantaray, 2020) ilişki analizi, RSM (Mohammed ve diğ., 2019), parçacık sürüsü optimizasyonu (Aich ve diğ., 2014) vb. teknikler kullanılarak işlenebilirlik göstergelerinin eş zamanlı optimizasyonu üzerine bazı çalışmaların yapıldığı görülmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle daha önce yapılan çalışmalar detayları ile açıklanmış, amaçları ve elde edilen sonuçlar belirtilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çalışmalar arasındaki farklar belirlenmiş, UMM uygulamalarının eksik ve güçlü yönleri ifade edilmiştir. Çalışmanın temel amacı seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan UMM ve özelliklerinin tüm yönleri ile ifade edilebilmesi, böylece daha sonra yapılacak çalışmalara yardımcı olabilmektir. Çalışmanın sonunda önerilerde bulunulmuş, yeni araştırma konuları ve alanları tavsiye edilmiştir.

#### **SERAMİKLERİN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİYLE İŞLENMESİ (MACHINING CERAMICS WITH UNCONVENTIONAL MANUFACTURING METHODS)**

Seramikler ve seramik esaslı kompozitler devamlı geliştirilmekte olan mühendislik malzemeleridir. Özellikle endüstriyel açıdan gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde seramikler ve imalat yöntemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Seramiklerin geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesinde zorluklar UMM'lerin geliştirilmesine ve yeni işleme yaklaşımların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu bölümde, endüstriyel olarak yaygın kullanım alanına sahip alışılmamış imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

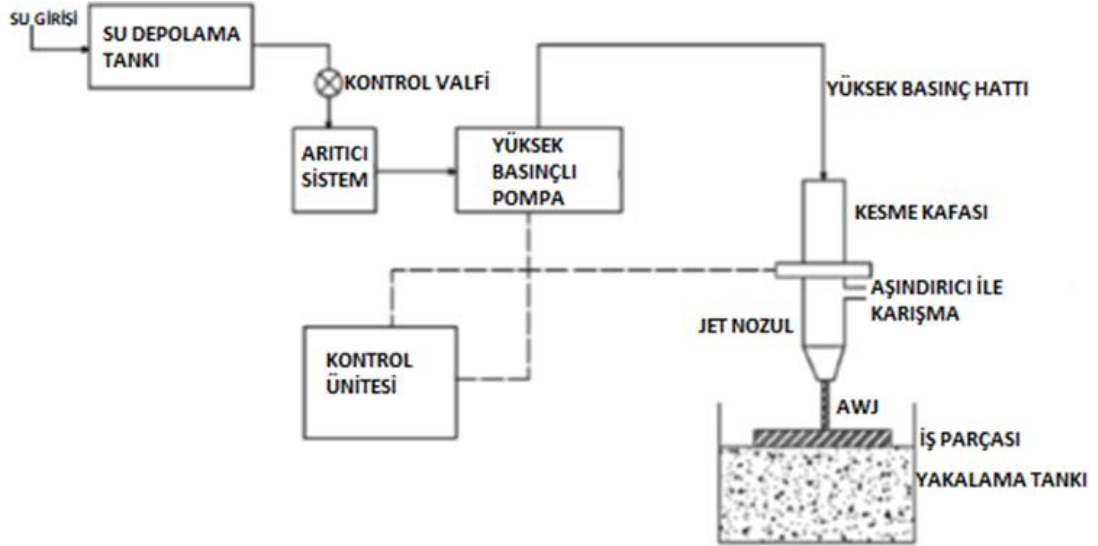
#### **Aşındırıcı Su Jeti ve Aşındırıcı Jet ile İşleme (Machining with Abrasive Water Jet and Abrasive Jet)**

Aşındırıcı su jeti (AWJ), imalat sanayilerinde metal ve metal olmayan birçok malzemelerin işlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. AWJ işleme yönteminin tercih edilmesinin nedenleri; kesme bölgesinde çok az miktarda ısı üretmesi, metal veya metal olmayan, kompozit, seramik gibi her türlü malzemenin kesilip işlenebilmesi, tel erozyon ile işleme (WEDM) yönteminden daha yüksek bir malzeme çıkarma oranı ve lazer ile işleme (LDM) yönteminden daha iyi yüzey bütünlüğü sağlama, 250 mm kalınlığa kadar malzemelerin kesilebilmesi, iş malzemelerinde ısıl bozulmanın olmaması olarak sıralanabilir. Bununla birlikte karmaşık geometrileri keserek şekillendirme yeteneği, iş parçası üzerinde minimum kesme kuvvetinin oluşması ve çok düşük deformasyonun olmasına bağlı olarak daha iyi boyutsal doğruluk sağlaması tercih nedenlerindedir (Natarajan ve diğ., 2020). Aşındırıcı su jeti sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de görülmektedir.

Bu yöntemde, yüksek basınçlı su ile karıştırılan aşındırıcı parçacıklar nozuldan iş parçasına doğru hareket eder. Karışımın kinetik enerjisi arttıkça iş parçasından çıkarılan malzeme miktarı da artar (Natarajan ve diğ., 2020). Aşındırıcı türü, işlenen malzemenin sertliğine göre değişmekle birlikte SiC (Shibin ve diğ., 2020), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Anjaneyulu ve diğ., 2019) gibi seramikler kullanılabilir. Aşındırıcı su jetinin kullanımının yaygınlaşmasından sonra, bu yönteme etki eden parametreler ve yöntemin verimini artırma yolları araştırılmıştır. Yeni bir teknoloji olan lazer destekli su jeti (LAWJ), kırılğan malzemelerin neredeyse hiç termal hasar bırakmadan mikro işlenmesini sağlar. Bu süreçte, lazer işleme yaparken su jeti anlık soğumayı sağlar. Lazerle yumuşatılan malzeme, su jeti ile kolayca ana parçadan ayrılabilir. Hibrit alışılmamış imalat yöntemi olarak değerlendirilebilecek bu teknoloji üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Liu ve diğ., aşındırıcı su jeti kullanılarak alüminyum seramiklerin tornalanmasında işleme parametrelerinin nüfuziyet derinliği ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Nüfuziyet derinliği ve Ra için işleme parametreleri, RSM ile eşzamanlı olarak optimize edilmiştir. Ayrıca, işleme çıktıları için ikinci dereceden regresyon modelleri geliştirilmiştir. Nüfuziyet derinliği için en önemli parametre ilerleme hızı iken, Ra için bu parametre kesme hızı olmuştur. Nüfuziyet derinliği ve Ra için optimum işleme parametrelerinde deneysel ve tahmini değerler arasındaki mutlak hata %5'in altında hesaplanmıştır. Böylece geliştirilen modelin alüminyum seramiklerinin AWJ ile tornalanmasında işleme çıktılarını tahmin etmek için etkin bir şekilde kullanılabilceği ortaya konulmuştur (Liu ve diğ., 2014).



Şekil 1. Aşındırıcı su jeti mekanizması (Natarajan ve diğ., 2020)

Figure 1. Abrasive water jet mechanism

Zhao ve diğ., nitrojen ve basınçlı hava destekli lazerli-su jeti (LWH) ile işlenmiş CBN/TiN ve CBN/AlN kompozitlerinde sertlik değişimini incelemişlerdir. Her iki malzemenin nitrojen gazı ile LWH işlemi sonucunda, mikro çatlakların oluşumu nedeniyle daha düşük mikro sertlik değerleri elde edilmiştir. Basınçlı hava ile yapılan deneylerde, LWH ile işlenmiş saf CBN'nin sertliği %23'e, %82 CBN-%18 AlN kompozitin sertliği %30 ve %55 CBN-%45 TiN kompozitin sertliğinin %21'e kadar yükseldiği belirlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan incelemeler, LWH uygulamasının kompozit mikroyapılarda, nano boyutlu tanelere sahip bölgelerin oluşumuyla tane sınırı güçlendirme mekanizmasına yol açtığını göstermiştir (Zhao ve diğ., 2017).

Kurşun zirkonat titanat (PZT) seramik ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit malzemeler aşınmaya karşı direnç, yüksek sertlik ve özgül mukavemet gibi özellikleriyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu iki malzemenin AWJ yöntemi ile işlenmesinde, işlenmiş yüzeylerde yüzey kalitesinin karşılaştırılması çok az çalışılmıştır. Bir çalışmada, PZT seramiği ile CFRP kompozit malzemesinin AWJ ile işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülükleri karşılaştırılmıştır. Varyans analizi sonuçlarına göre PZT seramiğin işlenmesinde su basıncı, nozul-iş parçası arasındaki mesafe ve ilerleme hızının ve CFRP kompozit malzemenin işlenmesinde su basıncı ve dönüş hızının önemli parametreler olduğu görülmüştür. Seramik malzemenin işlenmesinde su basıncının artması ve durma mesafesinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı gözlemlenmiştir. Kompozit malzemede ise su basıncının artması ve hareket hızının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, seramik ve kompozit malzemelerin işlenmiş yüzeyleri, SEM cihazı kullanılarak incelenmiş ve yüzey pürüzlülüğünün üç farklı bölge oluşturduğu gözlemlenmiştir (Dhanawade ve diğ., 2021).

Wang ve diğ. lazer destekli su jeti (LAWJ) ile silisyum nitrür seramiklerin mikro frezelenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kanal derinliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde çapraz besleme, lazer darbe enerjisi, su jeti basıncı ve hareket hızı gibi ana parametrelerin etkileri varyans analizi



(ANOVA) aracılığıyla analiz edilmiştir. Analizler, derinlik ve Ra üzerinde tüm parametrelerin tekli etkilerinin ve lazer darbe enerjisi-su jeti basıncı etkileşimin önemli olduğunu göstermiştir. SEM ve enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) sonucunda, LAWJ'nin saf lazer ile işlemeye göre daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü ve termal değişimden minimum etkilenme alanı sağladığı belirlenmiştir (Wang ve diğ., 2018c).

Aşındırıcı jet işlemede (AJM) ise aşındırıcı su jeti ile işlemekten farklı olarak aşındırıcı parçacık taşıyıcı akışkan olarak su yerine hava kullanılmaktadır. Hava ile kinetik enerji kazanan parçacıklar, iş parçasının yüzeyine çarparak malzeme koparmaktadır (Natarajan ve diğ., 2020). Yine aşındırıcı su jetinde olduğu gibi sistemin verimini arttırmak ve süreci etkileyen parametreleri ve etki oranlarını hesaplamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Srikantha ve Rao, seramik fayansların aşındırıcı jet ile işlenmesinde Taguchi yöntemi ve RSM kullanarak işleme parametrelerini optimize etmişlerdir. Aşındırıcı olarak farklı boyutlarda  $Al_2O_3$  ve SiC kullanılmış olup, aşındırıcı akış oranı (AFR), basınç ve nozul uzaklığının malzeme kaldırma miktarı (MRR) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. RSM sonuçlarına göre optimum malzeme kaldırma oranı 8 kg/cm<sup>2</sup> basınç, 5.5 gm/min aşındırıcı akış oranı, 20 mm nozul uzaklığı ile elde edilmektedir. Ayrıca, işleme parametreleri önem sıralamasının basınç, nozul uzaklığı ve aşındırıcı akış oranı şeklinde olduğu belirtilmiştir (Srikanth ve Rao, 2015).

Aşındırıcı su jeti (AWJ) frezeleme, sert malzemeleri işlemek için uygun bir tekniktir, ancak uygulanması da karmaşıktır. Modern üretimde hem performansı hem de kaliteyi iyileştirmek için çok aşamalı işleme kullanılabilir. Fakat AWJ frezeleme hala gelişmekte olan bir yöntem olduğundan AWJ ile işleme süreç tasarımı hakkında çok az bilgi vardır. Schuler ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, itriyum ile stabilize edilmiş zirkonya (3YSZ) numunenin AWJ çok aşamalı işlenmesi için yenilikçi bir yaklaşım getirilmek istenmiştir. 3YSZ numunenin işlenmesinde aşındırıcı malzeme olarak  $Al_2O_3$  kullanılmış olup, çok aşamalı işlemenin yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, farklı taneciklerin işleme sonucu üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Daha sonra  $Na_2CO_3$  (sodyum bikarbonat) ile yüzey özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğünde iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca  $Na_2CO_3$  uygulaması ile yüzeydeki kontaminasyonlar giderilmiştir (Schuler ve diğ., 2022).

Chaitanya ve diğ.,  $Al_2O_3$ , SiC gibi aşındırıcı parçacıklar ile orta karbonlu çelik malzeme üzerinde AJM uygulamasında yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Aşındırıcı jet ile işlemekte, alüminyum oksit, normal sertlikte malzemelerde kesme, çapak alma ve yüzey temizleme işlemleri için uygun iken silisyum karbür ise sert malzemelerde kesme, çapak alma, yüzey temizleme işlemleri için elverişli olduğu bildirilmiştir. Sodyum bikarbonat ise yumuşak malzemelerin kesme, çapak alma ve yüzey temizleme işlemlerinde ve ayrıca 500 °C'nin altında hafif son işlemler için kullanılmıştır. Cam tanecikleri işlenen kısımların matlaştırılmasında ve dolomit ise dağlama ve parlatma işlemlerinde kullanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak alüminyum oksitin silisyum karbürüne göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığı bulunmuştur (Chaitanya ve diğ., 2020).

Cf/SiC kompozitlerin geleneksel yöntemlerle delinmesi zor olup, işlem sırasında katmanlara ayrılma, fiberlerde kırık oluşumu, çapaklanma ve ufalanma gibi hasarlar oluşabilmektedir. Bu hasarların en aza indirilmesi için AWJ yöntemi tercih edilebilmektedir. Bu bağlamda, Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada kompozit plakanın delinmesinde oluşan hasarların özellikleri ve oluşum mekanizmaları araştırılmıştır. Kompozit plaka üzerine ilerleme hızı, aşındırıcı akış oranı, su basıncı ve su jeti nozulu mesafesi değiştirilerek delikler delinmiştir. Ölçümler sonucunda, delik çaplarının bu değişkenlere bağlı olarak 2.1 mm ile 2.6 mm arasında değiştiği belirlenmiştir. Hasar oluşum mekanizmaları için bir matematiksel model geliştirilmiş olup, seramik matrisli kompozit malzeme için yüksek hassasiyetli ve düşük hasarlı delik işleminin gerçekleştirilmesinde rehberlik edebileceği vurgulanmıştır (Zhang ve diğ., 2022c).

Anjaneyulu ve diğ.  $Al_2O_3$  levhaların aşındırıcı jet ile işlenmesinde basınç, AFR, nozul uzaklığı ve zaman parametrelerine göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü değişimlerini incelemiştir. Taguchi L27 dikey dizine göre yapılan deneylerde aşındırıcı malzeme olarak silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) kullanılmıştır. %95

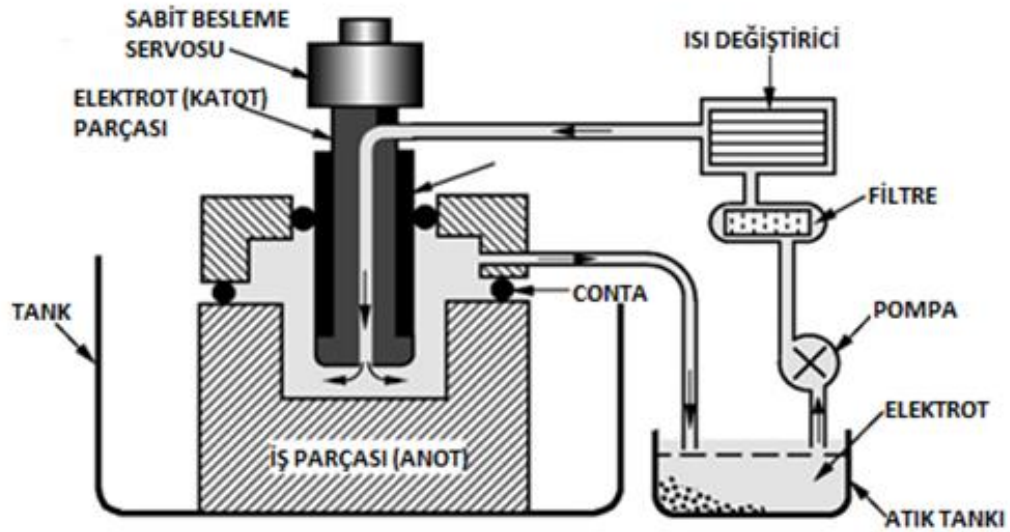
güven düzeyinde uygulanan ANOVA sonuçlarına göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü için en önemli değişken, basınç olarak bulunmuştur. İkinci önemli değişken MRR için AFR olurken, yüzey pürüzlülüğü için ise nozul uzaklığıdır. Diğer yandan, MRR ve yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametrelerinin farklı olduğu ortaya çıkmıştır (Anjaneyulu ve diğ., 2019).

Liu ve diğ., seramikler işlenmesinde tek noktalı elmas tornalama yöntemi kullanılabilir de bu yöntemin hem çok maliyetli hem de malzeme kaldırma hızının çok düşük olduğunu belirtmiştir. Diğer yandan, AWJ ile tornalama işleminde takım aşınması ile işleme süresi azalmakta ve AWJ ekipmanları kolay bir biçimde torna tezgahlarına entegre edilebilmektedir. Deney malzemesi olarak soğuk izostatik presleme ile üretilen halka şeklindeki  $Al_2O_3$  silindirik parçaların kullanıldığı çalışmada, nozul açısı, aşındırıcı oranı, pompa basıncı, yüzey hızı, işleme mesafesi, dönme hızı değiştirilerek deneyler yapılmıştır. AWJ tornalamada talaş kaldırma mekanizması analiz edilmiş ve elde edilen verilerle dalma derinliği (DOP) tahmin modeli oluşturulmuştur. İşlenen yüzeylerin topografya analizleri, asıl talaş kaldırma mekanizmasının düşük nozul açısında plastik kesme, büyük açılarda gevrek kırılma şeklinde olduğunu göstermiştir. AWJ tornalama teknolojisinin özellikle havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan seramik matrisli kompozitlerin işlenmesi için uygun bir yöntem olabileceği belirtilmiştir (Liu ve diğ., 2021).

### **Elektrokimyasal İşleme (Electrochemical Machining)**

Elektrokimyasal işleme yöntemi tüm elektrik iletken iş parçaları için kullanılabilir. Bu yöntem, elektrik akımı ile malzeme kaldırma prensibi ile çalışır. İş parçası anot görevi görürken, akım ile iş parçasından ayrılan metal iyonları katotta birikir. İşleme aralığında elektrolit sıvı uygulanarak katotta metal birikimi engellenir (Swift ve Booker, 2013). Elektrokimyasal işleme yöntemi seramik ve seramik matrisli kompozitlerin işlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Hinduja ve Kunieda, elektro-kimyasal işleme (ECM) ve elektro erozyonla işleme (EDM) yöntemlerinin modellenmesi, işleme sırasında ortaya çıkan farklı olguları simüle etmek için geliştirilen modelleri araştırmışlardır. ECM'deki akım yoğunluk dağılımını hesaplamak için potansiyel modeller, EDM'deki plazma arki için termal modeller, ECM'deki anodik çözünmeyi simüle etmek için hareketli sınır modelleri ve EDM'deki deşarj bölgesini belirlemek için olasılık modelleri geliştirilmiştir. ECM'nin temel prensipleri iyi bilinmesine rağmen süreci modellemek zordur, çünkü bazıları eşzamanlı olarak ortaya çıkan birkaç fiziksel ve kimyasal olay vardır. Bu olaylar kısaca açıklanacak olursa, anot ve katotta meydana gelen kimyasal reaksiyonlar iyonların, oksijenin ve hidrojenin elektrotlardan ve elektrolitten salınmasına neden olur. Diğer yandan, anot ve katottaki kimyasal reaksiyonlar, katotta hidrojen kabarcıklarının ve anotta oksijen kabarcıklarının salınmasına yol açar. Bu kabarcıkların varlığı elektrolit akışının iki fazlı olmasına sebep olur. Bu kabarcıklar elektrolitin iletkenliğini etkiler, böylece sürecin karmaşıklığı artar. Elektro-kimyasal reaksiyonlar, ısı üretilmesine neden olarak elektrolit sıcaklığının artmasına ve elektrolitin elektrik iletkenliğinde daha fazla değişikliğe yol açar. Ayrıca bu reaksiyonlar, iş parçasının çözünmesine neden olarak şeklinin zamanla değişmesine neden olur. İş parçasındaki bu geçici değişiklik, yavaş hareket eden bir sınır problemi olarak modellenmektedir (Hinduja ve Kunieda 2013). Şekil 2'de elektrokimyasal işleme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrokimyasal işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 2. Electrochemical machining mechanism

Saravanan ve diğ., TiC takviyeli AA6603 matrisli kompozitin ECM ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü değişimini araştırmışlardır. RSM metodolojisi uygulanarak, yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerinde takviye oranı, voltaj miktarı ve elektrolit konsantrasyon yüzdesinin etkileri analiz edilmiştir. ANOVA ve RSM analizlerine göre, yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametre takviye oranıdır. En iyi yüzey kalitesi ağırlıkça %6 takviye oranı, 13.31 V voltaj ve 34.05 g/litre elektrolit konsantrasyonu ile elde edilmiştir. Regresyon analizinde, deneysel ve öngörülen değerler arasındaki ortalama hata 0.23 mm<sup>3</sup>/min olarak hesaplanmış olup, geliştirilen Ra tahmin modelinin güvenle kullanılabileceği vurgulanmıştır (Saravanan ve diğ., 2020).

Miyoshi ve Kunieda, ECM teknolojisinin farklı bir uygulaması olan elektrolit jet tormalama sistemini tungsten karbür mikro çubukların işlenmesi için geliştirmişlerdir. Düz elektrolit jet, jetin iş parçası çubuğuna göre kolay konumlandırılmasını ve silindirik jetlerden daha fazla malzeme çıkarılmasını mümkün kılmıştır. İki kutuplu bir akım darbesi kullanılarak hem kobalt bağlayıcı hem de tungsten karbür eşit olarak çözülmüştür. Ayrıca, en uygun darbe koşullarını elde etmek için darbe koşullarının mevcut verimlilik ve işleme hassasiyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İnce taneli tungsten karbür çubuklarda daha fazla malzeme çıkarma miktarı ve daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Pozitif iş parçası polariteli uzun darbe süresi,  $t_a = 10$  ms ve yüksek görev faktörü,  $D = \%50$  ile işlenen çubuktan çapı 20  $\mu$ m ve en boy oranı 20 olan bir mikro çubuk başarıyla çıkarılmıştır (Miyoshi ve Kunieda, 2016).

Daniel ve diğ., Al5059/SiC/MoS<sub>2</sub> kompozitlerin ECM parametrelerini malzeme çıkarma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü için Taguchi yöntemini kullanarak optimize etmişlerdir. Ayrıca, gerilim, besleme hızı, elektrolit konsantrasyonu ve takviye yüzdesi gibi çeşitli işleme parametrelerinin işleme çıktıları üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlara göre MRR ve yüzey pürüzlülüğü için en iyi parametre seviyelerinin birbirinden farklı olduğu görülmüştür. (Daniel ve diğ., 2020).

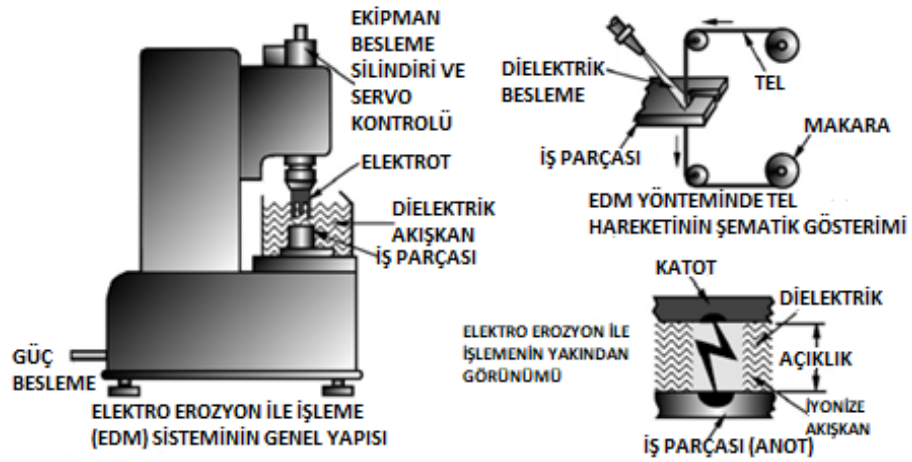
Kozak ve Zybura-Skrabalak, ECM yönteminde iş parçası malzemesinin heterojen yapısının etkisi ve anot sınır tabakasının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki hidrodinamik kararsızlığı gibi bazı özellikleri incelemişlerdir. Heterojen yapıya sahip alaşımların elektrokimyasal işlenmesi sırasında yüzey profillerinin değişimini simüle etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Simülasyonlar ile ECM parametreleri ve iş parçası malzeme yapısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin analizi yapılmıştır. Deneysel araştırmalar, sınır tabakasının hidrodinamik kararsızlığının işlenen yüzeyin mikro topografyası üzerindeki etkisini doğrulamıştır (Kozak ve Zybura-Skrabalak, 2016).

Goto ve diğ., sinterlenmiş karbürün ECM ile işlenmesinde en büyük sorunlardan birinin malzemede bağlayıcı etki yapan Co ayrılması olduğu ve çok fazla Co çözünmesi meydana geldiğinde, malzemenin mukavemetinin düştüğünü belirtmişlerdir. Bu bağlamda, araştırmacılar, WC'nin ECM ile işlenmesinde

Co ayrılmasının önlenmesi için yöntemler geliştirmeye çalışmışlardır. WC, elektrolit (NaCl sulu solüsyon) içine daldırıldığında, Co seçici olarak ayrıştırılmıştır. Daldırma testinde, elektrolite  $CoCl_2$  eklendiğinde ve  $Co^{+2}$  iyonunun konsantrasyonu artırıldığında, sinterlenmiş karbürdeki Co'un ayrışması önlenmiştir. Sinterlenmiş karbür, iki kutuplu darbe güç kaynağı kullanılarak NaCl sulu çözelti elektroliti ile işlendiğinde Co aşırı derecede ayrılmış, ancak NaCl+ $CoCl_2$  sulu çözelti elektroliti ile işlendiğinde Co ayrışması olmamıştır. Ayrıca, güç kaynağının frekansı ile işleme performansı arasındaki ilişki de araştırılmış ve frekans arttıkça işleme hızının düştüğü tespit edilmiştir (Goto ve diğ., 2016).

### Elektro Erozyon ile İşleme (Electrical Discharge Machining Machining)

Elektro erozyon ile işleme (EDM), temel olarak elektrik kuvveti ile iyonlaşan metal atomlarının anoda doğru hareket etmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin tercih sebepleri, elektrik iletken her parçanın işlenebilmesi ve çok karmaşık geometrilerin oluşturulabilmesi, takım-iş parçası arasında temas olmadığı için fiziksel deformasyonun az olması, ısıl işleminden etkilenmiş bölgenin az olması şeklinde sıralanabilir. Ayrıca daha az miktarda bitirme işlemine ihtiyaç duyulur. Fakat işleme hızı düşük ve ilk yatırım maliyeti fazladır (Swift ve Booker, 2013). Şekil 3'te bir elektro erozyon mekanizması gösterilmiştir. Tel erozyon ile işlemede ise tel takım (elektrot) olarak çalışmaktadır (Hanzel ve diğ., 2019). Elektro erozyon ile işlemenin başka bir uygulaması olan bu teknik, elektrik enerjisini kullanarak iki boyutlu kesme işlemleri için kullanılmaktadır. Yaygın kullanılan seramik malzemelerin EDM teknolojisiyle işlenmesi üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 3. Elektro erozyon işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 3. Electrical discharge machining mechanism

Jahan ve diğ. tarafından yapılan derleme çalışmada, EDM ve mikro-EDM yöntemleri tanıtılmış ve WC'nin işlenmesindeki performansları değerlendirilmiştir. Buna göre mikro-EDM'nin işleme hızı 0.005–0.006 mm<sup>3</sup>/min iken, EDM'de bu değer 0.4 mm<sup>3</sup>/min'dir. Bu rakamlar, mikro-EDM'nin işleme hızının EDM'ye göre çok düşük olduğunu göstermektedir. Mikro-EDM'nin yaygın bir sorunu, özellikle WC'de delik veya boşluk derinleştiğinde, dielektrik sirkülasyonu ve işlenmiş döküntülerin çıkarılmasının çok zor olmasıdır. WC'nin EDM veya mikro-EDM'sinin bir başka dezavantajı, işlemeden sonra nispeten daha zayıf ve kusurlu yüzeydir. Bu yöntemlerde karşılaşılan ortak sorunlardan birisi WC'nin erime noktasının çok yüksek oluşundan dolayı aşırı takım aşınmasıdır. Tungsten karbürün mikro-EDM'sinde karşılaşılan çeşitli eksikliklerin üstesinden gelmek için daha yeni hibrit mikro işleme teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir (Jahan ve diğ., 2011).

Rona ve diğ., zirkonya seramiğine uygulanan EDM işleminin, reçine ve zirkonya seramiği arasındaki bağın kayma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, üç noktalı eğilme testi ile zirkonya seramiğin eğilme dayanımını incelemişlerdir. Bu amaçla, 4.8x4.8x3.2 mm boyutlarında

zirkonya seramiği imal edilmiş ve 4 farklı ikincil işleme (kumlanmış+silan, tribokimyasal silika kaplı+silan, YAG lazer ile işlenmiş+silan, EDM+silan) tabii tutularak eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, 4 test grubu içinde en yüksek bağlanma kuvvetleri EDM+silan numunede elde edilmiştir. En yüksek eğilme mukavemeti kumlanmış+silan uygulanan numunede elde edilmesine rağmen, EDM'nin zirkonya eğilme mukavemeti üzerinde önemli bir olumsuz etkisinin olmadığı belirtilmiştir (Rona ve diğ., 2017).

Parihar ve diğ., WC'nin tel erozyon ile işlenmesinde oluşan yüzey bütünlüğünü SEM ve EDS analizleriyle incelemişlerdir. WEDM işlenmiş numunenin SEM görüntüsü açıkça yüzey hasarını göstermiştir, ancak kıvılcım plazma sinterleme uygulanarak hazırlanan Co bağlayıcılı WC'nin mikro yapısı EDM işleme parametrelerinden etkilenmemiştir. Ayrıca, hasar görmüş katmanın iç yapısının, işlenmiş yüzeye kıyasla daha az WC taneciklerine sahip olduğu gözlenmiştir. Gözlenen hasarlı yüzey kalınlığı çok küçüktür ve parlatma işleminden sonra tamamen ortadan kaldırılabilir. Bu nedenle, WEDM'nin kıvılcım plazma sinterleme ile üretilen WC'nin işlenmesi için etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Parihar ve diğ., 2018).

Gommeringer ve diğ., NbC içeren itriyum neodymi ile stabilize edilmiş zirkonya malzemenin EDM performansını araştırmışlardır. EDM deneylerinde, baskın malzeme çıkarma mekanizmasının ergime olduğu görülmüştür. 1,5 mm<sup>3</sup>/min'lik malzeme kaldırma oranları ile işlenmiş yüzeylerde düşük yüzey pürüzlülüğüne (Ra = 0,3 µm), ulaşılabilmektedir. Orta düzeyde enerji girdisi sağlayan işleme koşulları, yeterli işleme hızına, düşük yüzey pürüzlülüğüne ve işleme sürecinden etkilenen çok ince bölgelere sahip neredeyse hatasız yüzeylere yol açmıştır. Ancak, EDM'de aşırı yüksek enerji parametrelerinin seçimi yeniden katılaştırma sırasında çatlak oluşumuna, parçalanma ve faz birikmesine yol açabilmektedir (Gommeringer ve diğ., 2020).

Bhadoria ve diğ., derleme çalışmalarında tungsten karbür ve kompozitinin (WC-Co) EDM ile işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu malzemeler, kalıp ve kesme endüstrileri için kullanılmakta olup, petrol, enerji, madencilik ve sağlık endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte, sadece sert değil aynı zamanda kırılğan olan bu malzemeleri geleneksel tekniklerle işlemek zordur. Araştırmacılar, sert malzemeyi EDM teknikleri ile işlemek için çeşitli yaklaşımlar (DEDM, WEDM, µ-EDM, PMEDM) geliştirdiğini ve bu uygulamalarda işleme parametrelerinin WC malzeme üzerindeki etkilerinin analiz edildiği belirtmişlerdir. Metalik bağlayıcısız nano-yapılı WC'nin EDM ile işlenebilirliğinin araştırılabileceğini önermişlerdir (Bhadoria ve diğ., 2018).

Biyoseramik hidroksiapatit (HA) kaplamalı titanyum, mükemmel mekanik özellikleri ve yüksek osteo iletkenliği nedeniyle biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak elektrokimyasal biriktirme (ED) ile hazırlanan Ti/HA'nın ara yüzey kuvveti nispeten düşüktür. Bu da mekanik özelliklerde istenilen kalitenin yakalanamamasına neden olmaktadır. Ju ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, ara yüzey mukavemetini geliştirmek için kalsiyumlu bir mikro ark oksidasyonu (MAO) işleminden yararlanılmıştır. Darbeli ED, ağırlıkça %6 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeren bir elektrolit kullanarak MAO yüzeyi üzerindeki HA kaplamasını sentezlemek için kullanılmıştır. Örnekler, MAO kaplamanın Ca veya CaTiO<sub>3</sub> ile gözenekli TiO<sub>2</sub> (rutil ve anataz) içerdiğini ortaya çıkarmıştır. CaTiO<sub>3</sub> oluşumu, voltaja ek olarak akım yoğunluğuna, reaksiyon süresine ve Ca<sup>+2</sup> konsantrasyonuna bağlıdır. MAO kaplamaları, Ti içerenlerden daha yüksek bir korozyon direnci sergilemiştir. Nihai numunenin yapısı Ti/TiO<sub>2</sub>(Ca)/HA şeklindedir ve yapışkan gücü Ti/HA numunesinin yaklaşık iki katıdır. Özellikle, yüksek bir Ca<sup>+2</sup> konsantrasyonunda sentezlenen MAO kaplaması, geliştirilmiş bir yapışma mukavemeti (2.326 MPa) sergilemiştir. Bir bağlantı ara tabakası olarak Ca içeren MAO kaplamanın, HA yapışma mukavemetini geliştirmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Ju ve diğ., 2022).

Zhou ve diğ., WEDM ile üretilen düzenli ve kontrol edilebilir mikro-kanallı yapıya sahip Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> malzeme yüzeylerini analiz etmişlerdir. SEM ve EDS kullanılarak paralel ve dik temas açıları, mikro-kanallı yapıların derinlik-genişlik oranı ve yüzey dokusunun pürüzlülüğü arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, dokulu Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> yüzeyi üzerindeki paralel temas açısının, pürüzsüz yüzeydekine kıyasla yaklaşık %164 arttığını ve anizotropisi olan süperhidrofobik yüzeyin kabaca elde edildiğini göstermiştir. Deneysel paralel temas açıları, Cassie-Baxter formülü ile hesaplanan teorik temas

açlarına çok yakın sonuçlar vermiştir. Derinlik-genişlik oranının, %2.4'lük ortalama hatayla paralel temas açısını tahmin etmek için kullanılabilceği doğrulanmıştır. Dikey temas açılarının derinlik-genişlik oranı ve yüzey pürüzlülüğü ile iyi bir korelasyonu olduğu belirtilmiştir (Zhou ve diğ., 2018).

Selvarajan ve diğ., Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN ve Ni-Titanyum alaşımlarının EDM karakteristikleri, mikro yapıları ve sertlik değişimleri üzerine yapılan çalışmaları değerlendirmişlerdir. Numune olarak yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik türbin kanatları kullanılmıştır. Buna göre, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN iletken seramik kompozitin elektrik direncinin yüksek oluşunun, metal alaşımlara kıyasla elektriksel deşarj işlemede büyük bir dezavantaj olduğunu, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, voltaj ve akım gibi giriş parametrelerinin önemli olduğu görülmüştür. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-TiN iletken seramik kompozitin, türbin kanadı boyunca mekanik güç iletimli bileşenler için Ni-Titanyum alaşımlarından daha iyi olduğu bulunmuştur (Selvarajan ve diğ., 2020).

Zirkonyum diborid (ZrB<sub>2</sub>), çok yüksek erime noktası, yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, iyi termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerin kombinasyonu nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel bir seramiktir. Kullanıma en yakın şekiller üretim sırasında elde edilmeye çalışılsa da gerekli durumlarda işleme de gerekebilmektedir. Shanbhog ve diğ., ZrB<sub>2</sub> iş parçasının WEDM ile kesilebilirliğini araştırmışlardır. İşlemden sonra işlenen bölge enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Raman spektroskopisi ile eriyik katılaşmış tabakayı ve yeniden kristalize bölgeyi incelemek için kullanılmıştır. Eriyik katılaşmış tabakada mikro çatlaklar ve gözenekler ve çekirdeklenme gözlenmiştir. Gözlemler neticesinde, eriyik katılaşmış tabakanın altında, kütlelerin geri kalanına kıyasla azalan gözeneklilik ile yeniden kristalize edilmiş bir ince tane yapısı gözlenmiştir. Artan deşarj akımıyla birlikte MRR, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının arttığı belirlenmiştir. Ancak, darbe süresi arttığında yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve MRR artarken takım aşınmasının azaldığı görülmüştür (Shanbhog ve diğ., 2022).

Al-MMC'ler, yüksek mukavemet, sertlik ve termal özellikleri sayesinde çeşitli mühendislik uygulamaları için kullanılır. Praveen ve diğ., seramik takviyeli Al metal matrisli kompozitlerin (Al-MMC) tel erozyonla işleme üzerine yapılan çalışmaları incelemiştir. Bu derleme çalışmada, çeşitli takviyeli MMC'lerin malzemelerin WEDM sürecinin detaylı analizi ve işleme parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Araştırma makalelerinin çoğunda, sadece elektriksel parametrelere vurgu yapılmış, ancak elektriksel olmayan parametrelerin de işleme özelliklerini etkilediği ifade edilmiştir (Praveen ve diğ., 2020).

Prasanna ve diğ., AA7075-SiC kompozitlerin EDM yöntemiyle işlenmesinde parametrelerin MRR, takım aşınma hızı (TWR) ve Ra üzerindeki etkileri optimize edilmeye çalışılmıştır. Akım, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi ve voltaj değiştirilerek kerosene dielektrik sıvı ortamında Taguchi deney tasarımı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Boşalım akımı arttığında, MRR'nin arttığı ancak yüzey kalitesinde ciddi bir kötüleşme olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, AA7075-SiC kompozitlerin yüksek akımda işlenmesinde takım aşınma oranı artmıştır. Optimum parametreler, 12 A akım, 15 µs vuruş süresi, 1 µs vuruş bekleme süresi ve 35 V olarak belirlenmiştir. Deneyler sonrasında yapılan duyarlılık analizi akımın en etkili faktör olduğuna işaret etmiştir (Prasanna ve diğ., 2017).

Garg ve Sharma, ZrSiO<sub>4</sub>/6063 Al esaslı kompozitin WEDM ile işlenmesinde vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, gerilim ve akım parametrelerinin boyutsal sapma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneyler, RSM esaslı Box-Behnken deney tasarımı uygulanarak pirinç tel ile deiyonize su ortamında yapılmıştır. Vuruş süresi ve akım arttıkça boyutsal sapmanın arttığı, vuruş bekleme süresi ve servo voltajın ise boyutsal sapma üzerinde anlamlı bir etkisinin gözlenmediği bulunmuştur. Yüksek akımın, tel elektrotu gerekli yoldan saptıran tel üzerinde daha büyük itme kuvvetlerine ve basınç dalgasına yol açan boşalım enerjisini artırdığı ve böylece boyutsal sapmanın arttığı vurgulanmıştır. Optimum boyutsal sapma, 112 µs vuruş süresi, 59 µs vuruş bekleme süresi, 120 A akım ve 50 V servo voltajı kullanıldığında elde edilmiştir (Garg ve Sharma, 2017).

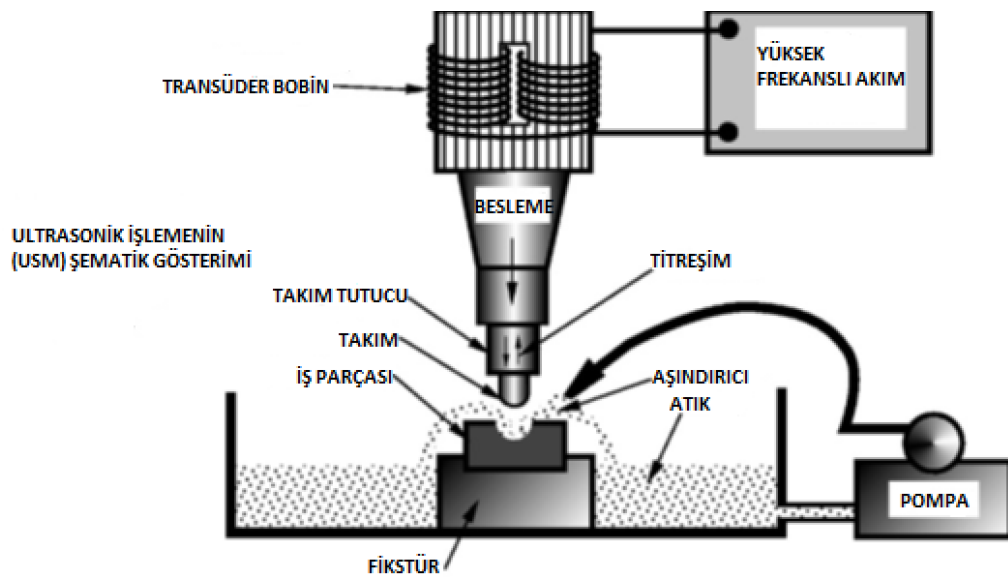
EDM, elektriksel deşarjların neden olduğu termal yükler, yüzeyde ve yüzey altı katmanlarında farklı değişikliklere neden olur. Isıdan etkilenen bölge (HAZ) içinde meydana gelen hasarların daha detaylı anlaşılması için bir alümina/zirkonya/tungsten karbür seramik üzerinde tek bir deşarj için bir ısı

transferi simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca, iş parçası malzemesindeki farklı mevcut fazların sıcaklık alanı üzerindeki etkisi de dikkate alınmıştır. Bu amaçla iki farklı simülasyon modelinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. İlk adımda, homojenleştirilmiş bir malzeme modeli ile tek bir deşarj simüle edilmiştir. Böylece yeni oluşturulan yüzeyde malzeme kaldırma ve oluşan ısı akısı belirlenmiştir. 2 boyutlu simülasyondan alınan ısı akışı, iki faz WC ve ZrO içeren bir 3 boyutlu modele uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; artan WC miktarı nedeniyle, kompozit seramiğin ısı iletkenliğinin arttığı ve HAZ içinde daha düşük sıcaklık gradyanlarına yol açtığı bulunmuştur. Düşük sıcaklık gradyanları, yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesiyle sonuçlanabilecek alt yüzey katmanlarında daha az gerilime neden olmaktadır. Yazarlar, sunulan modelin deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanması gerektiğini ve sonrasında, yüzey bütünlüğü tahminleri yapılabileceğini vurgulamışlardır (Hess ve diğ., 2022).

Fard ve diğ., Al-SiC kompozitin kuru WEDM hakkında parametrik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, vurum süresi, vurum bekleme süresi, voltaj, boşalım akımı, tel gerilimi ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü (SR) ve kesme hızı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kesme hızı açısından en uygun gaz ve tel malzemesinin seçilmesi için yapılan ön deneylerde oksijen gazı ve pirinç tel öne çıkmıştır. Kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Daha sonra kesme hızını maksimuma çıkarmak ve SR'yi minimize etmek için bir yapay arı kolonisi algoritması, ANFIS modeli ile ilişkilendirilmiştir. Düşük vurum süresi, yüksek vurum bekleme süresi, yüksek voltaj, düşük akım, düşük tel ilerleme hızı ve gerilimi kombinasyonunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. (Fard ve diğ., 2013).

#### Ultrasonik İşleme ve Döner Ultrasonik İşleme (Ultrasonic Machining and Rotary Ultrasonic Machining)

Ultrasonik işleme (UM), elektrik enerjisini titreşime dönüştürerek işlemeyi gerçekleştiren bir alışılmamış imalat tekniğidir. İşleme takımı, iş parçası yüzeyinde bir aşındırıcı tane bulamacı içinde 0.013-0.1 mm arasında bir genlikle yaklaşık 20 kHz'de titreşir. Talaş kaldırma süreci çekiçleme etkisi, darbe etkisi, kimyasal etki ve kavitasyon etkisi altında gerçekleşir. Otomasyon imkânı ve hassasiyeti yüksek, fakat işleme hızı düşük bir yöntemdir (Hinduja ve Kunieda 2013). Şekil 4'te ultrasonik işleme mekanizması gösterilmiştir. Döner ultrasonik işleme (RUM) ise sistemsel olarak ultrasonik işlemeye (USM) benzemesine rağmen aşındırıcı madde kullanılmamasıyla USM'den ayrılır. RUM yönteminde işleme için dönen elmas kaplı bir takım kullanılır. Bu yöntem delme, frezeleme, delik açma vb. işlemler için uygulanmaktadır (Hinduja ve Kunieda 2013).



Şekil 4. Ultrasonik işleme mekanizması (Swift ve Booker, 2013)

Figure 4. Ultrasonic machining mechanism

Ultrasonik işleme, optik cam malzemelerden gelişmiş seramiklere ve seramik matris kompozitlere kadar bir dizi kırılğan malzemenin hassas olarak işlenmesinde başarıyla uygulanmaktadır. Farklı malzemelerin işlenmesi ve yöntemin daha verimli çalışabilmesi hakkında birçok derleme ve araştırma makalesi bulunmaktadır.

Wang ve diğ. tarafından yapılan derleme çalışmada, kırılğan malzemelerin RUM'da malzeme çıkarma mekanizması ve kesme kuvveti modellemesinin yanı sıra kenar ufalanması oluşum mekanizmaları, yırtılma kusurları, yüzey altı hasarları ve bunların etkileşimli etkileri araştırılmıştır. RUM'da işleme parametrelerinin belirlenmesinde sınırlayıcı bir koşul olan takım tezgâhlarının kritik işleme kapasitesi tanımlanmıştır. İşleme parametrelerinin optimizasyonu, düşük hasarlı takım tasarımı ve döner ultrasonik eliptik işleme gibi diğer yöntemler dâhil olmak üzere hasar azaltma yöntemlerindeki ilerlemeler açıklanmıştır. RUM'un işleme parametrelerinin belirlenmesinde öncelikle kesme kuvvetinin kritik kesme kuvvetini aşmaması sağlanmalıdır. Döner ultrasonik delmede (RUD) delik girişindeki kenar yontma veya yırtılma hatası, doğrudan bireysel elmas aşındırıcıların malzeme çıkarma işleminden kaynaklanır. Aksine, delik çıkışındaki kenar yontma veya yırtılma hatası, tüm elmas aşındırıcıların makro kuvvet etkisinden kaynaklanır. Benzer şekilde, döner ultrasonik yüzey frezelemede (RUFM) kenar yontulması yukarıda belirtilen oluşum mekanizmasını takip eder. İşleme parametreleri optimizasyonu, düşük hasarlı takım tasarımı ve ayrıca delik çıkışında destek ekleme gibi yöntemler sayesinde, işleme kaynaklı hasarlar etkili bir şekilde bastırılabilir (Wang ve diğ., 2018b).

Silisyum karbür (SiC) seramik matrisli kompozitlerin işlenmesi, malzeme kaldırma sırasında meydana gelebilecek ve kompozit parçaların hizmet ömrünü kısaltabilecek hasarlar nedeniyle önemli bir sorundur. Zhang ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, iki boyutlu bir karbon fiber takviyeli silisyum karbür matrisli kompozit (2D-Cf/SiC) modeli oluşturulmuştur. Farklı fiber oryantasyonları oluşturulup seramik matrisli kompozitlerin ultrasonik destekli parlatma işleminde, kuvvet, yüzey topografyası ve yüzey/yüzey altı mikromorfolojisi ile yüzey sertliği araştırılmıştır. Sonuçlar, ultrasonik destekli parlatma ile malzeme kaldırma işleminde en etkili olayın gevrek kırılma olduğunu göstermiştir. Malzeme kırılma biçimleri; matris çatlaması, fiber kırılması, fiber çekilmesi, arayüzey bağlarının ayrılması ve arayüzey kırılması olarak sıralanabilir. Geleneksel taşlama ile karşılaştırıldığında, ultrasonik destekli taşlamada; normal kuvvet, teğetsel kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü sırasıyla yaklaşık %20, %18 ve %9 oranında azalmıştır. Ultrasonik destekli taşlama, taşlama kuvvetini etkili bir şekilde azaltabilir ve yüzey bütünlüğünü iyileştirebilir. Bu çalışma bulgularının, 2D-Cf/SiC'nin taşlama kuvvetini ve yüzey kalitesini tahmin etmek için kullanılacağı belirtilmiştir. (Zhang ve diğ., 2022b).

Feng ve diğ., C/SiC kompozitlerin döner ultrasonik işleminde delme kaynaklı yırtılma kusurlarını araştırmıştır. Ayrıca yırtılma kusuru oluşum mekanizması, itme kuvvetinin ayrıntılı gözlemi yoluyla incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, yırtılma kusurunun itme kuvvetine pozitif bir bağımlılığını göstermektedir. Daha büyük bir itme kuvveti, yırtılma kusurunun oluşumu sürecinde daha büyük bir matkap yer değiştirmesine karşılık gelir ve bu da daha fazla yırtılma kusuruna neden olur. RUM ortalama olarak delik çıkışındaki yırtılma kusurunu %60'tan fazla azaltabilir. Yırtılma kusurları, iş mili hızını ve ultrasonik genliği artırarak veya ilerleme hızını azaltarak daha da azaltılabilir (Feng ve diğ., 2017).

Döner ultrasonik işleme, kesme kuvveti ve gelişmiş delik kalitesi ile seramik matris kompozitler (CMC) için üstün bir delik üretim yöntemidir. Çeşitli işleme parametreleri arasında, kesme kuvvetinin azaltılması açısından RUM etkinliğini garanti etmek için yeterli ve kararlı ultrasonik titreşim çok önemlidir. Wang ve diğ., seramik matrisli kompozitlerin döner ultrasonik işlenmesinde titreşim stabilitesi üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, C/SiC, kuvars cam ve safirin RUM için delik girişinde kesme kuvveti ve ultrasonik güç değişiklikleri değerlendirilmiştir. Ultrasonik güç değişimi, C/SiC kompozitin RUM sırasında termo-mekanik yükün rezonans frekansı üzerindeki etkisini tanımlamak için de kullanılmıştır. Kompozit özelliğın termo-mekanik yükün ultrasonik titreşimin kararlılığı üzerindeki etki mekanizmasını etkilemediği ortaya çıkmıştır. Ayarlama frekansının önceden ayarlanmasıyla, takım aşınmasının kompozitin RUM işlemindeki kesme kuvveti artışı üzerindeki etkisinin zayıflatılabileceği belirtilmiştir (Wang ve diğ., 2018a).



Li ve diğ., SiC için ultrasonik titreşim destekli taşlamada (UVAG) malzeme kaldırma mekanizması ve taşlama kuvveti modellemesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Değişken derinlikli nano çizilme testi ve ultrasonik titreşim destekli taşlamaya (UVAG) dayalı olarak, birim zamanda malzeme çıkarılması kullanılarak normal taşlama kuvvetinin teorik bir modeli elde edilmiştir. Geleneksel taşlamada, malzemenin çıkarma şekli yığın kaldırmadır, UVAG ise sünek kaldırma elde etmek için faydalıdır. Taşlamada yüzey altı hasar derinliği, ana yüzey altı hasarı mikro çatlaklar olan UVAG'dan daha derin ve daha ciddidir. Tek değişkenli deneyler, taşlama derinliği, ilerleme hızı ve genliğinin artmasıyla taşlama kuvvetinin arttığını, iş mili hızının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Deney sonuçları UVAG'ın, yüzey taşlama işlemine kıyasla yüzey kalitesini iyileştirmek ve yüzey altı hasar derinliğini azaltmak için faydalı olduğunu göstermiştir. SiC seramikleri için normal taşlama kuvvetinin teorik modeli genetik algoritma kullanılarak elde edilmiş olup, deneysel sonuçlar teorik modelin güvenilir olduğunu göstermiştir (Li ve diğ., 2017).

Kumar ve Singh, döner ultrasonik işleme sırasında girdi faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini inceleyerek BK7 cam malzemenin yüzey kalitesini iyileştirmeyi amaçlamıştır. İşleme değişkenlerinin (devir sayısı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gözlemlemek için RSM metodolojisi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen kuadratik modelin uygunluğu ANOVA ile kontrol edilmiş ve ilerleme-hız etkileşimi hariç tüm faktörlerin model için önemli olduğu belirlenmiştir. İlerleme, güç ve devir sayısının ılımlı etkisiyle azalan yüzey pürüzlülüğü üzerinde maksimum etkiye sahiptir. SEM analizi, karışık malzeme akışı sağlayarak yüzey kalitesini düşüren düşük ilerleme hızı ile yüksek güç ve hız seviyelerinde işlenmiş yüzeylerde plastik olarak deforme olmuş bölgelerin olduğunu göstermiştir (Kumar ve Singh, 2018).

Du ve diğ., CFRP kompozitler ile karbon fiber takviyeli seramik (CFRC) kompozitlerin işlenme durumunu geleneksel ve geleneksel olmayan işleme yöntemleri açısından karşılaştırmışlardır. Geleneksel işleme yöntemleri, basit kullanım, daha az ekipman yatırımı vb. avantajlara sahiptir, ancak karbür takımlarda hızlı aşınma oluşur. PCD ve CBN kesiciler seramik matris kompozitlerin işlenmesi için daha uygundur. CFRP'lerin geleneksel yöntemlerle işlenmesi sırasında dikey fiber dökme yönünde tabakalar arasındaki bağlanma mukavemetini aşan kesme kuvveti delaminasyon kusurlarına neden olur. Geleneksel olmayan işleme yöntemleri birçok işleme kusurlarını bir dereceye kadar azaltabilir. Su jeti ile işleme ve lazer ışını işleme kombinasyonu, su jetinin erozyonu ve soğutması sırasında HAZ'ı önemli ölçüde azaltabilir, bu da bazı yönlerden geleneksel lazer ışını işlemeden daha avantajlıdır. Ultrasonik destekli işleme ve döner ultrasonik işleme, CFRC'lerin işlenmesinde yalnızca kesme kuvvetlerini ve ufalanma, çapak, çatlak, fiber çekilmesi gibi işleme kusurlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda işleme verimliliğini ve yüzey kalitesini iyileştirebilir (Du ve diğ., 2019).

Günümüzde teknik verimliliğe ek olarak, çevre dostu işleme yöntemlerine olan talep artmıştır. Seramik matris kompozitler (CMC), özellikle sert ve ağır koşullar altında olağanüstü özellikler göstermekle birlikte CMC'lerin işlenmesinde, önemli işleme maliyetleri, yüksek takım aşınması, kötü yüzey kalitesi ve düşük malzeme çıkarma oranı gibi çeşitli dezavantajlar vardır. Bu bağlamda, CMC'lerin işlenmesi için etkin bir stratejinin geliştirilmesi çok önemlidir. Esmaili ve diğ., soğutma sıvısı-yağlayıcı tipleri arasında, ucuz ve çevreye uyumlu olarak bilinen minimum miktar yağlama (MQL) tekniğinin taşlama işleminde iyi sonuçlar verebileceğini göstermek için bir araştırma yapmıştır. Karbon fiber takviyeli SiC kompozitin taşlanması, MQL yönteminin kuru taşlama koşuluna göre kesme kuvvetinde %37.95 azalma, yüzey pürüzlülüğünde %75.93 azalma ve taşlama verimliliğinde %150 artış sağladığı belirlenmiştir. MQL destekli taşlamadan sonra iş parçası yüzeyinin SEM görüntüleri, C/SiC kompozitlerde gevrek kırılmanın baskın kesme mekanizması olduğunu göstermiştir (Esmaili ve diğ., 2019).

Singh ve diğ., Al/SiC kompozitinin döner ultrasonik işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü (SR), malzeme çıkarma oranı (MRR) ve talaş kalınlığı gibi ilgi tepkiler üzerinde farklı deneysel koşulların (devir sayısı, ilerleme hızı ve ultrasonik güç) etkilerini incelemiştir. İşlenmiş numunelerin mikro yapı incelemesinde, SEM analizi yoluyla takım uç kenarı üzerindeki talaşlanma boyutu ve kalınlığını göstermek için kullanılmıştır. Bununla birlikte, orta seviye ilerleme hızı, talaş kalınlığı açısından en

uygun sonuçları sunar. Deneysel sonuçlar, ilerleme hızının MRR ve SR için en önemli değişken olduğunu göstermiştir (Singh ve diğ., 2020).

Abdo ve diğ., RUM ile biolox-forte seramiklere mikro kanalların işlenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. İş mili hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, titreşim genliği ve titreşim frekansının yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve takım aşınmasına etkileri değerlendirilmiştir. Elmas takım kesme hareketindeki farklılık nedeniyle kanal yan duvarına kıyasla kanal yatağında daha kırılğan kırılma ve derin çukurlar açığa çıkarmıştır. Ayrıca, kanal yan duvarlarının her zaman üst kenarın yakınında kaba işlenmiş bir bölge ve kanal yatağına kadar nispeten düz işlenmiş bir bölge gösterdiği gözlenmektedir. EDS analizi, biolox-forte bileşiminde herhangi bir değişikliğin meydana gelmediğini ve mikro kanallarda hiçbir takım malzemesi izinin gözlenmediğini ortaya koymuştur. SEM analizleri, plastik deformasyon, abrasiv aşınma, takım kenarı yuvarlanma ve talaşlanma gibi aşınma mekanizmalarının oluştuğunu göstermiştir. İdeal RUM parametreleri seçilerek, iyi yüzey kalitesi ( $Ra=0.21 \mu m$ ) ve minimum kenar talaşlanması ( $16.3 \mu m$ ) olan mikro kanallar oluşturulduğu belirtilmiştir (Abdo ve diğ., 2019).

Kuo ve Tsao, kendi kendine çalışabilen RUM mekanizması tasarlayarak bu işleme türünün uygulama alanını genişletmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, tasarlanan takım önce RUM takım tezgâhına adapte edilmiş ve deneylerde iş parçası olarak cam seçilmiştir. Sonuçlara göre, kesme derinliği ve ilerleme hızındaki artışlar, giriş alanındaki yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Zımpara taşı aşınması belirli bir seviyeye ulaştığında, kesme açısı ve taşların boyutu azalarak yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olur. Ultrasonik destekli frezeleme, frezeleme direncinin azalmasıyla sonuçlanır ve bu da daha yüksek bir işleme hızına yol açar. Ancak, uzunlamasına ultrasonik salınım, iş parçasına karşı mikro ezilme etkisi nedeniyle frezelenmiş yüzeye zarar verir. Dolayısıyla, ultrasonik frezelemenin yüzey kalitesi ultrasonik olmayan frezelemeden daha kötüdür. Ayrıca, taşlama taşları bu mikro ezilme etkisi nedeniyle daha fazla strese ve daha kolay yıpranmaya maruz kalır (Kuo ve Tsao, 2012).

Navas ve diğ.,  $ZrO_2-TiN$  ve  $Al_2O_3-TiC-SiC$  seramiklerinin RUM ile işlenmesinde nihai yüzey bütünlüğünü araştırmışlardır. Sonuçlara göre,  $Al_2O_3-TiC-SiC$  seramiğinden talaş kaldırma davranışı sünek kırılma şeklinde olurken,  $ZrO_2-TiN$ 'de gevrek kırılma hali daha baskındır. Daha küçük tane boyutuna sahip elmas takımlar kullanıldığında, eksenel kesme derinliğinin azaltılması ve/veya ilerleme hızı artırılması durumunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Döner ultrasonik işleme, her iki seramikte basma şeklinde yüzey kalıntı gerilmeleri üretmiştir. İşleme parametrelerinin  $ZrO_2-TiN$ 'deki nihai artık gerilmeler üzerinde hiçbir etkisi yoktur, ancak  $Al_2O_3-TiC-SiC$ 'de ilerleme azaltıldığında ve/veya eksenel kesme derinliği arttığında daha fazla basma gerilimi oluşur.  $ZrO_2-TiN$ 'nin RUM'u,  $ZrO_2$ 'nin herhangi bir zararlı tetragonal fazdan monoklinik faza dönüşüme neden olmaz (Navas ve diğ., 2015).

Kuruc ve diğ., polikristalin kübik bor nitrürün (PCBN) işlenebilirliğini döner ultrasonik işleme yöntemini kullanarak araştırmıştır. Çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) için en uygun yüzey pürüzlülüğüne sahip bir takım üretilmesi hedeflenmiştir. Çünkü pürüzlülüğün özellikle yapıştırma kabiliyeti üzerinde kaynak işleminde önemli bir etkisi vardır. Takımın pürüzlülüğü çok yüksekse, kaynak malzemesi takıma yapışır ve kaynak oluşturulamaz. İşlemeden sonra oluşan yüzeyde çıkıntılar olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni, kesme derinliğinin takım titreşiminin genliğinden daha yüksek olmamasıdır. Deneysel sonuçlara göre, FSW'de kaynak takımı için RUM yöntemiyle PCBN'nin işlenmesi sırasında yeterli düşük pürüzlülük ( $Ra=0.24 \mu m$ ) elde etmek mümkündür (Kuruc ve diğ., 2015).

Kompozit malzemelerdeki gelişmelerle birlikte, kompozit malzemelerin kullanım alanları da artmıştır. Özellikle CMC'lerden olan karbon fiber takviyeli silisyum karbür (C/SiC), ısı dayanımlarının fazla olması ile uçak motorlarının ısı dayanım isteyen parçalarında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Uçak motorlarındaki arızaların büyük bir çoğunluğu motordaki parçaların yorulması kaynaklı olduğu bilinmektedir (Ludwig ve diğ., 2020). Xue ve diğ. C/SiC kompozitlerin geleneksel frezeleme ve döner ultrasonik frezeleme yöntemiyle işlenmesi sonrası yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Farklı

ultrasonik genliklerde işlenen numunelere statik çekme, tam değişken yüklü yorulma ve artık çekme mukavemeti testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre RUM teknolojisinin C/SiC kompozitlerin işlenmesinde hem yüzey hem de yüzey altı kalitesini arttırabileceği bulunmuştur. RUM yüzeyi, artık basma gerilimi nedeniyle arayüzey çatlaklarının çoğunu ve daha iyi işlenmiş yüzey kalitesi için fiber çatlaklarının büyümesini engeller. Bundan dolayı, RUM ile C/SiC numunelerinin yorulma hasar oranının geleneksel frezelemeye oranla %31-%80 arasında azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca RUM ile işlenen numunelerin artık çekme mukavemetlerinde de iyileşme görülmüştür (Xue ve diğ., 2021).

### **Diğer Alışılmamış İmalat Yöntemleri (Other Unconventional Manufacturing Methods)**

Açıklanan yöntemler dışında kullanılan malzeme ve istenilen özelliklere göre çok farklı alışılmamış imalat yöntemi mevcuttur. Her yöntemin bir diğerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Doğru yöntemin belirlenmesi malzeme türü ve özellikleri, istenilen boyut ve toleranslar gibi işleme çıktılarına bağlıdır. Seramiklerin talaşlı imalatında kullanılan diğer alışılmamış imalat yöntemleriyle ilgili araştırmalar aşağıda verilmiştir.

Çolpan, alüminyum seramiklerin CO<sub>2</sub> lazer ile işlenmesini araştırmıştır. Seramiklerin lazer ile işlenmesinde, işleme hızında ve boyutsal kalitede artış, sertliğin ve kırılabilirliğin oluşturduğu işleme zorluğunu en aza indirme gibi yararları olduğu belirtilmiştir. Deneylerde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> levhalar kullanılmış olup, numuneler farklı lazer hızı ve gücünde işlenmiş ve sonuçlar SEM yardımıyla incelenmiştir. Lazer çıkış gücünün hem işaret derinliğini hem de genişliğini belirlediği tespit edilmiştir. Daha yüksek güç, yüksek kontrast ile karakterize edilmiş, bu durum daha derin ve daha geniş işaretlerin oluşmasına neden olmuştur. İşleme hızı, üst üste binen izleri ve lazer-malzeme etkileşim süresini kontrol ettiği, böylece işaret derinliği ve kontrastı üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Buna göre, yüksek işleme hızlarında işaret derinliği düşmektedir (Çolpan, 2019).

Yu ve diğ.'ne göre, soğuk presleme, sıcak presleme ve enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel üretim süreçleri, karmaşık geometrilere sahip yüksek kaliteli ZrO<sub>2</sub> bazlı seramiklerin imalatına sınırlamalar getirmektedir. Sorunların çözümü için bağlayıcı jet ile imalat, fotopolimerizasyon ve malzeme ekstrüzyonu gibi eklemeli imalat (AM) yöntemleri geliştirilse de üstün mekanik özelliklere sahip hatasız parçalar üretilememiştir. Bu sorunu çözmek için itriyum-kısmen stabilize ZrO<sub>2</sub> seramiklerinin imal edilmesi için yeni bir ekstrüzyon esaslı AM işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemde yağlayıcı ve bağlayıcılar zirkonyum oksit tozlarıyla karıştırılmış, daha sonra ekstrüzyon tabanlı 3D yazıcıyla katmanlar şeklinde üretilmiştir. Üretilen katmanlar yağlayıcı ve bağlayıcılardan ayrılması sağlanarak sinterlenmiştir. Katkı maddesi ile üretilen itriyum-kısmen stabilize ZrO<sub>2</sub> seramiklerinin eğilme, kırılma ve basma dayanımı, sertliği ve gözenekliliği gibi mekanik özellikler incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen ekstrüzyon esaslı AM işlemi ile üretilen parçaların bağlayıcı püskürtme ve SLS yöntemleriyle üretilen ZrO<sub>2</sub> parçalarına göre üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir (Yu ve diğ., 2020).

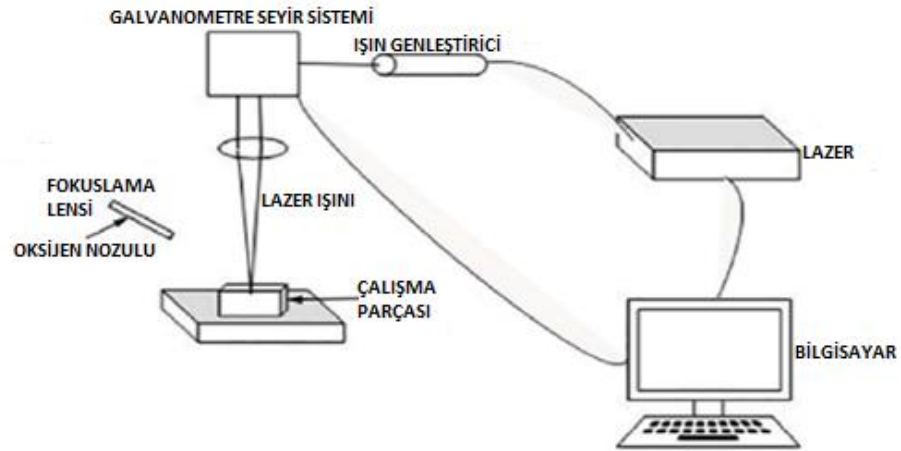
Xing ve diğ., Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC seramiği üzerinde mikro kanalların üretiminde lazer ile işleme (LBM) parametrelerinin (voltaj, tarama hızı, frekans ve overscan sayısı) yüzey kalitesi ve boyutlar üzerindeki etkisini incelemiştir. İşlenmiş yüzey morfolojisi, kanal genişliği ve derinliği ve yüzey bileşimi SEM, enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile ölçülmüştür. Sonuçlar, ısıdan etkilenen bölgenin oksidasyon reaksiyonları ile mikro kanalları çevrelediğini ve mikro kanalların yüzey morfolojisi ve boyutlarının LBM parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Yüksek voltaj, düşük tarama hızı, yüksek frekans ve fazla sayıda overscan, yüksek enerji birikimi nedeniyle belli bir eşik değerine kadar büyük kanal genişliği ve derinliği oluşumuna neden olmaktadır. Ancak aşırı enerji birikimi kanal genişliğinin ve derinliğinin azalmasına neden olabilmektedir. Deneysel sonuçlara göre, mikro kanalları oluştururken daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilmesi için LBM parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Optimizasyon ile yaklaşık 50 µm genişliğinde ve yaklaşık 43 µm derinliğinde istenen mikro kanallar üretilebilir (Xing, ve diğ., 2018).

Mükemmel biyoyoumluluk ve kimyasal dayanıklılık nedeniyle, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramikler diş hekimliği gibi biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiğin yüksek sertliği ve kırılabilirliği, geleneksel işleme yöntemlerinin işleme kalitesinin sağlanmasında zorluklara neden olur.

Ultrasonik titreşim destekli parlatma (UVAP), yeni bir işleme yöntemi olarak sert ve kırılğan malzemelerin yüzey kalitesini etkili bir şekilde iyileştirebilir. Zhang ve diğ., Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramiğin UVAP ile işlenmesinde yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Yüzey özelliklerinin değerlendirilmesi; mikroskobik topografi, sürtünme özelliği, yüzey sertliği ve mikroskobik gerinim değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Yüzey sertliğinin, yüzey pürüzlülüğündeki azalmayla birlikte azaldığı görülmüştür. Gerinim değerlerinde ise en az değer 4 µm değerinde elde edilirken, en çok değer 8 µm değerinde elde edilmiştir. Ek olarak, UVAP işleme mekanizmasına dayalı olarak alümina seramiğin bir yüzey pürüzlülüğü matematiksel modeli oluşturulmuştur. Model, farklı tipteki aşındırıcı parçacıkların malzeme kaldırma mekanizması üzerindeki etkisini dikkate almaktadır. Deneysel sonuçlar, tahmin modeli hatalarının %20'den az olduğunu göstermektedir (Zhang ve diğ., 2022a).

Shaikh ve Jain, elektro-kimyasal honlama (ECH) işlemi ile 20MnCr<sub>5</sub> alaşımlı çelik konik dişlilerin finiş işlenmesinde MRR ve yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modellerini oluşturmuşlardır. ECH, elektrokimyasal çözünme (ECD) ve mekanik honlamanın hibrit bir uygulaması olduğundan, ECD'nin MRR ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi Faraday'ın elektroliz yasası kullanılarak modellenmiştir. Mekanik honlamanın etkisi ve düzenli aşınma etkeni olan malzeme çıkarılması Archard'ın Aşınma Modellemesi kullanılarak oluşturulmuştur. Düzgün konik dişli diş yüzeylerinin geometrisine dayanarak elektrotlar arası boşluk boyunca bu iki modelin gerektirdiği yüzey alanının hesaplanması için formasyonlar önerilmiştir. Geliştirilen modeller, öngörülen yeni "ikiz tamamlayıcı katotlar" konseptine dayanan ECH ile konik dişlilerin bitirilmesi için geliştirilen bir deney düzeneği kullanılarak doğrulanmıştır. Katotlarda elektrolit olarak %25 NaCl + %75 NaNO<sub>3</sub> içeren sulu bir çözelti kullanılmıştır. ECH yöntemiyle üretilen dişliler için daha iyi çalışma performansı sağlayan yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğüne ulaşıldığı vurgulanmıştır. Ancak, ticari olarak bu yöntemi kullanarak form doğruluğu ve yüzey kalitesinde istenen iyileştirmeyi elde etmek için dişli imalatı sırasında finiş işleme miktarının tam olarak belirlenmesi gerekir (Shaikh ve Jain, 2014).

Wang ve diğ., spark plazma sinterlemesi ile işlenen TiB<sub>2</sub>-SiC seramiğinin mikro işleme sürecinin kolaylaştırılabilmesi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yeni yöntemde göre mikro işleme işlemine lazer ile indüklenen oksidasyon işlemi yardımcı olmaktadır (Wang ve diğ., 2019). Spark plazma ile sinterleme mekanizması Şekil 5'te görülmektedir. Lazer ışınları uygulandıktan sonra malzemenin mikro yapısı ve faz bileşimi elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Buna göre lazer ışınımı uygulanan bölgelerde, seramik ve oksijen arasındaki oksidasyon reaksiyonuyla çıkarılması kolay gevşek ve gözenekli bir oksit tabakası oluştuğu görülmüştür. İşleme parametreleri; ortalama lazer gücü, tarama hızı ve reaksiyon ortamının TiB<sub>2</sub>-SiC seramiğinin oksidasyon davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ortalama lazer gücünde bir artış ve tarama hızında bir azalma olduğunda oksit tabakasının kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Oksijen açısından zengin bir ortamda kalın ve stabil bir oksit tabakası oluşmaktadır. Optimum lazer parametrelerinde (5W güç ve 1 mm/s tarama hızı), oksijen yönünden zengin bir ortamda oksit katman kalınlığı 51 µm, oksit altı katman kalınlığı ise 15 µm'dir. Sonuç olarak, oksidasyon işlemi ile TiB<sub>2</sub>-SiC seramiğinin işlenmesinin kolaylaştığı vurgulanmıştır (Wang ve diğ., 2019).



Şekil 5. Spark plazma ile sinterleme mekanizması (Wang ve diğ., 2019)

Figure 5. Spark plasma sintering mechanism

Zhang ve diğ., Ni içeriğinin  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2\text{-Ni}$  sermetlerinin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve aşındırıcı aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı Ni içerikli dört grup  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2\text{-Ni}$  sermet reaksiyon borlama sinterlemesi ile üretilmiş ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Sonuçlar sermetlerin mikro-yapısının Ni/B oranının 0.9'dan 1.2'ye yükselmesiyle açıkça rafine edilebildiğini ve Ni/B oranı 1.1 olan sermetlerin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir (sertlik HRA 90.3 ve kırılma tokluğu 24.3 MPa). Ayrıca, yüksek hızlı bulamaç ( $\text{SiO}_2$  kum ile karıştırılmış yapay deniz suyu) aşındırıcı ile aşınma altında, Ni/B 0.9 ve 1.0 oranlı sermetler yüksek aşınma oranı sergilemiştir. Bununla birlikte, Ni/B 1.1 oranlı sermetlerin,  $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$  sert fazı ve Ni bağlayıcı fazının iki fazın uygun oranda etkileşimiyle açıklanan nispeten tam aşınmış yüzey ile minimum aşınma oranı elde edilmiştir (Zhang ve diğ., 2019).

Kannan ve diğ., SiC takviyeli Al7475 kompozitinde gerilimin azaltılması amacıyla mikro boyutlu eliptik bir deliğin LBM yöntemiyle işlenmesini incelemişlerdir. Mikro delik profilinin boyut ve yüzey kalitesi yönünden daha iyi hale getirilebilmesi için lazer gücü, tarama hızı gibi parametreler değiştirilmiştir. Alüminyum bazlı kompozitten başarılı bir şekilde işlenen eliptik profil incelemeleri, LBM'nin uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir. En iyi işlemenin minimum tarama hızı olan 50 mm/s ve maksimum lazer gücü 3 kW değerlerinde olduğu belirlenmiştir. SEM analizleri ile minimum tarama hızı ile maksimum lazer gücünde yüzey kalitesinin diğer kombinasyonlara göre çok daha iyi olduğu kanıtlanmıştır (Kannan ve diğ., 2020).

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, günümüze kadar seramiklerin ve seramik esaslı kompozit malzemelerin alışılmamış imalat yöntemleri ile işlenmesi üzerine yapılan araştırmalar değerlendirilmiştir. Yapılan inceleme ve değerlendirmeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Seramiklerin işlenmesinde ortaya çıkan ölçü ve yüzey kalitesiyle ilgili temel sorunlar bu malzemelerin sert ve kırılğan olmalarından kaynaklanmaktadır. Geleneksel yöntemler ile yapılan işlemlerde takım ömrü ve işleme verimliliğinde azalmalar yaşanmaktadır. Alışılmamış imalat yöntemlerinin seramiklerin işlenmesinde uygulanmasıyla bu dezavantajlı durumlar en düşük seviyeye çekilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemler ile takımın iş parçasına teması en düşük seviyeye indirilmiş veya tamamen ortadan kaldırılarak takım ömründe iyileşmeler sağlanmıştır. Ayrıca, alışılmamış imalat yöntemlerinde talaş kaldırma sürecinde kullanılan elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve kimyasal çözünme gibi etkenler işleme kalitesini ve işlenebilirliği arttırmaktadır. Özellikle, seramik matrisli kompozitlerin

işlenmesinde oluşan takviye malzemesindeki kırılma ve bozunmalar geleneksel imalat yöntemlerine göre daha az olmaktadır. Böylece, hem kompozit malzemenin fiziksel ve mukavemet özellikleri korunmakta hem de işlenebilirlik göstergeleri iyileşmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmaların alışılmamış imalat yöntemlerinde kullanılan sistemlerin geliştirilmesi, hibrit tekniklerin uygulanması, işleme verimliliğini etkileyen parametrelerin optimize edilmesi ile yüzey pürüzlülüğü ve işleme hızı gibi işlenebilirlik göstergelerinin modellenmesi üzerine olduğu görülmektedir. Bu araştırmalarda, çoğunlukla Taguchi ve RSM gibi deney tasarım ve analiz tekniklerinin yaygın olarak kullanılmıştır ve işleme yönteminde etkin parametreler varyans analizi ile belirlenmiştir.

Alışılmamış imalat yöntemleri kullanılarak, kırılğan malzemelerin üzerine karmaşık ve/veya mikro ölçülerde kanal, delik vb. unsurlar oluşturulabilmektedir. Diğer yandan, geleneksel yöntemlere göre talaş kaldırma hızının oldukça düşük olması en önemli dezavantajıdır. Ayrıca, ısı enerjisi yardımıyla talaş kaldıran EDM ve LBM uygulamalarında işlenen parçalarda mikro seviyede ısıl etkilenmiş bölgelerin oluşması bir diğer olumsuzluktur. Lazer ışını ile işlemede oluşan bu bölgeyi en aza indirmek için LBM ile WJM beraber kullanılabilir. Diğer yandan, ilk yatırım maliyeti ve birim parça başına düşen işçilik maliyetinin yüksek olması, sürdürülebilirlik açısından sistemlerin doğru ve etkili bir biçimde kullanılabilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, özellikle malzeme kaldırmanın karmaşık mekanizması nedeniyle, süreci optimize etmek için matematiksel modeller ve algoritmalar içeren stokastik ve deterministik teknikler kullanılabilir. Gelecekteki araştırmaların çok amaçlı optimizasyon ve sanayi uygulamalarına yoğunlaşılması sürdürülebilirlik açısından fayda sağlayacaktır. Ayrıca, seri üretimde verimliliği artırmak amacıyla enerji tüketimi ve işleme maliyetleri konularında ilgili analizlerin yapılmaması literatürdeki temel eksiklikler olarak göze çarpmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdo, B. M. A., Anwar, S., El-Tamimi, A., 2019, "Machinability study of biolox forte ceramic by milling microchannels using rotary ultrasonic machining", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 43, ss. 175-191.
- Aich, U., Banerjee, S., Bandyopadhyay, A., Das, P. K., 2014, "Abrasive water jet cutting of borosilicate glass", *Procedia Materials Science*, Cilt 6, ss. 775-785.
- Anjaneyulu, B., Prahladharao, K., Nagamalleswararao, G., 2019, "Optimization of process parameters by using Taguchi Techniques in abrasive air jet machining of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic material", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 19, ss. 140-147.
- Bhadauria, G., Jha, S. K., Roy, B. N., Dhakry, N. S., 2018, "Electrical-Discharge Machining of Tungsten Carbide (WC) and its composites (WC-Co) –A Review", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 5, Sayı 11, ss. 24760-24769.
- Bilal, A., Jahan, M. P., Talamona, D., Perveen, A., 2018, "Electro-discharge machining of ceramics: A review", *Micromachines*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 10.
- Chaitanya, A., Babu, D. K., Kumar, K. V. N. G., 2020, "Experimental study on surface roughness by using abrasive jet machine", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 23, ss. 453-457.
- Chaudhury, P., S. Samantaray, 2020, "Multi-optimization of process parameters for machining of a non-conductive SiC ceramic composite by non-conventional machining method", *Manufacturing Review*, Cilt 7, Sayı 32.
- Chiles, V., Black, S., Lissaman, A., Martin, S., 1996, *Principles of engineering manufacture*, Butterworth-Heinemann, Oxford, İngiltere.
- Çolpan, M. H., 2019, "Seramik Yüzeylerin Lazerle İşlenmesi Üzerine Bir Çalışma", *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, Cilt 45, Sayı 1, ss. 88-94.
- Daniel, S. A. A., Ananth, S. V., Parthiban, A., Sivaganesan, S., 2020, "Optimization of machining parameters in electro chemical machining of Al<sub>5</sub>O<sub>5</sub>/SiC/MoS<sub>2</sub> composites using taguchi method", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 738-743.

- Dhanawade, A., Bhosle, R., Jagtap, R., Sorate, K. A., 2021, "Comparative Study of Lead Zirconate Titanate Ceramic and Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite Surfaces Machined by Abrasive Water Jet", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 44, ss. 4628-4632.
- Du, J., Zhang, H., Geng, Y., Ming, W., He, W., Ma, J., Cao, Y., Li, X., Liu, K., 2019, "A review on machining of carbon fiber reinforced ceramic matrix composites", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 15, ss. 18155-18166.
- Esmaeili, H., Adibi, H., Rezaei, S. M., 2019, "An efficient strategy for grinding carbon fiber-reinforced silicon carbide composite using minimum quantity lubricant", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 8, ss. 10852-10864.
- Fard, R. K., Afza, R. A., Teimouri, R., 2013, "Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al-SiC metal matrix composite", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 15, Sayı 4, ss. 483-494.
- Feng, P., Wang, J., Zhang, J., Zheng, J., 2017, "Drilling induced tearing defects in rotary ultrasonic machining of C/SiC composites." *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 1, ss. 791-799.
- Garg, M. P., Sharma, A., 2017, "Examination of accuracy aspect in machining of ZrSiO<sub>4</sub>/6063 aluminium MMC using CNC wire electrical discharge machining", *Composites Communications*, Cilt 6, ss. 6-10.
- Gommeringer, A., Schweizer, C., Kern, F., Gadow, R., 2020, "Electrical discharge machinable (Y, Nd) co-stabilized zirconia-Niobium carbide ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 40, Sayı 11, ss. 3723-3732.
- Gorin, A., Reddy, M. M., 2014, "Advanced ceramics: Some challenges and solutions in machining by conventional methods", *Applied Mechanics and Materials*, Cilt 624, ss. 42-47.
- Goto, A., Nakata, A., Saito, N., 2016, "Study on Electrochemical Machining of Sintered Carbide", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 402-406.
- Gupta, K., Gupta M. K., 2019, "Developments in nonconventional machining for sustainable production: A state-of-the-art review", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Cilt 233, Sayı 12, ss. 4213-4232.
- Hanzel, O., Singh, M. A., Marla, D., Sedlák, R., Šajgalík, P., 2019, "Wire electrical discharge machinable SiC with GNPs and GO as the electrically conducting filler", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 39, Sayı 8, ss. 2626-2633.
- Hess, R., Olivier, M., Schneider, S., Heidemanns, L., Klink, A., Herrig, T., Bergs, T., 2022, "Numerical Investigation of the EDM Induced Temperature Field in a Composite Ceramic", *Procedia CIRP*, Cilt 108, Sayı 6, ss. 31-36.
- Hinduja, S., Kunieda, M., 2013, "Modelling of ECM and EDM processes", *CIRP Annals*, Cilt 62, Sayı 2, ss. 775-797.
- Jahan, M., Rahman, M., Wong, Y. S., 2011, "A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide", *International journal of machine tools and manufacture*, Cilt 51, Sayı 12, ss. 837-858.
- Ju, K., Chen, X., Zhao, Z., 2022, "Fabrication of Ti/TiO<sub>2</sub> (Ca)/Hydroxyapatite Bioceramic Material by Micro-Arc Oxidation and Electrochemical Deposition", *Ceramics International*, Cilt 48, Sayı 14, ss. 19937-19943.
- Kannan, V. S., Lenin, K., Navneethakrishnan, P., 2020, "Investigation in machining parameter of micro profile and surface characteristics of Al7475 with SiC alloy in LBM", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 701-707.
- Kozak, J., Zybura-Skrabalak, M., 2016, "Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM)", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 101-106.
- Kumar, V., Singh, H., 2018, "Regression analysis of surface roughness and micro-structural study in rotary ultrasonic drilling of BK7", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 14, ss. 16819-16827.
- Kuo, K.-I., Tsao, C.-C., 2012, "Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Cilt 22, ss. 793-800.

- Kuruc, M., Vopát, T., Peterka, J., 2015, "Surface roughness of poly-crystalline cubic boron nitride after rotary ultrasonic machining", *Procedia Engineering*, Cilt 100, ss. 877-884.
- Li, C., Zhang, F., Meng, B., Liu, L., Rao, X., 2017, "Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics", *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 3, ss. 2981-2993.
- Liang, Y., Dutta, S. P., 2001, "Application trend in advanced ceramic technologies", *Technovation*, Cilt 21, Sayı 1, ss. 61-65.
- Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., 2021, "Material removal mechanisms of ceramics turned by abrasive waterjet (AWJ) using a novel approach", *Ceramics International*, Cilt 47, Sayı 11, ss. 15165-15172.
- Liu, D., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Yao, P., Liu, Z., 2014, "Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design", *Ceramics International*, Cilt 40, Sayı 6, ss. 7899-7908.
- Ludwig, C., Rabold, F., Kuna, M., Schurig, M., Schlums, H., 2020, "Simulation of anisotropic crack growth behavior of nickel base alloys under thermomechanical fatigue", *Engineering Fracture Mechanics*, Cilt 224, 106800.
- Miyoshi, K., Kunieda, M., 2016, "Fabrication of micro rods of cemented carbide by electrolyte jet turning", *Procedia CIRP*, Cilt 42, ss. 373-378.
- Mohammed, M. K., Umer, U., Al-Ahmari, A., 2019, "Optimization of Nd: YAG laser for microchannels fabrication in alumina ceramic", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 41, ss. 148-158.
- Natarajan, Y., Murugesan, P. K., Mohan, M., Khan, S. A. L. A., 2020, "Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review", *Journal of Manufacturing Processes*, Cilt 49, ss. 271-322.
- Navas, V. G., Sandá, A., Sanz, C., Fernández, D., Vleugels, J., Vanmeensel, K., Fernández, A., 2015, "Surface integrity of rotary ultrasonic machined ZrO<sub>2</sub>-TiN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC-SiC ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 35, Sayı 14, ss. 3927-3941.
- Okumuş, H., 2017, "Geçmişte ve günümüzde seramiğin kullanım alanları", *Journal of Awareness (JoA)*, Cilt 2, Sayı 3, ss. 1-14.
- Parihar, R. S., Sahu, R. K., Srinivasu, G., 2018, "Effect of wire electrical discharge machining on the functionally graded cemented tungsten carbide surface integrity", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 5, Sayı 14, ss. 28164-28169.
- Parmar, M., James S., 2018, "Experimental and Modeling study of liquid-assisted—laser beam micromachining of smart ceramic materials", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Cilt 2, Sayı 2, ss. 28-39.
- Pramanick, A., Sarkar, S., Dey, P. P., Das, P. K., 2016, "Optimization of wire electrical discharge machining parameters for cutting electrically conductive boron carbide", *Ceramics International*, Cilt 42, Sayı 14, ss. 15671-15678.
- Prasanna, P., Sashank, T. V. S. S. P., Manikanta, B., Aluri, P., 2017, "Optimizing the process parameters of electrical discharge machining on AA7075-SiC alloys", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 4, Sayı 8, ss. 8517-8527.
- Praveen, D. V., Raju, D. R., Raju, M. V. J., 2020, "Optimization of machining parameters of wire-cut EDM on ceramic particles reinforced Al-metal matrix composites—A review", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 23, ss. 495-498.
- Rakshit, R., Das, A. K., 2019, "A review on cutting of industrial ceramic materials", *Precision Engineering*, Cilt 59, ss. 90-109.
- Rao, R. V., Kalyankar V., 2014, "Optimization of modern machining processes using advanced optimization techniques: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt 73, Sayı 5, ss. 1159-1188.
- Rona, N., Yenisey, M., Kucukturk, G., Gurun, H., Cogun, C., Esen, Z., 2017, "Effect of electrical discharge machining on dental Y-TZP ceramic-resin bonding", *Journal of prosthodontic research*, Cilt 61, Sayı 2, ss. 158-167.



- Samanta, S., Chakraborty S., 2011, "Parametric optimization of some non-traditional machining processes using artificial bee colony algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Cilt 24, Sayı 6, ss. 946-957.
- Saravanan, S., Balan, A. V., Dinesh, S., Vijayan, V., 2020, "Electrochemical machining behaviour of AA6063-TiC composites by using response surface methodology", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 592-594.
- Sayar, İ., 2017, "Seramik Tarihçe & Teknoloji & Uygulama", 1. Baskı, Gazi Kitapevi, Ankara, Türkiye.
- Schüler, M., Herrig, T., Bergs T., 2022, "A Study on Abrasive Waterjet Multi-Stage Machining of Ceramics", *Procedia CIRP*, Cilt 108, Sayı 6, ss. 770-775.
- Selvarajan, L., Rajavel, R., Prakash, B., Mohan, D. G., Gopi, S., 2020, "Investigation on spark electrical discharge machining of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based advanced conductive ceramic composites", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 27, ss. 2174-2178.
- Shaikh, J. H., Jain, N. K., 2014, "Modeling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process", *Journal of Materials Processing Technology*, Cilt 214, Sayı 2, ss. 200-209.
- Shanbhog, N., Arunachalam N., Bakshi S R., 2022, "Surface Integrity Studies on ZrB<sub>2</sub> and Graphene Reinforced ZrB<sub>2</sub> Ceramic Matrix Composite in EDM Process", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Cilt 38, ss. 401-413.
- Shibin, R., Anandakrishnan, V., Sathish, S., Sujana, V. M., 2020, "Investigation on the abrasive water jet machinability of AA2014 using SiC as abrasive", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 519-522.
- Singh, R. P., Kataria, R., Kumar, J., Verma, K., Chaudhary, B., Singh, S., 2020, "Investigation of Process Responses in Rotary Ultrasonic Machining of Al/SiC Composite Through Designed Experiments", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 21, ss. 2043-2052.
- Srikanth, D., Rao M. S., 2015, "Application of Taguchi & response surface methodology in optimization for machining of ceramics with abrasive jet machining", *Materials Today: Proceedings*, Cilt 2, Sayı 4-5, 3308-3317.
- Swift, K., Booker J., 2013, *Manufacturing process selection handbook*, Butterworth-Heinemann, Waltham, Massachusetts, USA.
- Wang, J., Feng, P., Zhang, J., Guo, P., 2018a, "Experimental study on vibration stability in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: cutting force variation at hole entrance," *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 12, ss. 14386-14392.
- Wang, J., Zhang, J., Feng, P., Guo, P., 2018b, "Damage formation and suppression in rotary ultrasonic machining of hard and brittle materials: a critical review", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 2, ss. 1227-1239.
- Wang, L., Huang, C., Wang, J., Zhu, H., Liang, X., 2018c, "An experimental investigation on laser assisted waterjet micro-milling of silicon nitride ceramics", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 5, ss. 5636-5645.
- Wang, M., Zhao, G., He, N., Ma, L., Li, L., 2019, "Study on oxidation behavior of spark plasma sintered TiB<sub>2</sub>SiC ceramic under laser irradiation", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 7, ss. 8477-8485.
- Xing, Y., Liu, L., Wu, Z., Wang, X., Huang, P., Tang, L., 2018, "Fabrication and characterization of micro-channels on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic produced by nanosecond laser", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 18, ss. 23035-23044.
- Xue, F., Zheng, K., Liao, W., Shu, J., Miao, D., 2021, "Experimental investigation on fatigue property at room temperature of C/SiC composites machined by rotary ultrasonic milling", *Journal of the European Ceramic Society*, Cilt 41, Sayı 6, ss. 3341-3356.
- Yu, T., Zhang, Z., Liu, Q., Kuliiev, R., Orlovskaya, N., Wu, D., 2020, "Extrusion-based additive manufacturing of yttria-partially-stabilized zirconia ceramics", *Ceramics International*, Cilt 46, Sayı 4, ss. 5020-5027.

- Zhang, C., Liang, Y., Cui, Z., Meng, F., Zhao, J., Yu, T., 2022a, "Study on the Effect of Ultrasonic Vibration-Assisted Polishing on the Surface Properties of Alumina Ceramic", *Ceramics International*, Cilt 48, ss. 21389–21406.
- Zhang, L., Huang, Z., Liu, Y., Shen, Y., Li, K., Cao, Z., ..., Jian, Y., 2019, "Effect of Ni content on the microstructure, mechanical properties and erosive wear of Mo<sub>2</sub>NiB<sub>2</sub>-Ni cermets", *Ceramics International*, Cilt 45, Sayı 16, ss. 19695-19703.
- Zhang, M., Pang, Z., Jia, Y., Shan, C., 2022b, "Understanding the Machining Characteristic of Plain Weave Ceramic Matrix Composite in Ultrasonic-Assisted Grinding", *Ceramics International*, Cilt 48 Sayı 4, ss. 5557–5573.
- Zhang, Y., Liu, D., Zhang, W., Zhu, H., Huang, C., 2022c, "Hole Characteristics and Surface Damage Formation Mechanisms of Cf/SiC Composites Machined by Abrasive Waterjet", *Ceramics International*, Cilt 48, Sayı 4, ss. 5488–5498.
- Zhao, J., Wong, K. S., Shrotriya, P., 2017, "Hybrid CO<sub>2</sub> laser waterjet heat (LWH) treatment of bindered boron nitride composites with hardness improvement", *Ceramics International*, Cilt 43, Sayı 11, ss. 8031-8039.
- Zhou, C., Wu, X., Lu, Y., Wu, W., Zhao, H., Li, L., 2018, "Fabrication of hydrophobic Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> surface with micro-grooved structures by wire electrical discharge machining", *Ceramics International*, Cilt 44, Sayı 15, ss. 18227-18234.