



ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY OF ESKİŞEHİR OSMANGAZI UNIVERSITY

Yıl / Year : 2023

Cilt / Volume : 31

Sayı/ Issue : 2

e-ISSN : 2630 - 5712





T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY
OF ESKİŞEHİR OSMANGAZİ UNIVERSITY



YIL/YEAR : 2023

CİLT/VOLUME : 31

SAYI/ISSUE : 2



T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



SAHİBİ / OWNER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Adına
Prof. Dr. Muammer KAYA
Dekan

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Haldun KURAMA (hkurama@ogu.edu.tr)

EDİTÖR YADIMCISI / ASSOCIATE EDITOR

Prof. Dr. Melih İPHAR (miphar@ogu.edu.tr)

ALAN (BÖLÜM) EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS

Bölüm / Department	Adı ve Soyadı / Name
Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Esra N. YOLAÇAN yolacan@ogu.edu.tr
Biyomedikal Mühendisliği Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Sultan BÜTÜN ŞENGEL sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical-Electronics Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ gdindis@ogu.edu.tr
Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering	Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK fdurmaz@ogu.edu.tr
İnşaat Mühendisliği Civil Engineering	Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN ozbasaran@ogu.edu.tr
Jeoloji Mühendisliği Geology Engineering	Prof. Dr. Selahattin KADİR skadir@ogu.edu.tr
Kimya Mühendisliği Chemical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Uğur SELENGİL uselen@ogu.edu.tr
Maden Mühendisliği Mining Engineering	Prof. Dr. Sabiha KOCA skoca@ogu.edu.tr
Makine Mühendisliği Mechanical Engineering	Prof. Dr. Haydar ARAS haras@ogu.edu.tr
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metallurgical and Materials Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Ersu LÖKÇÜ elokcu@ogu.edu.tr
Mimarlık Architecture	Doç. Dr. Başak GÜÇYETER basakgucyeter@gmail.com
Uçak Mühendisliği Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN mkushan@ogu.edu.tr
Yazılım Mühendisliği Software Engineering	Dr. Öğr. Üyesi İlker ÖZÇELİK ilker.ozcelik@ogu.edu.tr



ÖN DEĞERLENDİRME / PRE-CONTROL

Bölüm	Adı ve Soyadı
Bilgisayar Müh. / Computer Engineering	Araş. Gör. Dr. Zuhal TEPECİK CAN zcan@ogu.edu.tr
Biyomedikal Mühendisliği/Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Yapıncak GÖNCÜ yapincak.goncu@ogu.edu.tr
Elektrik ve Elektronik Müh. / Electrical-Electronics Engineering	Araş. Gör. Dr. İpek ÇETİNBAŞ ipekcetinbas@ogu.edu.tr
Endüstri Müh. / Industrial Engineering	Araş. Gör. Aslıhan KARAŞ aslihan.karas@ogu.edu.tr
İnşaat Müh. / Civil Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Meltem ERYILMAZ YILDIRIM meryilmaz@ogu.edu.tr
Jeoloji Müh. / Geology Engineering	Araş. Gör. Duru CESUR daral@ogu.edu.tr
Kimya Müh. / Chemical Engineering	Araş. Gör. Fırat YILMAZ firat.yilmaz@ogu.edu.tr
Maden Müh. / Mining Engineering	Dr. Öğr. Üyesi H. Serkan GÖKCEN sgokcen@ogu.edu.tr
Makine Müh. / Mechanical Engineering	Araş. Gör. Hakan SERTEL hsertel@ogu.edu.tr
Metalurji ve Malzeme Müh. / Metallurgical and Materials Engineering	Araş. Gör. Dr. Işın AKAY ERDOĞAN iakay@ogu.edu.tr
Mimarlık/Architecture	Doç. Dr. Başak GÜÇYETER basakgucyeter@ogu.edu.tr
Uçak Mühendisliği/Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN mkushan@ogu.edu.tr
Yazılım Mühendisliği/Software Engineering	Araş. Gör. Sergen AŞIK sergen.asik@ogu.edu.tr



YAYIN KURULU / PUBLISHING EDITORS

Adı ve Soyadı / Name	Bölüm / Department
Prof. Dr. Haldun KURAMA	Editör, ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Melih İPHAR	Editör Yrd., ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Dr. Öğr. Üyesi Esra Nergis YOLAÇAN	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Gültekin ÖZDEMİR	SDÜ Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ISPARTA
Doç. Dr. Cenk KARAKURT	Bilecik Şeyh Edebali Üniv. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü BİLECİK
Prof. Dr. Selahattin KADİR	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY	Bilecik Şeyh Edebali Üniv. Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü BİLECİK
Prof. Dr. Sabiha KOCA	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Ramazan KÖSE	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü KÜTAHYA
Dr. Öğr. Üyesi S. Mine TOKER	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü ESKİŞEHİR



EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

-
- A. Hakan Benzer, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, benzer@hacettepe.edu.tr
Barbara Tora, AGH University of Science and Technology in Kraków, Poland, tora@agh.edu.pl
Buket D. Barkana, University of Bridgeport, Bridgeport, Connecticut, ABD, bbarkana@bridgeport.edu
Cafer Çelik, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, ccelik@atauni.edu.tr
Cahit Helvacı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, cahit.helvaci@deu.edu.tr
Cemal Baykara, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, baykaracem@itu.edu.tr
Cengiz Dünder, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, dunder@cu.edu.tr
Demircan Canadınç, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, dcanadinc@ku.edu.tr
Derviş Karaboğa, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, karaboga@erciyes.edu.tr
Emin Çiftçi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, eciftci@gmail.com
Fatemeh Azmandian, Dell EMC Hopkinton, Massachusetts, ABD, fatemeh_azmandian@yahoo.com
Fatih Altun, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, faltun@erciyes.edu.tr
Fatih Hocaoğlu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, hocaoglu@aku.edu.tr
Gürsoy Arslan, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, garslan@anadolu.edu.tr
Habil. Ali Cemal Benim, Duesseldorf University, Duesseldorf, Almanya, alicemal.benim@hs-duesseldorf.de
Hatem Akbulut, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, akbulut@sakarya.edu.tr
Kadri Dağdelen, Colorado School of Mines, Colorado, ABD, kdagdelen@mines.edu
L. Antonio Estévez, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico, antonio.estevez@upr.edu
Manuel Pozo Rodríguez, Universidad Autónoma of Madrid, İspanya, manuel.pozo@uam.es
Mehmet Saltan, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, mehmetsaltan@sdu.edu.tr
Ömer Nezhir Gerek, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ongerek@eskisehir.edu.tr
Paul A. Schroeder, University of Georgia, ABD, schroe@uga.edu
Rasim İpek, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, rasim.ipek@ege.edu.tr
Serpil Erol, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, serpiller@gazi.edu.tr
Şadan Kelebek, Queen's University, Kanada, sadan.kelebek@queensu.ca
Şeref Sağıroğlu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, ss@gazi.edu.tr
Yasemin Serin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, serin@metu.edu.tr
Yüksel Avcıbaşı Güvenilir, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, avcibasi@itu.edu.tr
Zeki Aktaş, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, zaktas@eng.ankara.edu.tr
-



Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, bilim ve teknolojideki son gelişmeleri aktarmak amacıyla;

- ❖ Bilgisayar Mühendisliği
- ❖ Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- ❖ Endüstri Mühendisliği
- ❖ İnşaat Mühendisliği
- ❖ Jeoloji Mühendisliği
- ❖ Kimya Mühendisliği
- ❖ Maden Mühendisliği
- ❖ Makine Mühendisliği
- ❖ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- ❖ Mimarlık
- ❖ Uçak Mühendisliği
- ❖ Yazılım Mühendisliği

dallarında; *kuramsal ve uygulamalı araştırma ile tarama* niteliklerinde makaleler yayımlamayı amaçlayan disiplinler arası ve hakemli bir dergidir. Dergi, belirtilen mühendislik branşlarında hızla gelişen alanlarına ilişkin çalışmalarını ulaştırmayı amaçlamaktadır.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi ilk olarak **1986 yılında** "Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi" olarak yayın hayatına başlamıştır. 1993 ve 2005 yıllarında yapılan isim değişiklikleri sonrasında, üniversitemiz adının "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi" olması nedeniyle derginin adı da "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi" (ISSN: 1301-045x) haline gelmiştir.

Dergi yılda 2 sayı olarak yayımlanmış olup 2012 yılı sonunda yayın hayatına ara vermiştir.

2018 yılından itibaren e-Dergi olarak yayın hayatına tekrar başlamıştır.

Dergi hakkında ayrıntılı bilgiler

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

web sayfasında verilmiştir.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi yılda 3 sayı olarak yayımlanmaktadır.

Bu sayılara ek olarak Editörler Kurulu'nun kararıyla, fakültemiz bölümleri tarafında yürütülen bir kongrede sunulan bildiriler "Özel Sayı" olarak yayımlanabilmektedir.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is a multidisciplinary and peer-reviewed journal in engineering. The journal is not limited to a particular aspect of science and engineering, but is instead devoted to a wide range of areas in engineering. The journal aims to publish high quality papers in the areas of:

- ❖ Computer Engineering
- ❖ Electrical-Electronics Engineering
- ❖ Industrial Engineering
- ❖ Civil Engineering
- ❖ Geology Engineering
- ❖ Chemical Engineering
- ❖ Mining Engineering
- ❖ Mechanical Engineering
- ❖ Metallurgical and Materials Engineering
- ❖ Architecture
- ❖ Aeronautical Engineering
- ❖ Software Engineering

This journal publishes original theoretical and empirical research papers as well as review papers and case studies related to these areas of engineering. High quality submissions are welcome from academics, researchers, and practitioners.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University was first launched in 1986. After the name of the journal changed in both 1993 and 2005, consequently, the name is "The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University" (ISSN: 1301-045x). The journal was published as 2 issues per year until the end of 2012, then publication of the journal is suspended between 2012-2017.

It has resumed its publication life as an online journal in 2018.

Additional information for the journal is given at web page :

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is published as 3 issues per year.

In addition to the regular issues, proceedings of the conferences which are organized by our university are published as special issues depending upon the decision of the Editorial Board.



T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ



e-ISSN : 2630 - 5712

Dergi, halen, aşağıda verilen indeksler tarafından taranmaktadır.

The journal is currently indexed in the following databases.



[TR Dizin](#)



[SOBIAD](#)



[EBSCO Host](#)



[Index Copernicus](#)



[DOAJ \(Directory of Open Access Journals\)](#)



[BASE](#)



[WorldCat](#)



İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfa

- Emet-Hisarcık (Kütahya) Bölgesi Kilinin Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri ve Kolemanit Zenginleşmesine Etkisi** 610 – 619
Mineralogical and Geochemical Properties of Clay of Emet-Hisarcık (Kütahya) Region and Its Effects on Colemanite Enrichment
Zehra Ebru SAYIN, Tülay ALTAY, Hacer ŞENSÖZ
- Sarsma Tablası Test Modelinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri İle Seçilmesi: Bir Uygulama** 620 – 629
Selecting the Shaking Table Test Model Using Multi-Criteria Decision Making Methods: An Application
Handan KÜNKÜ, Osman AYTEKİN, Hakan KUŞAN
- Seri Üretim Hatlarında Güvenilirlik Analizi İle Durumsal Farkındalığın Artırılması** 630 – 643
Raising Situational Awareness With Reliability Analysis on Serial Production Lines
Diler ÖZ, Rifat EDİZKAN, Ahmet YAZICI
- İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Radyatörlerin Tasarımı İçin Bir Matematik Model Geliştirilmesi Ve Uygulaması** 644 – 662
The Development of a Mathematical Model for The Design of Internal Combustion Engine Radiators and Implementation
Halit KARABULUT, Regaip MENKÜÇ, A. Onur ÖZDEMİR, Emre YILDIRIM
- Yeraltı Maden İşletmelerindeki Meslek Gruplarının Gürültü Maruziyetinin Belirlenmesi** 663 – 674
Determination of Noise Exposure of Occupational Groups in Underground Mining Enterprises
Şahin YUVKA, Önder UYSAL, Serkan DOLĞUN
- Analysis of Raft Foundation on Sandy Soils by Winkler and Pseudo-Coupled Methods** 675 – 688
Kumlu Zemin Üzerindeki Radye Temellerin Winkler ve Psüdo-Eşlenik Yöntemleri İle Analizi
İlyas ÖZKAN, Yavuz YENGİNAR, Ali Serdar ECEMİŞ
- Havacılıkta Kullanılan Bazı Süperalaşımın Yüksek Sıcaklık Gaz Oksitlenme Davranışlarının Karşılaştırılması** 689 – 697
Comparison of High-Temperature Gas Oxidization Behaviors of Some Superalloys Used in Aviation
Hacer Bahar BİLGİÇ ÖZEN, Uğur Gökşen HALICI, İlyas BAYRAK, Neşe ÖZTÜRK KÖRPE
- Synthesis and Characterization of High Entropy Oxy-Hydroxides for Electrocatalytic Oxygen Evolution and Reduction Reactions** 698 – 704
Yüksek Entropili Oksi-Hidroksitlerin Üretilmesi, Karakterizasyonu ve Oksijen Çevrim Reaksiyonu Elektro Katalizörü Olarak Uygulanması
Cigdem TOPARLI
- Yataya Yakın Kalın Kömür Damarlarında Damar Eğiminin Uzunayak Yöntem Verimliliğine Etkisinin Fiziksel Model İle Araştırılması** 705 – 717
Investigation of The Effect of Seam Inclination on Longwall Method With a Physical Model in Thick Coal Seams Close to Horizontal
Arif ÇELİK



Araştırma Makaleleri / Research Articles

Sayfa

Göz Kırpma Tespiti İçin Yeni Bir Uyarlamalı Eşik Değeri Algoritması

718 – 728

A New Adaptive Threshold Algorithm for Eyeblink Detection

Nur Yasin PEKER, Ahmet Zengin, Çiğdem EROĞLU ERDEM, Mert Süleyman DEMİRSOY

GDSC Verilerini Kullanarak Yapay Öğrenme Yöntemleri İle Akciğer Kanseri İçin Hedef İlaç ve Yolak Tahmini

729 – 736

Prediction of Target Drugs and Traditions for Lung Cancer With Machine Learning Methods Using GDSC

Abdullah TERCAN, Gıyasettin ÖZCAN

Taş Ocağı Artık Malzemesinin Yol Dolgusu, Alt ve Üst Temel Malzemesi Olarak Uygunluğunun Değerlendirilmesi

737 – 745

Evaluation of The Suitability of Rock Quarry Residue As Road Fill, Subgrade and Subbase Material

Beyza ÖZULU, Gökhan ÇEVİKBİLEN, Berrak TEYMÜR

GMAW Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmiş Farklı Paslanmaz Çeliklerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Kullanılan İlave Telin Etkisinin İncelenmesi

746 – 759

Investigation of The Effect of The Additional Wire Used on The Mechanical and Microstructural Properties of Different Stainless Steels Joined By GMAW Welding Method
Ali YÜRÜK

EMET-HİSARCIK (KÜTAHYA) BÖLGESİ KİLİNİN MİNERALojİK VE JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİ VE KOLEMANİT ZENGİNLEŞTİRMESİNE ETKİSİ

Zehra Ebru SAYIN^{1*}, Tülay ALTAY² Hacer ŞENSÖZ³

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1949-3127>

² Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-3526-6717>

³ Pamukkale Üniversitesi Kale Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Kale/Denizli, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-2173-8974>

Anahtar Kelimeler	Öz
Bor, Lityum, Eti Maden, Kil, Saponit	<i>Çok karmaşık bir proses gerektirmeyen kolemanit zenginleştirme tesislerinden, üretim esnasında ve sonunda büyük potansiyel kaynak oluşturan kil içerikli atıklar çıkmaktadır. Bu çalışmada, Eti Maden Emet Bor İşletmesi Hisarcık kolemanit zenginleştirme tesisi katı atık killerinden alınan örneklerin kimyasal içerikleri incelenmiş ve mevcut kilin yapısal formülü tespit edilmiştir. 45 mikron tane boyutu altında kil içerikli atık %12,42 Mg ve 2352 ppm Li tenörüne sahiptir. Mg'ca zengin Li'lu bir simektit (saponit) olarak bilinen kilin su tutucu olma niteliği nedeniyle de kolemanit zenginleştirme prosesinde cevherden kilin uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Yapılan kil ayırma çalışması sonuçları değerlendirildiğinde, elde edilen saf kilin %46,82 SiO₂ ve %19,67 MgO tenörleri ile oldukça yüksek içeriğe sahip olmasının yanısıra 1776 ppm Sr, 3057 ppm As ve 2239 ppm Li tenörleri ile değeri daha da artmaktadır. Kil içerikli katı atığın saponit olması ve lityum içermesi endüstriyel kıymetini daha da arttırmaktadır. Kil içerikli katı atıkların, uygun strateji ve değerlendirme yöntemleriyle cevherden ayrılması ve ekonomiye kazandırılmasının önem taşıdığı belirlenmiştir.</i>

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL PROPERTIES OF CLAY OF EMET-HİSARCIK (KÜTAHYA) REGION AND ITS EFFECTS ON COLEMANITE ENRICHMENT

Keywords	Abstract
Boron, Lithium, Eti Mine, Clay, Saponite	<i>Clay-containing wastes, which constitute a great potential resource, come out during and at the end of production from colemanite beneficiation plants, which do not require a very complex process. In this study, the chemical contents of the samples taken from the solid waste clays of the Eti Maden Emet Boron Operations Directorate Hisarcık colemanite beneficiation plant were examined and the structural formula of the existing clay was determined. Clay-containing waste under 45 micron grain size has 12.42% Mg and 2352 ppm Li grade. Due to the water-retaining nature of the clay known as a Mg-rich Li smectite (saponite), it makes it difficult to remove the clay from the ore in the colemanite beneficiation process. When the results of the clay separation study are evaluated, the pure clay obtained has a very high content with 46.82% SiO₂ and 19.67% MgO grades, and its value increases even more with 1776 ppm Sr, 3057 ppm As and 2239 ppm Li grades. The fact that the clay-containing solid waste is saponite and contains lithium further increases its industrial value. It has been determined that it is important to separate the clay-containing solid wastes from the ore with appropriate strategies and evaluation methods and to bring them into the economy.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 02.11.2022

: 28.04.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 02.11.2022

: 28.04.2023

* Sorumlu yazar: zerkan@aku.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1198338>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olan Türkiye'de bilinen bor yatakları; Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek'te olmakla birlikte (Türkiye'nin Yükselen Değeri: Bor, 2022), en yaygın rezervleri tinkal ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) oluşturmaktadır. Bor mineralleri ile birlikte genellikle simektit kil mineralleri bulunmaktadır. Türkiye'deki bor havzaları içerik olarak incelendiğinde, borat yataklarındaki killerde % 0,17 ile % 0,58 tenör aralığında Li_2O olduğu ve bor yataklarında baskın olarak kil minerallerine bağlı (hektorit tipi simektitler) bulunduğu belirtilmiştir (Helvacı, 2018; Helvacı, Mordoğan, Çolak ve Gündoğan, 2004). Emet-Hisarçık kolemanit yatağında yapılan incelemede ise kil minerallerinin %60-90 oranında simektit (Li içerikli saponit) olduğu tespit edilmiştir (Çolak, 1995; Çolak, 1997). Çolak, Helvacı ve Maggetti (2000) çalışmalarında Hisarçık ve Espey simektitlerinin Li içerikli saponit olduğunu, Hisarçık bölgesinin % 0,56-0,58 Li_2O tenör aralığında bulunduğunu, Espey bölgesinin ise Li_2O değerinin % 0,24-0,60 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Killerin yanısıra içerikte kalsit ve dolomit gibi karbonatlar da bulunmaktadır. Bununla birlikte, lityumun alkali bir element olması doğada serbest olarak bulunmasını engellemektedir (Garrett, 2004). Genellikle iyonik bileşikler halinde yerleşmektedir (Krebs, 2006).

Killerin yüksek hızlı karıştırıcılar vasıtası ile cevherden ve birbirlerinden ayrılabilir özellikte olması nedeniyle birçok endüstri dalında kullanım alanı bulan bor cevherlerinden kil minerallerinin uzaklaştırılması yıkama-dağıtma ve boyuta göre sınıflandırma yöntemi ile yapılmaktadır. Cevherin oluşumu ve zenginleştirme yöntemlerine bağlı olarak ortaya çıkan atıkların miktarı değişmektedir. İri boyutlarda bu yöntemler ile nispeten yüksek verimli bor konsantrasi elde edilirken, 3 mm altında bor verimi oldukça düşmektedir ve kil mineralleri bu grupta toplanarak atık barajlarına gönderilmektedir. Erkan, Akar ve Savaş (2004); Erkan, Akar ve Savaş (2003); Yazar (1973), çalışmalarında 3 mm altı baraj atıklarından borun geri kazanımında başlangıçta suda bekletme ve ardından yüksek hızlı mekanik karıştırıcıda kil açmanın gerekliliğine vurgu yapmışlardır.

Emet- Hisarçık konsantratör tesisinden zenginleştirme çalışmaları sırasında üç farklı çıkıştan atık ayrılmaktadır. Bu çıkışlar proses sırasına göre -25 mm kalibreli elek atığı, triyaj atığı ve yıkama ve sınıflandırma sonucu oluşan -3 mm boyutundaki baraj atığıdır. Bu atıkların içerisinde lityum, rubidyum ve sezümler elementlerinin varlığı çeşitli araştırmalarda incelenmiştir (Erdoğan, Aksu, Demirbaş ve Abalı, 1998; Helvacı ve diğ., 2004; Mordoğan ve Helvacı, 1994; Şensöz, Sayın, Savaş ve Erdoğan, 2021). Araştırmalarda atık barajlarının, katı atık stoklarının ve bundan sonra

oluşacak stokların teknik, ekonomik, çevresel yönden değerlendirilmesinin mümkün olduğu da belirtilmiştir. Bu çalışmalar ile, katı atıkların kil içeriği bakımından zengin oluşu nedeniyle kullanımının sağlanmasına yönelik çeşitli araştırmalarında yapılmakta olduğu bilinmektedir (Chanturiya, Minenko, Makarov, Suvorova ve Selivanova, 2018; Şensöz ve diğ., 2021; Zhoua, Zhoua, Wua, Petitd, Jianga, Xiaa, Lib ve Yua, 2019). Atıkların uygun şekilde depolanması ve kullanılması ile stoklamadan doğan sorunlar ve stoklama maliyeti azalacaktır. Atıkların kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi ve ekonomiye katma değeri artırılarak verilmesinin yeni kazançlar sağlayacağı açıktır. Bu nedenle killerin içerik bakımından detaylı şekilde incelenmesi büyük önem arz etmektedir. İnce boyuttaki kilin özellikle kolemanitten uzaklaştırılması, kullanım alanlarının belirlenmesi ve zenginleştirme çalışmaları azdır. Bu amaçlarla belirlenen çalışma kapsamında, Eti Maden İşletmeleri Emet Bor İşletme Müdürlüğü Hisarçık bölgesi konsantratör tesisi kalibreli eleğinin -25 mm katı atığı incelenerek, kolemanit ile birlikte bulunan kil mineralleri, zenginleştirme prosesine etkisi ve kimyasal içerik bakımından nadir toprak elementlerinin özellikle de lityumun varlığı araştırılmıştır.

2. Materyal Yöntem

Hisarçık açık işletmesinden elde edilen ortalama % 28,50 B_2O_3 tenör değerine sahip tüvenan cevher, açık işletme yakınında bulunan Hisarçık konsantratör tesisinde zenginleştirilmektedir. Kil içeriği ileriki çalışmalarda kullanılmak üzere değerlendirildiğinden tesisten alınacak en uygun ve süreklilik sağlayacak mevkinin konsantratör girişinde yer alan kalibreli elekten geçerken ayrılan 25 mm tane boyutu altında kalan katı atık olacağı kanaatle kalibreli elek altında biriken stoktan tarama metoduyla numune alınmıştır. Bu katı atık numunesi %13,6 B_2O_3 içermektedir.

Atığın toplam kaya kimyasal analizi yapıldıktan sonra, yaş elek analizi yapılarak tane boyut dağılımına bağlı tenör değişimleri incelenmiştir. B_2O_3 analizi dışındaki tüm kimyasal analizler ACME Laboratuvarında (Kanada) 4 asit liçi ile ICP-ES/ICP MS cihazı ile MA270 analiz kodu kapsamında yaptırılmıştır. Numunenin B_2O_3 kimyasal analizleri ise Eti Maden Analiz Laboratuvarlarında standart analiz metodu ile tespit edilmiştir.

Atığın tüm kaya XRD mineralojik analizi Afyon Kocatepe Üniversitesinde Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM) laboratuvarında yaptırılmıştır. Analizlerin değerlendirilmesi sonucu kil mineral içeriği yüksek olan katı atığın kil ayrımı yapıldıktan sonra saf kil örnekleri üzerinde kil boyu mineralojik bileşimin belirlenmesi için kil çekimi (Normal, etilen glikollü ve 550°C de fırınlanmış)

yapılmıştır ($2\theta=2^{\circ}-30^{\circ}$). X-ışınları çözümlenmeleri Shimadzu 6000 model ve Bruker D8 Advance X-ışınları difraktometreleri kullanılarak, mineral tanımlamaları ise JCPDS (1993) kartları kullanılarak yapılmıştır.

Kil ayrımı yapıldıktan sonra numunenin kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla ana, iz ve nadir toprak element analizleri ACME Laboratuvarında (Kanada) CLYSP analiz kodu ile kil ayırma ve aseton ile yıkayarak elle toz haline getirme işleminin ardından 4 asit liçi ile ICP-ES/ICP MS cihazında MA270 analiz kodu ile yaptırılmıştır. Saf kil örneğinin kimyasal analizlerinden itibaren yapısal formülü hesaplanmıştır.

Seçilen örneklerin Afyon Kocatepe Üniversitesi TUAM laboratuvarında LEO VP-1430 model taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri ile minerallerin morfolojileri ve minerallerin ilişkileri, kristal büyüklükleri belirlenmiştir. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri yapılarak minerallerin yarı nicel kimyasal bileşimleri tespit edilmiştir. Örneklerin yüzey nemi uzaklaştırıldıktan sonra mineral görüntülerinin daha net olması amacıyla altın ile kaplatılmıştır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

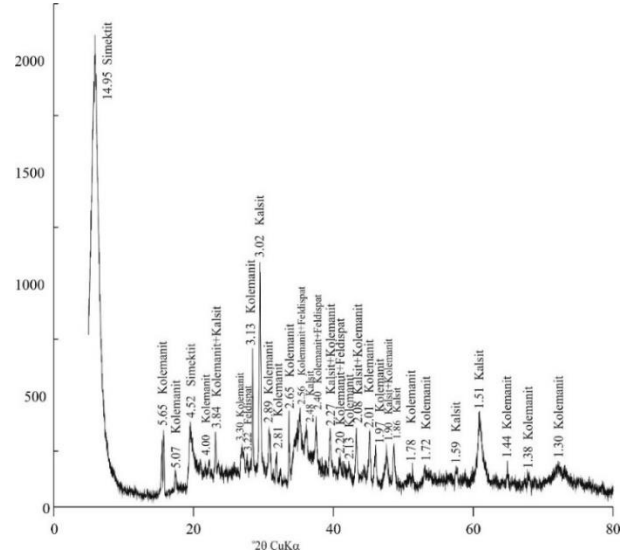
3. Bulgular

Tüm kaya XRD analizi sonucunda örneğin kolemanit ile önemli miktarda kalsit, simektit ve feldispat içerdiği belirlenmiştir (Şekil 1). Kolemanit mineralinin X-ışınları çalışmaları sonucu 3.13 \AA da karakteristik oldukça şiddetli ve kristalinitesi yüksek olan bir piki gözlenmiştir. Ayrıca kolemanit minerali için tipik olan diğer pikler 5.65 \AA , 5.07 \AA , 4.00 \AA , 3.84 \AA , 3.30 \AA , 2.89 \AA , 2.81 \AA , 2.65 \AA , 2.56 \AA , 2.40 \AA , 2.27 \AA , 2.20 \AA , 2.13 \AA , 2.08 \AA , 2.01 \AA , 1.97 \AA , 1.90 \AA , 1.78 \AA , 1.72 \AA , 1.44 \AA , 1.38 \AA ve 1.30 \AA daki pikleridir (Şekil 1). Belirtilen piklerin yanı sıra 3.02 \AA , 3.84 \AA , 2.48 \AA , 2.27 \AA , 2.08 \AA , 1.90 \AA , 1.86 \AA , 1.59 \AA ve 1.51 \AA da gelişen kalsit mineralinin tipik pikleri ile 3.22 \AA da feldispat mineraline ait pikler bu minerallerin tanımlanmasında kullanılmıştır. Simektit mineralinin 14.95 \AA ve 4.52 \AA da pikleri gözlenmiştir.

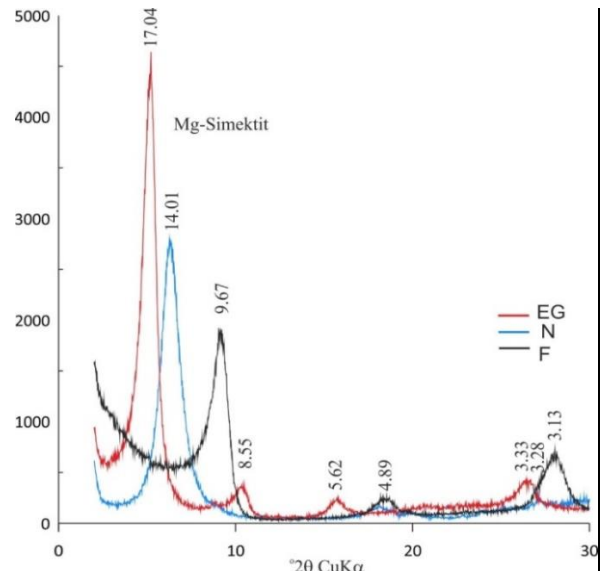
Örneğin kil boyu mineralojik analiz sonuçları incelendiğinde içeriğinin Mg simektit olduğu tespit edilmiştir. İncelenen örneklerde simektitlerin normal çekimlerinde 14.01 \AA da, etilen glikollü çekimlerinde 17.04 \AA da, fırınlanmış çekimlerinde 9.67 \AA da pik verdiği gözlenmiştir (Şekil 2).

Yapılan ön çalışmalarda 4 mm tane boyutu üstünde numunenin %18'inin kaldığı ve bu kısmın %30 B_2O_3 tenörlü olduğu tespit edilmiştir (Şensöz ve diğ., 2021). Bor oksit değerinin yüksek ve değerlendirilebilir olması nedeniyle numune önce suda bekletilmiş ardından yaş elenerek 4 mm tane boyutu üstünde kalan malzeme, düşük tenörlü konsantre olarak ayrılmıştır. 4 mm tane boyutu altında kalan killi kısmın mekanik

karıştırıcıda açma/dağıtma çalışmaları ile devam edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında elenerek 4 mm tane boyutu altına geçen numunenin B_2O_3 tenörü %10 olarak hesaplanmıştır. Belirlenen elek serisinde yaş elek analizine tabi tutularak elde edilen fraksiyonların içerikleri kimyasal analizler ile değerlendirilmiştir. Tablo 1'de 4 mm tane boyutu altına geçen malzemenin elek metal analizi verilmiştir.



Şekil 1. Örneğin Tüm Kaya X-ışınları Difraktogramı (Şensöz ve diğ., 2021)

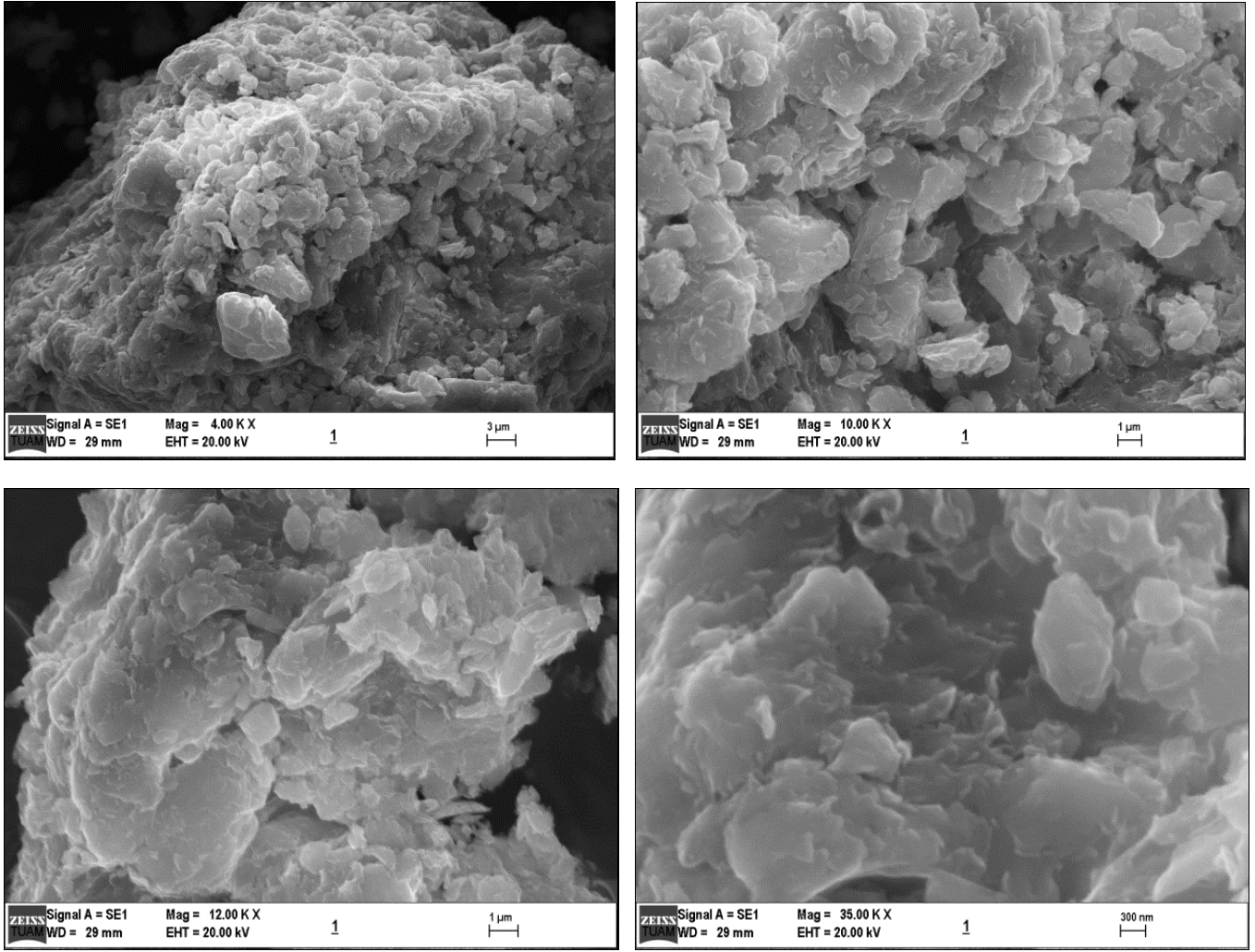


Şekil 2. Örneğin Kil Fraksiyonu X-ışınları Difraktogramı (EG: Etilen Glikollü, N: Normal, F: Fırınlanmış Çekim)

Kimyasal analizler incelendiğinde, numune içerisinde tane boyutu düştükçe lityum, rubidyum, toryum ve magnezyumun tenörlerinin arttığı tespit edilmiştir. Tesisten alınan işlem görmemiş katı atık kilden seçilen örneklerin morfolojisi ve dokusal özellikleri Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) incelenmiştir (Şekil 3).

Tablo 1. Numunenin Elek Metal Tablosu

Tane Fraksiyonu (mm)	Li ppm	Ni ppm	As ppm	Sr ppm	Rb ppm	Sb ppm	Fe %	Mg %	Ti %	Al %	Ca %	S %	Mo ppm	Cu ppm	Pb ppm	Zn ppm	Ag ppm	U ppm	Co ppm	Mn ppm	Th ppm
-4+2	257,2	<0,5	2.393	6.704	16,2	1,3	0,11	1,93	0,009	0,27	24,66	0,46	0,6	8,5	7,6	17	<0,5	1,7	<1	316	0,9
-2+1	344,6	3,1	3.653	6.507	29,9	1,6	0,22	2,46	0,022	0,48	22,99	0,52	<0,5	6,4	9,8	28	<0,5	1,8	<1	336	1,5
-1+0,5	1.097,8	7,2	3.517	5.217	57,3	3,6	0,49	6,65	0,045	0,99	14,43	0,52	0,9	11,6	16,9	45	<0,5	2,1	2	288	3,1
-0,5+0,212	1.914,9	9,5	3.128	3.137	63,6	4,7	0,59	10,45	0,049	1,19	7,88	0,45	0,7	10,5	19,0	46	<0,5	2,2	3	237	3,5
-0,212+0,125	1.767,4	9,9	4.559	3.562	66,9	4,6	0,59	9,46	0,050	1,21	8,90	0,51	0,9	8,4	20,5	56	<0,5	2,2	2	270	3,8
-0,125+0,063	1.661,9	8,7	6.373	3.847	73,6	5,2	0,61	9,02	0,050	1,31	8,97	0,60	1,2	7,9	24,2	72	<0,5	2,2	2	265	4,3
-0,063+0,045	2.181,8	14,9	4.037	2.135	111,4	5,9	0,88	11,65	0,077	1,78	5,32	0,52	1,7	11,8	38,5	129	<0,5	3,0	4	314	5,6
-0,045	2.352,4	13,8	3.362	1.884	116,6	5,8	0,87	12,42	0,077	1,83	4,64	0,50	1,3	10,6	34,8	118	<0,5	2,9	4	300	5,6
BM	1.825,9	18,5	4.095	3.392	81,7	5,20	0,64	9,78	0,055	1,29	8,63	0,55	1,2	8,3	24,9	49	<0,5	2,8	3	278	4,0
Tane Fraksiyonu (mm)	Cd ppm	Bi ppm	V ppm	P %	La ppm	Cr ppm	Ba ppm	Na %	K %	W ppm	Zr ppm	Ce ppm	Sn ppm	Y ppm	Nb ppm	Ta ppm	Be ppm	Sc ppm	Hf ppm	Se ppm	
-4+2	<0,5	<0,5	<10	0,01	2,1	4	140	0,08	0,17	1,6	1,7	<5	<0,5	1,7	0,6	<0,5	<5	1	<0,5	<5	
-2+1	<0,5	<0,5	<10	0,02	3,0	4	172	0,10	0,30	2,2	2,6	6	<0,5	2,6	0,9	<0,5	<5	1	<0,5	<5	
-1+0,5	<0,5	<0,5	15	0,03	4,4	7	199	0,09	0,43	3,4	7,9	8	0,6	3,0	2,1	<0,5	<5	1	<0,5	<5	
-0,5+0,212	<0,5	<0,5	20	0,03	4,3	8	95	0,10	0,45	3,3	11,8	8	0,9	2,6	2,7	<0,5	<5	3	<0,5	<5	
-0,212+0,125	<0,5	<0,5	18	0,04	5,0	10	139	0,12	0,60	4,0	10,7	10	0,7	3,0	2,6	<0,5	<5	1	<0,5	<5	
-0,125+0,063	<0,5	<0,5	21	0,05	7,2	9	176	0,12	0,75	3,9	11,3	13	0,9	3,2	2,5	<0,5	<5	<1	<0,5	<5	
-0,063+0,045	<0,5	0,5	27	0,05	6,9	24	163	0,21	0,97	5,1	15,5	13	2,0	3,6	3,9	<0,5	<5	3	0,5	<5	
-0,045	0,5	<0,5	32	0,05	7,2	12	143	0,20	0,98	5,4	15,1	13	1,7	3,8	4,1	<0,5	<5	2	0,5	<5	
BM	<0,5	<0,5	20	0,04	5,6	17	163	0,04	0,72	4,1	11,6	11	0,9	3,1	2,7	<0,5	<5	2	<0,5	<5	

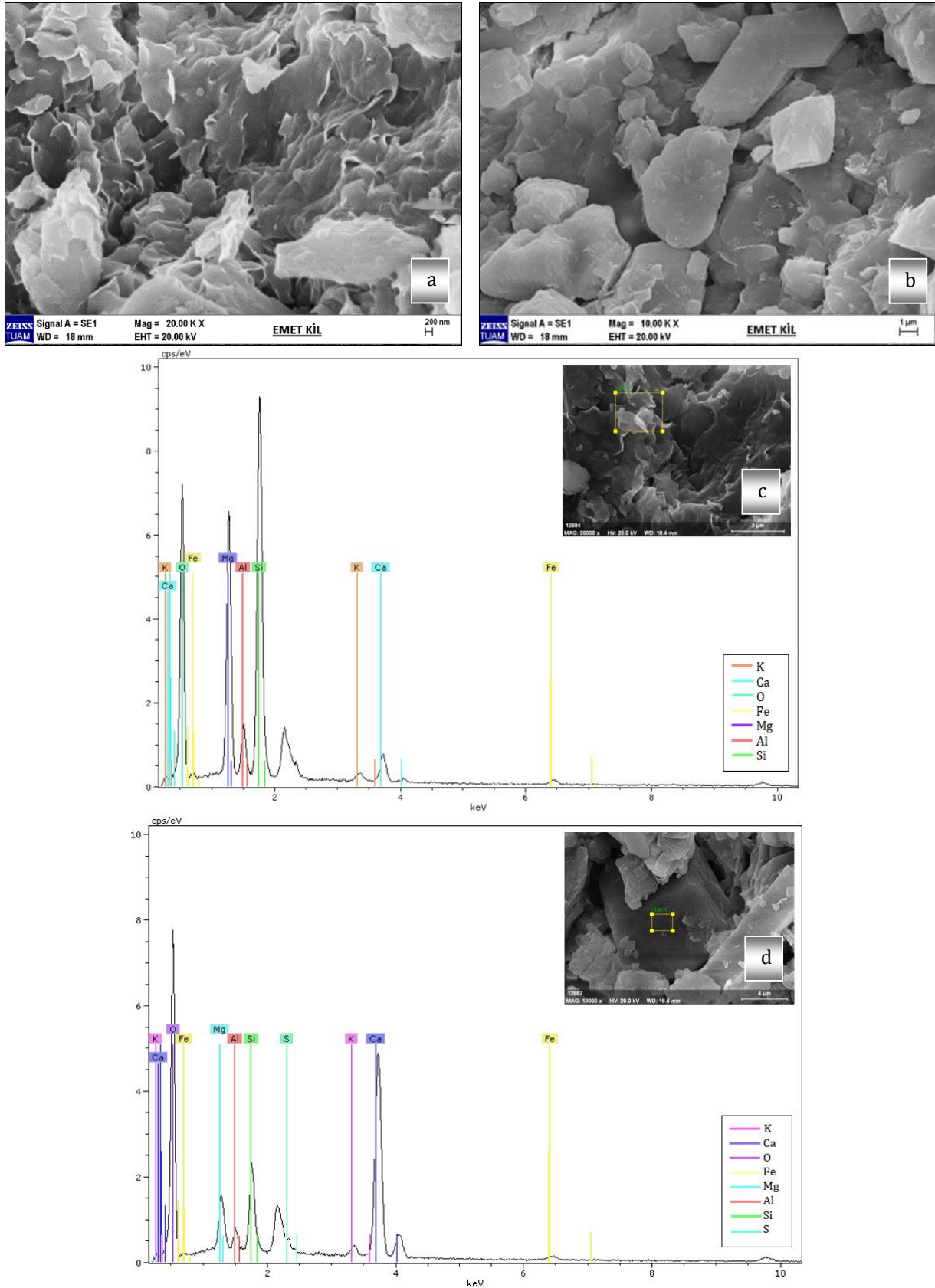


Şekil 3. Numunenin Genel SEM Görüntüleri

Şekil 4'de ise numunenin killeşme görüntüleri ve kristal haldeki kolemanit taneleri görülmektedir. Şekil 4a ve c'de mısır gevreği yapısı gösteren simektitler tespit edilmiştir. Yapılan EDS analizinde simektitin bileşiminde %63,13 SiO₂, %21,19 MgO, %8,81 Al₂O₃, %3,95 CaO, %1,99 Fe₂O₃ ve %0,93 K₂O tespit edilmiştir (Şekil 4c). Yapılan SEM incelemelerinde kolemanitlerin yarı özşekilli, özşekilli, yer yer özşekilsiz, prizmatik kristalleri tespit edilmiştir. Kristal büyüklükleri 0,5 µm ile 6 µm arasında değişmektedir. Kolemanitler de yer yer aşamalı olarak büyüme izleri gözlenmiştir (Şekil 4b ve 4d). Kolemanit üzerinde yapılan bölgesel EDS analizinde %40,84 CaO, %21,49 SiO₂, %17,43 SO₃, %16,40 MgO, %6,13 Al₂O₃, %2,4 Fe₂O₃ ve %1,48 K₂O tespit edilmiştir (Şekil 4d). Bu yarı nicel kimyasal analiz sonuçlarındaki farklılıklar etraftaki kristallerdeki saçınımlardan kaynaklanmaktadır.

Numunenin kil ayırma çalışması ile elde edilen saf kilin kimyasal analiz sonuçları Tablo 2'de, verilmiştir. Kil örneğinin analiz sonuçlarına göre Si ve Mg içeriğinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sr, As ve Li

içeriğininde tüvenan örmekteki gibi yüksek olduğu tespit edilmiştir. Örnekte Rb, Ba ve Cs içeriğinin de yüksek olduğu değerlendirilmiştir. Rb, Ba, Cs, Sr ve Li simektitin tabaka aralarında yer alabilir. Katyon değiştirme kapasitesi, tane boyu ve katyonların özelliğine göre; tek değerlikli katyonlarda Li<Na<K<Rb<Cs sırası, iki değerlikli katyonlarda ise Mg<Ca<Sr<Ba sırası ile artar. Örneğin Li içeriği 2239,4 ppm (%0,224) dir (Tablo 2). Lityum, simektitin tabaka arasına yerleşmiş veya Mg iyonunun yerine geçmiş olmalıdır. Tablo 3'de kil fraksiyonunun ana element bileşimleri ve yapısal formülü hesaplanarak verilmiştir. Tetraedrik süstitüsyon egemen olan kil örneği Mg'ca zengin Li'lu bir simektittir (saponit, Ca_{0,25}(Mg,Fe)₃((Si, Al)₄O₁₀)(OH)₂·nH₂O). Oktahedral tabaka boşlukları genellikle Mg ve daha az miktarda Fe, Al, Li ve Ti ile dengelenir. Tabaka yükü ise tabaka arasında bulunan Na, Ca ve K ile dengelenir. Toplam yük ise -0,84 dür. Saponit nispeten nadir bulunan bir simektit mineralidir. Çolak ve diğ. (2000) bölgede asidik kökenli volkanizma ürünü killerin Mg'ca zengin playa gölünde Mg'ca zengin killere dönüştüğünü söylemektedir.



Şekil 4. a) ve c) Mısır Gevreği Yapısı Gösteren Simektitin Elektron Mikroskop Görüntüsü, c) Ayrıca Simektitin EDS Analizi, b) ve d) Yarı Özşekilli, Özşekilli, Yer Yer Özşekilsiz, Prizmatik Kolemanitin Elektron Mikroskop Görüntüsü, d) Ayrıca kolemanitin EDS Analizi

Tablo 2. Kil Ayırma ile Elde Edilen Kilin Analiz Sonuçları (155,8 g/13,65 g saf kil)

İçerik	Miktar	İçerik	Miktar	İçerik	Miktar
K ₂ O, %	1,03	Ba, ppm	68,00	Se, ppm	<5,00
MgO, %	19,67	Sc, ppm	3,00	S, %	0,45
Fe ₂ O ₃ , %	1,32	Be, ppm	<1,00	Sn, ppm	1,50
Na ₂ O, %	0,04	Co, ppm	3,20	Mo, ppm	1,20
P ₂ O ₅ , %	0,11	Cs, ppm	360,10	Cu, ppm	10,80
SiO ₂ , %	46,82	Ga, ppm	4,20	Pb, ppm	29,50
TiO ₂ , %	0,12	Yb, ppm	0,39	Zn, ppm	38,00
Al ₂ O ₃ , %	3,43	W, ppm	6,10	Ag, ppm	<0,50
CaO, %	6,07	Zr, ppm	17,90	Ni, ppm	15,90
Toplam C, %	2,69	Y, ppm	3,80	Mn, ppm	263,00
Toplam S, %	0,44	La, ppm	6,70	As, ppm	3057,00
U, ppm	3,30	Ce, ppm	12,00	Cd, ppm	<0,50
V, ppm	26,00	Pr, ppm	1,31	Sb, ppm	5,70
Ta, ppm	0,30	Nd, ppm	4,90	Bi, ppm	<0,50
Th, ppm	5,70	Sm, ppm	0,85	Cr, ppm	11,00
Hf, ppm	0,50	Eu, ppm	0,19	Ti, %	0,07
Nb, ppm	4,20	Gd, ppm	0,82	Li, ppm	2239,40
Rb ppm	115,30	Tb, ppm	0,13	AZ, %	20,80
Sr, ppm	1776,00	Dy, ppm	0,72		
Lu, ppm	0,05	Ho, ppm	0,12		
Tm, ppm	0,06	Er, ppm	0,38	Toplam %	99,42

Tablo 3. Kil Fraksiyonunda Simektit Örneğinin Ana Oksit Bileşimleri ve Yapısal Formülü

	%	Tetraeder tabaka	
SiO ₂	46,82	Si ⁺⁴	3,72
MgO	19,67	Al ⁺³	0,28
CaO	6,07	Oktaeder tabaka	
Al ₂ O ₃	3,43	Mg ⁺²	2,33
Fe ₂ O ₃	1,32	Fe ⁺³	0,08
Na ₂ O	0,04	Li ⁺¹	0,07
K ₂ O	1,03	Al ⁺³	0,04
TiO ₂	0,12	Ti ⁺⁴	0,01
Li ₂ O ₃	0,22	Tabaka Arası	
AK	20,80	Ca ⁺²	0,52
Toplam	99,52	K ⁺¹	0,10
		Na ⁺¹	0,01
		Toplam Yük	
			-0,84

Formül; (Ca_{0.52}K_{0.1}Na_{0.01}) (Mg_{2.33}Fe_{0.08}Al_{0.04}Li_{0.07}Ti_{0.01}) (Si_{3.72}Al_{0.28}) O₁₀ (OH)₂, nH₂O

4. Tartışma

Atık kil incelendiğinde, başlıca gang mineralleri olarak, simektit grubu kil minerallerinin yanısıra kalsit ve feldispat minerallerinin bulunduğu belirlenmiştir. Örnek, kil fraksiyon analizi ile incelendiğinde ise kil içeriğinin Mg simektit (saponit) olduğu tespit

edilmiştir. Bununla birlikte saponitin, lityum içeren ve üretilen mineraller arasında yer aldığı bilinmektedir. Saponitçe zengin kilin modifikasyonunun ise minerallerin mevcut özelliklerini iyileştirdiği ve yeni fonksiyonel özellikler sağlayabildiği çeşitli araştırmalarda belirtilmektedir. Saponitin modifikasyonunda demir ve alüminyumun çözündürülerek ortamdan uzaklaştırılması sonucu yeni ürünler elde edilebilmektedir. Ayrıca, farklı malzemeler ile karışım haline getirilerek yeni özellikli malzemelerde elde edilebilmektedir (Spivak, Astrelın, Tolstopalova ve Atamaniuk, 2012; Vogels, Kloprogge ve Geus, 2005; Yanushevskaya, Dontsova, Aleksyuk, Vlasenko, Didenko ve Nypadymka, 2020).

Magnezyum simektit olan saponitler, magnezyum içeren volkanik kayaların ayrışma bölgesinde bulunan yaygın kil mineralleridir. Tane boyutunun <2 mikron olması, ayırt edici kristal yapısı, yüksek katyon değişim kapasitesi (80-120 me/100 g), yüksek şişme kapasitesi, yüksek özgül yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi gibi önemli özelliklere sahiptirler. Bu özelliklerin yanısıra, yüksek viskozite değeri, su varlığında yüksek plastisite formuna geçmesi kurduğunda katılaşması kullanım alanlarını çeşitlendirmektedir (Hover, Walter, Peacor ve Martini, 1999; Kumari ve Mohan, 2021; Murray, 2007; Polyakov ve Tarasevich, 2012; Shao ve Pinnavaia, 2010; Tarasevich, Poljakov, Ivanova ve

Trifonova, 2011; Vogels ve diğ., 2005). Saponit, kristalin yapıda, üç tabakalı (2:1) olduğundan genişleyen kafes yapısına sahiptir. Bu tabakalı killerin yük kaynaklarının büyük kısmı iyonik yer değişimi ile sağlanmaktadır ve simektitlerdeki iyonik yer değişimi alüminyum levhalarında gerçekleşmektedir. Böylece, kafes yapısından alüminyumun çıkması ve yerine magnezyumun yerleşmesi saponiti oluşturmaktadır (Chanturiya ve diğ., 2018; Kumari ve Mohan, 2021). Simektitte tabakalar arası O-O, O-kasyon, Van der Waals bağlarının bulunması ve bu bağlarında zayıf olması nedeniyle tabakalar arasında su alabilmektedir (Chanturiya ve diğ., 2018). Bu nedenler ile saponit, su ile temas ettiğinde, su tabakalar arası boşluğa girerek kil şişmesine neden olmaktadır. Kili oluşturan tanelerin yüzeylerinin su ile kaplanması (su/iyon adsorpsiyonu) ve kilin yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle kil suya maruz kaldığında kohezyon kuvvetinin etkinleşmesiyle yüksek plastiklik formuna dönüşmektedir. Saponit içerisinde bulunan katyonların iyon değiştirme mekanizmasının ise saponitin adsorpsiyon kapasitesine ciddi katkı sağladığı açıktır.

Simektit-su süspansiyonlarının araştırılması zordur. Genellikle, simektitler 0,5 µm boyutunda ince kristaller oluşturur. Düşük konsantrasyonlarda, süspansiyonlar hidrodinamik kuvvetler tarafından oluşturulan Newton özelliklerine sahipken, artan konsantrasyonlarda taneler arası etkileşimler Newton kanununa uymayan davranışı tetikler. Elektrostatik ve elektrokinetik özelliklerin neden olduğu bu etkileşimlerin çeşitliliği halen araştırılmaktadır. Saponitin, sulu süspansiyonlarda yüksek ve belirsiz elektrokinetik potansiyel değerlerine sahip olduğu bilinmesine rağmen, simektitler arasında en az çalışılanıdır (Chanturiya, Minenko, Suvorova, Pletneva ve Makarov, 2017). Belirtildiği üzere; higroskopik nem ve bunu kontrol eden adsorpsiyon kuvveti kilin plastik karakterine etki etmektedir. Böylece, bünyesine su aldığı anda plastik duruma geçen kil, kuruduğu zaman, sert bir kütle haline gelmektedir. Çalışmalarda suda bekletme ve mekanik karıştırıcıda yüksek devirde açma/dağıtma çalışmaları bu nedenler ile yapılmaktadır. Genellikle 0,001 mm (1 mikron) boyutundan küçük taneler koloidal olarak bilinmektedir. Koloidal özellik tanelerin hareket ve davranışını kontrol eden elektrik yükü ile yerçekimi kuvvetinin karşılaştırılması olarak tanımlanmaktadır. Yerçekimi kuvvetini karşılayacak derecede yüzeyinde elektrik yükü bulunan taneler, koloidal olarak nitelendirilmektedir ve bu neden ile koloidal taneler serbest taneleri birbirine bağlamakta ve içsel sürtünme artmaktadır. İçsel sürtünmesi artan taneler, daha kararlı bir hale gelmektedir. Bu durum zenginleştirme esnasında iri boyutta kolemanit tanelerinin kilden kolaylıkla yıkama dağıtmadan sonra ayrılmasını açıklarken ince boyutlara geçtiğinde bunu başaramadığından -3 mm boyutundaki kolemanit

taneleri ve kil mineralleri birlikte hareket etmektedir. Ayrıca, koloidal tanelerin yüzeyinde bulunan negatif elektrik yükü, birbirlerini ittiğinden su içinde düzensiz olarak hareket etmektedirler. Gelişmiş yaygın tabaka özelliği nedeniyle, saponit tanelerinin sulu ortamda oldukça kararlı olması, oluşan süspansiyonda oldukça kararlı hale getirmekte olup, taneler yavaş çökme göstermektedir. Su ile temas ettiğinde kil mineralinin şişmesi (şişme indeksi değeri $I = 5 \text{ mL/2 g}$ 'a karşılık gelmektedir) ve zenginleştirme sonrası atık göletine gönderilen kil içerikli pülpün, doğal koşullar altında çökmesi uzun zaman alan jel benzeri bir kıvamda olmaktadır. Bu davranış ise özellikle ince boyutta zenginleştirmenin verimliliğini azaltmakla birlikte, atık göletinin erken dolmasına ve çevresel bozulmaya yol açabilmektedir. Zenginleştirme esnasında kilin bu yapısı nedeniyle ortaya çıkan olumsuzlukları giderecek aktif ajanlar üzerinde çalışılarak kilin baraj içerisinde çökmesi hızlandırılabilir. Bu amaçla kalsiyum alüminosilikat (CAS) reaktifi geliştirilmiştir. Kil mineral süspansiyonlarını kalınlaştırmakta, suyun %95 oranında arıtılmasını sağlamakta, büzücü özelliğinden dolayı baraj duvarlarına gelen yükü azaltmaktadır (Zubkova, Alexeev, Polyanskiy, Karapetyan, Kononchuk ve Reinmölller, 2021).

Cevher ve kil arasındaki etkileşimin değerlendirilmesi, kimyasal ve granülometrik bileşimlerinin tespit edilmesi, ardından saponit kilinin ikincil bir ürün olarak kullanılmasının incelendiği çalışmada, lityum içeriği de değerlendirilmiştir. Bu bağlamda 4 mm tane boyutu altında katı atık numunesinin ana element içeriğinde Li 1826 ppm iken kil ayırma ile 2239 ppm Li tenörüne çıkmıştır. % 9,78 Mg, % 8,63 Ca ve % 1,29 Al değerleri ise kil içeriğinin yüksek olduğunu ifade etmektedir. Katı atık numunesi kolemanit mineral içeriğinin daha öncede açıklandığı üzere belirgin miktarda olduğu tespit edilmiştir. Ancak 4 mm tane boyutu üstünün uzaklaştırılması ile %10 B₂O₃'ün altına düşmüştür. Sensöz ve diğ (2021) çalışmalarında 0,045 mm tane boyutu altına geçen malzemenin ağırlıkça %40, B₂O₃ tenörünün ise %1,57 olduğunu tespit etmişlerdir.

Analiz sonuçlarına göre Sr içeriklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Sr'un konsantrasyonunun artması, kolemanit ve kalsit minerallerinde Ca iyonunun yerine yaygın olarak geçtiğini göstermektedir. Ayrıca Sr içeriğinin yüksek olması ortam tuzluluğuna işaret etmektedir (Rosell, Orti, Kasprzyk, Playa ve Peryt, 1998).

Kil örneğinin analiz sonuçlarına göre %46,82 SiO₂, % 19,67 MgO, %6,07 CaO, %3,43 Al₂O₃, %1,32 Fe₂O₃, %1,03 K₂O ve %0,04 Na₂O içermektedir. Si ve Mg içeriğinin de oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Analizlerde Sr, As ve Li elementlerinin de yüksek değerde olduğu değerlendirildiğinden, kazanımlarına yönelik çalışmaların yapılması önem arz etmektedir.

Saponitlerin kullanımı birçok endüstride önem taşımaktadır. Bir sorpsiyon malzemesi olarak kullanımı, kimyasal, zirai kimya, gıda ve tıbbi endüstrilerde oldukça yoğundur, bu konuda çeşitli araştırmalarda yapılmaktadır (Ağaoğlu, Yılmaz ve Demir, 2016; Spivak ve diğ., 2012; Yanushevskaya ve diğ., 2020). Eldeki doğal saponitin gerekli düzeyde modifikasyonu ile katma değeri yüksek ürüne dönüştürülmesi kuvvetle muhtemeldir.

5. Sonuçlar

Saponit, lityum içeren mineraller arasında yer almaktadır. Emet kolemanit zenginleştirme tesisi katı atığının incelendiği çalışmada, saponit kili ve bu kil içerisinde nadir toprak elementlerinden lityumun varlığı da değerlendirilmiştir. Katı atık içerisinde yer alan kolemanitin yaş eleme ile uzaklaştırılması ve ardından kil ayırma ile saponit kiline ulaşılması ve içerikte bulunan yaklaşık 2240 ppm Li'un önemine dikkat çekilmiştir. Saponit özellikleri incelendiğinde bu kıymetli kilin iki farklı amaç ile değerlendirilebileceği kanısına ulaşılmıştır. Kolemanit üretimi esnasında ikinci ürün olarak değerlendirilebileceği gibi, lityum üretiminin yapılması da söz konusudur. Lityum üretiminin günümüz üretim koşullarında nispeten maliyetli olması nedeniyle yeni kazanım yöntemlerinin araştırılmasının gerekliliği de önemle vurgulanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 17.FEN.BİL.64 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Zehra Ebru SAYIN, çalışmanın tasarlanması, uygulanması, yorumlanması, bilgisayar ortamına aktarılması, makalenin oluşturulması; Tülay ALTAY, sonuçların hesaplanması ve yorumlanması, makalenin oluşturulması; Hacer ŞENSÖZ, numunenin alınması, hazırlanması ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

Ağaoğlu, Z., Yılmaz, K. ve Demir, Ö. F. (2016). Simektit ve vermikulitce zengin kurak alanlarda hububatta üre ve amonyumun üst gübre olarak kullanılması. *Çukurova Tarım Gıda Bilimleri Dergisi*, 31(3), 165-169 (Özel Sayı).

Chanturiya, V., Minenko, V., Suvorova, O., Pletneva, V. & Makarov, D. (2017). Electrochemical modification of saponite for manufacture of ceramic building materials. *Applied Clay Science*, 135, 199-205.

Chanturiya, V. A., Minenko, V. G., Makarov, D. V., Suvorova, O. V. & Selivanova E. A. (2018). Advanced techniques of saponite recovery from diamond processing plant water and areas of saponite application. *Minerals*, 8, 549. doi: <https://doi.org/10.3390/min8120549>

Çolak, M. (1995). The Emet and Kırka borate mines (Turkey) 1: mineralogy and chemistry of the clays, 2: ceramic applications of their tailing products. Unpubl. (PhD Thesis), University of Fribourg, Switzerland, 213.

Çolak, M. (1997). *Hisarcık-Emet kolemanit ocağı killeri*. 8. Ulusal Kil Sempozyumunda Sunulmuş Bildiri, Dumlupınar Üniversitesi Kütahya, 25-36.

Çolak, M., Helvacı, C. & Maggetti, M. (2000). Saponite from the Emet colemanite mines, Kütahya, Turkey. *Clays and Clay Minerals*, 48(4), 409-423.

Erdoğan, Y., Aksu, M., Demirbaş, A. & Abalı, Y. (1998). Analyses of boronic ores and sludges and solubilities of boron minerals in CO₂-saturated water. *Resources, Conservation and Recycling*, 24(3-4), 275-283.

Erkan, Z. E., Akar, A. ve Savaş, M. (2003). Emet Bor İşletme Müdürlüğü Hisarcık baraj atıklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması. *Journal of Institute of Science and Technology of Balıkesir University*, 5(1):161-174.

Erkan, Z. E., Akar A. ve Savaş M., (2004). *Espey baraj atıklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması*. II. Bor Çalıştayı, 20.

Garrett, D. E. (2004). Handbook of lithium and natural calcium chloride. *Elsevier, Academic Press.*, 488.

Helvacı, C. (2018). *Lityum ve lityum minerallerinin kaynakları, yatakların dağılımı ve ekonomik önemi*. 71. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Bildiri Öz Kitabı, 265-266.

Helvacı, C., Mordoğan, H., Çolak, M. & Gündoğan İ. (2004). Presence and distribution of lithium in borate deposits and some recent lake waters of west-central Turkey. *International Geology Review*, 46(2), 177-190.

Hover, V. C., Walter, L. M., Peacor, D. R. & Martini, A. M. (1999). Mg-smectite authigenesis in a marine evaporative environment, Salina Ometepe, Baja California. *Clays and Clay Minerals*, 47, 252-268.

- JCPDS, (1993). *Mineral powder diffraction file databook, joint committee on powder diffraction standards*. Swarthmore, Pennsylvania, 781.
- Krebs, R. E. (2006). *The history and use of our Earth's chemical elements: a reference guide*. Greenwood Publishing Group, 422.
- Kumari, N. & Mohan, C. (2021). Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay and Clay Minerals*, 30. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.97672>
- Mordoğan, H. ve Helvacı, C. (1994). Bor yataklarındaki killer ile bazı güncel göl sularındaki lityumun varlığı ve dağılımı. *Geosound Yerbilimleri*, 25, 185-195.
- Murray, H. H. (2007). *Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays*. Developments in Clay Science, 2, Amsterdam, Elsevier.
- Polyakov, V. E. & Tarasevich, Y. I. (2012). Ion exchange equilibria involving uncharged cations on saponite. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 34, 18-27.
- Rosell, I., Ortu', F., Kasprzyk, A., Playa, E. & Peryt, T. M. (1998), Strontium geochemistry of Miocene primary gypsum: Messinian of southeastern Spain and Sicily and Badenian of Poland, *Journal of Sedimentary Research*, 68, 63-79.
- Shao, H. & Pinnavaia, T. J. (2010). Synthesis and properties of nanoparticle forms saponite clay, cancrinite zeolite and phase mixtures there of. *Microporous Mesoporous Materials*, 133, 10-17.
- Spivak, V., Astrelin, I., Tolstopalova, N., & Atamaniuk, I. (2012). Ecological sorbent based on saponite mineral from ukrainian clay-field. *Chemistry & Chemical Technology/Chemical Technology* 6(4), 451-457.
- Şensöz, H., Sayın Z. E., Savaş, M. ve Erdoğan, Y. (2021). Emet bor üretim tesisleri atıklarının lityum içeriğinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(6), 1460-1469.
- Tarasevich, J. I., Poljakov, V. E., Ivanova, Z. G., & Trifonova, M. Y. (2011). Composition, structure and thermal stability of exchangeable cations hydrates of saponite. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 33, 381-391.
- Türkiye'nin Yükselen değeri: Bor. (2022). Eti Maden. Erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor>
- Vogels, R. J. M. J., Kloprogge, J. T., & Geus, J. W. (2005). Synthesis and characterization of saponite clays. *American Mineralogist*, 90, 931-944.
- Yanushevskaya, O. I., Dontsova, T. A., Aleksyuk, A. I., Vlasenko, N. V., Didenko, O. Z. & Nypadymka, A. S. (2020). Surface and structural properties of clay materials based on natural saponite. *Clays and Clay Minerals*, 68(5), 465-475.
- Yarar, B. (1973). *Düşük tenörlü kolemanit cevherinin flotasyon yolu ile zenginleştirilmesi*. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 3 Kongre TMMOB Maden Mühendisleri Odası Ankara 571 - 588.
- Zhoua, C. H., Zhoua, Q., Wua, Q. Q., Petitt, S., Jianga, X. C., Xiaa, S. T., Lib, C. S., & Yua, W. H. (2019). Modification hybridization and applications of saponite: an overview. *Applied Clay Science*, 168, 136-154.
- Zubkova, O., Alexeev, A., Polyanskiy, A., Karapetyan, K., Kononchuk, O. & Reinmüller, M. (2021). Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise. *Applied Science*, 11, 6615-6632. doi: <https://doi.org/10.3390/app11146615>

SARSMA TABLASI TEST MODELİNİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ İLE SEÇİLMESİ: BİR UYGULAMA

Handan KÜNKÇÜ¹, Osman AYTEKİN^{2*}, Hakan KUŞAN³

¹ Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9839-640X>

² Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5916-0725>

³ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7689-2808>

Anahtar Kelimeler	Öz
Çok kriterli karar verme (ÇKKV) AHP TOPSIS ELECTRE Sarsma Tablası Seçimi	<i>Yapıların yer hareketi etkisindeki dinamik davranışlarının gözlemlenmesinde sarsma tablası test modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanım ihtiyacına ve özelliklerine göre sarsma tablası test modeli seçimi, çok sayıda parametreye ve koşula bağlıdır. Bu nedenle, bu seçim problemi çok kriterli bir karar verme problemi olarak düşünülebilir. Bu çalışmanın temel amacı, sarsma tablası modellerini birçok kritere göre değerlendirmektir. Bu amaçla bu çalışmada beş alternatif belirlenmiş ve sırasıyla AHP, TOPSIS ve ELECTRE çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları, beş farklı alternatifi karşılaştırarak aynı alternatifin üç yöntem için birinci olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu çalışmada farklı ÇKKV yöntemlerinin seçim problemi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın bulgularının, sarsma tablası modellerinin mekanik ve teknik özellikleri konusunda bilgi almak isteyen tasarımcılara, uygulayıcılara ve araştırmacılara katkıda bulunması beklenmektedir.</i>

SELECTING THE SHAKING TABLE TEST MODEL USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS: AN APPLICATION

Keywords	Abstract
Multi-criteria decision making (MCDM) AHP TOPSIS ELECTRE Shaking Table Selection	<i>Shaking table test models are widely used in observing the dynamic behavior of structures under the effects of ground motion. According to the user needs and characteristics, the selection of the shaking table test model depends on many parameters and conditions. Therefore, this selection problem can be considered as a multi-criteria decision making (MCDM) problem. The main purpose of this study is to evaluate shaking table models depending on many criteria. In this study, five alternatives were identified, and AHP, TOPSIS and ELECTRE methods were applied, respectively. The results revealed the same alternative is the first for three methods by comparing five different alternatives. In addition, the effect of different MCDM methods on the selection problem was observed in this study. The findings of this study are expected to contribute to designers, practitioners and researchers who want to learn about the mechanical and technical properties of shaking table models.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 06.02.2023

Submission Date : 06.02.2023

Kabul Tarihi : 28.04.2023

Accepted Date : 28.04.2023

* Sorumlu yazar: oaytekin@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogumf.1248370>

1. Giriş

Günümüze kadar pek çok deprem geçiren ülkemizde, bu depremler nedeniyle büyük hasarlar ve can kayıpları yaşanmıştır (Güler ve Canbaz, 2020). Bu olumsuzluklara maruz kalınmaması ve daha güvenli yapı inşa edilmesi için yapıların, yer hareketi etkisindeki dinamik

davranışlarının gözlemlenmesinde sarsma tablası testleri yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Kutaniş, 2007). Sarsma tablası, günümüzde inşaat mühendisliği yapılarının dinamik ve sismik performansının öğrenilmesinde en etkili araçlardan biri haline gelmiştir (Bairrao ve Vaz, 2000; Yuan, Yu, Li, Yan ve Yuan, 2018). Cimellaro ve Domaneschi (2018),



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

sarsma tablasının deprem mühendisliği alanında araştırma yapmak için tüm dünyada kullanılan başlıca laboratuvar platformu olduğunu ifade etmiştir. Yapıların tasarım teorilerinin geliştirilmesinde ya da doğrulanmasında sarsma tablası testlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Yuan vd., 2018). Uzun süreli yer hareketlerine maruz kalan büyük yapı modellerinin yapı elemanları için büyük ölçekli sarsma tablası modelleri kullanılırken (Chung, Nagae, Hitaka ve Nakashima, 2010), küçük ölçekli numunelerin yapısal davranışlarını gözlemlemek için ise küçük ölçekli sarsma tablası modellerinin kullanıldığı görülmektedir (Cimellaro ve Domaneschi, 2018). Sarsma tablası testleri ile ayrıca, akıcı beton karışımlarının işlenebilirlik özellikleri, harç, kireç, çimento numunelerinin akışkanlık özellikleri de incelenebilir (Sağlam, 2003). Böylece, sarsma tablası test modeli ile eğitimde ve dinamik davranışın öğretilmesinde önemli fırsatlar sunulduğu sonucuna ulaşılabilir. Bu modellerin seçiminde çeşitli nitel ya da nicel kriterlerin varlığının yanı sıra çok sayıda test modeli alternatifinin de olması problemin çözümünü zorlaştırmaktadır (Uluskan, Topuz ve Çimen, 2022). Bu farklı kullanım ihtiyaçları dikkate alındığında sarsma tablası test modelleri eksen sayısına, büyüklüğüne, deplasman ve yük kapasitesine göre farklı özelliklerde üretilebilmektedir (Tayfur, Uslu, Can, Cihan ve Öztekin, 2020). Örneğin; Kanada'da gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada tabla platformu 1000x1000 mm², maksimum yük kapasitesi 1000 kg, maksimum taşıma kapasitesi 1000 kg, frekans aralığı 1-17 Hz, maksimum yer değiştirme miktarı ±120 mm özelliklerine sahip sarsma tablası modeli kullanılmıştır (Alshawmar ve Fall, 2023). Bu özelliklerin her biri test modelinin maliyetini de önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Tayfur vd., 2020).

Tüm bu unsurlar göz önüne alındığında kullanım ihtiyacına ve özelliklerine göre sarsma tablası test modeli seçimi, çok sayıda parametreye ve koşula bağlıdır. Bu çeşitli parametre ve koşullar karşısında çözüm üretimi, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile sağlanabilir (Koca ve Eğilmez, 2020). Mardani ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada 2000-2014 yılları arasında ÇKKV yöntemlerinin kullanıldığı 393 çalışma incelenmiş; malzeme seçimi, üretim sistemleri, inşaat yapım ve proje yönetimi, üretim ve makine seçimi problemleri olmak üzere 15 farklı alanda bu yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Literatürde incelenen çalışmalarda hem inşaat hem de farklı alanlarda ürün, malzeme, makine ve ekipman seçim problemleri için ÇKKV yöntemlerinin sık sık kullanıldığı görülmüştür. Bu yöntemlerin kullanıldığı alanlar ve yapılan çalışmalardan son yıllara ait bazı örnekler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Literatürdeki seçim problemleri için kullanılan ÇKKV yöntemleri

Problem	ÇKKV Yöntemleri	Referans
Makine/Ekipman Seçimi	AHP, TOPSIS	(Barrios, De Felice, Negrete, Romero, Arenas, & Petrillo, 2016)
	AHP, MARE, ELECTRE III	(Hodgett, 2016)
	Entropi Ağırlıklı TOPSIS	(Koca ve Eğilmez, 2020)
	AHP, TOPSIS, PROMETHEE	(Uzun ve Kazan, 2016)
	AHP, PROMETHEE	(Temiz ve Calis, 2017)
	AHP, GIA	(Gülçiçek Tolun ve Tümtürk, 2020)
Tedarikçi Seçimi	AHP, EDAS	(Ulutaş ve Çelik, 2019)
	Bulanık VIKOR	(Faydalı ve Erkan, 2020)
	AHP, Gri İlişki Analizi	(Kavitha ve Gladson, 2019)
	ELECTRE I	(Erbıyık, Kabakçı ve Erdil, 2021; Arslan ve Uysal, 2017)
	ANP, ELECTRE	Çakın ve Özdemir, 2013)
	Bulanık AHP, MOORA, COPRAS	(Over Özçelik ve Eryılmaz, 2019)
	AHP, PROMETHEE	(Nebati, Yürük, ve Kenar, 2021)
	AHP, TOPSIS, VIKOR	(Alakaş, Bucak, ve Kızıltaş, 2019)
AHP, TOPSIS	(Onder ve Dag, 2013)	
Banka Seçimi	AHP, TOPSIS, ELECTRE	(Yalçın ve Karaatlı, 2018)
Sürücü Seçimi	AHP, GRA, TOPSIS	(Özcan, İnan ve Korkusuz, 2020)
Kredi Kart Seçimi	AHP, ELECTRE	(Orçanlı ve Özdemir, 2013)
Konut Satın Alımı	AHP, TOPSIS, COPRAS, ELECTRE	(Yertutan ve Çetinyokuş, 2021)
Paket Program Seçimi	AHP, TOPSIS, ELECTRE	(Tunca, Aksoy, Bülbül ve Ömürbek, 2015)

İnşaat proje yönetimi özelinde ise literatürde çeşitli ÇKKV yöntemlerinin bazı örnekleri sunulmuştur. Örneğin; Aslan ve Türkakın (2022) inşaat planlamasında optimal bir çözüm elde etmek için AHP yöntemini kullanırken, Al-Harbi (2001) AHP yönteminin proje yönetimindeki uygulamasını araştırmış ve bir örnek olarak yüklenici önyeterlilik problemini ele almıştır. Szpotowicz ve Tóth (2020) tarafından yapılan çalışmada, yol projelerinde sürdürülebilirlik açısından derecelendirme sistemlerinin uygulanabilirliğinin incelenmesi için TOPSIS yöntemi kullanılmış ve en uygun olan sistem belirlenmiştir. İnşaat projeleri için önemli bir seçim problemi olan en uygun yüklenici seçimi için Alptekin ve Alptekin (2017) tarafından TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Samaras, Gkanas ve Vitsa (2014) baraj projelerinde risk değerlendirmesi için AHP ve ELECTRE I yöntemlerini kullanmıştır. Böylece, inşaat ya da diğer endüstrilerdeki problemlerde AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin uygulanabilirliği sonucuna ulaşılmış olup test modeli seçim problemimiz için gerekli kriterlerin belirlenmesine gerek duyulmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmanın konusu ile benzer nitelikte olan makine veya ekipman seçimi için literatürde belirlenen kriterlerin bir özeti Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Literatürdeki makine/ekipman seçimi için belirlenen kriterler

Kriterler	Referans
Teknik özellikler (motor gücü, devir hızı, Z eksen, maksimum çap, fiyat)	(Koca ve Eğilmez, 2020)
Teknik özellikler, sözleşmeye bağlı kriterler, marka güvenilirliği, işletme ve bakım masrafları	(Uzun ve Kazan, 2016)
Fiyat, teknik özellikler (motor gücü, çalışma ağırlığı, hidrolik pompa debisi, yakıt tüketimi), servis olanakları, elden çıkarma ve yedek parça durumu, operatörün konforu	(Temiz ve Calis, 2017)
Teknik özellikler (dozaşlama süresi, hareket aralığı, motor gücü, yıkama sistemi gibi), fiyat, satış sonrası hizmet, ürün teslim süreci, dil seçeneği	(Gülçiçek Tolun ve Tümürk, 2020)
Fiyat, teknik özellikler (kaldırma kapasitesi, çatal boyu), yedek parça bulmanın kolaylığı, garanti süresi, marka güvenilirliği	(Ulutaş ve Çelik, 2019)
Fiyat, kalite, satış sonrası hizmetler, paketleme yapabilirliği, kullanım kolaylığı, güvenlik, performans	(Faydalı ve Erkan, 2020)

Bu çalışmanın amacı, AHP, TOPSIS ve ELECTRE ÇKKV yöntemleri kullanılarak sarsma tablası test modeli alternatifleri arasından seçim sıralaması yapmak ve

yöntemlerin sonuçlarını karşılaştırmaktır. Bu çalışma şu şekilde düzenlenmiştir. 2. bölümde çalışmada kullanılan ÇKKV yöntemleri açıklanmıştır. 3. bölümünde uygulanan bu yöntemlerin sonucunda alternatiflerin seçimlerinin sıralama sonuçları sunulmuş olup, 4. bölümde ise yöntemlerin sıralama sonuçları karşılaştırılmış ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Yöntem

Sarsma tablası test modeli seçim süreci birçok kriterle bağlı olduğundan ÇKKV yöntemlerinden AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri uygulanmıştır. Literatürde incelenen birçok çalışmada görüldüğü gibi AHP, çok seviyeli hiyerarşik karar problemlerinde etkili bir yöntem olduğunu kanıtlamış ve en çok benimsenen yöntemlerden biri haline gelmiştir. AHP yöntemi diğer ÇKKV yöntemleri ile karşılaştırıldığında, basit ve kolay uygulanabilir, problemin çözümünü kolaylaştıran hiyerarşik bir yapı sunmaktadır. Yöntemin aşamalarından biri olan tutarlılık oranlarının hesaplanması ile katılımcıların cevaplarının güvenilirliği sağlanmaktadır. Bu aşama yöntemin en güçlü özelliğini ifade etmektedir (Al-Harbi, 2001). AHP yöntemi ikili karşılaştırmalara dayanırken, TOPSIS yöntemi ideal çözüme en kısa mesafeyi ve negatif ideal çözüme en uzun mesafeyi dikkate alan bir çözüm yöntemi sunmaktadır. Bu durum TOPSIS yöntemini, insanın karar verme süreci doğası ile daha tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Zhang ve Wang, 2007). Grup karar verme sürecinde etkili karar verme yöntemlerinden olan ELECTRE, her bir çözüm çiftinin performans karşılaştırmalarının bağlantılarının oluşturulmasına dayanmaktadır. Ayrıca AHP ve TOPSIS yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ELECTRE yönteminin çözüm süreci daha karmaşıktır. Yöntem sonucunda iki farklı sıralama sonucu elde edildiğinden, bu sonuçların doğruluğuna ilişkin sonuçların farklı yöntemler ile karşılaştırılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir (Daugavietis, Solohe, Dace ve Ziemele, 2022).

Bu çalışmada, AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin seçilmesinin sebebi literatürde bulunan benzer çalışmalarda uygulan yöntemler olmasıdır. Böylece uygulanan yöntemlerin sıralama sonuçları da karşılaştırılacaktır. Bu yöntemlerin uygulama aşamaları aşağıda verilmiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Bu çalışma için etik kurul onayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu tarafından 05/04/2019 tarihli ve 53893652-299-E.42845 sayılı kararı ile verilmiştir.

2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Thomas L. Saaty (1987) tarafından geliştirilen AHP yöntemi, karar verme ile ilgili tüm kriterlerin değerlendirilmesini hiyerarşik bir düzende yapılandıran

ve bu düzen içinde ilişkiler kurmak için ikili karşılaştırmalara ihtiyaç duyan ÇKKV aracıdır (Saaty, 1987; Kumar, Singh ve Jain, 2020). Bu yöntem karmaşık ve yapılandırılmamış sorunların ele alması ve ilgili sorunları daha basit alt sistemlere ayırarak karar vericilerin analiz etmelerini kolaylaştırması sebebiyle uygulamada tercih edilmektedir (Kumar vd., 2020; Sindhu, Nehra ve Luthra, 2017). AHP yönteminin uygulama aşamaları kısaca aşağıda verilmiştir (Uzun ve Kazan, 2016; Kumar vd., 2020).

1. Adım: Problemin tanımlanarak kriterlerin, alt kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi.

2. Adım: Bir kriterin diğerine göre önem derecesini ifade eden ikili karşılaştırma matrislerinin Tablo 3'de verilen önem dereceleri kullanılarak oluşturulması.

Tablo 3. 1-9 puanlı önem dereceleri (Saaty, 1987)

Önem Derecesi	Tanım
1	Eşit derecede öneme sahip
3	Orta derecede öneme sahip
5	Güçlü derecede öneme sahip
7	Çok güçlü derecede öneme sahip
9	Aşırı derecede öneme sahip
2,4,6,8	Ara değerler

3. Adım: Normalize matrisin elde edilmesi.

4. Adım: Tutarlılık oranının hesaplanması. Bu oran belirlenen kriterlerin önem derecelerinin tutarlılığının kontrol edilmesi için hesaplanır. Öncelikle, tutarlılık oranının (TO) hesaplanması için ikili karşılaştırma matrisin tutarlılık indeksine (TI) ihtiyaç duyulmaktadır ve Eşitlik (1) ile hesaplanır, bu eşitlikte λ_{max} en büyük özvektör, n ise alternatif veya kriter sayısıdır. Eşitlik (2) kullanılarak TO hesaplanabilir, bu eşitlikte kriter sayısına bağlı olarak değişen uygun rassallık indeksi (RI) seçilir ve bu değerler Tablo 4'de verilmiştir (Temiz ve Calis, 2017; Saaty, 1987).

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

$$TO = \frac{TI}{RI} \quad (2)$$

Tablo 4. Rassallık indeksi (RI) (Saaty, 1987)

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32
n	8	9	10				
RI	1.41	1.45	1.49				

5. Adım: Kriterlerin, alt kriterlerin ve alternatiflerin ağırlıklarının belirlenmesi ve her alternatifin nihai ağırlığının hesaplanması ve sonrasında alternatiflerin ağırlık değerlerine göre sıralanması.

2.2. TOPSIS

Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilen TOPSIS yöntemi, ideal alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın olması ve negatif ideal çözüme en uzak olması prensibine dayanan bir ÇKKV aracıdır (Koca ve Eğilmez, 2020; Yertutan ve Çetinyokuş, 2021). Karar verme problemleri üzerindeki önemli etkisinden dolayı daha çok tercih edilen bu yöntem, pratik problemlerin çözümü için oldukça yararlıdır ve ayrıca alternatiflerin sıralamasını ve optimal çözümü sağlamaktadır (Bathrinath, Bhalaji ve Saravanasankar, 2021). TOPSIS yönteminin uygulama aşamaları aşağıda verilmiştir (Yertutan ve Çetinyokuş, 2021; Bathrinath vd., 2021).

1. Adım: Karar matrisinin oluşturulması.

2. Adım: Normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması.

3. Adım: Ağırlık normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması.

4. Adım: Pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözümün belirlenmesi.

5. Adım: Her bir alternatif için öklid uzaklığı yöntemini kullanarak pozitif ideal noktaya uzaklığın (S_i^*) ve negatif ideal noktaya olan uzaklığının (S_i^-) hesaplanması. Pozitif ideal çözüm için öklid uzaklığı yöntemi Eşitlik (3), negatif ideal çözüm için Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanabilir.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

6.adım: Eşitlik (5) kullanılarak ideal çözüme göreceli yakınlığın hesaplanması ve alternatiflerin sıralanması. Göreceli yakınlık değeri (C_i^*) 0 ile 1 arasındadır. Göreceli yakınlığın 1'e eşit olması pozitif ideal çözüme yakınlığı gösterir.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

2.3. ELECTRE

ELECTRE yöntemi, alternatifler arasında ikili üstünlük karşılaştırmalarına ve kıyaslanmalarına dayanan bir ÇKKV aracıdır (Erbiyık vd., 2021; Arslan, 2018). Bu ÇKKV yönteminin ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS ve ELECTRE A farklı türevleri bulunmaktadır (Huang ve Chen, 2005). Seçim problemi

için tercih edilen ELECTRE I yönteminin uygulama aşamaları aşağıda verilmiştir (Erbıyık vd., 2021; Arslan ve Uysal, 2017; Pang, Zhang ve Chen, 2011; Çelik ve Ustasüleyman, 2014).

1. Adım: Karar matrisinin oluşturulması.

2. Adım: Fayda ve maliyet özelliklerini belirleyerek fayda için Eşitlik (6), maliyet için Eşitlik (7) kullanılarak normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması.

$$x_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m b_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$x_{ij} = \frac{1/b_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{b_{ij}}\right)^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

3. Adım: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması.

4. Adım: Uyum ve uyumsuzluk setinin oluşturulması.

5. Adım: Uyum ve uyumsuzluk setlerinin kullanılarak uyum ve uyumsuzluk matrislerinin oluşturulması.

6. Adım: Uyum ve uyumsuzluk eşik değerlerinin hesaplanması.

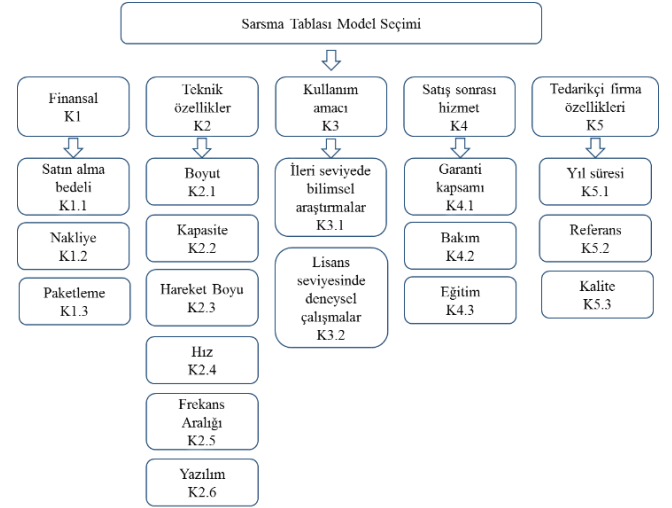
7. Adım: Uyum ve uyumsuzluk eşik değerlerinin uyum ve uyumsuzluk matrislerinin elemanlarıyla karşılaştırılması.

8. Adım: Uyum, uyumsuzluk ve toplam üstünlük matrislerinin oluşturulması.

9. Adım: Toplam üstünlük matrisine göre alternatiflerin sıralanması.

3. Uygulama ve Bulgular

Sarsma tablası test modeli seçimi için anket uygulaması ile toplam 45 uzman ve tasarım ekiplerinin görüşleri alınarak bu çalışma için beş alternatif belirlenmiştir. Belirlenen alternatiflerde firma isimlerinin yerine A1, A2, A3, A4, A5 ifadeleri kullanılmıştır. Seçim problemi için belirlenen ana kriterler, finansal, teknik özellikler, kullanım amacı, satış sonrası hizmet ve tedarikçi firma özelliklerinden oluşmaktadır. Finansal ana kriteri 3 alt kriterden, teknik özellikler ana kriteri 6 alt kriterden, kullanım amacı ana kriteri 3 alt kriterden, satış sonrası hizmet ana kriteri 3 alt kriterden ve tedarikçi firma özellikleri ana kriteri 3 alt kriterden oluşmaktadır. 5 ana kriter ve bu ana kriterler için belirlenen alt kriterler Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu kriterlerden yıl süresi tedarikçi firmanın sektördeki faaliyet gösterdiği ifade etmektedir. İleri düzey bilimsel araştırmalar kriteri ise daha kapsamlı ve özellikli bilimsel çalışmaları ifade etmektedir.



Şekil 1. Seçim problemi için kriterler

3.1. AHP Yönteminin Uygulanması

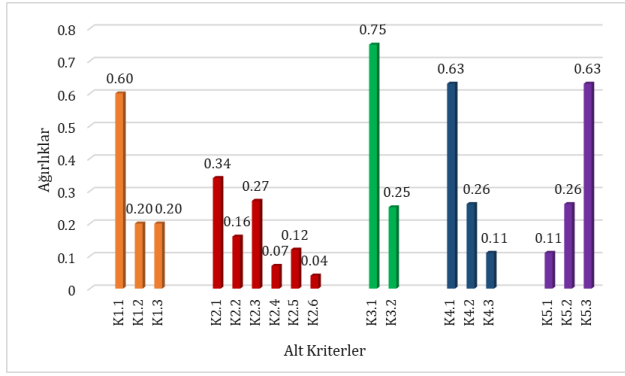
AHP yöntemi kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için öncelikle Tablo 5'de verilen ana kriterler için ikili karşılaştırma yapılmış ve ağırlık değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Ana kriterlerin ikili karşılaştırılması

Ana kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	Ağırlık
K1	1	1/3	1/5	1/4	2	0.079
K2	3	1	1/3	1/3	3	0.156
K3	5	3	1	4	5	0.457
K4	4	3	1/4	1	4	0.250
K5	1/2	1/3	1/5	1/4	1	0.058
$\Sigma = 1.000$						

$$\lambda_{\max} = 5.336, CI = 0.084, RI = 1.12, CR = 0.075 < 0.100 \checkmark$$

İkili karşılaştırma matrisleri, çalışmaya katılan uzman ve tasarım ekiplerinin görüşlerinin geometrik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Grup değerlendirmeleri için geometrik ortalama yöntemi uygulanabilmektedir (Saaty, 2008). Her bir ana kriter için belirlenen alt kriterlerin ikili karşılaştırmaları oluşturulmuş ve tutarlılık oranları hesaplanmıştır. İkili karşılaştırmalar sonucu tutarlılık oranlarının 0.1 değerinden küçük veya bu değere eşit olması ile karşılaştırma sonuçlarının tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Saaty, 1987). Hesaplanan tüm alt kriterler için ağırlık değerleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Alt kriterlerin ağırlıkları

Çalışmada belirlenen beş alternatif için toplam ağırlıkları hesaplanmış ve sıralama sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. AHP yöntemi sonucuna göre en yüksek ağırlık değerine sahip alternatif A2 olarak bulunmuştur.

Tablo 6. AHP yönteminin sonuçları

Alternatifler	Genel Ağırlıklar	Sıralama
A1	0.159	4
A2	0.299	1
A3	0.242	2
A4	0.185	3
A5	0.115	5

3.2. TOPSIS Yönteminin Uygulanması

Bu çalışmadaki belirlenen beş alternatif için tanımlanan kriterlerde sayısal ifadeler için gerçek değerler, sözel ifadeler için 1-5 puanlı önem dereceleri kullanılmıştır. Bu değerler ile Tablo 7'de TOPSIS metodunun ilk aşaması olan karar matrisi oluşturulmuştur.

AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi oluşturulmuştur. Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinden elde edilen pozitif ideal (A*) ve negatif ideal (A-) çözüm setleri elde edilmiş ve aşağıda bu setler sunulmuştur.

Tablo 7. Karar matrisi

	K1			K3	
	K1.1	K1.2	K1.3	K3.1	K3.2
(TL)	-	-	-	-	-
A1	2762900	4	2	2	5
A2	1274000	5	1	4	2
A3	1650000	3	3	5	3
A4	55582	2	5	3	4
A5	14700	1	4	1	1

Tablo 7. Karar matrisi (devamı)

	K2					
	K2.1	K2.2	K2.3	K2.4	K2.5	K2.6
	(m ²)	(kN)	(mm)	(mm/sn)	(Hz)	-
A1	16.00	667.24	200	500	50	3
A2	25.00	350.00	800	630	25	5
A3	6.25	250.00	350	1000	12	4
A4	0.48	1.00	200	500	20	2
A5	1.00	80.00	300	400	50	1

Tablo 7. Karar matrisi (devamı)

	K4			K5		
	K4.1	K4.2	K4.3	K5.1	K5.2	K5.3
	(Yıl)	-	-	-	-	-
A1	2	3	5	18	4	1
A2	5	5	3	21	5	4
A3	2	2	4	18	3	3
A4	2	4	2	18	2	2
A5	2	1	1	19	1	5

A* = {0.002548, 0.026968, 0.026968, 0.279216, 0.132967, 0.221196, 0.049505, 0.078938, 0.026968, 0.505650, 0.168550, 0.494290, 0.175966, 0.071465, 0.052850, 0.175966, 0.426769}

"A" "-" "-" "-" = {0.478898, 0.134840, 0.134840, 0.005361, 0.000199, 0.055299, 0.019802, 0.018945, 0.005394, 0.101130, 0.033710, 0.197716, 0.035193, 0.014293, 0.045300, 0.035193, 0.085354}

Pozitif ve negatif ideal çözüm setleri kullanılarak öklid uzaklığı yöntemi uygulanmış ve sonrasında göreceli yakınlık değerleri hesaplanmıştır. Bu göreceli yakınlık değerleri, alternatiflerin tercih sıralama sonuçlarını oluşturmuştur. Her bir alternatif için bu sonuçlar Tablo 8'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre en uygun alternatif A2'dir.

Tablo 8. TOPSIS yönteminin sonuçları

Alternatifler	S _i [*]	S _i ⁻	C _i [*]	Sıralama
A1	0.758520	0.326289	0.300781	5
A2	0.306150	0.688348	0.692156	1
A3	0.542257	0.507802	0.483593	2
A4	0.587816	0.545874	0.481502	3
A5	0.652114	0.600407	0.479359	4

3.3. ELECTRE Yönteminin Uygulanması

Bu çalışmada ELECTRE yönteminin ailesinden olan ELECTRE I yönteminin uygulama aşamasında Tablo 7'de verilen kriterlerin maliyet veya fayda özelliklerine göre normalize karar matrisi oluşturulmuştur. AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra ağırlıklı normalize edilerek matristen uyum ve uyumsuzluk setleri elde edilmiş ve bu setler sonucuna göre uyum ve uyumsuzluk matrisleri Tablo 9 ve Tablo 10'da sunulmuştur. Bu

setlerin hesaplanmasına ait detaylı işlem adımlarına Küncü (2019) çalışmasında ulaşılabilmektedir.

Tablo 9. Uyum matrisi (C)

	-	0.839	2.439	2.556	3.194
	4.161	-	3.623	3.950	3.443
C =	3.300	1.377	-	3.565	3.337
	3.521	1.050	2.174	-	2.372
	2.563	1.557	2.296	3.261	-

Tablo 10. Uyumsuzluk matrisi (D)

	-	1.000	1.000	0.867	1.000
	0.341	-	0.341	0.495	1.000
D =	0.359	1.000	-	0.733	1.000
	1.000	1.000	1.000	-	1.000
	0.290	0.529	0.704	0.474	-

Üstünlük matrisinin elde edilmesi için uyum eşik değeri 2.729, uyumsuzluk eşik değeri ise 0.757 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin uyum ve uyumsuzluk matrislerinin elemanlarıyla karşılaştırılması ile Tablo 11 ve Tablo 12'de verilen üstünlük matrisleri elde edilmiştir.

Tablo 21. Uyum (F) ve uyumsuzluk (G) üstünlük matrisi

	-	0	0	0	1		-	0	0	0	0
	1	-	1	1	1		1	-	1	1	0
F =	1	0	-	1	1	G =	1	0	-	1	0
	1	0	0	-	0		0	0	0	-	0
	0	0	0	1	-		1	1	1	1	-

Tablo 32. Toplam üstünlük matrisi (E)

	-	0	0	0	0	$\sum A1=0$
	1	-	1	1	0	$\sum A2=3$
E =	1	0	-	1	0	$\sum A3=2$
	0	0	0	-	0	$\sum A4=0$
	0	0	0	1	-	$\sum A5=1$

Tablo 12'de gösterilen toplam üstünlük matrisi sonuçlarına göre A2 alternatifi ilk sırada yer alırken, bu sırayı A3, sonrasında ise A5 takip etmektedir. A1 ve A4 alternatifi ise son sırada yer almaktadır. Bu iki alternatif arasında bir sıralama sonucuna ulaşmak için Pang vd. (2011)'in önerdiği gibi Cp ve Dp değerleri hesaplanmış ve Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 43. Cp ve Dp değerleri

	Ortalama (Cp)			Ortalama (Dp)			
C ₁	9.028	13.545	-4.517	D ₁	3.867	1.990	1.877
C ₂	15.177	4.823	10.354	D ₂	2.177	3.529	-1.353
C ₃	11.579	10.532	1.047	D ₃	3.092	3.045	0.047
C ₄	9.117	13.332	-4.215	D ₄	4.000	2.569	1.431
C ₅	9.677	12.346	-2.669	D ₅	1.997	4.000	-2.003

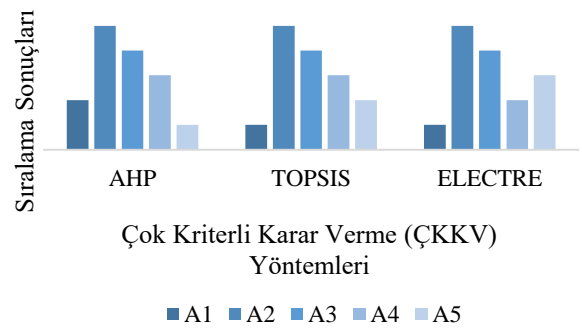
C_p ve D_p değerleri hesaplanarak elde edilen sıralama sonucu ve toplam üstünlük matrisine göre yöntem sonucunda elde edilen nihai sıralama sonucu Tablo 14'de gösterilmiştir.

Tablo 54. ELECTRE I yönteminin sonuçları

C _p	D _p	(E)	Alternatiflerin Sıralama Sonuçları	
			Sıralama	Sıralama
C ₂	D ₅	E ₂	A2	1
C ₃	D ₂	E ₃	A3	2
C ₅	D ₃	E ₅	A5	3
C ₄	D ₄	E ₁ = E ₄	A4	4
C ₁	D ₁	E ₁ = E ₄	A1	5

4. Sonuçlar

Sarsma tablası test modellerinin mühendislik eğitimleri ve depreme dayanıklı yapıların tasarımına katkısı nedeniyle uygun test modelinin seçimi son derece önemlidir. Bu çalışmada test modeli seçimi için bir karar hiyerarşisi oluşturulmuş ve bu noktada ÇKKV yöntemlerinden olan AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemleri uygulanarak yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin uygulanması için tasarım ekipleri ve uzmanların görüşleri alınarak sarsma tablası test modellerinin özelliklerine göre kriterler ve alternatifler belirlenmiştir. İlk olarak AHP yöntemi uygulanmış ve kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. AHP yöntemi ile hesaplanan bu ağırlıklar TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinde de kullanılmıştır. Yöntemlerin elde edilen sıralama sonuçları Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışmada uygulanan ÇKKV yöntemlerinin sıralama sonuçları

Yöntemlerin sonuçlarına göre en uygun alternatif A2'dir ve diğer alternatiflerin sıralama sonuçları ise birbirine çok yakındır. A1 ve A5 alternatiflerinin ise son sıralarda yer aldığı görülmektedir. Bu sıralama sonuçları arasındaki tutarlılık AHP, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin başka bir seçim problemi için karar verilmesi gerektiğinde kolaylıkla uygulanabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, farklı ÇKKV yöntemlerinin

seçim sıralamasındaki etkisi gözlemlenmiştir. Bu yöntemler, bir karar problemini çözmek için olası alternatifler için karar vericilerin tercihini temsil etmek için kullanılmıştır.

Bu çalışmada benimsenen yaklaşımlarda alt kriterlerin birbiri ile olan ilişkileri incelenmediği için bu ilişkilerin dahil edilerek sıralama sonuçlarının elde edilmesi için Analitik Ağ Süreci (Analytical Network Process (ANP)) yöntemi kullanılabilir. Bu çalışma sonuçlarının, sarsma tablası modellerinin mekanik ve teknik özellikleri konusunda, bilgi almak ve uygulama deneyimi gerçekleştirmek isteyen tasarımcılara, uygulayıcılara ve araştırmacılara yardımcı olması beklenmektedir. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar için alternatif ve kriter sayısı artırılabilir veya farklı ÇKKV yöntemleri uygulanabilir. Bu çalışmada önerilen çerçevenin literatürdeki diğer seçim problemleri için faydalı olması beklenmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; H. KÜNKCÜ, bilimsel yayın araştırması, veri toplama, makalenin oluşturulması; O. AYTEKİN ve H. KUŞAN, araştırma tasarımı ve uygulanması ile makalenin genel kontrolünün yapılması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Alakaş, H. M., Bucak, M. Y. & Kızıltaş, Ş. (2019). AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR yöntemleri ile ambulans tedarik firması seçimi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1), 93-101.

Al-Harbi, K. M. A. S. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19(1), 19-27. doi: [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1)

Alptekin, O. & Alptekin, N. (2017). Analysis of criteria influencing contractor selection using TOPSIS method. *In IOP conference series: materials science and engineering*, 245(6), 062003. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062003>

Alshawmar, F. & Fall, M. (2023). Investigation of drying and wetting effects on response of highly densified tailings to cyclic loadings: Shaking table test results. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166, 107769. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107769>

Arslan, H. M. (2018). ELECTRE ve maksimum kapsama modeli yöntemleri ile bilim merkezlerinin optimum tesis yeri seçimi. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(65), 337-355. doi: <https://doi.org/10.17755/esosder.339495>

Arslan, H. M. & Uysal, H. T. (2017). ELECTRE I yöntemi ile en uygun tedarikçinin belirlenmesi: Ahşap sektörü uygulaması. *Düzce Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(1), 44-57.

Aslan, S. & Türkakın, O. H. (2022). A construction project scheduling methodology considering COVID-19 pandemic measures. *Journal of Safety Research*, 80, 54-66.

Bairrao, R. & Vaz, C. (2000). *Shaking table testing of civil engineering structures-The LNEC 3D simulator experience*, In Proceedings 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.

Barrios, M. A. O., De Felice, F., Negrete, K. P., Romero, B. A., Arenas, A. Y. & Petrillo, A. (2016). An AHP-topsis integrated model for selecting the most appropriate tomography equipment. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 15(04), 861-885. doi: <https://doi.org/10.1142/S021962201640006X>

Bathrinath, S., Bhalaji, R. K. A. & Saravanasankar, S. (2021). Risk analysis in textile industries using AHP-TOPSIS. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1257-1263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.722>

Chung, Y. L., Nagae, T., Hitaka, T., & Nakashima, M. (2010). Seismic resistance capacity of high-rise buildings subjected to long-period ground motions: E-Defense shaking table test. *Journal of Structural Engineering*, 136(6), 637-644. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000161](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000161)

Cimellaro, G. P. & Domaneschi, M. (2018). Development of dynamic laboratory platform for earthquake engineering courses. *Journal of Professional issues in engineering education and practice*, 144(4), 05018015. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000393)

Çakın, E. & Özdemir, A. (2013). Tedarikçi seçim kararında Analitik Ağ Süreci (ANP) ve ELECTRE yöntemlerinin kullanılması ve bir uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(2), 339-364.

- Çelik, P. & Ustasüleyman, T. (2014). ELECTRE I ve PROMETHEE yöntemleri ile GSM operatörlerinin hizmet kalitesinin değerlendirilmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (12), 137-160. doi: <https://doi.org/10.18092/ijeas.19566>
- Daugavietis, J. E., Soloha, R., Dace, E. & Ziemele, J. (2022). A comparison of multi-criteria decision analysis methods for sustainability assessment of district heating systems. *Energies*, 15(7), 2411. doi: <https://doi.org/10.3390/en15072411>
- Erbıyık, H., Kabakçı, G. & Erdil, A. (2021). ELECTRE yöntemi ile otomotiv sektöründe tedarikçi seçimi: Yeşil tedarikçi seçimi uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı 24, 421-429. doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.903952>
- Faydalı, R. & Erkan, E. F. (2020). Makine seçim probleminin bulanık VIKOR yöntemiyle incelenmesi. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 3(1), 7-12. doi: <https://doi.org/10.38016/ijsta.677785>
- Gülççek Tolun, B. & Tümtürk, A. (2020). AHP ile bütünlük gri ilişkisel analiz yöntemi ile makine seçimi: tarım makinaları üretim işletmesinde bir uygulama. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 27(1), 21-34. doi: <https://doi.org/10.18657/yonveek.610281>
- Güler, E. & Canbaz, M. (2020). Yapıların deprem riskinin sokak tarama yöntemi ile belirlenmesi: Sivrihisar örneği. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 227-234. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.736221>
- Hodgett, R. E. (2016). Comparison of multi-criteria decision-making methods for equipment selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1145-1157. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7993-2>
- Huang, W.C. & Chen, C.H. (2005). Using the ELECTRE II method to apply and analyze the differentiation theory. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 2237-2249.
- Hwang, C. L. & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making methods and application. New York: Springer-Verlag
- Kavitha, T. S. & Frank, Gladson. (2019). Evaluation of best supplier using multi criteria decision making methods. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10(2), 2176-2183.
- Koca, G. & Eğilmez, Ö. (2020). Makine seçimi probleminin entropi ağırlıklı TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi: Bir doğal taş işletmesi örneği. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 714-729. doi: <https://doi.org/10.35193/bseufbd.726608>
- Kumar, R., Singh, K. & Jain, S. K. (2020). A combined AHP and TOPSIS approach for prioritizing the attributes for successful implementation of agile manufacturing. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 69(7), 1395-1417. doi: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-05-2019-0221>
- Kutaniş, M. (2007). Deprem simülasyonu tasarımı ve yapımı. Sakarya Üniversitesi. MAG-HD-11 (105m082)'nolu TÜBİTAK Projesi.
- Küncü, H. (2019). Mekanik laboratuvarlarında kullanılacak sarsma tablası deney modeli seçiminde çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic research-Ekonomika istraživanja*, 28(1), 516-571. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Nebati, E. E., Yürük, H. & Kenar, Z. (2021). Bir otobüs işletmesi için tedarikçi seçimi. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 1-14. doi: <https://doi.org/10.38002/tuad.790761>
- Onder, E. & Dag, S. (2013). Combining analytical hierarchy process and TOPSIS approaches for supplier selection in a cable company. *Journal of Business Economics and Finance*, 2(2), 56-74.
- Orçanlı, K. & Özdemir, A. (2013). Kredi kartı seçimine yönelik bir karar modeli ve uygulama: Analitik hiyerarşi prosesi (AHP)-ELECTRE yöntemi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 77-106.
- Over Özçelik, T. & Eryılmaz, S. (2019). Traktör imalatında çok kriterli karar verme yöntemleri ile tedarikçi seçimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı, 498-512. doi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.590418>
- Özcan, İ., İnan, U. H. & Korkusuz, A. Y. (2020). Çok kriterli karar verme yöntemleriyle metro sürücüsü seçimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15(3), 1185-1202. doi: <https://doi.org/10.17153/oguibf.573735>

- Pang, J., Zhang, G. & Chen, G. (2011). ELECTRE I decision model of reliability design scheme for computer numerical control machine. *Journal of Software*, 6(5), 894-900.
- Sağlam, A. R. (2003). Kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176.
- Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making: Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors - The Analytic Hierarchy/Network Process. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*, 102(2), 251-318.
- Samaras, G. D., Gkanas, N. I. & Vitsa, K. C. (2014). Assessing risk in dam projects using AHP and ELECTRE I. *International Journal of Construction Management*, 14(4), 255-266.
- Sindhu, S., Nehra, V. & Luthra, S. (2017). Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 496-511. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.135>
- Szpotowicz, R. & Tóth, C. (2020). Revision of sustainable road rating systems: selection of the best suited system for Hungarian road construction using TOPSIS method. *Sustainability*, 12(21), 8884. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su12218884>
- Tayfur, B., Uslu, E., Can, Ö., Cihan, A. & Öztekin, E. (2020). 2 Eksenli sarsma tablası tasarımı ve imalatı. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 131-137.
- Temiz, I. & Calis, G. (2017). Selection of construction equipment by using multi-criteria decision making methods. *Procedia Engineering*, 196, 286-293.
- Tunca, M. Z., Aksoy, E., Bülbül, H. & Ömürbek, N. (2015). AHP temelli TOPSIS ve ELECTRE yöntemiyle muhasebe paket programı seçimi. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(1), 53-71.
- Uluskan, M., Topuz, D. & Çimen, C. (2022). AHP, Bulanık AHP, LBWA ve COPRAS yöntemleri ile tedarikçi değerlendirme: demiryolu sektöründe bir uygulama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (3), 412-430. doi: <https://dx.doi.org/10.31796/ogummf.1068384>
- Ulutaş, A. & Çelik, D. (2019). Transpalet seçimi probleminin AHP ve EDAS yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 7(2), 668-686. doi: <https://dx.doi.org/10.15295/bmij.v7i2.1028>
- Uzun, S. & Kazan, H. (2016). Çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE karşılaştırılması: Gemi inşada ana makine seçimi uygulaması. *Journal of Transportation and Logistics*, 1(1), 99-113. doi: <https://dx.doi.org/10.22532/jtl.237889>
- Yalçiner, D. & Karaatlı, M. (2018). Mevduat bankası seçimi sürecinde TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerinin kullanılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(2), 401-423.
- Yertutan, D. İ. & Çetinyokuş, T. (2021). Sürdürülebilir konut satın alımının çok kriterli karar verme metotlarıyla değerlendirmesi ve bir uygulama. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(1), 32-54. doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.677636>
- Yuan, Y., Yu, H., Li, C., Yan, X. & Yuan, J. (2018). Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings—Part I: Theory and validation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 108, 177-186. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.017>
- Zhang, X. & Wang, Y. (2007). *Research on the evaluation and selection of partner in knowledge share between logistics enterprises based on AHP-TOPSIS*. In 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 4367-4370.

SERİ ÜRETİM HATLARINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İLE DURUMSAL FARKINDALIĞIN ARTIRILMASI

Diler ÖZ¹, Rifat EDİZKAN^{2*}, Ahmet YAZICI³

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0002-5125-5631](https://orcid.org/0000-0002-5125-5631)

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0002-6198-976X](https://orcid.org/0000-0002-6198-976X)

³ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

ORCID No : [0000-0001-5589-2032](https://orcid.org/0000-0001-5589-2032)

Anahtar Kelimeler	Öz
Güvenilirlik Analizi Yaşam Olasılığı Durumsal Farkındalık Seri Üretim Hattı Bakım Planlaması.	<i>Bir işletmedeki üretim hatlarının performansı ve kapasitesi planlanmamış makine duruşları en aza indirilerek artırılabilir. Bu duruşların sıklıkla meydana geldiği üretim hatları için arızalar analiz edilmeli ve duruşlara neden olan sorunları azaltmak için bakım planlaması yapılmalıdır. Bu çalışmada, Minyatür Devre Kesici (MDK) üretim hattında seri olarak çalışan makinelerin bakım planlaması için güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli önerilmiştir. Güvenilirlik analizi, üretim hattında plansız duruşları azaltmak için doğru kararların alınmasında ve planlamaların yapılmasında kullanılacak önemli bilgiler sağlayacaktır. Önerilen model, üretim hattında operatör, bakımcı ve yönetici düzeyinde durumsal farkındalığı artıracaktır. Güvenilirlik analiz için makinelerin duruş verileri Üretim Yönetim Sistemi (ÜYS) üzerinden toplanmıştır. Güvenilirlik analizinde arızalar arası süre ve tamir süresi değerleri kullanılmıştır. Analiz yapılan zaman aralığındaki verilerden ileride darboğaz olabilecek makineler ve bu makinelerde en çok sorun oluşturan arızalar belirlenmiştir.</i>

RAISING SITUATIONAL AWARENESS WITH RELIABILITY ANALYSIS ON SERIAL PRODUCTION LINES

Keywords	Abstract
Reliability Analysis Survival Probability Situation Awareness Serial Production Line Maintenance Planning	<i>The performance and capacity of production lines in a company can be increased by minimizing unplanned machine downtime. The malfunctions should be analyzed for production lines where these stoppages frequently occur and maintenance should be planned to reduce the problems that cause downtime. In this study, a situational awareness model based on reliability analysis has been proposed for the machines running in series on a Miniature Circuit Breaker (MCB) production line. Reliability analysis will provide important information that can be used in making the right decisions and planning to reduce unplanned stoppages on the production line. The proposed model will increase situational awareness at the operator, maintainer, and manager levels in the production line. For reliability analysis, the stoppage data of the machines were collected through the Manufacturing Execution System (MES). Reliability analysis was performed using time to failure and time to repair values. From the data in the analyzed period, the machines that could be bottlenecks in the future and the malfunctions that cause the most problems in these machines were determined.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 20.10.2022

: 02.05.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 20.10.2022

: 02.05.2023

* Sorumlu yazar: redizkan@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1192034>

1. Giriş

Günümüz rekabet koşullarında işletmeler, üretim hatlarından en yüksek verimliliği sağlamak ve müşteri

taleplerini zamanında karşılamak için bakım faaliyetlerinin planlamasına ve uygulamasına önem vermek zorundadır. Bakım, makinelerin ve hatların sürekli ve verimli bir şekilde çalışması için yürütülen



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

çalışmaların bütünüdür. Bakım çalışmalarının sistematik bir şekilde yürütülebilmesi için doğru analizlerle personeldeki farkındalığın artırılması ve makinelerin ve hatların mevcut performans parametrelerinin detaylı bir şekilde çıkartılması gerekir. İşletmelerde bakım planlaması yapılırken sistemin veya alt sistemlerin güvenilirlik analizi değerleri kullanılabilir. Güvenilirlik analizi, üretim makinelerinin ve hatlarının mevcut ve gelecekteki çalışma durumları hakkında bilgi vermektedir. Güvenilirlik analizi ile birlikte arıza dağılımları, arızaların istatistiksel özellikleri, sağ kalım olasılıkları ve arıza oranları elde edilir (Atamer, 2009; Enzi ve Khan, 2022).

Üretim ekipmanlarından en yüksek oranda yararlanmak ve üretim kapasitesini artırmak için plansız duruşları en düşük seviyeye indirmek gerekir. Üretimde meydana gelen duruşlar, üretim oranını düşürerek verimliliğin azalmasına neden olurlar. Ayrıca, plansız duruşlar üretim planlamasını zorlaştırır (Seifoddini ve Djassemi, 2001). Üretim duruşlarının çoğunluğu hat veya makine kaynaklı teknik problemlerdir. Özellikle plansız duruşların çok sık olduğu üretim tesislerinde etkili bir bakım planlamasıyla duruşların büyük çoğunluğu önlenir. Plansız bir arıza, planlı bir bakım veya onarımdan daha yüksek onarım maliyetlerine neden olabilir. Plansız arızalar; duruş sırasındaki üretim kaybı, tamir ve ürün kalitesinin düşmesi gibi etkenlerden dolayı maliyetleri artırmaktadır. Bakım sistemlerinin temel amacı; işletme kaynaklarının verimli ve etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak, bakım personelinin verimini yükseltmek ve plansız duruşları sifıra yaklaştırmaktır. Bakım planlaması yapılmadan önce mevcut durumun iyi analiz edilmesi gerekir. Bakım planlamasının doğru yapılması ile verimlilik artışı sağlanabilir. Bu amaç için güvenilirlik analizinden yararlanılabilir ve güvenilirlik merkezli bakım politikası uygulanabilir. Güvenilirlik merkezli bakım; periyodik, önleyici ve kestirimci bakım uygulamalarının harmanlanmış halidir (Kuldaşlı, 2009). Ürün ve üretim yöntemlerindeki karmaşıklığın artması, rekabet, maliyetler, müşteri talepleri ve plansız arızalar gibi faktörlerden dolayı güvenilirlik analizinin endüstride kullanımı artmaktadır (Atamer, 2009).

Güvenilirlik, ürün güvenilirliği ve sistem güvenilirliği olarak iki ana başlıkta incelenebilir (Uzuner, 2015). Ürün güvenilirliği, bir ürünün belirli bir süre boyunca düzgün çalışabilme olasılığıdır (Omondi, 2017). Sistem güvenilirliği ise bir sistemin belirli bir süre boyunca işlevini düzgün şekilde yerine getirebilme olasılığıdır. Sistem, birden fazla alt bileşenden oluşan yapılardır. Üretim makineleri ve hatları birden fazla alt bileşenden oluşabilecekleri için sisteme örnek olarak gösterilebilir. Bir sistemde güvenilirliği en düşük olan alt bileşenin tespiti güvenilirlik analizi ile mümkündür ve bu şekilde darboğazlar belirlenebilir (Barabady ve Kumar, 2008). Güvenilirlik değeri, sistemde meydana gelebilecek

plansız arızaların sayısına bağlıdır ve plansız arızaların nedenlerinin ortadan kaldırılmasıyla artmaktadır. Düşük güvenilirlik seviyesi, üretim sisteminde plansız arızaların fazla olduğu anlamına gelir ve bu da düşük kullanılabilirlik oranına neden olur.

Durum farkındalığı, algılanan olaylarla ilgili bilgileri anlamlandırmayı amaçlar ve dinamik ortamlarda karar vermenin temelini oluşturur (Ghimire, Luis-Ferreira, Nodehi ve Jardim-Goncalves, 2016). Durumsal farkındalık üç zihinsel seviyeden oluşmaktadır: algılama, anlama ve tahmin (Endsley, 2000). Yeni üretim uygulamalarında artan karmaşıklık ve üretim hızı ile birlikte operatörler için durumsal farkındalığın artırılması gereklidir (Lall, Torvatn ve Seim, 2017).

Bu çalışmada, Minyatür Devre Kesici (MDK) üretim hattında makinelerin güvenilirlik analizi yapılmış, güvenilirlik analizinden elde edilen sonuçlara göre bakım planlamasında öncelik verilecek duruşlar belirlenmiştir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı, üretim hattında güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modelinin bakım planlamasında nasıl kullanılacağını göstermesidir (Öz, 2021). Durumsal farkındalık seviyeleri ve güvenilirlik analizinin aşamaları kavramsal olarak ilişkilendirilmiştir. Durumsal farkındalığın artırılması ile bakım süreçlerinin daha iyi yönetilmesi mümkün olacaktır.

İkinci bölümde, güvenilirlik analizi ve durumsal farkındalık ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, güvenilirlik analizi hakkında bilgi verilmektedir. Dördüncü bölümde; MDK içyapısı, MKD üretim hattında veri toplama, güvenilirlik analizi uygulaması ve elde edilen bulgular anlatılmaktadır. Sonuç bölümünde çalışmanın genel sonuçlarına ve önerilere yer verilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Güvenilirlik, bir sistemin çalışma fonksiyonlarını, belirlenen çalışma koşulları altında belirli bir sürede yerine getirebilme olasılığıdır (Kuo ve Zuo, 2003). Güvenilirlik, hatasız çalışma olasılığının göstergesi olduğu için önemli bir parametredir. Güvenilirlik konusu ürün, makine, sistem veya bir makinenin veya sistemin alt bileşeni için ele alınabilir.

Topçu (2007), Kaplan-Meier tahmin yöntemini ve Greenwood formülünü çalışmada ele almıştır. Sansürlenmiş gözlemler için yaşam fonksiyonunun tahmininde Kaplan-Meier ve Greenwood tahmin yöntemini kullanmıştır. Türkan (2007), güvenilirlik analizinde kullanılan istatistiksel dağılım modelleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada istatistiksel dağılım modellerinin kullanıldığı alanları ve her dağılım modeline ait özellikleri ele almıştır. Atamer (2009), mekanik bir sistemin ve bu sisteme ait bileşenlerin tasarım ve test aşamalarındaki güvenilirlik analizini

kullanmıştır. İnceoğlu (2013), sağ kalım analiz yöntemlerinden Yaşam Tablosu Analizi, Kaplan-Meier Analizi ve Cox Regresyon Analizi yöntemlerini ele almış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır. Karşılaştırma için karaciğer nakli yapılan hastalardan alınan gerçek verileri kullanmıştır.

Güvenilirlik analizi birçok üretim sürecinde makine ve hat için ele alınmaktadır. Literatürde özellikle bakım ve üretim faaliyetlerinde kullanılmak üzere güvenilirlik analizinin ele alındığı çalışmalar vardır. Liberopoulos ve Tsarouhas (2005), otomatik bir pizza hattının güvenilirlik analizini ele almıştır. Bu çalışmayla, ekmek ve unlu mamul ve gıda ürünleri makine imalatçalarına, ürettikleri ve işlettikleri üretim hatlarının tasarımını ve işletimini geliştirmeleri için rehberlik etmeyi amaçlamışlardır. Ünal (2009), yaptığı bir çalışmada güvenilirlik odaklı bakım konusunu ele almıştır. Bu çalışmada bir çimento fabrikasındaki bakım politikasına değinmiş ve güvenilirlik odaklı bakıma geçişe yönelik öneriler sunmuştur. Tsarouhas ve Arvanitoyannis (2010), ekmek üretim hatlarında güvenilirlik ve sürdürülebilirlik analizi yapmıştır. Arıza ve tamir verileri ile hat ve makine seviyesinde yaptıkları çalışmayla mevcut koşulları değerlendirmeyi ve bakım faaliyetlerinin etkinliğini artırmayı hedeflemişlerdir. Uzun ve Özdoğan (2011), yaptıkları güvenilirlik analizi çalışması ile bir işletmedeki bakım politikasını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmayla makine alt bileşenlerinin önleyici bakım periyotlarını belirlemişlerdir. Tsarouhas (2012), gıda endüstrisindeki üretim hatlarının Güvenilirlik, Kullanılabilirlik ve Sürdürülebilirlik (RAM: Reliability, Availability and Maintainability) analizi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmayla üretim sistemlerinin performans ve bakım etkinliği ile iyileştirilmesi gereken kritik noktaları tanımlamayı amaçlamışlardır. Zhang, Zhang, Yu ve Chen (2014), bir piston üretim hattının güvenilirlik analizi üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada güvenilirlik ve sürdürülebilirlik konularıyla birlikte arıza kayıplarına dayalı önem ölçümü konusunu ele almışlardır. Uzuner (2015), bir akü üretim tesisinde güvenilirlik analizine bağlı olarak sistem tasarımı üzerine çalışmıştır. Bu çalışmayla birlikte üretim planlamasına yön vermeyi amaçlamıştır. Ahmaivala (2016), bir simülasyon üzerinden kenar bantlama makinesi üreten bir işletmedeki mevcut güvenilirlik düzeyinin bulunması ve geliştirilmesi için çalışma yapmıştır. Çalışmasında Monte Carlo benzetimi kullanmıştır. Omondi (2017), güvenilirlik analizlerinde kullanılan Weibull ve Log-normal dağılımlarına odaklanmıştır. Yapılan çalışmada buzdolabı fan motorunun ömür süresinin uzatılması hedeflemiştir. Koçak ve İşçioğlu (2018), meyve suyu dolm hatlarının güvenilirlik analizi üzerine çalışma yapmışlardır. Üretim hattının ve makinelerin güvenilirlik analizi sonuçları, iyileştirme noktalarını belirlemede ve bakım faaliyetlerinin planlamasında kullanılmıştır. Enzi ve

Khan (2022) yaptığı çalışmada, krank mili üretim hattının güvenilirliğini tahmin etmek için güvenilirlik, tehlike oranı, sağ kalım miktarı ve arıza yoğunluğunu hesaplanmıştır. Yapılan analizlerde en sık arızanın halka vidada olduğu ve Pareto diyagramından en fazla arıza oranının son dört ay içinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada; arızayı azaltmak ve güvenilirliği artırmak için bakım sisteminin desteklenmesi gerektiği, üretim hattında duruşlara neden olan arızaların analiz edilmesi, çalışanlara sürekli eğitim verilmesi ve üretim hattında modern teknolojilerin kullanılması önerilmektedir. Soltanali, Rohani, Tabasizadeh, Abbaspour ve Parida (2020), otomotiv üretiminde kritik olan ekipmanlar için güvenilirliğe dayalı bir bakım planlaması önermiştir. Çalışmada, üretim hattında sıvı dolm sisteminden arızalar arası süre verileri toplanmıştır. Güvenilirlik, veri dağılımının istatistiksel yapısı belirlenerek ve Monta Carlo benzetimi ile değerlendirilmiştir. İstatistiksel model, güvenilirliği yükseltmek için darboğaz oluşturan doldurma kafa setine öncelik verilmesi gerektiğini göstermiştir. Monte Carlo benzetimi uygulanarak en düşük hata ile en yüksek doğrulukta güvenilirlik elde edilmiştir. Bu çalışmada, optimal bakım aralıkları için güvenilirlik fonksiyonunu içeren maliyet tabanlı model uygulanmıştır.

Durumsal farkındalık, çevredeki unsurların bir zaman ve mekân hacmi içinde algılanması, anlamlarının kavranması ve yakın gelecekteki durumlarının tahmin edilmesidir (Endsley, 2000). Durumsal farkındalık, çevresinin ilgili unsurları ile etkileşim gerektiren bir durumda insan seviyesinde veya herhangi bir sistem seviyesinde ele alınabilir. Üretim operatörleri, bakım personelleri veya üretim makineleri üretimde durumsal farkındalığın ele alınabileceği konulara örnek olabilir.

Durumsal farkındalık üç seviyeden oluşmaktadır: mevcut durumdaki unsurların algılanması, mevcut durumun anlaşılması ve gelecekteki durumun tahmini. Durumsal farkındalığın ilk seviyesi, çevredeki ilgili öğelerin durumunu, niteliklerini ve dinamiklerini algılamakla ilişkilidir (Panteli, 2013). İlk seviye, ilgili bilginin algılanmasını kapsar. Öncelikle sistemin veya kişinin ilgili bilgilere erişimi olması gerekir. Sonrasında bu bilgiler sistem veya kişiler tarafından tanınabilmelidir. Durumsal farkındalığın ikinci seviyesi, ilgili amaç ve hedeflerle ilişkili olarak algılanan verilerin ne anlama geldiğinin anlaşılmasını işaret eder. Elde edilen bilginin doğru anlaşılması gerekmektedir. Durumsal farkındalığın üçüncü seviyesi ise, bir sistemin elemanlarının, mevcut durumlarına ve algılanan bilgilere dayalı olarak gelecekteki davranışlarının tahmin edilmesini ifade eder. Özellikle bu seviyede dinamik süreçlerin yanlış varsayımlarla geleceğe yansıtılması durumu kritiktir. Örneğin; karmaşık sistemler yüksek seviyede bağlılıklarla karakterize edilir. Bu da bir değişkenin tüm sistemi nasıl etkileyeceğinin tahmin edilmesini zorlaştırır.

Durumsal farkındalık üzerine farklı alanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Durumsal farkındalıkta algılanan durum “zihinsel” veya “bilişsel” bir model olabilir. Bu da durumsal farkındalığın insan seviyesinde veya bilişsel bir sistem seviyesinde ele alınabileceğini göstermektedir. Literatürde endüstriyel ortamlarda operatörlerdeki durumsal farkındalık üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Endsley ve Kiris (1995), üretim operatörlerindeki döngü dışı performans sorununu ele almışlardır. Otomasyon sistemlerinin üretim süreçlerinde daha fazla yer almasıyla birlikte operatörlerdeki manuel işlere karşı durumsal farkındalığın azaldığını vurgulamışlardır. Lall ve diğ. (2017), çalışmalarında üretim süreçlerindeki teknik destek sistemlerle operatörlerdeki durumsal farkındalığın artırılmasının gerekliliği konusunu ele almışlardır. Endüstri 4.0 ve gelişen üretim teknolojileri ile birlikte, operatörlerdeki artan hız ve görev karmaşıklığını verimli bir şekilde yönetebilmek için, operatörlerdeki durumsal farkındalığın artırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışmalarla birlikte endüstride bilişsel sistemler seviyesinde durumsal farkındalık üzerine yapılan çalışmalar da mevcuttur. Panteli (2013), bilgi ve iletişim teknolojileri güvenilirliğinin ve durum farkındalığının güç sistemi kesintileri üzerindeki etkisini konu olarak ele almıştır. Bu çalışmanın amacı, elektriksel olmayan olayların güç sistemi kesintileri riskine katkısını değerlendirmektir ve çalışmada, güvenilirlik ve durum farkındalığı konusu birlikte ele alınmıştır. Ghimire ve diğ. (2016), verimli proje yönetimi sağlamak için IoT (Internet of Things) teknolojileriyle karar verme süresini azaltmayı amaçlamıştır. Hedef, mevcut üretim süreçlerinin üstünde dinamik bir durumsal farkındalık yapısı oluşturup, üretim alanında veya proje uygulamalarında devam eden süreçleri tespit etme ve bunlara ilişkin içgörü kazanma yeteneklerine sahip bir proje yönetimi yaklaşımı sağlamaktır. Park, Laskey, Salim ve Lee (2017), çalışmalarında Öngörülü Üretim Durum Farkındalığı (Predictive Manufacturing Situation Awareness) konusunu ele almışlar ve bunu akıllı üretim sistemlerini desteklemenin ilk adımı olarak görmüşlerdir. Daha kısa sürede daha düşük maliyetle daha yüksek kalite elde etmek gibi konularda, imalat endüstrisinde endüstriyel rekabet gücünü artırmak amacıyla bir öngörülü üretim durum farkındalığı sistemi geliştirmeyi hedeflemişlerdir.

3. Yöntem

Bu bölümde; güvenilirlik hesabı, olasılık yoğunluk modelinin belirlenmesi, MDK üretim hattında güvenilirlik hesabı ve güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli hakkında bilgi verilmektedir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1 Güvenilirlik Hesabı

Güvenilirlik, bir makine veya sistemin, belirli koşullar altında, t süresi boyunca işlevini yerine getirebilme olasılığıdır (Tsarouhas, 2012). T , arızalar arası süreyi (TBF: Time Between Failure) gösteren sürekli rassal değişken olsun. $T \geq 0$ için güvenilirlik,

$$R(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

şekilde ifade edilir. $F(t)$, bir sistemin güvensizliği ise

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (2)$$

$F(t)$, t süresinden önce sistemin arızalanma olasılığı gösterir.

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (3)$$

$F(t)$, arıza dağılımının birikimli dağılım fonksiyonudur. Güvenilirlik teorisinde arıza oranı (risk oranı) fonksiyonu

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $f(t)$, arıza dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonudur ve

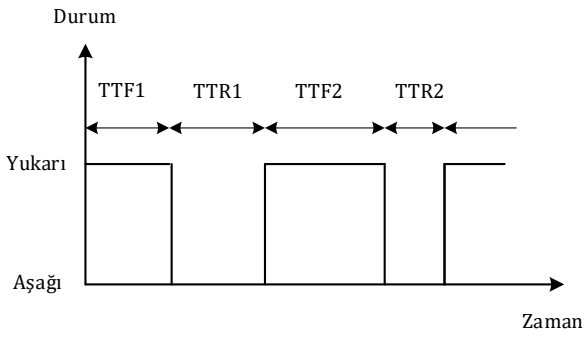
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

şekilde tanımlanır. $f(t)$ 'nin ortalaması, Arızalar Arası Ortalama Süreyi (MTTF: Mean Time to Failure) verir.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (6)$$

Bu çalışmada yaşam olasılığı üzerinden arızalar arası süreleri (TTF: Time To Failure) ve tamir süreleri (TTR: Time To Repair) kullanılarak güvenilirlik analizi yapılmıştır. Tamir durumları dizisi; TTF ve TTR değerlerinin sıralı olarak örneklendirilmesiyle oluşturulur (Panteli, 2013). Şekil 1'de bir bileşen için rastgele çalışma döngüsü gösterilmektedir. Burada “Yukarı” bileşenin çalıştığı durumu, “Aşağı” ise bileşenin tamir sürecinde olduğu durumu gösterir.

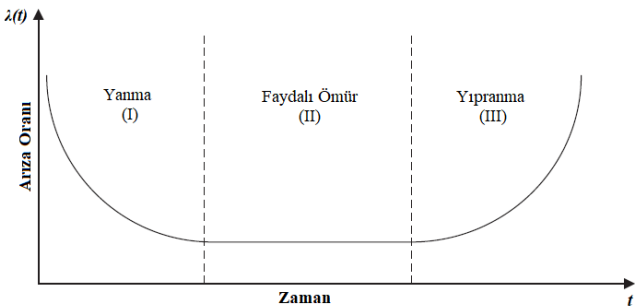
Güvenilirlik, bir sistemin fonksiyonlarını sorunsuz bir şekilde yerine getirebilme olasılığıdır. Güvenilirlik değerinin yüksek olabilmesi için TTF değerlerinin büyük, TTR değerlerinin ise küçük olması gerekmektedir. TTF değerlerinin büyük olması sistemin uzun süreli arızalanmadan çalıştığının göstergesidir. TTR değerlerinin büyük olması ise tamir için ayrılan sürelerin yüksek olması anlamına gelmektedir ve üretim maliyetini artıran bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1. Bir bileşenin rastgele çalışma döngüsü (Panteli, 2013)

Arıza oranı fonksiyonu $\lambda(t)$, bir bileşenin veya sistemin arıza oranını temsil eden zamana bağlı bir fonksiyondur. Bir sistem için kuvvet eğrisi üç bölgeden oluşur: yanma (burn-in), faydalı ömür (useful life) ve yıpranma (wear-out). Bu fonksiyon şeklinden dolayı kuvvet eğrisi (bathtub curve) olarak adlandırılır (Şekil 2).

Kuvvet eğrisindeki üç bölgede arızalar temelde farklı nedenlere bağlıdır. Bu sebeple güvenilirliği artırmada her bölgenin tedbirleri farklıdır. Birinci bölgede arızalar, üretim kusurlarından, zayıf işçilikten ve zayıf kalite kontrolden kaynaklanmaktadır. Birinci bölgede kusurlar düzeltilir, zayıf bileşenler değiştirilir ve kullanıcı ürünün kurulmasına, çalışmasına ve bakımına zaman geçtikçe alışır. İkinci bölgede; rastgele yükler, insan hatası, doğal arızalar ve kötüye kullanım nedeniyle arıza oranı sabittir. Bu bölgedeki hasarlar rastlantısal olarak meydana geldiği için hasarların tahmini zordur. Üçüncü bölgede; yorgunluk, eskime, korozyon ve sürtünmeden kaynaklı arızalar görülür. Arıza oranı fonksiyonu ile bir bileşen/sistemin yorulma hasarları, erken bozulmaları ve rastlantısal hasarları açıklanabilmektedir.



Şekil 2. Kuvvet eğrisi

3.2 Seri Üretim hatlarında güvenilirlik hesabı

Bir üretim hattının güvenilirliğini hesaplayabilmek için öncelikle o hatta güvenilirliği hesaplanabilecek en küçük sistemlere karar verilmelidir. Bu sistemler hattaki makineler, makinelerdeki istasyonlar vs. olabilir. Alt sistemlerin bağlantı şekillerine (seri, paralel, seri-

paralel) ve sıralamasına bağlı olarak hattın güvenilirliği hesaplanır.

Seri yapıya sahip bir sistem n adet alt sistemden oluşsun ve bu alt sistemler $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile temsil edilsin. Seri sistemin güvenilirliği R_s ;

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n \quad (7)$$

$$= \prod_{i=1}^n R_i$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte alt sistemlerin güvenilirlik değerleri $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile gösterilmektedir. Güvenilirlik değeri $[0, 1]$ aralığındadır. Alt sistem sayısı arttıkça seri sistemin güvenilirliği azalır.

Alt sistemlerinin güvensizlik değerleri $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ile gösterilsin. Bu durumda seri sistemin güvensizlik değeri F_s ;

$$F_s = 1 - [(1 - F_1) \times (1 - F_2) \times \dots \times (1 - F_n)] \quad (8)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i)$$

eşitliğinden hesaplanır.

3.2.3 Uyum iyiliği testi ve olasılık dağılım modelleri

Bir makinenin veya üretim hattının güvenilirliğini hesaplayabilmek için arızalar arası ve tamir süreleri verilerinden yararlanılır. Güvenilirlik, belirli bir süre sonra makine veya hattın arızaya geçmeme olasılığı olduğu için, güvenilirlik hesabı geçmiş arıza verilerinin dağılımına bağlı olarak yapılır. Makine ömür sürelerini gösteren veriler genellikle sürekli rastgele değişken özelliğe sahiptir ve bu nedenle bu verilerin ömür dağılımları da sürekli dağılımlardır. Güvenilirlik analizlerinde Weibull, Üstel, Log-normal ve Normal dağılım modelleri yaygın olarak kullanılan dağılım modellerindedir (Uzun ve Özdoğan, 2011).

Verilerin dağılımına uyan olasılık dağılım modeli seçilirken uyum iyiliği testi (goodness-of-fit test) kullanılabilir (Woodruff ve Moore, 1988). Uyum iyiliği için kullanılan testlere örnek olarak Kolmogorov-Smirnov testi, Anderson-Darling testi, Ki-Kare testi, Shapiro-Wilk testi ve Cramér-von Mises testi verilebilir.

3.3 MDK üretim hattında güvenilirlik analizi

Bir üretim hattında güvenilirlik analizi için duruş verileri kullanılır. Duruş verileri elle veya otomatik olarak toplanabilir. Bu çalışmada kullanılan duruş verileri bir MES (Manufacturing Execution System) ile veri tabanına otomatik olarak kaydedilmiştir.

Bu çalışmadaki güvenilirlik analizi için yapılan işlemlere ait akış şeması Şekil 3'de gösterilmektedir. Güvenilirlik analizi duruş verilerine ait TTF ve TTR değerleri kullanılır. İlk olarak MES ile toplanan duruş verileri ön işlemeden geçirilir.

Uyum iyiliği testi ile verilerin parametrik olasılık dağılımına uyumlu olup olmadığı belirlenir. Veriler parametrik dağılıma uygun ise en yüksek uyum değerine sahip dağılım modeline ait parametreler hesaplanır. Daha sonra olasılık dağılım modeline ait formüller ve parametreler kullanılarak güvenilirlik değerleri hesaplanır. Parametrik olmayan dağılımlar için ise parametrik olmayan veri analizi uygulanarak güvenilirlik değerleri hesaplanır.

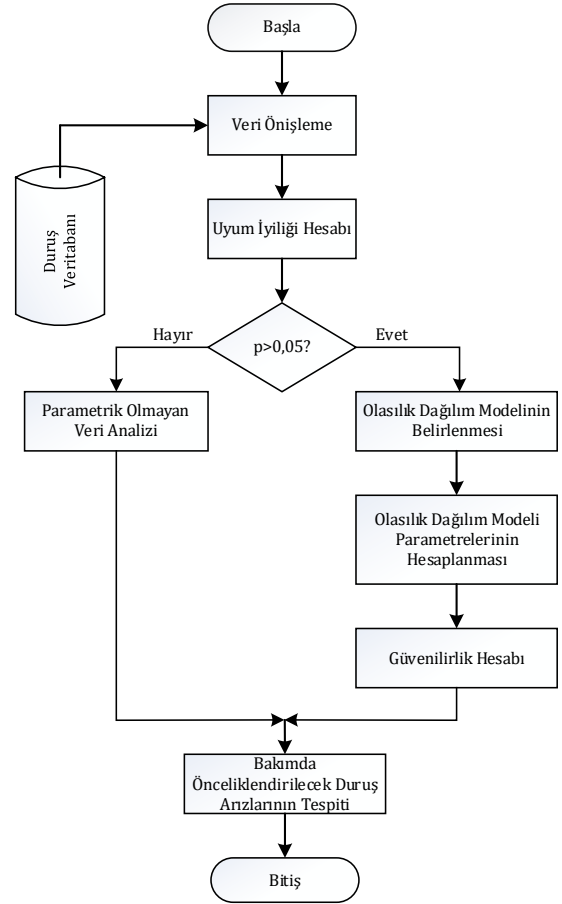
Bu çalışmada, olasılık dağılım modellerinin uyum iyiliği için Anderson-Darling testi kullanılmıştır. Weibull, Log-normal, Üstel, Log-lojistik, 3-parametrelili Weibull, 2-parametrelili Üstel, En Küçük Uç Değer, Normal ve Lojistik olasılık dağılım modelleri Anderson-Darling testi ile değerlendirilmiştir. Güvenilirlik analizinde kullanılacak olasılık dağılım modeli kararlaştırıldıktan sonra dağılım modelinin o veri seti için parametrelerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada parametrik dağılım modellerinin parametrelerinin tahmin edilmesinde En Çok Olabilirlik Tahminleme (MLE: Maximum Likelihood Estimation) yöntemi kullanılmıştır.

Duruş verileri parametrik olasılık dağılımlardan en az birine uyan makineler için seçilen dağılım modelinin olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları kullanılarak güvenilirlik hesabı yapılır. Güvenilirlik değerleri belirli süreler için belirlenir.

Her veri seti bir parametrik dağılıma uymayabilir. Bu çalışmada herhangi bir parametrik dağılıma uymayan veriler için Kaplan-Meier analizi uygulanmıştır.

Bu çalışmada, her makinenin arızalanmadan çalışabileceği süreler için olasılıkları gösteren sağ kalım grafikleri çıkarılmıştır. Makinelerin belli sürelerdeki yaşam olasılıkları makinelerin güvenilirliği hakkında bilgi vermektedir. Süre arttıkça yaşam olasılığı düşeceği için sağ kalım grafikleri aşağı doğru eğimlidir. Arıza ve tamir süreleri için seçilen birikimli dağılım modeli ise ele alınan makinenin belirli bir süreye kadar arızalanma olasılığını göstermektedir.

Bir işletmede güvenilirlik analizi yapmak bakım faaliyetlerine yön vermek için önemlidir. Bu nedenle, güvenilirlik hesaplamaları yapıldıktan sonra sonuçların bakım faaliyetlerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

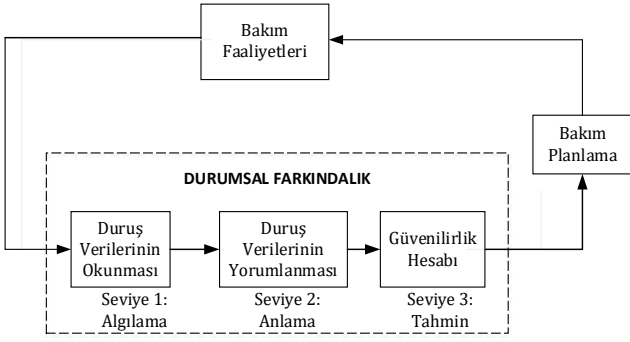


Şekil 3. Güvenilirlik analizi akış şeması

3.4. Durumsal farkındalık modeli

Üretim süreçlerinde güvenilirlik, üretim makinelerinin ve hatlarının çalışma performansını gösteren önemli bir ölçüttür. Çünkü güvenilirlik değeri, bir süre için ele alınan bileşenin veya sistemin arızasız olarak çalışma olasılığını gösterir.

Güvenilirlik analizi, üretim tesisinde bakım planlamasındaki durumsal farkındalığı artırır. Ayrıca, güvenilirlik analizi işletmede üretimde kullanılan makinelerin ve üretim hatlarının çalışma performansları hakkında bilgi verir. Güvenilirlik analizi, tanımı ve seviyeleri düşünüldüğünde durumsal farkındalık ile paralellik göstermektedir. Durumsal farkındalığın algılama, anlama ve tahmin şeklindeki adımları güvenilirlik analizinde de uygulanmaktadır. Bu çalışmada önerilen güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeli Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Önerilen durumsal farkındalık modeli

Güvenilirlik analizinde öncelikle ele alınacak bileşen veya sistemle ilgili arıza verileri elde edilir. Daha sonra elde edilen veriler ön işlemeden geçirilir, güvenilirlik analizinde kullanılacak hale getirilir ve verilerle ilgili genel çıkarımlar yapılır. Güvenilirlik analizinin son adımında güvenilirlikle ilgili hesaplamalar gerçekleştirilir ve gelecek ile ilgili olasılık tahminleri yapılır. Güvenilirlik analizi sonucunda elde edilen bilgiler bakım faaliyetlerinin planlamasında kullanılır. Güvenilirlik analizi, belirli periyotlarla tekrarlanması gereken bir analizdir. Bu da durumsal farkındalığın genel döngüsünde olması gereken bir durumdur. Güvenilirlik analizi yapılan sistem ya da bileşen yıpranma sürecinde ise güvenilirlik hesaplarının sık aralıklarla periyodik olarak yapılması önemlidir. Çünkü güvenilirlik değeri düşük olan bir sistem ya da bileşenin yıpranma sürecinde olması muhtemeldir. Bu durumun tespiti ve önlem ve düzeltme olarak gerekli aksiyonların alınması, o sistem veya bileşen için güvenilirlik değerini artıracaktır. Güvenirliğin artması ile birlikte verimlilik artacak, üretim kapasitesi yükselecek ve maliyetler düşecektir.

4. Bulgular

Bu bölümde; MDK üretim hattı hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca, MDK üretim hattının güvenilirlik analizinden elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Bu çalışmada, Pareto grafiklerinin analizi, uyum iyiliği testleri, olasılık dağılım modellerinin analizi ve parametrik olmayan analizler Minitab 19 istatistiksel analiz yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Anonim, 2021).

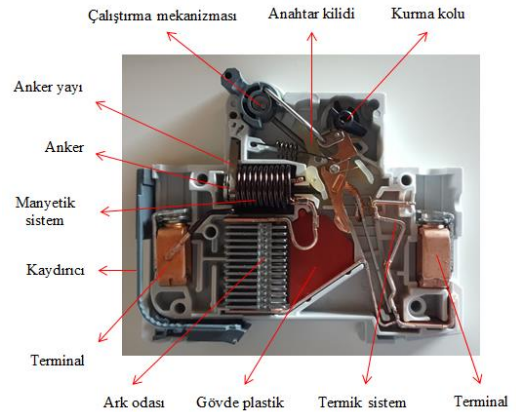
4.1 Minyatür devre kesici üretim hattı

Minyatür devre kesiciler, elektrik tesisatını ve sistemi aşırı akım ve kısa devrelere karşı koruyan koruma ve anahtarlama devre elemanlarıdır. Şekil 5'de bir Siemens minyatür devre kesicisinin iç yapısı gösterilmektedir.

Siemens Gebze Elektrik Ürünleri Fabrikası'nda Minyatür Devre Kesici üretim hattı seri bağlı on bir (11) makineden oluşmaktadır. Bu makineler, hattın başından sonuna doğru sırasıyla; hat yükleme makinesi, manyetik sistem ve anker makinesi, kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, anker yayı ve ark odası makinesi, kamera ve

kapak makinesi, perçin makinesi, tampon makinesi, test makinesi, lazer baskı makinesi, koruma parçası makinesi ve paketleme makinesidir.

Hat yükleme makinesi, yarı mamul olarak gelen minyatür devre kesicilerin hatta otomatik olarak beslenmesini sağlayan makinedir. Minyatür devre kesiciler yarı mamul olarak şarjörler içinde dizili bir şekilde gelmektedir ve şarjörler bir robot aracılığı ile besleme istasyonlarına yerleştirilmektedir. Manyetik sistem ve anker makinesi, minyatür devre kesicinin manyetik sistem ve anker parçalarının montajını yapan makinedir. Kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, minyatür devre kesicinin kurma kolu ve kaydırıcı parçalarının montajını yapan makinedir. Anker yayı ve ark odası makinesi, minyatür devre kesicinin anker yayı ve ark odası parçalarının montajını yapan makinedir. Kamera ve kapak makinesi, minyatür devre kesicinin içindeki parçaların varlığını ve konumlarını bir kamera ile kontrol eder. Ardından minyatür devre kesicinin kapağının montajını yapar. Perçin makinesi, minyatür devre kesicinin kapak ve gövdesini perçinleyen makinedir. Tampon makinesi, perçin makinesi ile lineer test makinesi arasında geçiş makinesidir.

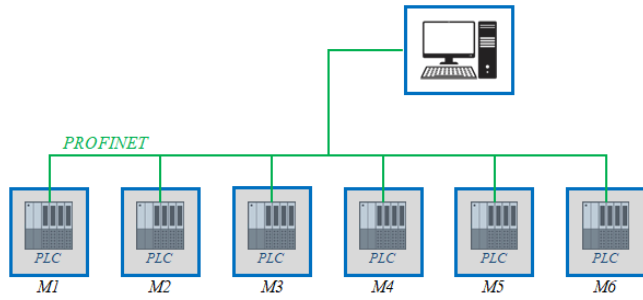


Şekil 5. Siemens minyatür devre kesicinin iç yapısı

Test makinesi, minyatür devre kesicilerin termik açma ve manyetik açma zamanlamasını ve limitlerini ve mekanik yapısının düzgün çalışıp çalışmadığını test eder. Lazer baskı makinesi, minyatür devre kesicilerin üst ve yan yüzeylerine, ürün tipine bağlı olarak karakteristik bilgilerini ve firmanın bilgilerini içeren baskıları yapan makinedir. Koruma parçası makinesi, minyatür devre kesicinin koruma parçasının montajını yapan makinedir. Bununla birlikte minyatür devre kesicinin yüksek gerilim testini de yapar. Paketleme makinesi, minyatür devre kesicilerin otomatik olarak paketlenmesini sağlar. Tampon makinesi hattın ortasında depo görevi görmektedir. Operasyonel süreçler tampon makinesinin öncesi ve sonrası olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada, minyatür devre kesici üretim hattının sadece tampon makinesine kadar olan altı (6) makine ele alınmıştır. Üretim hattında ilk

altı makine sırasıyla hat yükleme makinesi, manyetik sistem ve anker makinesi, kurma kolu ve kaydırıcı makinesi, anker yayı ve ark odası makinesi, kamera ve kapak makinesi ve perçin makinesidir. Bu makineler sırasıyla M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 ile temsil edilecektir.

MDK üretim hattını oluşturan makineler PLC (Programmable Logic Controller) ile kontrol edilmektedir. Üretim hattı seri olarak çalışan makinelerden oluştuğu için bir arıza durumunda makineler bekleme durumuna geçecektir. MDK üretim hattı verileri bir MES üzerinden toplanmaktadır. Her makine PROFINET ağı üzerinden MES'e veri göndermektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Veri toplama sistemi

MES üzerindeki veri tabanına; vardiyalık olarak makinelere giren ürün adedi, çıkan ürün adedi, bozuk olarak ayrılan ürün adedi, Genel Ekipman Etkinliği (Overall Equipment Effectiveness) değerleri ve duruş verileri kaydedilmektedir. Duruş verisi; makine ismi, TTF, TTR, duruş mesajı ve mesaj numarasını içermektedir. Bir makine arızaya geçtiğinde, arızaya ait duruş mesajı MES tarafından veri tabanına anlık olarak kaydedilmektedir. Bu çalışmada 2020 yılı Mart ayına ait veriler kullanılmıştır (Siemens veri kullanım onayı, 26/11/2020).

4.2. MDK üretim hattında makinelerin duruş hatalarının analizi

MDK üretim hattındaki makineler ağırlıklı olarak pnömatik sistemlerden oluşmaktadır. Bu nedenle, pnömatik pistonların hareketlerini yapamamalarından kaynaklanan duruşlar, arızaların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Duruşlar birkaç saniyeden birkaç saate kadar sürebilmektedir. Operatörler, duruşların büyük bir bölümüne anlık olarak müdahale edebilmekte ve makineyi tekrar hızlı şekilde çalışır hale getirebilmektedir. Bu nedenle duruşların birçoğu kısa süreli duruştur.

MDK üretim hattındaki makinede çeşitli nedenlerle oluşan duruşların oluşma sıklıkları süreleri kullanılarak Pareto grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, her makine için en sık oluşan arızaları göstermektedir. Makinelerde ortaya çıkan duruşlar "DXXX" şeklinde kodlanmıştır.

Şekil 7'de M1 makinesinde ortaya çıkan duruşlar sıklığına ve duruş sürelerine göre Pareto grafiğinde gösterilmektedir.

Veri setinde M1 için 580 adet arıza kaydı bulunmaktadır. Pareto grafiğinden görüleceği gibi M1 için en sık oluşan ilk altı duruş, en yüksekte en küçüğe doğru sıralandığında, D026, D013, D042, D030, D029 ve D028 kodlu duruşlardır. Bu kodlar sırasıyla; kapak açma mekanizması Z eksen silindirinini aşağı inmemesi, kartezyen robot tutucusunun kapanmaması, kartezyen robotun Z eksenine ait servo motorun hataya geçmesi, 3 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi, 4 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi ve 5 numaralı şarjör itme silindirinini ileri gitmemesi duruşlarını temsil etmektedir.

Tablo 1 ve Tablo 2'de oluşma sıklığına ve sürelerine göre etkisi yüksek duruşların birikimli oranları gösterilmektedir. Bu tablolar, makinelerine ait arızaların duruş sıklığına göre oluşturulan Pareto grafiklerinden elde edilmiştir.

Tablo 1. Makinelerde oluşma sıklığına göre en sık görülen duruşlar ve birikimli oranları

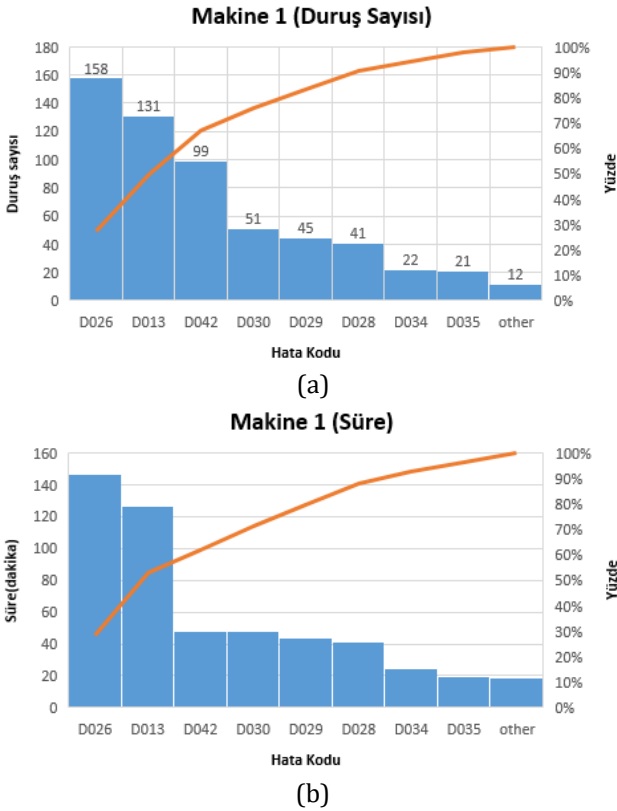
Makine	Duruş Kodları	Birikimli Oran (%)
M1	D026, D013, D042, D030, D029, D028	90,5
M2	D064, D029, D084, D056, D058, D069	75
M3	D040, D018, D022, D027, D042	77
M4	D083, D043, D061, D044, D041, D014	82
M5	D086, D095, D035, D065, D066	83,4
M6	D085, D064, D068, D077	94,4

Tablo 2. Makinelerin duruş süresine göre en çok görülen duruşlar ve birikimli oranları

Makine	Duruş Kodları	Birikimli Oran (%)
M1	D026, D013, D028, D030, D042, D029	87,8
M2	D064, D084, D059, D056, D058, D029	84,2
M3	D040, D018, D022, D042, D027	74
M4	D083, D022, D043, D044, D061, D014	81
M5	D020, D04, D066, D086, D095	94,4
M6	D064, D085, D077	95

Makinelerin ve hattın performansını ve kullanım süresini artırmak için, arızaların gerçekleşme sebeplerini ortadan kaldırmaya yönelik yapılacak faaliyetlerde bu arızalara öncelik verilmelidir. Bazı arızaların etkisi oluşma sıklığı açısından yüksekken,

bazılarının etkisi ise duruş süresi açısından yüksektir. Özellikle hem oluşma sıklığı hem de duruş süresi açısından etkisi yüksek arızaların gerçekleşme sebeplerinin ortadan kaldırılması, makinelerin performansını artıracak ve kullanım sürelerini uzatacaktır.



Şekil 7. M1 makinesinde sık görülen duruşların a) sayısına ve b) sürelerine göre Pareto grafikleri

4.4. Makinelerin güvenilirlik hesabı

MES kullanılarak üretim hattındaki M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 makinelerinden toplanılan 2020 yılı Mart ayına ait TTF ve TTR değerleri için güvenilirlik hesaplamaları yapılmıştır.

4.4.1. Olasılık dağılım modelinin belirlenmesi

Olasılık dağılım modelinin uygunluğuna Anderson-Darling test istatistiği değerine göre karar verilmiştir.

Anderson-Darling testi; Weibull, Üstel, Log-normal, Log-lojistik, 3-parametrelili Weibull, 2-parametrelili Üstel, En Küçük Uç Değer, Normal ve Lojistik dağılımlarına uygulanmıştır. Her makine için Anderson-Darling test istatistiği değeri $p > 0,05$ olan dağılımlar anlamlı kabul edilmiştir ve güvenilirlik analizi için o dağılım modeli kullanılmıştır. Eğer herhangi bir makinenin arızalar arası süresi verileri için, Anderson-Darling test istatistiği değeri 0,05'ten büyük olan bir dağılım yoksa o veri kümesi parametrik olmayan dağılım olarak kabul edilmiştir.

İstatistiksel analiz programı (Anonim, 2021) kullanılarak dokuz adet dağılım için Anderson Darling testi istatistiği değeri hesaplanmıştır (Öz, 2021). Tablo 3 ve Tablo 4'de M1-M6 makinelerinin arızalar arası süre ve tamir süresi verilerinden belirlenen olasılık dağılım modelleri için Anderson testi ile elde edilen p değerleri verilmektedir.

Tablo 3'de verilen değerlere göre M1, M2, M3 ve M6 makinelerinde arızalar arası süre için en uygun olasılık dağılımı modelinin 3-parametrelili Weibull olduğu görülmektedir. 3-parametrelili Weibull dağılımı için M1, M2, M3 ve M6 makinelerinden Anderson Darling testinden elde edilen sırasıyla $p=0,395$; $p>0,5$; $p>0,5$; ve $p=0,07$ değerleri elde edilmiştir. M4 ve M5 için istatistik değerleri $p > 0,05$ olan olasılık dağılımı bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu makinelerde Kaplan-Meier analizi uygulanmıştır.

Tablo 4'den M2 ve M3 makinelerinin tamir süresi verilerine uygun olasılık dağılım modelinin 3-parametrelili Weibull dağılımı olduğu görülmektedir. Bu makineler için Anderson Darling testi ile elde edilen p -değerleri sırasıyla 0,162 ve 0,231'dir. Diğer makineler için Kaplan-Meier analizi kullanılmıştır.

4.4.2. Olasılık dağılım modeli parametrelerinin hesaplanması

Arızalar arası ve tamir süresi verileri için belirlenen 3-parametrelili Weibull ve Log-normal olasılık dağılım modellerinin parametreleri MLE (Maksimum Likelihood Estimation) yöntemiyle hesaplanmıştır. 3-parametrelili Weibull olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları Eşitlik (10) ve Eşitlik (11)'de verilmektedir.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde; β şekil, η ölçek ve γ konum parametresini göstermektedir. Log-normal olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (\log x - \mu)^2 \right\} \quad (12)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (\log y - \mu)^2 \right\} dx \quad (13)$$

Bu eşitliklerde; μ ortalama ve σ varyansı göstermektedir.

Tablo 3. Arızalar arası süre verileri için olasılık dağılım modellerinden elde edilen Anderson-Darling testinin p değerleri

Dağılım	Anderson-Darling Test İstatistiği Değeri					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Weibull	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Log-normal	<0,005	0,112	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Üstel	0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Log-lojistik	<0,005	0,032	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
3-parametrelili Weibull	0,395	>0,5	>0,5	0,009	<0,005	0,07
2-parametrelili Üstel	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
En Küçük Uç değeri	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Normal	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Lojistik	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Tablo 4. Tamir süresi verileri için olasılık dağılım modellerinden elde edilen Anderson-Darling testinin p değerleri

Dağılım	Anderson-Darling Test İstatistiği Değeri					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Weibull	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Log-normal	<0,005	0,017	0,231	<0,005	<0,005	<0,005
Üstel	<0,003	0,004	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Log-lojistik	<0,005	0,008	0,022	<0,005	<0,005	<0,005
3-parametrelili Weibull	<0,005	0,162	0,057	<0,005	<0,005	<0,005
2-parametrelili Üstel	<0,01	0,022	0,204	<0,01	<0,01	<0,01
En Küçük Uç Değeri	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Normal	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Lojistik	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

M1-M6 makineleri içinden arızalar arası süresi ve tamir süresi verileri parametrik dağılıma uygun olanlar için belirlenen olasılık dağılım modellerinin MLE ile hesaplanan parametreleri Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 5. Arızalar arası süre verilerine göre M1, M2, M3 ve M6 makinelerinin dağılım modeli parametreleri

Makine	3-parametrelili Weibull Dağılım Modeli Parametreleri		
	Şekil (β)	Ölçek (η)	Konum (γ)
M1	0,888068	40,2849	0,966984
M2	0,638147	51,4760	1,12842
M3	0,653196	54,1258	0,979365
M6	0,727432	50,2849	1,05174

Tablo 6. Tamir süresi verilerine göre M2 ve M3 makinelerinin dağılım modeli parametreleri

Makine	Olasılık Dağılım Modeli	Dağılım Parametreleri	Modeli
M2	3-parametrelili Weibull	Şekil (β): 0,833674 Ölçek (η): 0,428146 Konum (γ): 0,0972094	
M3	Log-normal	Ölçek (σ): 0,688111 Konum (μ): -1,01129	

4.4.3. Makinelerin yaşam olasılık tahmini

Arızalar arası ve tamir süreleri için makinelerin yaşam olasılığı tahminleri Tablo 7 ve Tablo 8'de verilmiştir. Arızalar arası ve tamir süresi verileri parametrik bir dağılıma uyan makinelerin yaşam olasılıkları, olasılık dağılım modeline ait olasılık yoğunluk ve birikimli dağılım fonksiyonlarından yararlanılarak hesaplanmıştır. Tablolarda verilen süreler üzerinden hesaplanan yaşam olasılıkları değerleri makinenin güvenilirliği hakkında bilgi vermektedir.

Sağ kalım grafiğinden, makinenin belirli bir süreden sonra düzgün çalışma olasılığı belirlenir. Bu değer aynı zamanda makinenin güvenilirlik değeridir. Birikimli arıza grafiği, ele alınan makinenin belirli bir süreye kadar arızalanma olasılığını gösterir. Arıza oranı (failure rate) grafiği, belirli bir zamandaki anlık arıza oranını göstermektedir. Arıza oranının artması, zamanla arızalanma olasılığının daha yüksek olduğunu ve sistemin yıpranma sürecinde olduğunu gösterir. Arıza oranının azalması, sistemin arızalanma olasılığının erken kullanım dönemlerinde daha yüksek olduğunu gösterir. Sistemin faydalı ömür döneminde arıza oranı sabittir. Şekil 8 ve Şekil 9'da M1'in arızalar arası ve tamir süreleri için sağ kalım, birikimli arıza ve arıza oranı grafikleri gösterilmektedir. M1'in tamir süresi verileri için uygun dağılım modeli belirlenemediğinden Şekil 9'da grafikler istatistiksel yazılım programı kullanılarak Kaplan-Meier metodu ile elde edilmiştir.

Tablo 7. Arızalanma sürelerine göre yaşam olasılığı tahminleri

Zaman (dakika)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
2	0,96	0,93	0,93	0,88	<0,954 ve >0,947	0,95
5	0,88	0,83	0,83	<0,72 ve >0,71	<0,868 ve >0,861	0,85
10	0,77	0,72	0,73	<0,60 ve >0,59	<0,834 ve >0,828	0,75
20	0,60	0,59	0,60	<0,471 ve >0,469	<0,769 ve >0,762	0,61
30	0,47	0,50	0,51	<0,350 ve >0,348	<0,722 ve >0,715	0,51
40	0,38	0,43	0,45	<0,294 ve >0,292	<0,630 ve >0,623	0,44
50	0,30	0,38	0,39	<0,239 ve >0,238	<0,557 ve >0,550	0,38

Tablo 8. Tamir sürelerine göre yaşam olasılığı tahminleri

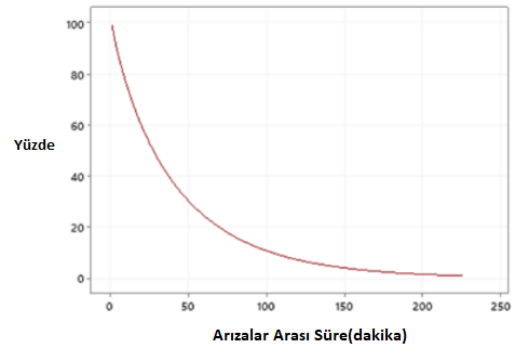
Zaman (dakika)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
0,1	0,9776	0,9851	0,9697	0,9458	0,9404	0,9812
0,2	0,8741	0,7376	0,8076	0,6561	0,5629	0,8662
0,3	0,7966	0,5849	0,6103	0,4449	0,3642	0,6268
0,4	0,7017	0,4728	0,4451	0,3159	0,2781	0,4272
0,5	0,6362	0,3866	0,3219	0,2131	0,1987	0,3498
1	0,2776	0,1553	0,0708	0,0729	<0,0795 ve >0,0728	0,1244
2	<0,069 ve >0,672	0,0312	0,0066	<0,0243 ve >0,0224	<0,0464 ve >0,0397	<0,0376 ve >0,0352
3	<0,0362 ve >0,345	0,0072	0,0011	<0,0168 ve >0,015	<0,0265 ve >0,0199	<0,0188 ve >0,0164
4	<0,0086 ve >0,0069	0,0018	0,0002	<0,015 ve >0,0131	<0,0265 ve >0,0199	<0,0164 ve >0,0141
5	<0,0086 ve >0,0069	0,0005	~0	<0,0075 ve >0,0037	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
10	<0,0017 ve >0	~0	~0	<0,0037 ve >0,0019	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
15	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0199 ve >0,0132	<0,0117 ve >0,0094
20	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0132 ve >0,0066	<0,0117 ve >0,0094
30	0	~0	~0	<0,0019 ve >0	<0,0132 ve >0,0066	<0,0094 ve >0,007

Makinelerin arızalar arası süreleri incelendiğinde, ortalama arızalar arası süresi en düşük makine 36,07 dakika ile M4 iken, en yüksek makine 107,3 dakika ile M5'tir. Makinelerin tamir süreleri incelendiğinde, ortalama tamir süresi en düşük makine 0,467 dakika ile M3 iken, en yüksek makine de 2,82 dakika ile M6'dır. Tamir süresi yüksek olan makinelerin tamir sürelerinin düşürülmesi için gerekli çalışmalar yapılmalıdır.

Makinelerin arızalar arası sürelerine göre güvenilirlik değerleri incelendiğinde 60. dakika değeri için M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 için güvenilirlik değerleri sırasıyla 0,2456; 0,3364; 0,3471; 0,204; 0,533 ve 0,3254'tür. Bu değerlere göre güvenilirlik değeri en düşük makine M4 iken, en yüksek makine M5'tir. Arızalar arası süreleri için güvenilirlik değerini özellikle sık sık oluşan arızalar olumsuz olarak etkilemektedir. Bu nedenle, M4 için bakım planlamasında oluşma sıklığına göre birikimli toplamı %82 olan D083, D043, D061, D044, D041 ve D014 kodlu duruşlara bakım planlamasında öncelik verilmelidir.

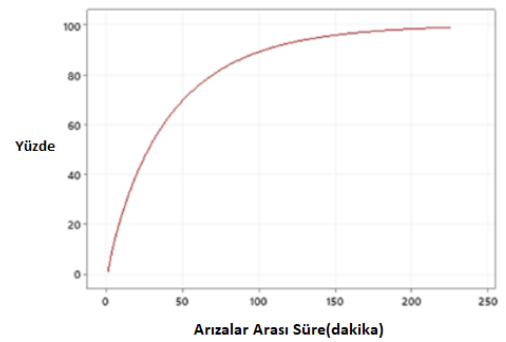
Tablo 8'de verilen zaman değerleri için makinelerin tamir edilebilme olasılıkları elde edilir. Örneğin; M2 arızalandığında 1 dakikada tamir edilme olasılığı 0,8447 (=1-0,1553)'dir. M3 arızalandığında ise, 1 dakikada tamir edilme olasılığı 0,9292'dir. Tablo 8'de görüldüğü gibi süre arttıkça makinelerin tamir süresine ait yaşam olasılığı azalmakta ve bundan dolayı tamir edilebilme olasılığı artmaktadır.

Sağ Kalım Grafiği

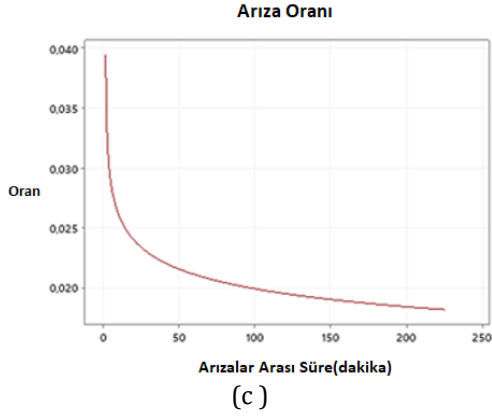


(a)

Birikimli Arıza Grafiği

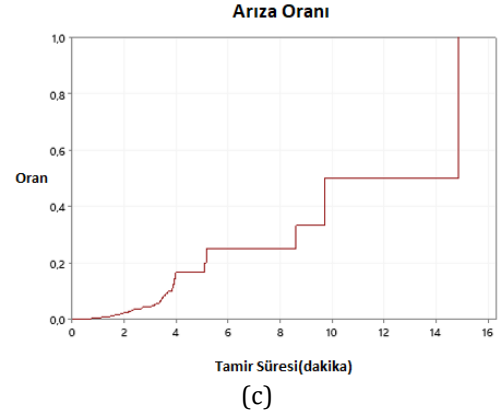
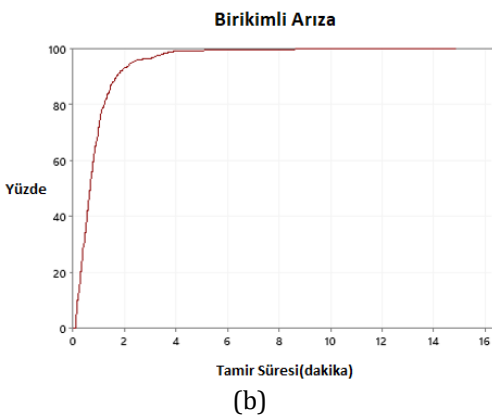
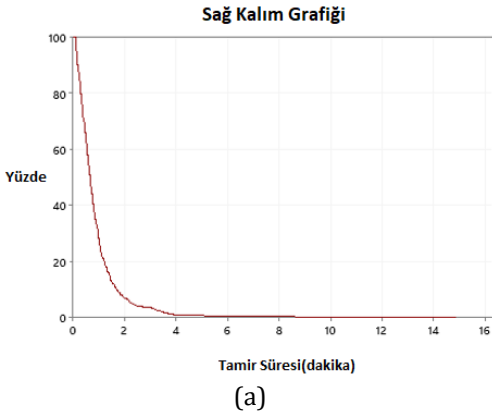


(b)



Şekil 8. M1 makinesinin arızalar arası süreleri için a) sağ kalım, b) birikimli arıza ve c) arıza oranı grafikleri

Bir dakikalık tamir süreleri M1, M2, M3, M4, M5 ve M6 için güvenilirlik değerleri sırasıyla 0,2776; 0,1553; 0,0708; 0,0729; 0,076 ve 0,1244'tür. Bu makinelerin 1 dakika içinde tamir edilebilme olasılıkları ise sırasıyla 0,7224; 0,8447; 0,9292; 0,9271; 0,924 ve 0,8756'dır. Bu sonuçlara göre bir dakikada tamir edilebilme olasılığı en düşük makine M1 iken, en yüksek makine M3'tür.



Şekil 9. M1 makinesinin tamir süreleri için a) sağ kalım, b) birikimli arıza ve c) arıza oranı grafikleri

Tamir edilebilme olasılığının düşük olması tamir süresinin uzun olması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, M1 için bakım planlamasında duruş süresine göre birikimli toplamı %87,8 olan D026, D013, D028, D030, D042 ve D029 kodlu duruşlara bakım planlamasında öncelik verilmelidir.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Günümüz koşullarında üretim yapan firmalar diğer firmalarla rekâbet edebilmek için bakım politikalarına önem vermek zorundadır. Bakım çalışmalarının sistematik bir şekilde yürütülebilmesi için doğru analizlerle personellerdeki farkındalığın artırılması ve makinelerin ve hatların mevcut performans parametrelerinin detaylı bir şekilde çıkartılması ve bu parametrelerin izlenmesi gerekir.

Güvenilirlik analizi, üretim hatlarının ve makinelerin performanslarının mevcut ve gelecekteki durumu hakkında bilgi sahibi olmanın en etkili yöntemlerden biridir. Güvenilirlik analizi ile birlikte arıza dağılımları, arızaların istatistiksel özellikleri, sağ kalım olasılıkları, arıza oranları gibi bilgiler elde edilir.

İşletmeler, birçok açıdan faydalı bilgiler sunan güvenilirlik analizini bakım politikalarının merkezine yerleştirebilir.

Güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık, üretim hatlarında ve makinelerde kullanılması ile uygulaması gelecekte oluşabilecek sorunların önceden öngörülmesi ve gerekli tedbirlerin alınması ve planlamaların yapılabilmesi için önemlidir.

Bu çalışmada, üretim hattındaki makinelerindeki duruşları azaltmak ve verimliliği artırmak için döngüsel olarak bakım planlaması ve bakım faaliyetinin yapıldığı durumsal farkındalık modeli kullanılmıştır. Bu uygulama modeli, üretim hattındaki duruşlar yönünden operatör, bakımcı ve yönetici düzeyinde durumsal farkındalık artırılacaktır.

Bu çalışmanın devamında, güvenilirlik analizine dayalı durumsal farkındalık modeline göre belirlenen bakım faaliyetlerinin üretim hattının verimliliğini ne kadar iyileştirdiği araştırılabilir. Bunun yanında, belli bir zaman aralığında durumsal farkındalık modelinin MKD üretim hattındaki dar boğaz oluşturan sorunların azaltılmasına yönelik etkileri analiz edebilir. Bu çalışmanın devamı olarak, benzetim ile makinelerin arızalar arası süreleri ve tamir süreleri için elde edilen dağılımlardan hattın duruş sıklıkları, duruş süresi ve güvenilirlik gibi parametreler hesaplanabilir. Ayrıca, üretim hattının performansını analiz eden, güvenilirlik analizi ile darboğaz oluşturan duruşları tespit ederek bakım faaliyetlerinin planlaması için öneride bulunan bir sistem geliştirilmesi üzerinde çalışılabilir.

Teşekkür

Siemens Gebze Elektrik Ürünleri Fabrikasına, MKD üretim hattı verilerinin tez çalışmasında kullanılmasına izin verdiği için teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; D. ÖZ, bilimsel yayın araştırması, veri toplama, yöntem, bulgular ve sonuçlar, makalenin hazırlanması; R. EDİZKAN ve A. YAZICI bilimsel yayın araştırması, yöntem, bulgular ve sonuçlar, makalenin hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Anonim, 2021, Minitab Industry Solutions, <https://www.minitab.com/en-us/industry/>, erişim tarihi: 15.05.2021.

Ahmadivala, M. (2016). A simulation based approach for reliability evaluation and optimization of time-dependent systems: a case study of production systems (Barin Plast Company) (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Şehir Üniversitesi, İstanbul.

Atamer, Ş. (2009). Makine elemanlarında güvenilirlik ve ömür analizleri, (Yüksek Lisans Tezi). Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Barabady, Javad ve Kumar, Uday. (2008). Reliability Analysis of Mining Equipment: A Case Study of a Crushing Plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran. Reliability Engineering and System Safety, 93, 647-653.

Endsley, M.R., Kiris, E.O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. Human Factors, 37(2), 381-394. DOI: <https://doi.org/10.1518/001872095779064555>

Endsley, M. (2000). Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review. In: Endsley, M.R., & Garland, D.J. (Eds.). Situation Awareness Analysis and Measurement. (1st ed.). CRC Press.

Enzi, A., Khan, S.A. (2022). Automated production line reliability analysis of the crankshaft manufacturing process. Advances in Science and Technology Research Journal, 16(1), 15-27. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/143936>

Ghimire, S., Luis-Ferreira, F., Nodehi, T., Jardim-Goncalves, R. (2016). IoT based situational awareness framework for real-time project management, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(1), 74-83. doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130242>

İnceoğlu, F., (2013). Sağkalım analiz yöntemleri ve karaciğer nakli verileri ile bir uygulama (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Malatya.

Koçak, A., İşçioğlu, F. (2018). Meyve suyu dolum hatlarında güvenilirlik analizi, Journal of Yaşar University, 13(50),185-196. DOI: <https://doi.org/10.19168/jyasar.384192>

Kuldaşlı, E.D. (2009). Elektrik enerji sistemlerinde güvenilirlik temelli bakım (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kuo, W. ve Zuo, M. J. (2003). Optimal Reliability Modelling, Principles and Applications. John Wiley and Sons, Inc.

Lall, M., Torvatn, H., Seim, E.A. (2017). Towards Industry 4.0: Increased Need for Situational Awareness on the Shop Floor. In: Lödding, H., Riedel, R., Thoben, KD., von Cieminski, G., Kiritsis, D. (eds). Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing, APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 513, 322-329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_38

Liberopoulos, G., Tsarouhas, P. (2005). Reliability analysis of an automated pizza production line. Journal of Food Engineering, 69(1), 79-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.07.014>

Omondi, B.A. (2017). Weibull and log-normal distributions in reliability analysis applications, (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Öz, Diler (2021), Akıllı fabrikalarda güvenilirlik analizi temelli durumsal farkındalığın artırılması (Yüksek

- Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Panteli, M. (2013). Impact of ICT reliability and situation awareness on power system blackouts (Doktora Tezi). University of Manchester, Manchester, İngiltere.
- Park, C.Y., Laskey, K.B., Salim, S., Lee, J.Y. (2017). Predictive situation awareness model for smart manufacturing. 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion), 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/ICIF.2017.8009849>
- Seifoddini, H. ve Djassemi, M. (2001). The Effect of Reliability Consideration on Application of Quality Index. Computer and Industrial Engineering, 40, 65-77.
- Topçu, Ç. (2007). Greenwood ve Kaplan-Meier metodu yardımı ile varyans tahmini (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tsarouhas, P. (2012). Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review. International Journal of Food Science and Technology, 47(11), 2243-2251. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2012.03073.x
- Tsarouhas, P.H., Arvanitoyannis, I.S. (2010). Reliability and maintainability analysis of bread production line. Critical reviews in Food Science and Nutrition, 50(4), 327-343.
- Türkan, A.H. (2007). Güvenilirlik analizinde kullanılan istatistiksel dağılım modelleri (Yüksek Lisans Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Soltanali H., Rohani A., Tabasizadeh M., Abbaspour-Fard M.H. ve Parida A. (2020). Operational reliability evaluation-based maintenance planning for automotive production line, Quality Technology & Quantitative Management, 17:2, 186-202, DOI: [10.1080/16843703.2019.1567664](https://doi.org/10.1080/16843703.2019.1567664)
- Uzun, A., Özdoğan, A. (2011). Güvenirlik analizlerine dayalı önleyici bakım planlanması. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 20(1), 303-320.
- Uzuner, M. (2015). Bir işletmede güvenilirlik analizlerine dayalı sistem tasarımı (Yüksek Lisans Tezi). Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ünal, G. (2009). Güvenilirlik merkezli bakım ve bir endüstriyel uygulama (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Woodruff, B.W., Moore, A.H. (1988). 7 Application of goodness-of-fit tests in reliability. Handbook of Statistics, Elsevier, 7, 113-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(88\)07009-9](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(88)07009-9)
- Zhang, D., Zhang, Y., Yu, M., Chen, Y. (2014). Reliability defects identification of serial production systems: application to a piston production line. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(12), 9113-9125, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1426-7>

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANILAN RADYATÖRLERİN TASARIMI İÇİN BİR MATEMATİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULAMASI

Halit KARABULUT¹, Regaip MENKÜÇ², A. Onur ÖZDEMİR^{3*}, Emre YILDIRIM⁴

^{1,2,3,4} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara

¹ ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-6211-5258>

² ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2108-2418>

³ ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6475-1976>

⁴ ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-2528-2740>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kanatçık verimi Matematik model Radyatör tasarımı Soğutma fanı gücü	<i>Bu çalışmada, içten yanmalı motorlar için yassı su boruları ve düzlem kanatçıklardan oluşan bir radyatörün matematik modeli ve tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen matematik modelde radyatörün kanatçıklı borulardan oluştuğu kabul edilmekte ve tasarım işinin özünü kanatçıklı boruların uzunluğunun ve sayısının belirlenmesi oluşturmaktadır. Geliştirilen matematik model ve tasarım yöntemi kullanılarak 100 kW ısı transferi kapasitesi olan bir radyatörün fiziki boyutları araştırılmıştır. Düzlem kanatçıkların arasındaki en uygun mesafenin 0.85-1.05 mm aralığında ve hava akış hızının 5-10 m/s aralığında olabileceği belirlenmiştir. Bu durumda, kanatçıkların arasındaki hava akışı laminer rejimde gerçekleşmekte olup, kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı 100 W/m²K civarında olmaktadır. Kanatçıkların yapımında 0.25 mm kalınlığında alüminyum levha kullanıldığına, kanatçıkların ısı verimi %90 in üzerine çıkmaktadır. Motor soğutma suyunun radyatöre giriş ve radyatörden çıkış sıcaklıkları arasındaki fark 15 °C kabul edildiğinde, radyatörün en uygun hacmi 25 litre olarak belirlenirken, sıcaklık farkı 10 °C yapıldığında ise 22.5 litre olarak belirlenmektedir. Tasarım ölçülerine göre hava fanı gücünün 1000-2000 W aralığında olabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, su devirdaim pompası gücünün 10 W in altında kaldığı tespit edilmiştir.</i>

THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE DESIGN OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE RADIATORS AND IMPLEMENTATION

Keywords	Abstract
Air fan optimization Fin efficiency Mathematical model Radiator design	<i>In this study, a mathematical model and design procedure is developed to design Internal Combustion Engine radiators. In the model, the radiator is assumed to be a device consisting of finned tubes. The main element of the design is the determination of the length and number of tubes. The physical dimensions of a radiator with 100 kW heat transfer capacity are investigated using the mathematical model with the application procedure. It is determined that the optimum distance between the plane fins would be 0.85-1.05 mm, and the airflow velocity would be 5-10 m/s. In these circumstances, the airflow regime between fins is laminar, and the heat transfer coefficient becomes about 100 W/m²°C. If fins are processed from aluminum sheets with 0.25 mm thickness, the thermal efficiency of fins exceeds 90%. When the temperature difference between the inflow and outflow of the radiator is assumed to be 15 °C, the optimum radiator volume becomes about 25 liters. If the temperature difference is assumed to be 10 °C, the radiator volume becomes 22.5 liters. According to the design dimensions, the required fan power could be ranged from 1000 to 2000 W. In addition, it was found that the power requirement of the water pump is lower than below 10 W.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 25.12.2022

Kabul Tarihi

: 09.05.2023

Research Article

Submission Date

: 25.12.2022

Accepted Date

: 09.05.2023

*Sorumlu yazar: onurozdemir@gazi.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogumf.1224107>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

İçten yanmalı pistonlu motorlarda kullanılan yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısının, ekonomik çalışma şartlarında, yaklaşık %35 i işe dönüşmekte, %35 i egzoz gazları ile birlikte atmosfere atılmakta, geri kalan %30 luk kısmı çalışma gazından motorun katı parçalarına transfer edilmektedir. Katı parçalara transfer edilen ısının sebep olduğu sıcaklık yükselmesi kontrol altında tutulmaz ise genleşme, deformasyon ve sıkışmalar neticesinde motor işlerliğini kaybederek hizmet dışı kalmaktadır. Mekanik parçaların sıcaklığının gerektiğinden az olması da çalışma gazlarının ısı kaybının artmasına ve termodinamik verimsizliğe sebep olmaktadır. Motorlardaki vuruntu olayının minimize edilebilmesi için de yine motor parçalarının sıcaklığının belirli değerlerde sınırlı tutulması gerekmektedir. Ayrıca, motorların mekanik parçaları tasarlanırken birlikte çalışan parçaların arasında yağlama ve seri çalışma boşlukları bırakılmaktadır. Yağlamanın en mükemmel biçimde gerçekleştirilerek, gaz kaçaklarının ve mekanik sürtünmelerin önüne geçilmesi ve neticede motorun yüksek verim ile enerji üretebilmesi için yağlama ve seri çalışma boşluklarının belirli limitlerin dışına çıkmaması gerekmektedir. Mekanik parçalar arasındaki yağlama ve çalışma boşluklarının belirli limitler arasında kalabilmesi için, mekanik parçaların sıcaklığının da belirli limitler arasında tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde yağlama ve çalışma boşlukları artarak veya azalarak motorun çalışma performansını düşürecek, ya da arızalanmaya sebep olacaktır. Motorların mekanik parçalarının sıcaklığının belirli sınırlar arasında tutulması motor soğutma sisteminin görevidir. Motor soğutma sisteminde yer alan temel bileşenler arasında bir devirdaim pompası, bir radyatör, bir termostat, birleştirme boruları, motorun su ceketleri, soğutma suyunun kendisi, hava fanı, davlumbaz ve sensörler bulunmaktadır. Motorun mekanik parçalarının sıcaklığının kontrol altında tutulması işlemi soğutma suyu sıcaklığı aracılığı ile yapılmaktadır. Modern motorlar tasarlanırken soğutma suyunun (%25 Ethylene-Glycol ve %75 su) sürekli çalışma şartlarındaki sıcaklığı 90-115 °C aralığında seçilmektedir (Morad ve Alrajhi, 2014). Devirdaim pompasının görevi soğutma suyunun soğutma sistemini oluşturan elemanlar arasında dolaşımını sağlamaktır. Termostatın görevi soğutma suyunun sirkülasyon debisini ihtiyaca göre düzenleyerek motor parçalarının gereğine göre soğutulmasını ya da soğutulmamasını sağlamaktadır. Radyatörün görevi motorun parçalarından soğutma suyuna geçen ısının atmosfere atılmasını sağlamaktadır. Radyatörler çapraz akışlı ısı değiştirgeçleri olup, bir sıcak su kolektörü, bir soğuk su kolektörü, sıcak ve soğuk su kolektörlerini birleştiren bir boru demeti ve boru demetindeki boruların arasına ya da üzerine monte edilmiş kanatçıklardan oluşmaktadır. Modern taşıtlarda ağırlığı ve hacmi küçük olan radyatörler kullanılarak yakıt tasarrufu sağlanmaktadır (Karabulut, İpci ve Çınar, 2016). Hacmi

küçük radyatörlerin kullanımı hafif ve aerodinamik performansı yüksek taşıt modellerinin tasarımını mümkün kılmanın yanı sıra soğutma suyunun kütlesini azaltarak motorun sürekli çalışma sıcaklığına daha erken ulaşmasını da sağlamaktadır. Radyatörlerin daha küçük boyutlarda tasarlanabilmesi için ısı taşınım katsayısının ve birim hacimdeki yüzey alanının olabildiğince genişletilmesi gerekmektedir (Amrutkar ve Patil, 2013).

Soğutma suyu kanalı olarak hidrolik çapı küçük yassı boruların kullanılması hem iç yüzey ısı taşınım katsayısını, hem de iç yüzey ısı transferi alanını genişletmek için kullanılabilir göstermektedir (Sahar, Wissink, Mahmoud, Karayiannis ve Ishak, 2017; Arora ve Gupta, 2020). Soğutma suyunun akışının türbülanslı rejimde gerçekleştirilmesi de iç yüzey ısı taşınım katsayısını güçlendirmede etkili olan bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır (Vahidinia ve Mir, 2015). Su borularının iç yüzeyindeki ısı transferini güçlendirmek için son zamanlarda nano akışkan olarak adlandırılan karışımlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Motor soğutma suyuna ısı iletkenliği yüksek olan nano büyüklükteki bir takım parçacıkların karıştırılması ile nano akışkan elde edilmektedir. Belli başlı nano akışkanlar arasında su-CuO, su-Al₂O₃, Ethylene Glycol-CuO, Ethylene Glycol-Al₂O₃, Polyester-Al₂O₃, Polyester-CuO, su-Fe₂O₃, su-TiO₂, su-SiO₂, su-kül gibi karışımlar yer almaktadır (Arora ve Gupta, 2020; Mukkamala, 2017; Sidik, Yazid ve Mamat, 2015; Peyghambarzadeh, Hashemabadi, Naraki ve Vermahmoudi, 2013).

Bir akışkan ile ısı alışverişi yapan bir katı cismin yüzeyindeki ısı transferini $q = -k_f (dT/dn)_f$ şeklinde tanımlanan Fourier yasası yönetmektedir (Altınışık, 2003). Bu eşitlikte bulunan k_f akışkanın Fourier katsayısı olarak adlandırılmakta olup, suyun Fourier katsayısı havanın Fourier katsayısının yaklaşık 20 katı kadardır. Bu sebeple radyatörlerde su tarafındaki ısı akışı hava tarafındaki ısı akışının yaklaşık 20 katı kadardır. Hava tarafındaki ısı transferini iyileştirmek için akışın rejimini türbülanslı yapmak, ısı transferi alanını genişletmek ve havanın hidrolik çapı küçük kanallardan geçmesini sağlamak gibi seçenekler bulunmaktadır. Dış tarafı çıplak borular ile asla istenilen seviyede ısı transferi gerçekleştirilememektedir. Boruların dış tarafına mutlaka kanatçık donanımı yapmak gerekmektedir. Hava akımı kanatçıklar arasındaki boşluklardan gerçekleşmektedir. Bu boşluklara hava kanalı ismi verilebilir. Hava kanallarındaki akışın türbülanslı olabilmesi için akışın hızı veya kanalların hidrolik çapının göreceli olarak büyük olması gerekmektedir. Akış hızını belirli bir değerin üzerine çıkarmak mümkün olmadığı için yüksek türbülanslı bir akış yaratarak dış yüzeydeki ısı transferini güçlendirmek mümkün olmamaktadır. Geriye kalan seçenek su borularının çevresine mümkün olduğunca çok kanatçık donatarak ısı transferi alanını genişletmektir. Kanatçık sayısının artırılması zorunlu

olarak hidrolik çapın küçülmesi ile neticelenmektedir. Hidrolik çapın küçülmesi hava kanallarındaki akışın ısı transferi katsayısını da iyileştirmektedir. Bununla birlikte hava kanallarının hidrolik çapının küçülmesi mutlaka ısı transferi katsayısının artacağı anlamına da gelmemektedir. Çünkü, genellikle hidrolik çapı küçük olan kanalların akış kesiti bir takım keskin köşeler içermekte, bu da Nusselt sayısının küçük olması ile neticelenmektedir. Keskin köşeli kanallarda Nusselt sayısının küçük olmasının sebebi, keskin köşelere yakın olan yerlerde viskoz etkilerin akış hızını ve sıcaklık dağılımını etkilemesidir. Hidrolik çapın küçültülmesinin akışı laminarleştirme etkisi de mevcuttur. Kanatçıkların geometrisine göre hava kanalları sinüzoidal, üçgen, dörtgen, parabolik veya petek şeklinde bir takım kesitlere sahip olabilirler (Karabulut ve diğ., 2016; İpci, Karabulut ve Çınar, 2016). Kanalların şeklinin değişmesinin iletkenlik (hA) üzerindeki etkisinin az olması sebebi ile ısı transferinde büyük bir artış olmamaktadır. Bununla birlikte, parabolik ve sinüzoidal kanalların sınırlı miktarda avantaj sağladığı görülmektedir.

Hava kanallarındaki laminar akış hem hidrodinamik yönden hem de termal yönden giriş bölgesi ve tam gelişmiş akış bölgesi olarak iki kısma ayrılabilir. Nusselt sayısının giriş bölgesindeki değişimi dikkate alındığında, giriş bölgesinin efektif uzunluğu hidrolik çapın yaklaşık 10-20 katı kadar olmaktadır (Belhadj, Bouchenafa ve Saim, 2018; El-Genk ve Pourghasemi, 2019; Gamrat, Favre ve Asendrych, 2005). Giriş bölgesinin tam giriş ucunda Nusselt sayısı göreceli olarak yüksek olmakla birlikte akış yönünde hızlı bir düşüş göstererek tam gelişmiş laminar akışın Nusselt sayısına asimptotik olarak yaklaşmaktadır. Kanalın tam giriş ucunda Nusselt sayısının yüksek olmasının sebebi, bu kısımda tek düze bir hız profilinin bulunmasıdır. Sabit ısı akışı şartı dikkate alındığında düzlem kanatçıkların tam girişindeki Nusselt sayısı 12 civarında bir değer olarak belirlenmektedir (İpci, 2018). Sabit duvar sıcaklığı şartı dikkate alındığında düzlem kanatçıkların tam girişindeki Nusselt sayısı 9.87 olarak hesaplanmaktadır. Düzlem kanatçıkların tam gelişmiş akış bölgesinde sabit ısı akışı ve sabit duvar sıcaklığı için Nusselt sayısı 8.23 ve 7.54 olarak verilmektedir. Belirli bir mesafeden sonra (radyatörün hava kanallarının uzunluğu kadar bir mesafe) Nusselt sayısının akış yönündeki ortalaması ile tam gelişmiş laminar akışın Nusselt sayısı arasındaki fark önemini kaybetmektedir (Lee ve Garimella, 2006). Kirlenme ve tıkanmalar dikkate alındığında hava kanallarındaki ısı taşınım katsayısının tam gelişmiş akışın Nusselt sayısından hesaplanmasının daha garantili olacağı görülmektedir. Dikdörtgen şeklindeki bir radyatör kanalının en/boy oranı 1/10 ve daha küçükse, akış hem hidrodinamik yönden hem de ısı yönden iki paralel duvar arasındaki akışa benzemekte olup (Kundu, Simlandi ve Das, 2011), akışın basınç kaybı ve ısı transferi hesapları yapılırken iki paralel duvar arasındaki akışın sürtünme faktörü ve

Nusselt sayısı kullanılabilir. Radyatörlerde hava tarafındaki ısı transferinin mükemmel olması için kanatçıkların yassı borulara birleştiği yerlerdeki ısı direncin yok edilmesi gerekmektedir. Kanatçıkların borulara birleştiği yerlere lehim uygulayarak ısı direnci yok edilmektedir (Jadidi, 2013). Radyatörlerde hava tarafındaki ısı transferini güçlendirmek için uygulanan yöntemlerden bir tanesi de kanatçıkların oluşturduğu hava kanallarının cidarına akışı yönlendirici yarıklar açarak, hava moleküllerinin kanallar arasında dolaşmasını sağlamaktır (Junjana, Kulasekharan ve Purushotham, 2012; Priyadarsini, Reddy ve Devi, 2022).

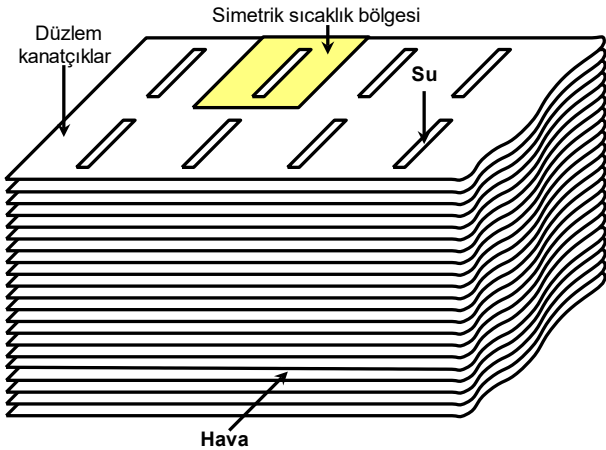
Radyatörlerin tasarımında, ϵ -NTU yöntemi, iteratif yöntemler, logaritmik sıcaklık farkı yöntemi (LMTD), hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi farklı yaklaşımlar kullanılmakta olup (Trivedi ve Vasava, 2012; Starace, Fiorentino, Longo ve Carluccio, 2017; Oliet, Oliva, Castro ve Perez, 2007; Jain, Rajagopal, Selvaraj ve Devaraj, 2022), bunların hiç birisi sistematik bir matematik model oluşturmamaktadır. Bu çalışmada, toplam ısı direnci kavramı kullanılarak soğutma suyunun sıcaklığının değişimi bir diferansiyel denklem ile ifade edilmiş ve söz konusu denklemin çözümünden radyatörün matematik modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan matematik model radyatör tasarımını dış yüzeyi kanatçıklı bir borunun uzunluğunun belirlenmesine indirgemektedir. Geliştirilen model soğutma kapasitesi 100 kW olan bir radyatörün tasarımında kullanılmıştır. Bu model İçten Yanmalı Motorların soğutma sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgilenen mühendislerin kolayca kullanabileceği bir tasarım metodolojisidir.

2. Radyatörün Fiziki Mekanizması ve Matematik Modeli

Bu çalışmada, bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Radyatörler; bir sıcak su kolektörü, bir soğuk su kolektörü, bu iki kolektörü birleştiren sıcak su boruları ve bu boruların üzerine donatılmış kanatçıklardan oluşmaktadır. Şekil 1 de iki sıra dikey konumlu yassı su borusu ve çok sayıda yatay konumlu düzlem kanatçıklardan oluşan bir radyatörün ısı transferi yapan kısmı (özü) görülmektedir. Su borularının yukarı ucu sıcak su kolektörüne, aşağı ucu soğuk su kolektörüne bağlanmaktadır. Radyatör soğutma havası kanatçıkların arasından yatay doğrultuda ileri doğru akarken, motor soğutma suyu yassı su borularından aşağı doğru akmaktadır. Motor soğutma suyundan yassı borulara geçen ısı, boruların dış yüzeyi ve düzlem kanatçıklar tarafından havaya aktarılmaktadır. Yassı borulara üst taraftan giren sıcak su boruların alt ucundan 10-15 °C soğumuş olarak çıkmaktadır. Kanatçıkların arasındaki kanala radyatörün ön yüzeyinden giren atmosferik hava arka yüzeyden ısınmış olarak çıkmaktadır. Su boruları

ile kanatçıkların arasındaki ısı temas direnci lehimleme (brazing) yapılarak minimize edilmektedir.



Şekil 1. Düzlem Kanatçıklar ve Simetrik Sıcaklık Bölgesi

Düzlem kanatçıklar geometrik yönden simetrik kısımlara ayrılabilir şekilde tasarlanırsa, sıcaklık dağılımı açısından da simetrik kısımlar oluşmakta ve radyatörün ısı tasarımı kanatçıklı bir borunun tasarımına indirgenmektedir. Söz konusu kanatçıklı boru Şekil 2 de görülmektedir. Kanatçıklı boruların tasarımında dikkate alınması gereken belli başlı ısı transferi dirençleri;

- 1) İç taraftaki (su ile boru arasındaki) konveksiyon direnci,
- 2) Borunun cidar kalınlığının kondüksiyon direnci,
- 3) Borunun dış yüzeyi ile kanatçıklar arasındaki temas direnci,
- 4) Kanatçıkların kondüksiyon direnci ve dış yüzey konveksiyon direnci

olarak sıralanabilir. Temas direncini hesaba katmak için borunun kendi direncini bir miktar yükseltmek yeterli olabilir. Bu dirençlerin her birisinden aynı miktarda ısı geçmektedir. Şekil 2 deki yassı borunun Δz uzunluğundaki bir parçasında sıcak sudan boru cidarına geçen ısı

$$\Delta Q = P_i h_i (T_{f1} - T_{wi}) \Delta z = \frac{(T_{f1} - T_{wi}) \Delta z}{\frac{1}{P_i h_i}} \quad (1)$$

$$= \frac{(T_{f1} - T_{wi}) \Delta z}{R_1}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte bulunan T_{f1} yassı borunun Δz uzunluğundaki bir parçası içerisindeki su sıcaklığını, T_{wi} aynı yerde yassı borunun iç yüzey sıcaklığını göstermektedir. Aynı yerde yassı borunun iç yüzeyinden dış yüzeyine geçen ısı

$$\Delta Q = k_b \frac{P_i + P_o}{2 \delta_b} (T_{wi} - T_{wo}) \Delta z = \frac{(T_{wi} - T_{wo}) \Delta z}{\frac{1}{k_b \frac{P_i + P_o}{2 \delta_b}}} \quad (2)$$

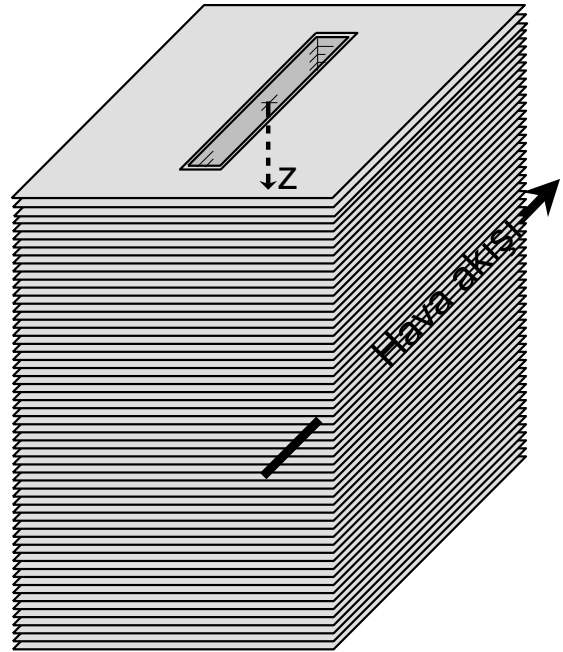
$$= \frac{(T_{wi} - T_{wo}) \Delta z}{R_2}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte bulunan T_{wo} aynı yerde yassı borunun dış yüzey sıcaklığını göstermektedir. Yassı borunun aynı parçasının kanatçıklı dış yüzeyinden havaya aktarılan ısı

$$\Delta Q = \frac{T_{wo} - T_{f2}}{\frac{1}{(1 - n_k \delta_k) P_o h_o + (n_k A_k) h_k \eta}} \Delta z \quad (3)$$

$$= \frac{T_{wo} - T_{f2}}{R_3} \Delta z$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte bulunan T_{f2} aynı yerde havanın ortalama sıcaklığını göstermektedir. Burada sözü edilen ortalama, kanatçıklar arasından geçmekte olan havanın sıcaklığının akış doğrultusundaki ortalamasıdır.



Şekil 2. Kanatçıklı Yassı Boru

Bu eşitliklerde bulunan δ_b , δ_k , A_k ve n_k sırası ile yassı borunun et kalınlığını, kanatçıkların et kalınlığını, kanatçıkların arkalı önlü alanını ve metre uzunluk başına kanatçık sayısını göstermektedir. Son üç eşitliğin toplamı alınarak kanatçıklı borunun Δz uzunluktaki parçasından havaya transfer edilen ısı

$$\Delta Q = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_1 + R_2 + R_3} \Delta z = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\Omega} \Delta z \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte bulunan Ω toplam ısı direnci, T_{f2} kanatçıkların arasından geçmekte olan havanın ortalama sıcaklığını göstermektedir. Söz konusu ortalama, havanın akış yönündeki ortalaması olup z ile de sınırlı ölçüde değişmektedir. Son eşitlik

$$dQ = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\Omega} dz \quad (5)$$

şeklinde de yazılabilir. Aynı ısı termodinamik olarak

$$dQ = -\dot{m} C_{f1} dT_{f1} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Son iki eşitliğin bileşiminden

$$\frac{dT_{f1}}{dz} + \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\Omega \dot{m} C_{f1}} = 0 \quad (7)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu eşitlikte bulunan T_{f1} in yassı borudan geçmekte olan suyun sıcaklığı olduğunu ve z istikametinde değiştiğini biliyoruz. Kanatçıklar arasından geçmekte olan havanın ortalama sıcaklığı olan T_{f2} de yine z ye bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte T_{f2} ye sabit bir ortalama değer tayin ederek eşitlik (7) yi analitik olarak çözmek mümkündür. Termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak söz konusu sabit değer in hesabı için

$$T_{f2} = T_{\infty} + \frac{1}{2} \Delta T_{f2} = T_{\infty} + \frac{1}{2} \frac{Q_e}{U_{f2} A_r \rho_{f2} C_{f2}} \quad (8)$$

eşitliği türetilir. Son eşitlikten görüldüğü üzere havanın akış debisi ($U_{f2} \cdot A_r$) çok çok büyük olduğunda $T_{f2} = T_{\infty}$ gibi sabit bir değer elde edilmektedir. Eşitlik (7) nin çözümü

$$T_{f1} = T_{f2} + K e^{-\frac{z}{\dot{m} C_{f1} \Omega}} \quad (9)$$

olur. Kanatçıklı borunun sıcak su kolektörüne bağlanan üst ucunda $z=0$ olup, bu uçtan giren suyun sıcaklığı günümüzdeki modern motorlarda 90-115 °C civarında tutulmaktadır. Bu sıcaklık T_h ile gösterilir ve sınır şartı olarak kullanılırsa, son eşitlikte bulunan integral sabiti $K = T_h - T_{f2}$ olarak belirlenir. Bu durumda eşitlik (9) dan

$$T_{f1} = T_{f2} + (T_h - T_{f2}) e^{-\frac{z}{\dot{m} C_{f1} \Omega}} \quad (10)$$

özel çözümü belirlenir. Son eşitlik kanatçıklı boruların uzunluğunun belirlenmesini sağlamaktadır. Bu eşitliğin kullanımı deneme-yanılma işlemi yapmayı gerektirmektedir. Motor soğutma suyunun radyatörden çıkış sıcaklığı (T_{f1}) in, giriş sıcaklığı (T_h) dan 10-15 °C küçük olması istenmektedir. Eşitlik (10) da, z ye verilen

bir atma değer T_h ile T_{f1} arasında istenilen miktarda fark oluşturuyorsa, z ye verilen bu değer kanatçıklı su borusunun gerçek değeri olur. Radyatörün diğer boyutunu ise, sıcak ve soğuk su kolektörlerinin arasına paralel olarak bağlanan kanatçıklı boruların sayısı belirleyecektir. Kanatçıklı boruların sayısı;

$$n_b = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{f1}} \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte \dot{m} ile motor soğutma suyunun debisi, \dot{m}_{f1} ile bir tek kanatçıklı borunun debisi gösterilmektedir. Motor soğutma suyunun debisi

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{C_{f1} \Delta T_{f1}} \quad (12)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Son eşitlikte bulunan ΔT_{f1} in 10-15 °C gibi bir değer olduğunu biliyoruz. Q_e ile radyatörün atmosfere atacağı ısının tamamı gösterilmektedir. Bu ısı hemen hemen motorun gücüne denk bir enerjidir. Kanatçıklı borunun debisini kanatçıklı borunun içerisinden geçen sıcak suyun akış rejimi ve bu akışın oluşturduğu ısı taşınım katsayısı belirlemektedir. Radyatör hacminin küçük olması için kanatçıklı boruların sayısının az olması gerekmektedir. Kanatçıklı boruların sayısının az olması için de sıcak su tarafındaki ısı taşınım katsayısının yüksek olması gerekmektedir. Kanatçıklı borunun sıcak su tarafındaki Nusselt sayısı ve ısı taşınım katsayısı

$$Nu_i = \frac{\left(\frac{f_i}{8}\right) (Re_i - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f_i}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (13)$$

$$f_i = (0.790 \cdot \ln(Re_i) - 1.64)^{-2} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{C_{f1} \mu_{f1}}{k_{f1}} \quad (15)$$

$$h_i = \frac{Nu_i k_{f1}}{D_{hi}} \quad (16)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir (Incropera, Dewitt, Bergman ve Lavine, 1996). Yassı borulardaki sıcak su akışının Reynolds sayısı

$$Re_i = \frac{U_{f1} D_{hi}}{\nu_{f1}} \quad (17)$$

ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte D_{hi} yassı borunun hidrolik çapını göstermekte olup, $D_{hi} = 4A_i / P_i$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Yassı borudaki sıcak su akışında ısı taşınım katsayısının yeterince yüksek olabilmesi için akışın kararlı türbülanslı rejimde olması gerekmektedir. Sıcak su akışının türbülanslı olmasını garanti edebilmek

için bilindiği üzere Reynolds sayısının 5000 den fazla olması gerekmektedir. Reynolds sayısına uygun değerler verilerek eşitlik (13-15) yardımı ile istenilen büyüklükte bir ısı taşınım katsayısı belirlenir ve daha sonra Reynolds sayısının bu değeri

$$U_{f1} = \text{Re}_i \frac{V_{f1}}{D_{h,i}} \quad (18)$$

eşitliğinde kullanılarak sıcak suyun yassı borudaki akış hızı belirlenir. Belirlenen akış hızı

$$\dot{m}_{f1} = U_{f1} A \rho_{f1} \quad (19)$$

eşitliğinde kullanılarak bir yassı borudaki kütleli debi ve ardından eşitlik (11) yardımı ile kanatçıklı boruların sayısı belirlenir. Görüldüğü üzere bu çalışmada takdim edilmekte olan radyatör tasarımı metodolojisinde boru içi akışın Reynolds sayısı bağımsız bir değişken muamelesine tabi tutulmakta ve hem boru içi akışın ısı taşınım katsayısı hem de boru sayısı Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu metod radyatörün eninin, boyunun ve kalınlığının ihtiyaca göre düzenlenmesine imkân sağlamaktadır. Reynolds sayısı küçük seçilirse boru sayısı artmakta ve buna bağlı olarak radyatörün boyu azalmaktayken, eni artmaktadır. Reynolds sayısı büyük seçilirse radyatörün boyu artmakta ve eni azalmaktadır. Radyatörün kalınlığını azaltmak gerektiğinde ise iki sıra boru değil tek sıra boru kullanılabilir. Bu çalışmada tanıtılmakta olan metodolojinin en önemli avantajlarından birisi budur.

Eşitlik (3) te yer alan kanatçık veriminin (η) tanımı

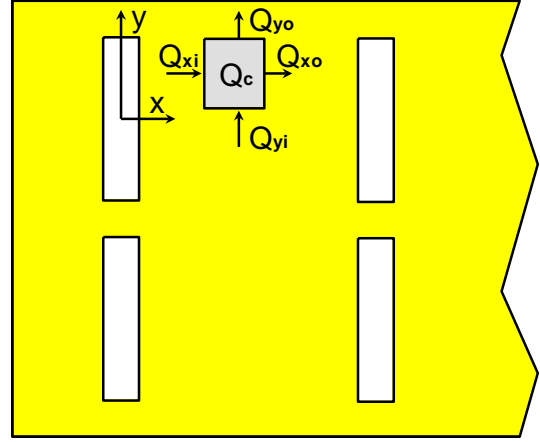
$$\eta = \frac{\bar{T} - T_{\infty}}{T_{w0} - T_{\infty}} \quad (20)$$

şeklinde yapılmaktadır (Kakaç, Yener ve Pramuanjaroenkij, 2013). Bu eşitlikte bulunan \bar{T} kanatçığın yüzeyindeki sıcaklığın alan ortalamasını, T_{w0} kanatçığın bağlandığı yüzeyin sıcaklığını, T_{∞} ısı atılan ortamın bulk sıcaklığını göstermektedir. Kanatçığın ortalama sıcaklığının belirlenebilmesi için önce kanatçığın üzerindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Kanatçıkların üzerindeki sıcaklık dağılımı kanatçık enerji denklemi ile belirlenebilmektedir. Enerji denklemi bir kontrol hacmi üzerinde enerji balansı yapılarak türetilmektedir. Şekil 3 te bir kontrol hacmi, söz konusu kontrol hacmine giren ve çıkan ısılar görülmektedir. Kontrol hacmine giren enerjiler Q_{xi} ve Q_{yi} olup, konveksiyonla gerçekleşmektedir. Kontrol hacminden enerji çıkışı hem konveksiyonla hem de konduksiyonla gerçekleşmektedir. Konveksiyonla çıkan enerji Q_c , konduksiyonla çıkan enerjiler Q_{xo} ve Q_{yo} ile gösterilmiştir. Enerji balansı

$$Q_{xi} + Q_{yi} = Q_{xo} + Q_{yo} + Q_c \quad (21)$$

olur. Fourier ısı iletim yasası ve Newton soğutma yasası kullanılarak son eşitlik

$$\begin{aligned} & -k_k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{xi} \delta_k \Delta y \Delta t - k_k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{yi} \delta_k \Delta x \Delta t = \\ & -k_k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{xo} \delta_k \Delta y \Delta t - k_k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{yo} \delta_k \Delta x \Delta t \quad (22) \\ & + 2 h_k \Delta x \Delta y (T - T_{\infty}) \Delta t \end{aligned}$$



Şekil 3. Enerji Balansında Kullanılan Kontrol Hacmi

şeklinde düzenlenir. Bu eşitlikte bulunan T yüzey elemanının ortasındaki sıcaklık olarak düşünülebilir. Son eşitliğin kapsadığı türevlerin yüzey elemanının orta noktasına göre Taylor açılımı yapılarak

$$\begin{aligned} & -k_k \left(\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Delta x \right) \delta_k \Delta y \Delta t - k_k \left(\frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Delta y \right) \delta_k \Delta x \Delta t = \\ & -k_k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Delta x \right) \delta_k \Delta y \Delta t - k_k \left(\frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Delta y \right) \delta_k \Delta x \Delta t + \quad (23) \\ & 2 h_k \Delta x \Delta y (T - T_{\infty}) \Delta t \end{aligned}$$

elde edilir. Son eşitliğin kapsadığı türevlerin hepsi kanatçığın orta noktasındaki değerlerdir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında son eşitlikten

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{h_k}{k_k \delta_k} (T - T_{\infty}) = 0 \quad (24)$$

elde edilir. Eşitlik (24) ün çözüm bölgesi Şekil 2 de görülen kanatçıkların yüzeyidir. Bu çözüm bölgesinin sınırlanmış şekli ve sınır şartları Şekil 4 te görülmektedir. Şekil 4 teki çözüm bölgesi sayısal çözüm açısından düzenli bir bölge olup, sonlu farklar metodu ile çözümlenebilir. Çözümün amacı kanatçığın verimini hesaplamaktır. Bilindiği üzere kanatçıkların verimi bağlı olduğu duvarın sıcaklığından bağımsızdır. Bu sebeple, iç sınırlarda keyfi bir sıcaklık tanımlanabilir. Kanatçığın iç sınırlarındaki sıcaklığını motor soğutma suyunun sıcaklığına (T_{f1}) eşit kabul etmek uygun olacaktır. Çözüm bölgesinin dış sınırlarında türevsel

sınır şartı kullanmak gerekmekte olup, A-B ve D-C sınırlarında $\frac{dT}{dy} = 0$, A-D ve B-C sınırlarında $\frac{dT}{dx} = 0$

sınır şartları oluşmaktadır. Kanatçığın iç sınırlarındaki sıcaklığın T_{f1} kabul edildiği de dikkate alınarak kanatçığın verimi

$$\eta = \frac{\bar{T} - T_{f2}}{T_{f1} - T_{f2}} \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir. T_{f2} çevredeki ısı atılan ortamın (kanatçıkların arasından geçmekte olan havanın) bulk sıcaklığı olup, T_{f2} nin hesabı için yukarıda (8) numaralı eşitlik türetilmiştir.

T_{f2} ile T_{f1} arasındaki farkın büyük olması radyatörün daha küçük yapılmasını mümkün kılarken, kanatçıklar arasından geçen havanın debisinin yüksek tutulmasını da zorunlu hale getirmektedir. Bu yüksek debi radyatör fanı gücünün yüksek olmasını ve motorun ürettiği gücün oldukça büyük bir kısmının fan tarafından tüketilmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple T_{f2} nin optimizasyonu önem arz etmektedir.

Eşitlik (3) teki n_k nın (1 m uzunluğa sahip bir borunun üzerindeki kanatçık sayısı) değerinin belirlenebilmesi için kanatçıkların arasındaki mesafenin optimize edilmesi gerekmektedir. Düzlem kanatçıkların arasındaki mesafe ise hem kullanılacak fanın sağlayacağı basınç hem de kanatçıkların yüzeyinde oluşan ısı taşınım katsayısı ile ilgilidir.

Kanatçıklar arasındaki hava akışının rejimini (laminer ya da türbülanslı olması) belirlemek için kullanılan kriter Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısı $Re < 2300$ olduğunda akış laminer rejimde gerçekleşmektedir. Reynolds sayısı $2300 \leq Re \leq 5000$ aralığındayken akış kararsız bir akış olarak nitelenmektedir. Reynolds sayısı $Re > 5000$ olur ise akış türbülanslı olmakta ve $Re > 10000$ den sonra tam kararlı türbülans oluşmaktadır. Kanatçıklar arasındaki akışın Reynolds sayısı

$$Re_o = \frac{U_{f2} D_{ho}}{\nu_{f2}} = \frac{2 U_{f2} D}{\nu_{f2}} \quad (26)$$

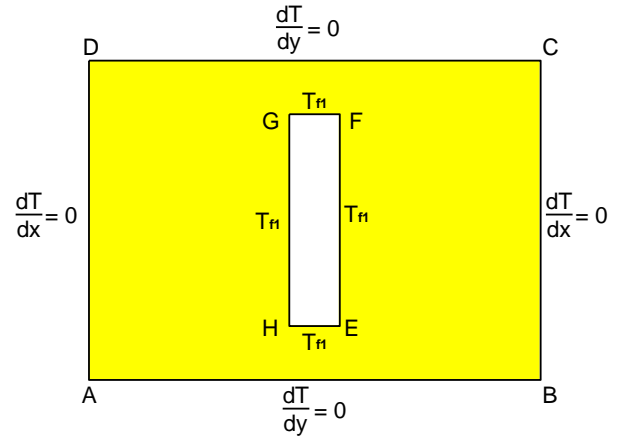
ile hesaplanabilir. Reynolds sayısı, bir akışın sürtünme faktörünün eşitlik olarak verilebilmesi için de kullanışlı bir parametredir. Düzlem kanatçıklar arasındaki laminer akışın sürtünme faktörü

$$f_o = \frac{96}{Re_o} \quad (27)$$

eşitliği ile verilmektedir. Radyatörün iki yüzeyi arasındaki basınç farkının hesabı için Darcy eşitliği

$$\Delta p_2 = f_o \frac{l_k}{2D} \frac{\rho_{f2} U_{f2}^2}{2} \quad (28)$$

şeklinde düzenlenebilir. Burada l_k radyatörün iki yüzü arasındaki mesafe veya hava kanallarının akış doğrultusundaki uzunluğudur.



Şekil 4. Soyutlanmış Simetrik Sıcaklık Bölgesi ve Analizde Kullanılan Koordinat Sistemi

Düzlem kanatçıklar arasındaki laminer akışın sabit ısı akısı ve sabit duvar sıcaklığı şartı ile Nusselt sayısı sırasıyla $Nu_o = 8.23$ ve $Nu_o = 7.54$ olarak verilmektedir. Radyatörde kanatçıklar arasındaki akışta duvar sıcaklığını sabit kabul etmek daha gerçekçi olabilir. Hava kanalının tam girişindeki hız dağılımı tek düze bir hız dağılımına benzemektedir. Enerji denkleminin çözümü tüm kanal için tek düze bir hız dağılımına göre yapıldığında sabit duvar sıcaklığı için Nusselt sayısı $Nu_o = 9.869$ olarak belirlenir. Kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı $Nu_o = 7.54$ eşitliğinden hesaplandığında tam giriş bölgesinde yaklaşık %30 luk bir hesap hatası oluşmaktadır. Bununla birlikte, bu hata oranı akış yönünde hızla azaldığı için önemsiz kabul edilebilir. Dolayısıyla, kanatçıkların üzerindeki ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında $Nu_o = 7.54$ değeri kullanılmıştır. Kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı

$$h_k = \frac{Nu_o k_{f2}}{2D} \quad (29)$$

şeklinde hesaplanır. Kanatçıklar arasındaki mesafenin (D) küçültülmesi ile kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı istenildiği kadar yükseltilebilir. Ancak, kanatçıklar arasındaki mesafenin küçültülmesi radyatör fanının tükettiği enerjinin aşırı miktarda artmasına da sebep olmaktadır. Bu sebeple, kanatçıklalar arasındaki mesafenin iyi optimize edilmesi gerekmektedir. Radyatör fanının tükettiği güç

$$P_{fan} = \frac{\dot{m}_{f2}}{\rho_{f2}} \Delta p_2 \quad (30)$$

şellinde hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte bulunan Δp radyatörün hava kanallarındaki basınç kaybı olup, aynı zamanda radyatörün ön ve arka yüzü arasındaki basınç farkıdır. Bir radyatörün boyutlarının belirlenmesinde gerekli olan değerlerden birisi de sıcak su borularındaki akışın basınç kaybıdır. Bu kayıp

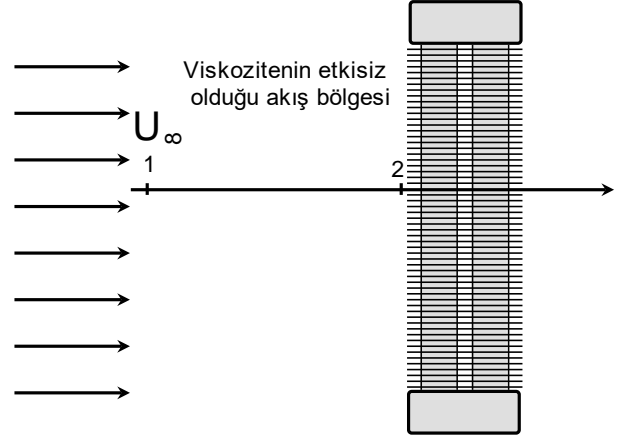
$$\Delta p_1 = f_i \frac{l_b}{D_{hi}} \frac{\rho_{f1} U_{f1}^2}{2} \quad (31)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Buradaki f_i nin değeri eşitlik (14) den belirlenir ancak, f_i nin belirlenmesinde kullanılan Reynolds sayısı h_i nin hesabında kullanılan aynı olmak zorundadır.

Taşıtlar orta ve yüksek hızlarda seyrederken, radyatör fanı çalışmasa bile, önden gelen hava akımı sayesinde radyatörün hava kanallarından bir miktar hava geçecek ve radyatörün atmosfere ısı transferi yapmasını sağlayacaktır. Fansız bir radyatörün hava kanallarında oluşan akış hızının taşıt hızı ile ilişkilendirilmesi radyatör analizlerinde önem arz eden bir husustur. Şekil 5 te görülen akış mekanizması analiz edilerek taşıt hızı ile radyatörün hava kanallarındaki ortalama hızın ilişkisi yaklaşık olarak kurulabilir. Şekilde görülen 1 noktası radyatörden yeterince uzakta bulunan bir nokta olup, bu noktada taşıtın hızına denk bir U_∞ hızı bulunmaktadır. Radyatör hava kanallarının akışa dik bir kesitindeki hız dağılımının alan ortalaması debisel hız olarak adlandırılabilir. Şekil 5 te görülen 2 noktası radyatörün hava kanallarının tam girişinde olup, bu noktadaki debisel hız hava kanallarının her kesitindeki debisel hıza eşit kabul edilebilir. Debisel hız radyatörün ısı transferi kapasitesinden hesaplanmaktadır. Radyatörün hava kanallarındaki basınç düşmesi debisel hız kullanılarak eşitlik (27) ve (28) yardımı ile hesaplanmaktadır. Şekilde görülen 1 ve 2 noktalarının arasındaki akış büyük ölçüde potansiyel akış olup 1 ve 2 noktalarının arasında Bernoulli eşitliği kullanılabilir. Bernoulli eşitliği 1 ve 2 noktaları arasında uygulanırsa,

$$U_\infty = \sqrt{V_2^2 + 2 \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_a} \right)} \quad (32)$$

olur. Bu eşitlikte bulunan V_2 radyatör hava kanallarındaki debisel hız olup, yukarıda belirtildiği üzere radyatörün ısı transferi kapasitesinden belirlenmektedir. Eşitlik (32) de yer alan basınç farkı ($P_2 - P_1$) radyatörün ön ve arka yüzeyi arasındaki basınç farkına (Δp_2) eşit olmak zorundadır ve yukarıda açıklandığı üzere debisel hızdan hesaplanmaktadır. Eşitlik (32) nin kapsadığı ρ_a atmosferik havanın yoğunluğu olarak kabul edilebilir.



Şekil 5. Taşıt Hızının Yarattığı Hava Akımı ile Radyatörün Soğutulması

3. Uygulama ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Radyatör tasarımında kullanılmak üzere geliştirilen matematik modelin sayısal çözümü için FORTRAN programında bir simülasyon modeli hazırlanmış ve 100 kW soğutma kapasitesine sahip olan bir radyatörün teknik özelliklerini belirlemek için sistematik analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon programında kullanılan verilerin bir kısmı sabit sayılar olup, endüstriyel üretimi yapılan malzemelerin üretim standartları ve kullanılan akışkanların termo-fizik özellikleridir. Verilerin diğer bir kısmı radyatör teknolojisinde mevcut olan temel tasarım kriterleridir. Bir kısım veriler de geliştirilen matematik model ile belirlenmiş olan bulgulardır. Analizde kullanılan veriler ve bulgular Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Analizde Kullanılan Girdiler ve İnteraktif Bulgular

Parametre	Sembol	Değer
Alüminyumun termal iletkenliği (W/m°C)	k_b	180
Boru içi akışın Prandtl sayısı	Pr	2.04
Hava akış hızı (m/s)	U_{f2}	5-10
Havanın gaz sabiti (J/kg°C)	R_o	288
Havanın kinematik viskozitesi (m ² /s)	ν_{f2}	1.89x10 ⁻⁵
Havanın özgül ısı (J/kg°C)	C_{f2}	1007
Havanın ısı iletim katsayısı (W/m°C)	k_{f2}	0.028
Kanatçıklar arası mesafe (mm)	D	0.85-1.05
Kanatçıklar arasındaki akışın Nusselt sayısı	Nu_o	7.54
Kanatçıkların et kalınlığı (mm)	δ_k	0.25
Ortam basıncı (Pa)	p_∞	101325
Ortam sıcaklığı (°C)	T_∞	40
Radyatörün soğutma kapasitesi (kW)	Q_e	100
Sıcak su borusunun iç kesitinin ölçüleri (mm)	-	1.5x17.5
Sıcak su giriş çıkış farkı (°C)	ΔT_s	10-15
Sıcak su kolektör sıcaklığı (°C)	T_h	90
Su borusunun et kalınlığı (mm)	δ_b	0.25
Suyun kinematik viskozitesi (m ² /s)	ν_{f1}	364.9x10 ⁻⁵
Suyun özgül ısı (J/kg°C)	C_{f1}	4200
Suyun Reynolds sayısı	Re_i	5000-10000
Suyun ısı iletim katsayısı (W/m°C)	k_{f1}	0.67
Suyun yoğunluğu (kg/m ³)	ρ_{f1}	970

Modern taşıtlarda kullanılan radyatörlerin hacminin ve ağırlığının küçük olması istenmektedir. Bu çalışmada incelenen radyatörde su boruları ve kanatçıklar Şekil 1 deki gibi yerleştirilmiştir. Kanatçıklar ve su borularının 0.25 mm kalınlığında alüminyum levhalardan yapıldığı kabul edilmiştir. Kanatçıklar arasındaki mesafenin belirlenmesi tasarımın önemli bir merhalesini oluşturmaktadır. Kanatçıklar arasındaki mesafe belirlenirken kanatçıklardaki ısı taşınım katsayısının yüksek olması ve viskoz akış sürtünmesinden doğan basınç değişiminin kabul edilebilir bir seviyede olması istenmektedir. Aksi halde motorun ürettiği gücün

önemli bir kısmı fan tarafından harcanacaktır. Kanatçıklar arasındaki hava akışının rejimi (laminer veya türbülanslı olması) hem ısı taşınım katsayısının hem de viskoz akış sürtünmesinin büyüklüğünü tayin eden bir faktördür. Isı taşınım katsayısının yüksek olması için dar kanallarda yüksek türbülanslı akış elde etmek gerekmektedir. Dar kanallarda türbülanslı akışın oluşması için akış hızının çok yüksek olması gerekmektedir. Dar kanallardaki yüksek hızlı türbülanslı akışta basınç kaybı ve bu basınç kaybının gerektirdiği fan gücü aşırı derecede yüksek olmaktadır. Bu durum karşısında yapılacak iş laminer akışa razı olmak ve kanatçık sayısını mümkün mertebe arttırmaktır. Akış laminer rejimde olsa bile kanatçıklar arası mesafeyi çok azaltmak basınç kaybını ve fan gücünü arttırmaktadır. Kanatçıklar arası mesafe tayin edilirken hava akış kanallarının kirlenme nedeni ile tıkanabileceği dikkate alınması gereken önemli bir husustur. Kirlenmenin kanatçıklar arasındaki mesafeye etkisi tecrübe ile hesaba katılacak bir faktördür. Laminer akışta ısı taşınım katsayısı yalnız hidrolik çapa bağlı olarak değişmektedir. Kanatçıklar arası mesafe 1.2 mm nin yukarısına çıktığında ısı taşınım katsayısının oldukça azaldığı görülmektedir. Bu sebeple, kanatçıklar arası mesafeyi optimize ederken inceleme aralığının üst sınırını 1.2 mm gibi bir değer olarak seçmek uygun görülmektedir. Kanatçıklar arasındaki mesafe 1.2 mm iken kanatçıklar arasındaki akışın hızı 20 m/s ye ulaştığında türbülans açısından kritik Reynolds sayısına ($Re \approx 2300$) yaklaşıldığı görülmektedir. Bu sebeple, kanatçıklar arasındaki akış hızının üst limiti 20 m/s olarak kabul edilebilir. Kanatçıklar arasındaki hızı optimize ederken hem fan gücünü hem de radyatörün toplam hacmini dikkate almak gerekmektedir. Pratikte fan gücünün motor gücüne oranı %1-2 aralığında bir sayı olmaktadır (Wang, Jagarwal, Wagner ve Fadel, 2015).

Kanatçıklar arası mesafeyi optimize etmek amacı ile fan gücü (P_{fan}), radyatör hacmi (\mathcal{V}_r), kanatçık verimi (η), metre uzunluk başına kanatçık sayısı (n_k) ve radyatör boyunun (l_b) değişimi kanatçıklar arası mesafe ve hava akış hızına bağlı olarak incelenmiş, elde edilen bulgular Tablo 2 ve 3 te verilmiştir. Ayrıca, verilen değerler tablolardan sonraki şekillerde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 2. $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ İçin Elde Edilen Sonuçlar

U_{f2} (m/s)	D (mm)	P_{fan} (W)	\mathcal{G}_r (lit)	h_k $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$	η (%)	n_k	l_b (m)	ΔP (Pa)	\dot{m}_a (kg/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)
5	0.7	695.53	25.33	150.8	0.882	1052	0.697	145.53	5.37	60.35
5	0.8	550.74	28.49	131.95	0.895	952	0.784	111.426	5.55	59.68
5	0.9	446.87	32.16	117.29	0.905	869	0.885	88.040	5.70	59.16
5	1.0	369.78	36.34	105.56	0.914	799	1.000	71.312	5.82	58.76
5	1.1	311.34	40.78	95.96	0.921	740	1.122	58.936	5.93	58.41
5	1.2	265.73	45.43	87.97	0.927	689	1.25	49.522	6.03	58.13
7.5	0.7	1564.95	19.81	150.80	0.882	1052	0.545	218.303	8.05	53.57
7.5	0.8	1239.17	21.81	131.95	0.895	952	0.6	167.138	8.33	53.12
7.5	0.9	1005.45	24.90	117.29	0.905	869	0.685	132.060	8.55	52.78
7.5	1.0	832.01	28.35	105.56	0.914	799	0.78	106.969	8.73	52.51
7.5	1.1	700.52	31.98	95.96	0.921	740	0.88	88.404	8.90	52.28
7.5	1.2	597.89	35.98	87.97	0.927	689	0.99	74.284	9.04	52.09
10	0.7	2782.133	16.899	150.8	0.882	1052	0.465	291.071	10.73	50.18
10	0.8	2202.962	19.444	131.95	0.895	952	0.535	222.851	11.10	49.84
10	0.9	1787.464	22.351	117.289	0.905	869	0.615	176.080	11.40	49.58
10	1.0	1479.132	25.44	105.56	0.9137	799	0.7	142.625	11.65	49.38
10	1.1	1245.372	28.893	95.964	0.921	740	0.795	117.872	11.86	49.21
10	1.2	1062.914	32.527	87.967	0.927	689	0.895	99.045	12.05	49.06
12.5	0.7	4347.08	16.00	150.80	0.882	1052	0.44	363.839	13.42	48.14
12.5	0.8	3442.13	18.39	131.95	0.895	952	0.506	278.564	13.88	47.87
12.5	0.9	2792.91	21.15	117.29	0.905	869	0.582	220.100	14.25	47.67
12.5	1.0	2311.14	24.17	105.56	0.914	799	0.665	178.281	14.56	47.50
12.5	1.1	1945.37	27.40	95.96	0.921	740	0.754	147.340	14.84	47.37
12.5	1.2	1660.803	30.892	87.967	0.927	689	0.85	123.806	15.06	47.25
15	0.7	6259.80	15.34	150.8	0.882	1052	0.422	436.606	16.10	46.78
15	0.8	4956.67	17.70	131.95	0.895	952	0.487	334.277	16.65	46.56
15	0.9	4021.80	20.35	117.29	0.905	869	0.56	264.120	17.10	46.39
15	1.0	3328.05	23.26	105.56	0.914	799	0.64	213.937	17.47	46.25
15	1.1	2802.09	26.53	95.96	0.921	740	0.73	176.808	17.80	46.14
15	1.2	2391.55	29.80	87.97	0.927	689	0.82	148.567	18.08	46.04
17.5	0.7	8520.28	14.90	150.80	0.882	1052	0.41	509.374	18.78	45.82
17.5	0.8	6746.57	17.26	131.95	0.895	952	0.475	389.900	19.42	45.62
17.5	0.9	5474.11	19.92	117.29	0.905	869	0.548	308.140	19.50	45.48
17.5	1.0	4529.84	22.71	105.56	0.914	799	0.625	249.593	20.38	45.36
17.5	1.1	3813.95	25.80	95.96	0.921	740	0.71	206.276	20.76	45.26
17.5	1.2	3255.17	29.26	87.97	0.927	689	0.805	173.329	21.09	45.18
20	0.7	11128.53	14.54	150.8	0.882	1052	0.400	582.142	21.47	45.09
20	0.8	8811.85	16.90	131.95	0.895	952	0.465	445.702	22.20	44.92
20	0.9	7149.857	19.44	117.29	0.905	869	0.535	352.160	22.80	44.79
20	1.0	5916.53	22.17	105.56	0.914	799	0.610	285.250	23.29	44.69
20	1.1	4981.49	25.26	95.96	0.921	740	0.695	235.743	23.73	44.60
20	1.2	4251.656	28.64	87.966	0.927	689	0.788	198.090	24.10	44.53

Tablo 3. $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ İçin Elde Edilen Sonuçlar

U_{f2} (m/s)	D (mm)	P_{fan} (W)	\mathcal{Q}_r (lit)	h_k $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$	η (%)	n_k	l_b (m)	ΔP (Pa)	\dot{m}_a (kg/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)
5	0.7	1043.30	17.33	150.80	87.7	1052	0.318	145.536	8.05	53.57
5	0.8	826.11	19.898	131.95	88.96	952	0.365	111.426	8.33	53.12
5	0.9	670.30	22.787	117.29	89.96	869	0.418	88.040	8.55	52.78
5	1.0	554.67	25.95	105.56	90.78	799	0.476	71.312	8.73	52.51
5	1.1	467.01	29.38	95.96	91.46	740	0.539	58.936	8.90	52.28
5	1.2	398.59	33.09	87.96	92.03	689	0.607	49.522	9.04	52.09
7.5	0.7	2347.42	15.12	150.80	87.71	1052	0.277	218.303	12.08	49.05
7.5	0.8	1858.75	17.50	131.95	88.96	952	0.321	167.138	12.49	48.75
7.5	0.9	1508.17	20.116	117.29	89.96	869	0.369	132.060	12.82	48.52
7.5	1.0	1248.02	22.95	105.56	90.78	799	0.421	106.969	13.10	48.34
7.5	1.1	1050.78	26.05	95.96	91.45	740	0.478	88.404	13.35	48.18
7.5	1.2	896.83	29.38	87.97	92.03	689	0.539	74.284	13.56	48.06
10	0.7	4173.2	14.23	150.8	87.71	1052	0.261	291.071	16.10	46.78
10	0.8	3304.44	16.46	131.95	88.96	952	0.302	222.851	16.65	46.56
10	0.9	2681.2	18.97	117.29	89.96	869	0.348	176.080	17.10	46.39
10	1.0	2218.7	21.69	105.56	90.77	799	0.398	142.625	17.47	46.25
10	1.1	1868.06	24.69	95.96	91.45	740	0.453	117.871	17.80	46.14
10	1.2	1594.37	27.86	87.97	92.03	689	0.511	99.045	18.08	46.04
12.5	0.7	6520.62	13.737	150.8	87.71	1052	0.252	363.839	20.13	45.43
12.5	0.8	5163.19	15.918	131.95	88.96	952	0.292	278.564	20.81	45.25
12.5	0.9	4189.37	18.37	117.29	89.96	869	0.337	220.100	21.37	45.11
12.5	1.0	3466.71	21.04	105.56	90.78	799	0.386	178.281	21.84	45.00
12.5	1.1	2918.84	23.93	95.96	91.45	740	0.439	147.340	22.25	44.91
12.5	1.2	2491.20	27.04	87.97	92.03	689	0.496	123.806	22.60	44.83
15	0.7	9389.697	13.41	150.80	87.71	1052	0.246	436.606	24.15	44.52
15	0.8	7435.0	15.591	131.95	88.96	952	0.286	334.277	24.89	44.37
15	0.9	6032.692	17.99	117.289	89.96	869	0.33	264.120	25.65	44.26
15	1.0	4992.07	20.606	105.56	90.78	799	0.378	213.937	26.20	44.17
15	1.1	4203.13	23.441	95.963	91.46	740	0.443	176.808	26.70	44.09
15	1.2	3587.33	26.49	87.966	92.03	689	0.486	148.567	27.12	44.03
17.5	0.7	12780.42	13.22	150.8	87.71	1052	0.2425	509.374	28.18	43.88
17.5	0.8	10119.86	15.34	131.95	88.96	952	0.2815	389.990	29.14	43.75
17.5	0.9	8211.16	17.72	117.29	89.96	869	0.325	308.140	29.92	43.65
17.5	1.0	6794.76	20.28	105.56	90.78	799	0.372	249.593	30.57	43.57
17.5	1.1	5720.93	23.11	95.96	91.46	740	0.424	206.276	31.14	43.51
17.5	1.2	4882.76	26.11	87.96	92.03	689	0.479	173.329	31.63	43.45
20	0.7	16692.80	13.03	150.08	87.71	1052	0.239	582.142	32.20	43.39
20	0.8	13217.77	15.155	131.95	88.96	952	0.278	445.702	33.30	43.28
20	0.9	10724.79	17.50	117.29	89.96	869	0.321	325.160	34.20	43.19
20	1.0	8874.79	20.06	105.56	90.78	799	0.368	285.250	34.94	43.13
20	1.1	7474.23	22.84	95.963	91.46	740	0.419	235.743	35.59	43.07
20	1.2	6377.48	25.78	87.967	92.03	689	0.473	198.090	36.15	43.02

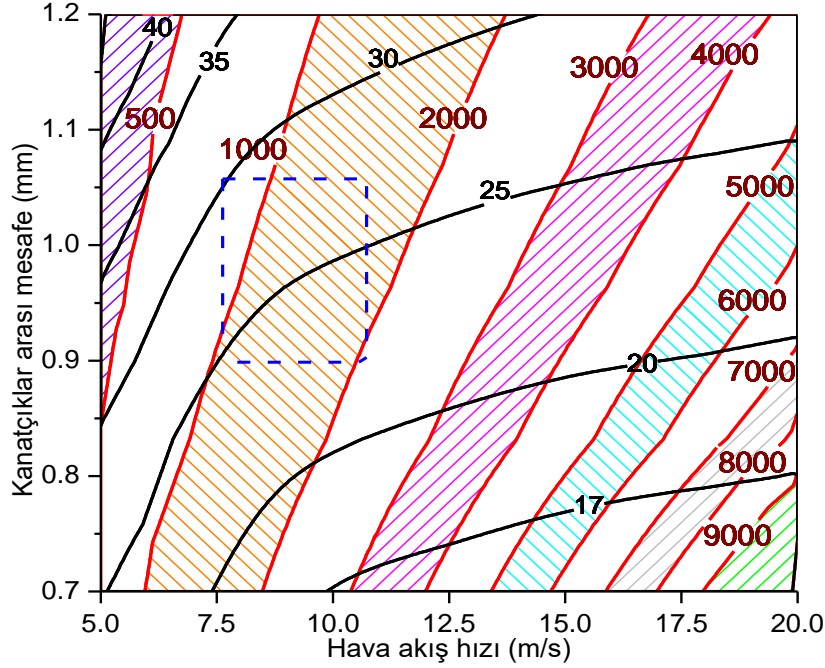
Şekil 6 da suyun radyatöre giriş ve çıkış sıcaklık farkının 15°C olması durumunda, radyatör hacmi ve fan gücünün kanatçıklar arası mesafe ve hava akış hızı ile değişimi gösterilmiştir. Şekilde çizgi-desen kontürleri ile fan gücü aralıkları ve taralı bölgeleri çapraz kesen siyah eğrilerle de radyatör hacmi değişim aralıkları gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere hava akış hızı 5-20 m/s aralığında ve kanatçık mesafesi 0.7-1.2 mm

aralığında değişmektedir. Radyatör hacmi 17-40 litre aralığında ve fan gücü 500-9000 W aralığında değişmektedir. Bu bulgular Sandu (Sandu, 2016) tarafından yapılan deneysel çalışmanın bulguları ile benzeşmektedir. Sandu tarafından yapılan çalışmada, radyatör kapasitesi 93.5 kW olan 114 kW lık güce sahip bir dizel motorunun radyatörünün fan gücü 1.2-8.4 kW aralığında verilmektedir. Aynı motorun soğutma

sisteminde kullanılan radyatörün hacmi 32 litre olarak verilmektedir.

Şekilde görülen kesik çizgili dikdörtgen; kanatçık mesafesi ve akış hızının kabul edilebilir olduğu bölgeyi göstermektedir. Kanatçık mesafesi 0.85-1.05 mm

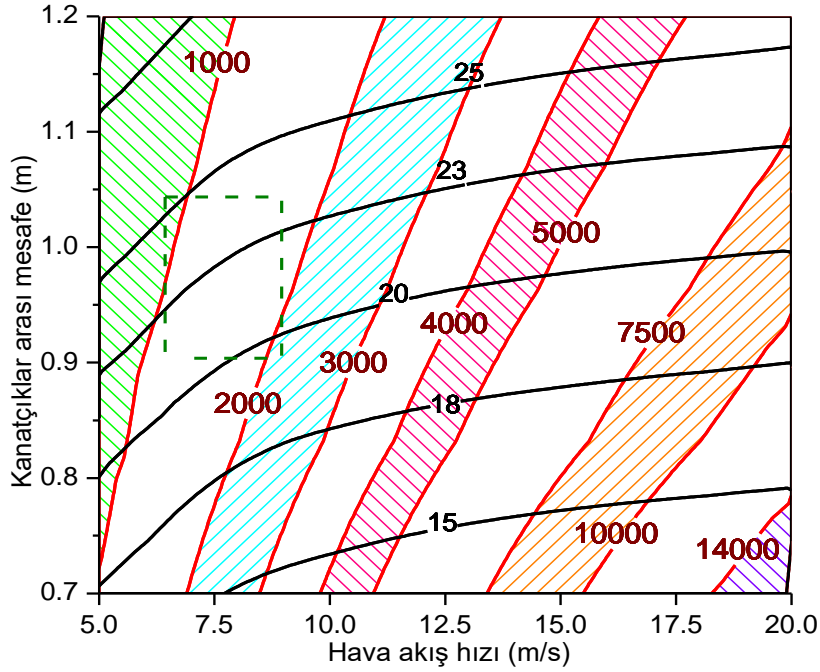
aralığında, akış hızı 8-11 m/s aralığında seçilirse fan gücünün 1000-2000 W aralığında, radyatör hacminin 25 litre civarında olacağı belirlenmiştir. Hava akış hızının artması radyatör hacminin küçülmesine imkân vermektedir.



Şekil 6. Radyatör Hacmi ve Fan Gücünün Kanatçık Mesafesi ve Akış Hızı ile Değişimi ($\Delta T_s = 15 \text{ }^\circ\text{C}$)

Şekil 7 de suyun radyatöre giriş ve çıkış sıcaklık farkının $10 \text{ }^\circ\text{C}$ olması durumunda, kanatçıklar arası mesafe ve hava akış hızındaki değişimin radyatör hacmi ve fan gücünü nasıl etkilediği gösterilmiştir. Hava akış hızı yine 5-20 m/s aralığında, kanatçık mesafesi 0.7-1.2 mm aralığında değiştirilmiştir. Radyatör hacmi 15-30 litre aralığında ve fan gücü 1000-14000 W aralığında değişmektedir. Fan gücü 1000-2000 W aralığında seçilirse, radyatör hacminin 22.5 litre civarında olacağı görülmektedir. Sıcak suyun sıcaklığının giriş-çıkış farkının $15 \text{ }^\circ\text{C}$ den $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ye düşürülmesi radyatör

hacminde 2.5 litrelik bir azalma sağlamıştır. Soğutma suyu hızının 8-11 m/s aralığından 6-9 m/s aralığına düştüğü, kanatçık mesafesinin 0.85-1.05 mm aralığından 0.9-1.05 mm aralığına değiştiği görülmektedir. Su pompasının gücü 10 W ın altında kaldığı için grafiklere eklenmemiştir. Kanatçıklar arası mesafenin artması radyatör hacminin daha büyük olmasını gerektirirken, ihtiyaç duyulan fan motoru gücünün azalmasını sağlamaktadır.

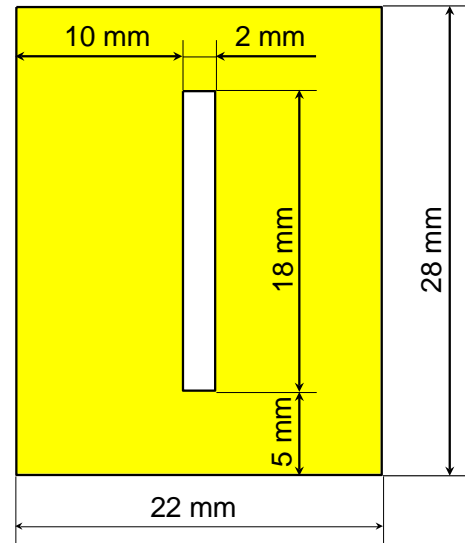


Şekil 7. Radyatör Hacmi ve Fan Gücünün Kanatçık Mesafesi ve Akış Hızı ile Değişimi ($\Delta T_s = 10 \text{ }^\circ\text{C}$)

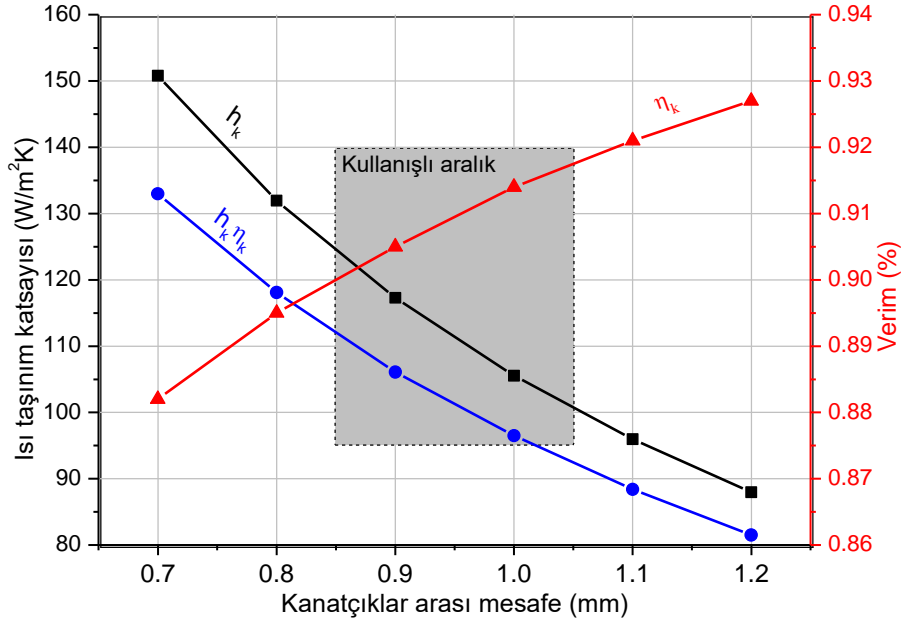
Radyatörün boyutlarının göreceli olarak küçük olması için hem verimin hem de kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısının mümkün olduğunca yüksek olması istenir. Kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı ve kanatçıkların verimi yalnızca kanatçıklar arası mesafe ile değişim gösteren değerlerdir. Kanatçıkların enerji denklemi ısı taşınım katsayısını ihtiva ettiği için kanatçıkların verimi geometrik boyutların yanı sıra, ısı taşınım katsayısına da bağımlı olan bir parametredir. Kanatçıkların verimi ve geometrik boyutları etkileşimli olarak incelenmek sureti ile geometrik boyutların Şekil 8 de görüldüğü gibi olması kararlaştırılmıştır. Boyutları belirlenen kanatçığın verimi ve yüzeyindeki ısı taşınım katsayısının kanatçıklar arası mesafeye göre değişimi Şekil 9 da gösterilmektedir. Şekilde kanatçıklar arası mesafenin kullanışlı kısmı (0.85-1.05 mm) dikdörtgen bir bölge içerisine alınmıştır. Kullanışlı kısımda kanatçık verimi %90-%92 aralığında değişmektedir. Aynı bölgede ısı taşınım katsayısı 89-125 $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında değişmektedir. Peyghambarzadeh vd. (Peyghambarzadeh ve diğ., 2013) yapısal olarak mevcut çalışmada tasarlanan radyatöre benzer bir radyatör kullanarak deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Kullanılan radyatörün kanatçıkları ve su boruları alüminyum malzemeden yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak nanoakışkan kullanılmıştır. Bu şartlar dikkate alındığında, kanatçık verimi yeterince yüksek ve iç yüzeydeki ısıl direnç yeterince küçük olacaktır. Neticede, toplam ısı iletim katsayısı ile kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı yeterince birbirine yakın değerler olacaktır. Yazarlar, toplam ısı iletim katsayısını 70-85 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ olarak vermektedir. Bu deneysel veri mevcut çalışmada belirlenen dış yüzey ısı

taşınım katsayısının (89-125 $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$) doğruluğunu teyid etmektedir.

Kanatçıklar arası mesafe arttıkça kanatçık veriminin iyileştiği ancak ısı taşınım katsayısının daha hızlı bir oranda azaldığı görülmüştür. Kanatçıklar arası mesafe sabit tutulduğunda, hidrolik çap değişmediği için ısı taşınım katsayısı, kanatçık verimi ve metre başına kanatçık sayısı değişmemektedir. Ancak, hava akış hızının artmasıyla radyatör boyunun (akış istikametindeki boyut) ve dolayısıyla radyatör hacminin azaldığı görülmektedir.

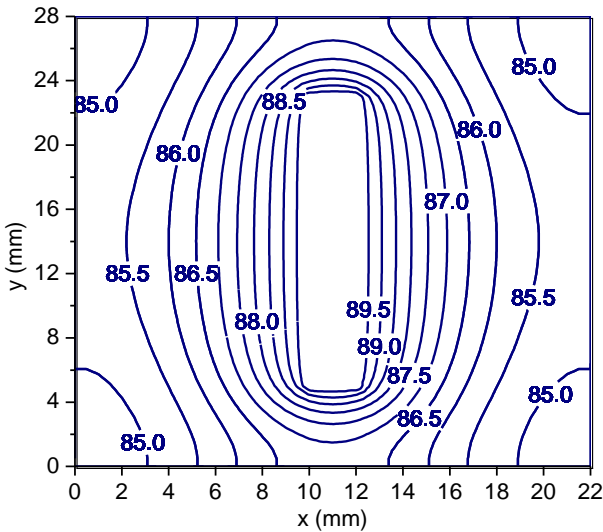


Şekil 8. Kanatçık Ölçüleri



Şekil 9. Kanatçık Isı Taşınım Katsayısı ve Verimin Kanatçıklar Arası Mesafe ile Değişimi

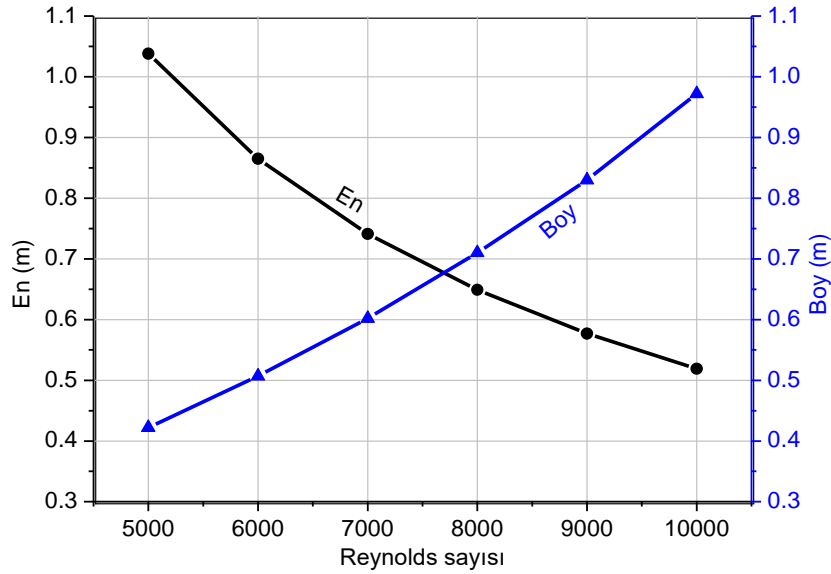
Kanatçıkların yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı $106 \text{ W/m}^2\text{°C}$ olarak seçilirse (1 mm kanatçık mesafesine karşılık gelmektedir) ve kanatçıkların iç sınırlarında 90 °C sıcaklık şartı kullanılırsa Şekil 10 da görülen sıcaklık dağılımı ortaya çıkmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, sıcaklık kontürleri 90 °C ile 84.7 °C arasında değerler almaktadır. Kanatçıkların ortalama sıcaklığı 86 °C , verimi %91 olarak hesaplanmıştır. Bu inceleme alüminyum malzemeden yapılan kanatçıkların ısı performansının yeterince yüksek olduğunu göstermektedir. Kanatçıkların veriminin yeterince yüksek olması aynı zamanda su boruları arasındaki mesafenin iyi tahmin edildiğini göstermektedir. Pratikte kanatçıkların verimi %85 in üzerinde tutulmaktadır.



Şekil 10. Kanatçığın Sıcaklık Dağılımı

Radyatörler tasarlanırken geometrik boyutlarının (en, boy ve kalınlık) kullanılacağı yere göre düzenlenmesi gerekmektedir. Boru sayısı artırıldığında doğal olarak borulardaki akış debisi azalmakta, akış debisi ile orantılı olarak boru başına düşen ısı transferi miktarı da azalmaktadır. Neticede kanatçıklı boruların uzunluğu da azalmaktadır. Buna karşılık, boru sayısının artması radyatörün eninin ve kalınlığının artması ile sonuçlanmaktadır. Bu çalışmada, doğrudan boru sayısına değer vererek radyatörün geometrik ölçülerini belirlemek yerine, Reynolds sayısına değer vererek boru sayısının belirleniminin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Çünkü, Reynolds sayısı aynı zamanda akışın rejimini ve boruların iç tarafındaki ısı transferini hesaplamada kullanılacak olan ampirik denklemi de tayin etmektedir.

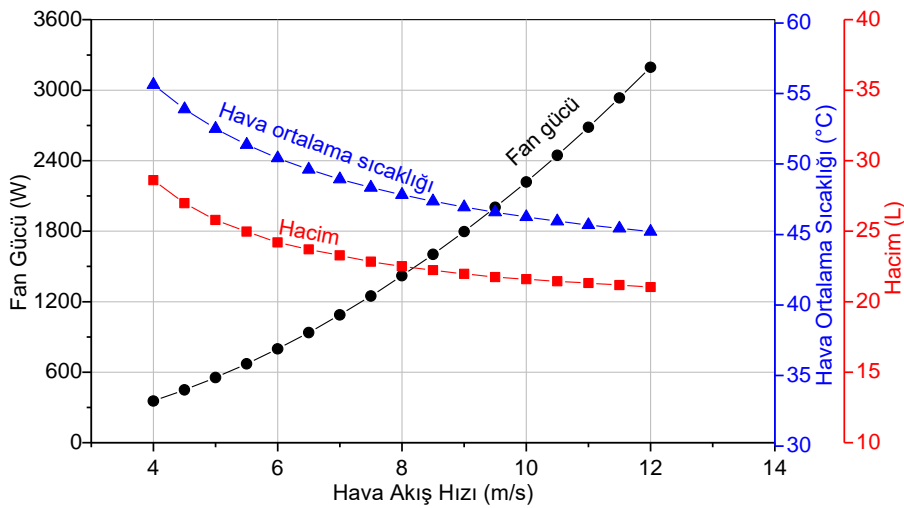
Tablo 1 de verilen değerler kullanılarak radyatörün en ve boyunun Reynolds sayısına göre değişimi incelendiğinde, Şekil 11 de görülen eğriler ortaya çıkmaktadır. Radyatör su borularındaki akışın Reynolds sayısı 5000 iken radyatörün boyu 422 mm, eni 1038 mm olarak, Reynolds sayısı 10000 iken radyatörün boyu 972 mm, eni 519 mm olarak belirlenmektedir. Radyatörün enini ve boyunu tayin eden faktör, taşıyan radyatör bölmesinin ölçüleri olduğu için en/boy oranı hakkında optimum bir değer tanımlamak doğru olmamaktadır.



Şekil 11. Radyatörün En ve Boyunun Soğutucu Akışkanın Reynolds Sayısı ile Değişimi

Radyatörlerin fan gücü hava akış hızı ile değişmektedir. Fan gücünün düşük olması için akış hızının da düşük olması gerekmektedir. Hava akış hızının düşürülmesi havanın ortalama sıcaklığının yükselmesini zorunlu kılmaktadır. Havanın ortalama sıcaklığının yükselmesi radyatör hacminin büyütülmesini gerektirmektedir. Şekil 12 de ortalama sıcaklık, radyatör hacmi ve fan gücünün hava akış hızı ile değişimi görülmektedir. Şekilde kullanılan veriler suyun girişi ile çıkışı arasında

10 °C lik bir fark olduğu, kanatçıklar arasında 1 mm mesafe olduğu ve Reynolds sayısının 8000 olduğu kabul edilerek elde edilmiştir. Diğer girdiler Tablo 1 de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 8 m/s hava hızında radyatör hacmi 22.5 litre civarında, fan gücü 1400 W civarında ve havanın ortalama sıcaklığı 48 °C civarında oluşmaktadır. Radyatörün hacmi ve hava fanının gücü Wang vd. (Wang ve diğ., 2015) tarafından verilen endüstriyel değerler ile uyumludur.



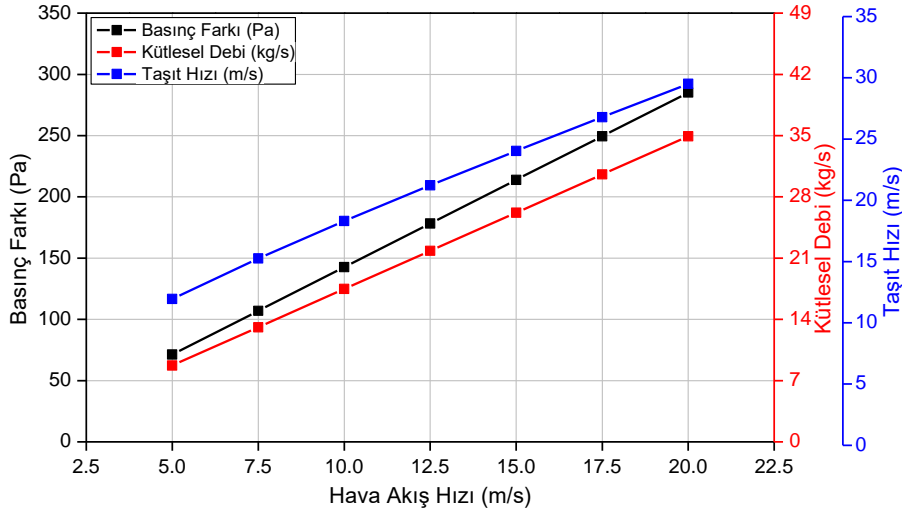
Şekil 12. Fan Gücü ve Hava Sıcaklığının Hava Akış Hızı ile Değişimi

Şekil 13 te radyatördeki basınç düşmesi, kütleli debi ve taşıt hızının radyatördeki debisel hızın değişimi ile ilişkisi görülmektedir. Şekil 12 ve Şekil 13 aynı girdiler kullanılarak elde edilmiştir. Kütleli debi ve basınç düşmesinin debisel hızla değişimi belirgin bir biçimde

lineer olmaktadır. Bu grafiğin esas amacı taşıt hızının hangi değerinde hangi debisel hızın oluşacağını kıyaslamalı olarak göstermektir. Şekilden görüldüğü üzere radyatördeki debisel hava hızı 5 m/s den 20 m/s ye giderken kütleli debi 8.73 kg/s den 34.95 kg/s ye,

basınç düşmesi 71.3 Pa dan 285.25 Pa ya, taşıt hızı 11.95 m/s den 29.5 m/s ye gitmektedir. Debisel hızın optimum değeri olan 8 m/s de taşıt hızı 16.5 m/s civarında, basınç düşmesi 114 Pa civarında olmaktadır. Bu inceleme, radyatör fanı devre dışı kaldığında

taşıtların radyatöründeki ısı transferinin 60 km/h hızlarda bile yeterli olacağını göstermektedir. Bunun için radyatörün ön cephesinin tamamen açık olması gerekmektedir.



Şekil 13. Radyatördeki Basınç Düşmesi, Kütleli Hava Debisi ve Taşıt Hızının Debisel Hız İle İlişkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, içten yanmalı motorların radyatörlerinin tasarımında kullanılmak üzere bir matematik model ve tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Geliştirilen model radyatörün en, boy, ve kalınlığının isteğe göre tayin edilmesine imkan sağlamaktadır. Soğutma kapasitesi 100 kW olan bir radyatörün boyutları araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kanatçıklar arası mesafenin 0.85-1.05 mm aralığında ve hava akış hızının 5-10 m/s aralığında olabileceği belirlenmiştir.
- Hava akışının laminer rejimde, su akışının türbülanslı rejimde olabileceği görülmüştür.
- Su boruları arasındaki mesafenin 22 mm civarında olması durumunda kanatçık veriminin %90 ın altına düşmeyeceği belirlenmiştir.
- Fan gücünün 1000-2000 W aralığında olabileceği hesaplanmış olup, motor gücünün %1-2 kadarının fan tarafından tüketilebileceği tespit edilmiştir.
- Havanın radyatöre giriş çıkış sıcaklık farkı 10 °C, akış hızı 8 m/s seçilirse; radyatörün hacmi 22.5 litre, havanın ortalama sıcaklığı 48 °C, kanatçıklar arası mesafe 1 mm, fan gücü 1419 W, kanatçık verimi %91 civarında olmaktadır.
- Tasarlanan radyatörde 8 m/s debisel hızda fan basıncı 114 Pa civarında hesaplanmaktadır.
- Tasarlanan radyatörün fanının devre dışı olması halinde taşıt seyir halindeyken radyatörde yeterli ısı transferinin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Semboller

Sembol	Anlamı	Birimi
A_i	Boru içerisindeki akış kesit alanı	m^2
A_k	Kanatçıklı yüzey alanı	m^2
A_r	Radyatör kanatçıkları arasındaki toplam akış alanı	m^2
C_{f1}	Suyun sabit sıcaklıktaki özgül ısı	$J/kg^\circ C$
C_{f2}	Fan tarafından sağlanan havanın özgül ısı	$J/kg^\circ C$
D	İki kanatçık arasındaki mesafe	m
D_h	Hidrolik çap	m
f	Sürtünme faktörü	-
f_1	Soğutma suyu (alt indis)	-
f_2	Fan tarafından sağlanan hava (alt indis)	-
h_i	Su borusunun içindeki ısı taşınım katsayısı	$W/m^2^\circ C$
h_k	Kanatçıkların ısı taşınım katsayısı	$W/m^2^\circ C$
h_o	Su borusunun dışındaki ısı taşınım katsayısı	$W/m^2^\circ C$
i	Suyun akış bölgesi (alt indis)	
k_b	Boru malzemesinin ısı iletim katsayısı	$W/m^\circ C$
k_{f1}	Suyun ısı iletim katsayısı	$W/m^\circ C$
k_{f2}	Havanın ısı iletim katsayısı	$W/m^\circ C$
k_k	Kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısı	$W/m^\circ C$

l_b	Radyatör borusunun düşey uzunluğu (boy)	m
l_k	Radyatörün ön ve arka yüzleri arasındaki mesafe (kalınlık)	m
\dot{m}	Radyatörden geçen suyun debisi	kg/s
\dot{m}_{f1}	Bir borudan geçen suyun debisi	kg/s
\dot{m}_{f2}	Havanın kütleli debisi	kg/s
n_b	Boru sayısı	
n_k	Boru üzerindeki kanatçıkların sayısı	
Nu	Nusselt sayısı	-
o	Havanın akış bölgesi (alt indis)	
P_1	Radyatörden yeteri kadar uzaklıktaki havanın hızı	Pa
P_2	Radyatörün hava kanallarının tam girişindeki basınç	Pa
P_{fan}	Hava fanının gücü	W
P_i	Su borusunun iç yüzey çevre uzunluğu	m
P_o	Su borusunun dış yüzey çevre uzunluğu	m
Pr	Prandtl sayısı	-
Q_c	Hacim elemanından konveksiyon ile atılan ısı	W
Q_e	Radyatörden aktarılabilecek toplam ısı	W
Q_{xi}	Hacim elemanına x yönünde giren ısı	W
Q_{xo}	Hacim elemanından x yönünde çıkan ısı	W
Q_{yi}	Hacim elemanına y yönünde giren ısı	W
Q_{yo}	Hacim elemanından y yönünde çıkan ısı	W
R_1	Boru içerisindeki ısı transfer direnci	$W/^\circ C$
R_2	Boru cidarındaki ısı transfer direnci	$W/^\circ C$
R_3	Kanatçıklı yüzeydeki ısı transfer direnci	$W/^\circ C$
Re	Reynolds sayısı	-
\bar{T}	Kanatçık üzerindeki sıcaklığın alan ortalaması	$^\circ C$
T_{f1}	Su sıcaklığı	$^\circ C$
T_{f2}	Kanatçıkların arasından geçen havanın ortalama sıcaklığı	$^\circ C$
T_h	Suyun radyatöre giriş sıcaklığı	$^\circ C$
T_{wi}	Borunun iç duvarındaki sıcaklık	$^\circ C$
T_{wo}	Borunun dış duvarındaki sıcaklık	$^\circ C$
T_∞	Ortam sıcaklığı	$^\circ C$
U_{f1}	Suyun akış hızı	m/s
U_{f2}	Havanın akış hızı	m/s
U_∞	Taşıt hızına denk hava akış hızı	m/s
V_2	Havanın kanatçıklar arası debisel hızı	m/s
ν_{f1}	Suyun kinematik viskozitesi	m^2/s
ν_{f2}	Havanın kinematik viskozitesi	m^2/s
δ_b	Borunun et kalınlığı	m
δ_k	Kanatçığın et kalınlığı	m
Δp_1	Borunun iki ucu arasındaki basınç farkı	Pa
Δp_2	Radyatörün ön yüzü ile arka yüzündeki havanın basınç farkı	Pa

η	Kanatçık verimi	$\%$
μ_{f1}	Suyun dinamik viskozitesi	Ns/m^2
ρ_a	Atmosferik havanın yoğunluğu	kg/m^3
ρ_{f1}	Suyun yoğunluğu	kg/m^3
ρ_{f2}	Havanın yoğunluğu	kg/m^3
Ω	Toplam ısı transferi direnci	$W/^\circ C$

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Halit Karabulut, kavramsallaştırma, metodoloji, yazma (özgün taslak); Regaip Menküç, Analiz verilerinin elde edilmesi, literatür taraması; A. Onur Özdemir, veri iyileştirme, görselleştirme, yazma (düzenleme); Emre Yıldırım, analiz verilerinin elde edilmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Altınışik, K. 2003. Uygulamalarla Isı Transferi, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul. Erişim adresi: <https://www.nobelyayin.com/>
- Amrutkar P.S., and Patil S. R., 2013, Automotive radiator performance–Review, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2(3): 563-565. Erişim adresi: <https://www.ijeat.org/>
- Arora N., and Gupta M., 2020, An updated review on application of nanofluids in flat tubes radiators for improving cooling performance, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110242. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110242>
- Belhadj A., Bouchenafa R., and Saim R., 2018, A numerical study of forced convective flow in microchannels heat sinks with periodic expansion-constriction cross section, Journal of Thermal Engineering, 4(3): 1912-1925. Erişim adresi: <https://eds.yildiz.edu.tr/journal-of-thermal-engineering/>
- El-Genk M. S., and Pourghasemi M., 2019, Nusselt number and development length correlations for laminar flows of water and air in microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 133, 277-294. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.077>
- Gamrat G., Favre-Marinet M., and Asendrych D., 2005, Conduction and entrance effects on laminar liquid

- flow and heat transfer in rectangular microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(14): 2943-2954. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.006>
- Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., and Lavine A. S., 1996, *Fundamentals of heat and mass transfer (Sixth Ed.)*, Wiley, New York. Erişim adresi: <https://www.wiley.com/en-gb>
- Ipci D., Karabulut H., ve Cinar C., 2016, Radyatör hava kanallarında tam gelişmiş akış ve ısı transferinin incelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 36(2): 119-133. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/isibtcd>
- Ipci, D., 2018, Taşıt radyatörlerinde bulunan dar kanallarda akış ve ısı transferinin incelenmesi, *Doktora Tezi*. Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Jadidi A., 2013, Karbon çelik malzemelerin fırında sert lehimlemesine etki eden parametrelerin deneysel olarak optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Jain J., Rajagopal T., Selvaraj A., and Devaraj E., 2022, Cross-flow radiator design using CFD for FSAE car cooling system and its experimental validation using the GEMS data acquisition system, *SAE Technical Paper*, 2022-01-0374. Doi: <https://doi.org/10.4271/2022-01-0374>
- Junjanna G. C., Kulasekharan N., and Purushotham H. R., 2012, Performance improvement of a louver-finned automobile radiator using conjugate thermal CFD analysis, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1(8): 1-13. Erişim adresi: <https://www.ijert.org/>
- Kakac S., Yener Y., and Pramuanjaroenkij A., 2013, *Convective heat transfer (Second Ed)*, CRC press, Boca Raton. Erişim adresi: <https://taylorandfrancis.com/>
- Karabulut H., Ipci D., and Cinar C., 2016, Numerical solution of fully developed heat transfer problem with constant wall temperature and application to isosceles triangle and parabolic ducts, *Applied Thermal Engineering*, 102, 115-124. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.129>
- Kundu B., Simlandi S., and Das P. K., 2011, Analytical techniques for analysis of fully developed laminar flow through rectangular channels, *Heat and mass transfer*, 47(10): 1289-1299. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0790-z>
- Lee P. S., and Garimella S. V., 2006, Thermally developing flow and heat transfer in rectangular microchannels of different aspect ratios, *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 49(17-18): 3060-3067. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.011>
- Morad M. M. A., and Alrajhi J., 2014, The effect of high temperature on engine performance in Kuwait conditions, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 4(2): 55-62. Doi: <https://doi.org/10.5923/j.jmea.20140402.02>
- Mukkamala Y., 2017, Contemporary trends in thermo-hydraulic testing and modeling of automotive radiators deploying nano-coolants and aerodynamically efficient air-side fins, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 76, 1208-1229. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.106>
- Oliet C., Oliva A., Castro J., and Perez-Segarra C. D., 2007, Parametric studies on automotive radiators, *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12): 2033-2043. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.006>
- Peyghambarzadeh S. M., Hashemabadi S. H., Naraki M., and Vermahmoudi Y., 2013, Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator, *Applied Thermal Engineering*, 52(1): 8-16. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013>
- Priyadarsini C. I., Reddy T. R., and Devi P. A., 2022, Design and performance analysis of automotive radiator using computational fluid Dynamics, *International Journal of Mechanical Engineering*, 7. Erişim adresi: <https://kalaharijournals.com/>
- Sahar A. M., Wissink J., Mahmoud M. M., Karayiannis T. G., and Ishak M. S. A., 2017, Effect of hydraulic diameter and aspect ratio on single phase flow and heat transfer in a rectangular microchannel, *Applied Thermal Engineering*, 115, 793-814. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.018>
- Sandu V., 2016, Experimental study on diesel engine fitted with visco fan drive, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, 9(1): 1. Erişim adresi: <https://webbut.unitbv.ro/index.php/Bulletin>

- Sidik N. A. C., Yazid M. N. A. W. M., and Mamat R., 2015, A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 68, 85-90. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.08.017>
- Starace G., Fiorentino M., Longo M. P., and Carluccio E., 2017, A hybrid method for the cross flow compact heat exchangers design, *Applied Thermal Engineering*, 111, 1129-1142. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.018>
- Trivedi P. K., and Vasava N. B., 2012, Effect of variation in pitch of tube on heat transfer rate in automobile radiator by CFD analysis, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 1(6): 180-3. Erişim adresi: <https://www.ijeat.org/>
- Vahidinia F., and Miri M., 2015, The effect of Reynolds number on the thermal and hydrodynamic characteristics of turbulence flow of the nanofluid in the heat exchanger, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3): 2109-2119. Erişim adresi: <http://csj.cumhuriyet.edu.tr/tr/>
- Wang, T., Jagarwal, A., Wagner, J. R., and Fadel, G., 2015, Optimization of an automotive radiator fan array operation to reduce power consumption, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5): 2359-2369. Doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2377655>

YERALTI MADEN İŞLETMELERİNDEKİ MESLEK GRUPLARININ GÜRÜLTÜ MARUZİYETİNİN BELİRLENMESİ

Şahin YUVKA^{1*}, Önder UYSAL², Serkan DOLĞUN³

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-3219-2321>

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-3640-3341>

³ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8129-7990>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kişisel Gürültü Maruziyeti, Maden Meslek Grupları, Madencilikte Gürültü, Yeraltı Madenciliği	Madencilik dünyanın ve ülkemizin önemli iş kollarından birisidir. Madencilik faaliyetleri esnasında çeşitli fiziksel risk etmenleri ortaya çıkmaktadır. Bu fiziksel risk etmenlerinin başında da gürültü gelmektedir. Teknolojinin gelişimine bağlı olarak günümüzde yeraltı madenciliğinde mekanizasyona geçiş süreçleri hızlanmış ve bu durum da çalışan personelin yüksek gürültü düzeyleri ile karşı karşıya kalmasına neden olmuştur. Gürültü insan üzerinde fizyolojik ve psikolojik birçok etki oluşturmaktadır. Bunların başında da bir meslek hastalığı olan işitme kayıpları gelmektedir. Bu çalışmada, yeraltı kömür madenciliğinde farklı meslek gruplarının iş tanımları yapılmış ve bu meslek gruplarında çalışan personelin maruz kaldığı gürültü düzeyleri belirlenmiştir. Yapılan gürültü ölçümleri gürültü yönetmeliği kapsamında değerlendirilerek gürültüye karşı alınabilecek önlem ve tedbirler açıklanmıştır.

DETERMINATION OF NOISE EXPOSURE OF OCCUPATIONAL GROUPS IN UNDERGROUND MINING ENTERPRISES

Keywords	Abstract
Personal Noise Exposure, Mining occupational groups, Noise in Mining, Underground Mining.	Mining is one of the important business lines in the world and in our country. Various physical risk factors arise during mining activities. One of these physical risk factors is noise. Depending on the development of technology, the processes of transition to mechanization in underground mining have accelerated and this has caused the working personnel to be faced with high noise levels. Noise has many physiological and psychological effects on people. One of these is hearing loss, which is an occupational disease. In this study, job descriptions of different occupational groups in underground coal mining were made and the noise levels that the personnel working in these occupational groups were exposed to were determined. The noise measurements made were evaluated within the scope of the noise regulation and the precautions and measures that could be taken against noise were explained.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 09.05.2023

: 30.05.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 09.05.2023

: 30.05.2023

* Sorumlu yazar: sahin.yuvka@dpu.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1294497>

1. Giriş

Çevrede ve çalışma ortamında işin yapılması esnasında çeşitli nedenlerden dolayı oluşan ve insan sağlığında olumsuz etkiler oluşturabilecek koşullardan korunmak amacıyla yapılan sistemli ve bilimsel çalışmalara "İş Sağlığı ve Güvenliği" denilmektedir. Çalışma ortamlarında psikolojik, biyolojik, ergonomik, kimyasal ve fiziksel olarak sağlığı etkileyebilecek çeşitli risk etkenleri bulunmaktadır. Bu fiziksel etkenlerden biri de gürültüdür (Doğan ve Çataltepe, 2018). Teknoloji ve

endüstrinin gelişimi ile doğru orantılı olarak üretilen makine ve teçhizatların gürültü seviyesi azaltılmaya çalışılsa da gürültülü çalışması zaman zaman kaçınılmaz olmaktadır. Gürültü, denetlemesi ve kontrolü zor, ileriye dönük etki ve zarar verme potansiyeli fazla olan bir çevre kirliliği olarak ortaya çıkmaktadır. Gürültünün zararları yaşanmış ve bilimsel olarak saptanmıştır. Gürültünün rahatsız edici etkisi çalışanları, iş yerlerini dolayısıyla da iş sağlığı ve güvenliği birimlerini daha çok meşgul etmeye başlamıştır (Ediz, Beyhan, Akçakoca ve



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Sarı, 2002). Maden işletmelerinde son yıllarda mekanize yöntemlerin uygulanmasının artışıyla birlikte gürültü problemi de artarak karşımıza çıkan sorun olmaktadır.

Yeraltı madencilğinde hazırlık ve üretim aşamalarında galeri açma ve kesici-yükleyici makineler gibi mekanize kazı araçları, personel, cevher veya çeşitli makine parçalarının taşınmasında kullanılan kulikar-monoray sistemleri, zincirli oluklar, telesiyej ve vinç sistemleri gibi makineler bu ocakların vazgeçilmez elemanlarıdır (Erol ve Su, 2015). Yeraltı maden ocaklarında kullanılan kesici-yükleyiciler, galeri açma makineleri, martopiferatörler, delik delme makineleri, sondaj makineleri, zincirli oluklar, bant konveyörler, tulumbar, elektrikli ve havalı vantilatörler, halatlı ve dizel lokomotifler (kulikar ve monoray sistemleri), kırıcılar (çeneli, çekicili), vinç sistemleri, hidrolik pompa istasyonları, havalı pompa ve manevra sistemleri, elektrikli dalgıç pompalar gibi ekipmanların her biri ayrı ayrı gürültü kaynakları olarak değerlendirilir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Akbay, Altındağ ve Şengün (2019) yaptıkları çalışmada, Antalya-Kemer'de açılan Altan Ayağ Tüneli inşaatında farklı kaya birimlerinde ve farklı faaliyetler sonucunda oluşan gürültü düzeylerini belirlemiş, yasal mevzuata göre değerlendirme yaparak, gürültüye karşı alınabilecek önlemleri sıralamışlardır. Çetin (2000) yaptığı çalışmada, Orta Anadolu Linyitleri İşletmeleri yeraltı ocağında çalışma birimlerine göre gürültü değerlerini saptanmış ve çalışanların odyogramlarını inceleyerek risk grupları oluşturmuştur. Ediz, ve diğ., (2002) yaptıkları çalışmada, Seyitömer Linyitleri İşletmesi, Eti Gümüş A.Ş. ve Garp Linyitleri İşletmelerinde gürültü ölçümlerini ele alarak madencilikteki gürültü sorunu ve oluşan problemleri ortaya çıkarmışlardır. Erdem, Duran, Doğan ve Yüksel (2017) yaptıkları çalışmada, Sivas ve çevresinde yer alan yol şantiyesi, kum ocağı ve açık işletme olarak faaliyet gösteren kireçtaşı, demir, altın ve kömür ocaklarında farklı tip ve modelde 67 adet iş makinesi için gürültü ölçümleri yaparak çalışanlar üzerinde oluşan gürültü maruziyetlerini belirlemeye çalışmışlardır. Erol ve Su, (2015) yaptıkları çalışmada mekanize yeraltı maden işletmesinde çalışan maden makinelerinin gürültü seviyelerini ölçmüşlerdir. En düşük, en yüksek, ortalama ve eşdeğer gürültü seviyelerini belirleyerek işçilerin maruz kaldığı gürültü seviyesini hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçları gürültü yönetmeliğine göre değerlendirmişlerdir. Harper ve O'Brien (2006), yaptıkları çalışma ile yeraltı çalışma ortamında tek başına ve kombine halinde kullanılan makinelerdeki çalışanların maruz kaldığı gürültü maruziyetleri belirlenmeye çalışılmış ve ses basınç seviyelerinin tahmini için bir model sunulmuştur. Onder ve Onder (2017) yaptıkları çalışmada maden işletmelerinden kaynaklanan eşdeğer

gürültü seviyelerinin değerlendirilmesi amacıyla 2004-2007 yılları arasında lavvar, açık ve yeraltı ocaklarını içeren üç maden alanında gürültü ölçüm örneklerini toplamışlardır. Gürültü ölçüm çalışmalarından elde edilen veriler tek yönlü varyans analizi ve tukey çoklu karşılaştırma prosedürü kullanılarak değerlendirilmiştir. Şahin (2003) yaptığı çalışmada, gürültü seviyesinin çalışanlar açısından zararlı olduğu tespit edilen bir işyerinde gürültü kontrol yöntemleri kullanılarak gürültü seviyesi azaltılmaya çalışmış ve bu yöntemlerin etkinliklerini araştırmıştır. Şensöğüt (2007) yaptığı çalışmada, madenlerde karşılaşılan gürültü kaynakları ve gürültü seviyeleri, gürültünün çalışanlar üzerine etkileri ve bu etkileri azaltmak için yapılması gerekenleri sunmuştur. Şensöğüt ve Çınar (2006a) yaptıkları çalışmada gürültüden arındırılmış 10000 m²'lik açık alanda 121 ölçüm istasyonunda tek ve çift kaynakları ile 7 farklı oktav bandının merkezi frekansları kullanmışlardır. Çalışmada meteorolojik parametreler ve dalga yansıması dikkate alınmış ve SPSS programı kullanılarak denklem elde edilmiştir. Şensöğüt ve Çınar (2006b), çalışmalarında Garp Linyitleri İşletmeleri Tunçbilek Açık Ocak İşletmesinde 312 ölçüm istasyonu kurularak gürültü kayıtları yapmışlardır. Ölçüm istasyonlarının şevlere, ocak yollarına ve gürültü kaynaklarına olan uzaklıkları çıkartılarak, atmosferik şartlarla birlikte değerlendirilip oluşacak gürültü seviyeleri modellenmiştir.

Bu çalışmada, yeraltı kömür madencilğinde farklı meslek gruplarının iş tanımları yapılarak, bu meslek gruplarında çalışan personelin maruz kaldığı gürültü düzeyleri belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirilerek gürültüye karşı alınabilecek önlemler verilmiştir.

3. Yöntem

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyularak Kütahya Bölgesinde bulunan yeraltı maden işletmelerinde farklı meslek gruplarında çalışanların kişisel gürültü maruziyet ölçümleri yapılmıştır. Gürültü ölçümleri TS EN ISO 9612-2009 "Akustik-Mesleki Gürültü Maruziyetinin Belirlenmesi-Mühendislik Metodu" ile "TS ISO 1999 Akustik-Gürültüye bağlı işitme kaybının tahmini" standartlarına uygun olarak Casella markasına ait dBadge2 donanımlı dozimetre aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Casella dBadge2 gürültü dozimetresi kişisel gürültü maruziyetini ölçen antigruzi özellikli bir cihazdır. Cihaz, uluslararası standartlar kapsamında entegre-ortalama ses seviyesi ve kişisel maruziyet ölçer olarak çalışabilmektedir. Casella dBadge2 kişisel gürültü dozimetresi Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Casella Dbadge2 Kişisel Gürültü Dozimetresi (Casella dBadge2, 2021)

3.1. Yeraltı Meslek Grupları

Bir yeraltı kömür ocağında işin aksamadan, duraksamadan ve karmaşa ortamı olmadan yapılabilmesi için çalışanların yapacakları işleri bilmeleri adına değişik meslek grupları belirlenmiştir. Aynı zamanda bu şekilde meslek gruplarına göre çalışmanın olması, çalışanların yaptıkları işi benimsemesi ve kendi alanlarında uzmanlaşmasına neden olmaktadır. Ölçüm yapılan yeraltı ocaklarında ve yeraltı ocaklarına bağlı olarak yer üstü çalışanlarının meslek gruplarına göre görevleri ve iş tanımları şu şekilde yapılabilir (Dolgun, 2021):

Maden teknikeri (ayak, ihzarat, nakliyat, iş sağlığı ve güvenliği, kontrol): İş yerinin iş programındaki belirtilen hedeflere ulaşabilmesi için eldeki iş gücü, makine, malzeme ve teçhizat gibi kaynaklar ile belirli çalışma metotları arasında organizasyonu sağlamak ve verilen tertip içerisinde gerekli kontrol ve denetiminin yapılıp aksaklıkların giderilerek programlanan üretim veya buna bağlı bütün işlerin emniyetli bir şekilde yerine getirilmesi işleridir.

Elektrik teknikeri: Konusu ile ilgili programlarda bir grup faaliyetin uygun bir biçimde yerine getirilmesi için mevcut bulunan iş gücü, makine, teçhizat vs. kaynakların planlanması, tahsisi, kullanımının denetlenmesi ve uygulamadaki aksamaların saptanıp düzeltilmesi için gerekli işlerin tümüdür.

Makine teknikeri: Yeraltında çalışan tüm mekanik tesislerin çalışmasını sağlamak, montaj, demontaj, periyodik bakımını yaptırmak, ünitelerin aksamadan çalışmasını temin için gerekli yedek parça stoku bulundurmaktır. Her tesiste gerekli emniyet tedbirlerini aldırarak, acil durumlarda üretimin akışının aksamaması için teknik ve idari her türlü tedbiri almak veya aldırarak ve bu durumu hemen ilgili iş amirlerine haber vermek. İmalat atölyesi ve diğer servislerle iletişime geçerek imal edilmiş malzemelerin gelmesini, tamire gidecek ya da tamirden gelen malzemenin takip ve kontrolünün yapılması işleridir.

Harita teknikeri: Servis amirinden aldığı talimat doğrultusunda yeraltı ve yerüstü maden işletmelerinin topoğrafik etütlerini, işletme haritalarını ve topoğrafik

haritalarının yapılması, nirengi noktalarını saptayarak ve koordinatlarının hesaplanması, her türlü röle ve aplikasyon işlerini çıkarılmasıdır.

Ajüstör postabaşı: İş amirinin vermiş olduğu tertip gereği gerekli basınçlı hava, havalandırma, su atımı gibi işlerle ilgili boru ve vantüp şebekelerinin döşenmesi, makine ve teçhizatın kurulması şebeke bağlantılarının yapılması nakliyat ünitelerinin demontaj ve montaj işlerinin yapılması, şebeke kaçaklarının giderilmesi işlerinin mevcut emniyet yönetmelik ve talimatlarına uygun olarak yapılmasıdır.

Elektrik postabaşı: Elektrik faaliyetlerinin, mevcut talimat ve yönetmeliklere, çalışma şartlarına, emniyet kurallarına uygun olarak zamanında yapılması, personelin sevk ve idaresi için gerekli tedbirlerin alınması ve yapılması işidir.

Tamir bakım postabaşı: Yeraltında kurulu tüm mekanik tesislerin kendi vardiyası içinde teknik ve ekonomik yönden uygun biçimde çalışmasını ve bakımını sağlamak, ünitelerin çalışmasında bir aksaklığa meydan vermemek için yeterli yedek malzeme stoku bulundurmaktır, tesisleri arızasız çalışır durumda bir sonraki vardiyaya teslim etmektir.

Ajüstör usta: Basınçlı hava, tali havalandırma su atımı gibi işlerle ilgili boru ve vantüp döşenmesi, makine ve teçhizatın kurulması, şebeke bağlantılarının yapılması, mevcut şebeke kaçaklarının giderilmesi, hazırlık aşamasındaki zincirli konveyörlerin montaj ve demontaj işlemleri, teçhizatın doğabilecek arızaların giderilmesi işleridir.

Elektrik usta: İş amirin vereceği talimata göre mevcut mevzuat dahilinde elektrik sistemlerinin ve elektrik ile çalışan her türlü motorların bakım, tamir, montaj ve demontaj (hat işleri dahil) ile arızaların giderilmesi işlerinin tümüdür.

Tamir bakım usta: Yeraltında çalışan tüm mekanik ünitelerin teknik ve ekonomik yönden en emniyetli şekilde çalışmasını sağlamak, arıza ve üretim akışının durmasına meydan vermeden uygun zamanlarda müdahale ederek kural ve talimatlara uygun olarak bakımlarının yapılması işidir.

Elektronik usta: Mevcut mevzuat dahilinde elektrik ve elektronik sistemlerinin ve elektrik ile çalışan her türlü motorların bakım, tamir, montaj ve demontaj (hat işleri dahil) ve arızaların giderilmesi işlerinin tümüdür.

Şilt sürücü (Tahkimatçı): Emniyet kurallarına uygun olarak yürüyen tahkimatları çalıştırmak, çalıştırmadan önce ve sonra gerekli kontrolleri yapmak, emniyetli bir çalışma ortamı sağlanması işleridir.

Kesici makine operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü): Emniyet kurallarına uygun olarak kesici makineyi çalıştırmak, çalıştırmadan önce ve iş bitiminden sonra gerekli kontrolleri ve bakımını yapmak, emniyetli bir

çalışma ortamı sağlayarak hedeflenen programda hem iş hem makine randımanı göz önünde bulundurarak aynada kömür kazısı yapma işleridir.

Kazı usta: Amirinden almış olduğu tertip gereği bulunduğu ayaktaki gerek görülen yerlerde ilerleme, tamirat, tahkimat, emniyete alma işlerini yaparak üretimin aksamamasını ve emniyetli bir çalışma ortamı oluşmasını sağlamak, hidrolik, çelik veya ağaç direklerin vurulması alınması-sökülmesi gibi işlerin yapılmasıdır.

Kazı ihzarat usta: Amirinden almış olduğu tertip gereği bulunduğu bacanın ilerleme-tamir işlerini aksamadan yürütmesini sağlamak, bacadaki her türlü havalandırma, su tahliyesi, nakliyat işlerini yürütmek, aksayan yönlerini ihzarat nezaretçisine derhal bildirmek, bacadaki malzeme akışını kontrol etmek, lağım sırasında ve ilerlemelerde emniyet kurallarına uygun olarak yapılması işleridir.

Kazı yedek: Ustasının talimatları doğrultusunda hareket etmek, kullanılan teçhizatları korumak, çalışır vaziyette tutmak, ihtiyaç duyulan alet, ekipman ve teçhizatı taşımak, verilen işin emniyet kurallarına göre hareket edilerek yapılması işidir.

Kazı ihzarat yedek: İhzarat ustasının emir ve talimatları doğrultusunda hareket etmek, kullanılan teçhizatları korumak, çalışır vaziyette tutmak, kullanılacak malzemeleri taşımak, her türlü işi emniyet kurallarına göre yapılmasıdır.

Kazı işçi: Kazı, tahkimat, söküm ve arkadan kömür alma işlerinin yürütümü, nakliye ünitelerinin rahat çalışması için temizliğinin yapılması ve bu işler için gerekli malzemelerin taşınması ile çalışacağı yerdeki eksik ve bozuk tahkimatların yapılması işidir.

Kazı ihzarat işçi: Hazırlık işlerinde iş amirinin vermiş olduğu tertip gereği kazı, tahkimat, tamirat, nakliye ünitelerinin rahat çalışması için temizliğinin yapılması ve bu işler için gerekli malzemelerin taşınması ile çalışacağı yerde usta-yedek olup olmaması durumuna göre eksik ve bozuk tahkimatların yapılması işidir.

Düz işçi: Üretim ya da hazırlık birimlerinde kazı, tahkimat, tamirat işlerinin öncesi veya sonrasında gerekli olan temizliğin yapılması ve nakliye ünitelerinin rahat çalışması için gerekli olan temizliğinin yapılmasıdır.

Tamirci-taramacı usta: Ocağın her yerinde her türlü tamir, tarama, temizlik, göçük açma, baskıya mukavemet sağlama, bağ değiştirme işlerinin yapılması işidir.

Delikçi usta: Ayaklarda ve bacalarda, aynada veya arkada kazının rahat bir şekilde yapılması için gerekli olan patlama deliklerinin açılması işidir.

Ateşleyici (Barutçu): Ateşleme manyetolarını, patlayıcı maddeleri, kapsülleri depolardan almak, taşımak, iş

yerlerinde korumak ve kullanmak, kullanılmayanları iade etmek ve kayıtlarını tutmak işleridir.

Kaynakçı usta (yeraltı): Yeraltında imalat, tamir, montaj, demontaj işlerinde ihtiyaç olabilecek her türlü elektrik ve oksijen kaynağının ve oksijen ile kesim yapılması işleridir.

Hidrolik pompacı-hortumcu: Yeraltındaki işleri aksatmayacak şekilde hidrolik pompanın çalıştırılması ve hortumların bakım ve tamirat işleridir.

Marangoz usta: Desandrelere merdiven çakma, baca ve kelebelerde insan ve posta yolunu ayıran tahta perdeyi yapma, havalandırma kapıları ve gerekli yerlere tahta korkuluklar yapılması işleridir.

Tesis çalıştırıcı (DAC Operatörü): Kırıcının, aktarma konveyörünün, ayak içi konveyörlerinin talimatlar doğrultusunda çalıştırılması ve çalışmalarının kontrolü, bantların çalışmasının kontrol edilmesi, görülen aksaklıkların iş amirine haber verilerek giderilmesi işleridir.

Konveyör çalıştırıcı-bakımcı: Yeraltında ve yerüstünde besleme, tüvenan, mıknaş, sist ve yükleme bantlarını çalıştırıp temizliğini yapmak, tüvenan elekleri, seperatör ve dansifiyerlerin çalışmasını kontrol etmek ve temizliğini yapmaktır.

Tulumbacı-pompacı: Ocak içerisindeki yeraltı sularının, galerilerde kanal veya boru şebekesi ile havuzlara toplanmasını sağlamak ve biriken suyu toplama noktalarından yerüstüne sevk edilmesi için her türlü donanımın temizlik, bakım ve onarımını yapma işidir.

Malzemeci-vinççi (yeraltı): Yeraltı panolarının ve hazırlık galerilerinin her türlü ağaç ve demir malzeme naklini, arızalı malzemelerin ocak dışına çıkarmak için yükleme ve boşaltılmasını; malzemelerin vinç ile nakliyatını sağlamak, vincin bakımını yapmak, arıza halinde ilgili iş amirine ve nezaretçiye haber vererek mevcut emniyet kurallarına göre yapılması işidir.

Kulikar-monoray operatörü: Dizel ya da halatlı kulikar ve monorayları kullanarak yeraltından yerüstüne veya yer üstünden yeraltına malzeme ve insan nakliyatı yapma işidir.

Düğmeci- saccı-kancacı: Kulikar-monoray operatörleri ve vinççi ile anlaşarak malzemelerin emniyetli bir şekilde kulikar-monoray ve vinçle inip çıkmasını sağlamak, sac dibi manevrasını yapmak, malzemelerin yükleme, indirme ve taşınma esnasında gerekli emniyet tedbirlerini alarak gerekli uyarı ve sinyalleri verme işidir.

Yağcı: Yeraltında çalışan mekanik ünitelerin gereken aksamalarını yağ cinsine ve miktarına göre talimatnameler doğrultusunda emniyet kurallarına göre yağlanması işidir.

Dedektörcü: Ocak havasındaki gaz oranlarının ölçülmesi ve analizinin yapılması işleridir.

Barajcı-yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta): Yer altı ocağında yangın, su ve bekleme barajlarının yapılması, ötelenmesi ve konu ile ilgili tüm tedbirlerin alınması işidir.

Sihhiye acil tıp teknisyeni: Yeraltında kaza geçiren kişilere gerekli ilk yardımın yapılması işidir.

Tahlisiyeci: Tahlisiye cihazlarının kullanılmasının öğrenilmesi, bu cihazların günlük bakımı yapılarak her an hazır bulunma ve bu cihazlarla her türlü şartlarda çalışma yaparak gerekli kurtarma ve müdahale işlemlerinin yapılması işidir.

Tahlisiye bakım ve tamirci: Tahlisiye cihazlarının tamiri, bakımı ve kontrolü yapılarak kullanmaya hazır duruma getirilmesi, cihazların periyodik muayenelerinin yapılması işidir.

Ambarcı-takımcı: Yeraltında hazırlık işlerinde, üretimde kullanılan veya mekanik malzemeleri (martopikör, martoperfaratör, mengene, söküm ve dikim anahtarları, kürek, kazma, caraskal, çeşitli mekanik anahtarlar, sivriç, cıvata, somun, çivi, manşon gibi her türlü bağlantı ve sızdırmazlık elemanları) muhafaza, temin ve takip etmek. Arızalı malzemeleri ayırmak, tamirini yapmak tamiri mümkün olmayanların yerine sağlam malzemelerin gelmesini sağlamak işleridir.

Malzemeci (yerüstü, harici karo): Yerüstünde her türlü ağaç ve demir malzeme naklini, yükleme ve boşaltma işi, servislerin ihtiyaçlarına göre malzeme işlerinin yapılması işidir.

Kaynakçı (yerüstü, atölye): Yerüstünde her türlü oksijenasetilen ve elektrik ark kaynağıyla ocağın yeraltında veya yerüstünde ihtiyaç duyduğu malzemelere istenilen şekilde kaynak işlemlerinin yapılması işleridir.

Vantilatörcü: Emici veya üfleme vantilatörlerinin düzenli çalışmasını sağlama işidir.

Merkezi izleme operatörü: Ocak havasını, üretimi, çalışan personelin hareketliliğini ve bilgisayar sistemine bağlı bütün tertibat ve makineleri izleme işidir.

Lamba tamir bakımcı (lambahaneci): Lambahane ile ilgili kısma ait bakım, tamir, temizlik gibi işlerin tümüdür.

Hamamcı-kazancı-kaloriferci: İşçi hamamlarının düzenli ve temiz kullanılmasını sağlama, kazan ve kaloriferler sistemlerinin çalıştırılması işleridir.

Şoför (pick-up, otobüs, kamyon, binek): Birinci kademe bakımının bizzat aracı kullanan tarafından yapılması, yürürlükteki trafik mevzuatına göre iş amirince yapılmış programlara işletme amaçlarına uygun olarak aracın sevk ve idaresinin yapılması işidir.

Yol tamir bakımcı (yol marangozu): Yeraltında insan ve malzeme nakli yapan vasıta (kulikar, monoray ve shunting) yollarının montajı, demontajı; arızalı olanların arızalarının giderilmesi veya değiştirilmesi işleridir.

Düz İşçi (Fişçi): Yeraltından tüvenan halde çıkarılan kömürün kamyonlarla naklinin yapılabilmesi için araçların seferlerine fiş verme işidir.

Ağır kamyon şoförü: İşletme sahasından kömür, sert kayaç, dekapaj malzemesi, gerektiğinde stabilize malzeme ve ihtiyaç durumuna göre diğer malzemeleri çekmek için ağır kamyonların sevk ve idare işidir. (Dolgun, 2021).

4. Bulgular

Bu çalışmada Kütahya Bölgesinde bulunan yeraltı maden işletmelerinde farklı meslek gruplarında çalışan kişiler üzerinde gürültü maruziyeti ölçümleri yapılmıştır.

4.1. Gürültü Ölçümleri

Çalışma kapsamında farklı meslek gruplarında farklı zamanlarda ikişer defa kişisel gürültü maruziyeti ölçümleri yapılmıştır. İlk yapılan kişisel gürültü maruziyeti ölçümleri 52 farklı meslek grubunda, ikinci ölçümler ise 44 farklı meslek grubunda gerçekleştirilmiştir. Gürültü ölçüm sonuçları 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında 28.07.2013 tarih ve 28721 sayılı Resmî Gazete yayınlanan "Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik'e göre değerlendirilmiştir. Gürültü ölçümleri yapılan meslek grupları için 8 saatlik ölçüm süresi sonucunda elde edilen 8 saatlik gürültü maruziyet seviyesi (LEX 8Hrs) değerleri birinci ve ikinci ölçüm için sırasıyla Tablo 1, Tablo 2'de ve karşılaştırmalı olarak da Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 1. Sekiz Saatlik Birinci Gürültü Ölçüm Sonuçları (Uysal, Yuvka, Özgür ve Dolğun, 2019)

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	8 Saatlik Gürültü Maruziyet Seviyesi (LEX 8Hrs) dB(A)
1	Maden Teknikeri (Ayak)	83,9
2	Maden Teknikeri (İhzarat)	77,6
3	Maden Teknikeri (İş Sağlığı ve Güvenliği)	75,9
4	Elektrik Teknikeri	76,4
5	Makine Teknikeri	81,6
6	Harita Teknikeri	74,9
7	Ajüstör Postabaşı	76,2
8	Elektrik Postabaşı	78,1
9	Tamir-Bakım Postabaşı	87,2
10	Ajüstör Usta	84,5
11	Elektrik Usta	81,9
12	Tamir-Bakım Usta	88,1
13	Elektronik Usta	76,1
14	Şilt Sürücü (Tahkimatçı)	82,0
15	Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü)	87,6
16	Kazı Usta	81,1
17	Kazı İhzarat Usta	84,9
18	Kazı Yedek	79,5
19	Kazı İhzarat Yedek	84,0
20	Kazı İşçi	76,2
21	Kazı İhzarat İşçi	82,5
22	Düz İşçi	82,2
23	Tamirci-Taramacı Usta	90,4
24	Delikçi Usta	88,2
25	Ateşleyici (Barutçu)	87,9
26	Kaynakçı Usta (Yeraltı)	78,9
27	Hidrolik Pompacı-Hortumcu	106,1
28	Marangoz Usta	92,8
29	Tesis çalıştırıcı (DAC Operatörü)	81,1
30	Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı	87,7
31	Tulumbacı-Pompacı	76,4
32	Malzemeci-Vinççi	84,2
33	Kulikar Operatörü	83,9
34	Monoray Operatörü	89,0
35	Düğmecici-Saççı-Kancacı	82,9
36	Yağcı	76,4
37	Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu)	80,5
38	Dedektörcü	76,3
39	Barajcı-Yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta)	66,8
40	Sihhiye-Acil Tıp Teknisyeni	79,4
41	Tahlisiyeci	73,5
42	Tahlisiye Bakım ve Tamirci	70,3
43	Ambarcı-Takımcı	79,9
44	Malzemeci-Vinççi (Yer Üstü, Harici Karo)	84,3
45	Kaynakçı Usta (Yer Üstü, Atölye)	78,8
46	Düz İşçi (Fişçi)	71,0
47	Vantilatörcü	68,7
48	Merkezi İzleme Operatörü	72,7
49	Lamba Tamir Bakımcı (Lambahaneci)	71,4
50	Hamamcı-Kazançı-Kaloriferçi	73,9
51	Şoför (Pick-Up, Otobüs, Kamyon, Binek)	74,3
52	Ağır Kamyon Şoförü	77,9

Ülkemizde yayımlanan “Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik” kapsamında üç farklı maruziyet değeri söz konusudur. Yönetmeliğe göre en düşük maruziyet eylem değeri 80

dB(A), en yüksek maruziyet eylem değeri 85 dB(A) ve maruziyet sınır değeri 87 dB(A) olarak belirlenmiştir. Eğer yönetmelik gereği 8 saatlik gürültü ölçümleri 80 dB(A)’dan düşük ise herhangi bir kulak koruyucu

donanım kullanılmasına gerek yoktur. Ölçüm değerleri 80 dB(A) ve üzerinde ise işveren işyerinde kulak koruyucu donanım bulundurmaya zorundadır. 85 dB(A) ve üzerinde ise, çalışanlar işveren tarafında verilen kulak koruyucu donanımı kullanmak zorundadır.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde 1. ölçüm sonuçlarına göre gürültü maruziyeti 80 dB(A)'dan düşük olan ve herhangi bir kulak koruyucu donanım kullanması gerek olmayan meslek grupları; Maden Teknikeri (İş Sağlığı ve Güvenliği), Elektrik Teknikeri, Harita Teknikeri, Ajüstör Postabaşı, Elektrik Postabaşı, Elektronik Usta, Kazı Yedek, Kazı İşçi, Kaynakçı Usta (Yeraltı), Tulumacı-Pompacı, Yağcı, Dedektörçü, Barajcı-Yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta), Sıhhiye-Acil TıpTeknisyeni, Tahlisiyeci, Tahlisiye Bakım ve Tamirci, Ambarcı-Takımcı, Kaynakçı Usta (Yer Üstü, Atölye), Düz İşçi (Fişçi), Vantilatörçü, Merkezi İzleme Operatörü, Lamba Tamir Bakımcı (Lambahaneci), Hamamcı-Kazancı-Kaloriferci, Şoför (Pick-Up, Otobüs, Kamyon, Binek), Ağır Kamyon Şoförüdür.

Ölçüm değerleri 80 dB(A) ve üzerinde olan ve işveren tarafından kulak koruyucu donanım bulundurmaya zorunda olan meslek grupları ise; Makine Teknikeri, Ajüstör Usta, Elektrik Usta, Şilt Sürücü (Tahkimatçı), Kazı Usta, Kazı İhzarat Usta, Kazı İhzarat Yedek, Kazı İhzarat İşçi, Düz İşçi, Tesis çalıştırıcı (DAC Operatörü), Malzemeci-Vinççi, , Düğmecici-Saçcı-Kancacı, Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu), Malzemeci-Vinççi (Yer Üstü, Harici Karo), Kulikar Operatörü'dür.

Ölçüm değerleri 85 dB(A) ve üzerinde olan ve kulak koruyucu kullanmak zorunda olan meslek grupları; Tamir-Bakım Postabaşı, Tamir-Bakım Usta, Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü), Tamirci-Taramacı Usta, Delikçi Usta, Ateşleyici (Barutçu), Hidrolik Pompacı-Hortumcu, Marangoz Usta, Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı, Monoray olarak belirlenmiştir

Tablo 2. Sekiz Saatlik İkinci Gürültü Ölçüm Sonuçları (Dolgun, 2021)

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	8 Saatlik Gürültü Maruziyet Seviyesi (LEX 8Hrs) dB(A)
1	Maden Teknikeri (Ayak)	83,4
2	Maden Teknikeri (İş Sağlığı ve Güvenliği)	72,1
3	Makine Teknikeri	72,6
4	Harita Teknikeri	79,6
5	Tamir-Bakım Postabaşı	77,7
6	Ajüstör Usta	81,5
7	Elektrik Usta	91,5
8	Tamir-Bakım Usta	84,0
9	Elektronik Usta	85,1
10	Şilt Sürücü (Tahkimatçı)	87,9
11	Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü)	83,3
12	Kazı Usta	77,4
13	Kazı İhzarat Usta	93,3
14	Kazı Yedek	91,6
15	Kazı İhzarat Yedek	69,1
16	Kazı İhzarat İşçi	88,2
17	Düz İşçi	74,3
18	Tamirci-Taramacı Usta	83,3
19	Delikçi Usta	88,2
20	Ateşleyici (Barutçu)	90,1
21	Kaynakçı Usta (Yeraltı)	82,5
22	Hidrolik Pompacı-Hortumcu	95,3
23	Marangoz Usta	81,8
24	Tesis çalıştırıcı (DAC Operatörü)	85,1
25	Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı	88,5
26	Tulumacı-Pompacı	82,3
27	Malzemeci-Vinççi (Yeraltı)	90,9
28	Kulikar Operatörü	85,3
29	Monoray Operatörü	88,2
30	Düğmecici-Saccı-Kancacı	85,3

Tablo 2. Sekiz Saatlik İkinci Gürültü Ölçüm Sonuçları (devam)

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	8 Saatlik Gürültü Maruziyet Seviyesi (LEX 8Hrs) dB(A)
31	Yağcı	87,1
32	Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu)	89,7
33	Dedektörcü	81,8
34	Barajcı-Yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta)	82,7
35	Sıhhiye-Acil Tıp Teknisyeni	77,9
36	Tahlisiye Bakım ve Tamirci	65,5
37	Ambarcı-Takımcı	71,8
38	Kaynakçı Usta (Yer Üstü, Atölye)	81,6
39	Düz İşçi (Fişçi)	67,5
40	Vantilatörcü	72,2
41	Merkezi İzleme Operatörü	76,0
42	Hamamcı-Kazancı-Kaloriferici	76,6
43	Şoför (Pick-Up, Otobüs, Kamyon, Binek)	72,6
44	Ağır Kamyon Şoförü	87,2

Tablo 2'ye göre 44 farklı meslek grubunda yapılan 8 saatlik kişisel gürültü maruziyeti ölçümleri 65,5 dB(A) ile 95,3 dB(A) aralığında değişmektedir. 8 saatlik gürültü maruziyetlerine bakıldığında en yüksek 95,3 dB(A) değeriyle Hidrolik Pompacı-Hortumcu, en düşük 65,5 dB(A) değeriyle Tahlisiye Bakım ve Tamirci meslek gruplarında görülmektedir. 2.ölçüm sonuçlarına göre gürültü maruziyeti 80 dB(A)'dan düşük olan ve herhangi bir kulak koruyucu donanım kullanılmasına gerek olmayan meslek grupları; Maden Teknikeri (İş Sağlığı ve Güvenliği), Makine Teknikeri, Harita Teknikeri, Tamir-Bakım Postabaşı, Kazı Usta, Kazı İhzarat Yedek, Düz İşçi, Sıhhiye-Acil Tıp Teknisyeni, Tahlisiye Bakım ve Tamirci, Ambarcı-Takımcı, Düz İşçi (Fişçi), Vantilatörcü, Hamamcı-Kazancı-Kaloriferici, Şoför (Pick-Up, Otobüs, Kamyon, Binek), Merkezi İzleme Operatörü'dür.

Ölçüm değerleri 80 dB(A) ve üzerinde olan ve işveren tarafından sağlanan kulak koruyucu donanım bulundurmamak zorunda olan meslek grupları ise; Maden

Teknikeri (Ayak), Ajüstör Usta, Tamir-Bakım Usta, Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü), Tamirci-Taramacı Usta, Kaynakçı Usta (Yeraltı), , Tulumacı-Pompacı, Dedektörcü, Barajcı-Yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta), Kaynakçı Usta (Yer Üstü, Atölye), Marangoz Usta'dır.

Ölçüm değerleri 85 dB(A) ve üzerinde olan Elektrik Usta, Elektronik Usta, Şilt Sürücü (Tahkimatçı), Kazı İhzarat Usta, Kazı Yedek, Kazı İhzarat İşçi, Delikçi Usta, Ateşleyici (Barutçu), Hidrolik Pompacı-Hortumcu, Tesis çalıştırıcı (DAC Operatörü), Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı, Malzemeci-Vinççi (Yeraltı), Kulikar Operatörü, Monoray Operatörü, Düğmecici-Saccı-Kancacı, Yağcı, Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu), Ağır Kamyon Şoförü kulak koruyucuları kullanmak zorunda olan meslek gruplarıdır.

Tablo 3 'te 8'er saatlik birinci ve ikinci gürültü ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3. Sekiz Saatlik 1. ve 2. Gürültü Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	1. Ölçüm LEX 8Hrs dB(A)	2. Ölçüm LEX 8Hrs dB(A)
1	Maden Teknikeri (Ayak)	83,9	83,4
2	Maden Teknikeri (İş Sağlığı ve Güvenliği)	75,9	72,1
3	Makine Teknikeri	81,6	72,6
4	Harita Teknikeri	74,9	79,6
5	Tamir-Bakım Postabaşı	87,2	77,7
6	Ajüstör Usta	84,5	81,5
7	Elektrik Usta	81,9	91,5
8	Tamir-Bakım Usta	88,1	84,0
9	Elektronik Usta	76,1	85,1
10	Şilt Sürücü (Tahkimatçı)	82,0	87,9
11	Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü)	87,6	83,3
12	Kazı Usta	81,1	77,4
13	Kazı İhzarat Usta	84,9	93,3
14	Kazı Yedek	79,5	91,6

Tablo 3. Sekiz Saatlik 1. ve 2. Gürültü Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması (devam)

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	1. Ölçüm LEX 8Hrs dB(A)	2. Ölçüm LEX 8Hrs dB(A)
15	Kazı İhzarat Yedek	84,0	69,1
16	Kazı İhzarat İşçi	82,5	88,2
17	Düz İşçi	82,2	74,3
18	Tamirci-Taramacı Usta	90,4	83,3
19	Delikçi Usta	88,2	88,2
20	Ateşleyici (Barutçu)	87,9	90,1
21	Kaynakçı Usta (Yeraltı)	78,9	82,5
22	Hidrolik Pompacı-Hortumcu	106,1	95,3
23	Marangoz Usta	92,8	81,8
24	Tesis Çalıştırıcı (DAC Operatörü)	81,1	85,1
25	Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı	87,7	88,5
26	Tulumbacı-Pompacı	76,4	82,3
27	Malzemeci-Vinççi (Yeraltı)	84,2	90,9
28	Kulikar Operatörü	83,9	85,3
29	Monoray Operatörü	89,0	88,2
30	Düğmeci-Saccı-Kancacı	82,9	85,3
31	Yağcı	76,4	87,1
32	Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu)	80,5	89,7
33	Dedektörcü	76,3	81,8
34	Barajcı-Yangıncı (Yangın Usta-Baraj usta)	66,8	82,7
35	Sıhhiye-Acil Tıp Teknisyeni	79,4	77,9
36	Tahlisiye Bakım ve Tamirci	70,3	65,5
37	Ambarcı-Takımcı	79,9	71,8
38	Kaynakçı Usta (Yer Üstü, Atölye)	78,8	81,6
39	Düz İşçi (Fişçi)	71,0	67,5
40	Vantilatörcü	68,7	72,2
41	Merkezi İzleme Operatörü	72,7	76,0
42	Hamamcı-Kazançı-Kaloriferçi	73,9	76,6
43	Şoför (Pick-Up, Otobüs, Kamyon, Binek)	74,3	72,6
44	Ağır Kamyon Şoförü	77,9	87,2

Tablo 3'te 44 farklı meslek grubunda farklı zamanlarda ikişer defa yapılan kişisel gürültü maruziyeti ölçümlerinin karşılaştırılmasına bakıldığında birçok meslek grubunda ölçümler arasında farkların olduğu görülmektedir. Tamir-Bakım Postabaşı, Tamir-Bakım Usta, Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü), Tamirci-Taramacı Usta, Marangoz Usta meslek grubu çalışanlarında birinci ölçüm sonuçlarında gürültü maruziyet sınır değeri (LEX 8Hrs = 87 dB(A)) aşılmasına rağmen ikinci ölçüm sonuçlarında maruziyet sınır değerinin altında olduğu görülmektedir. Elektrik Usta, Şilt Sürücü (tahkimatçı), Kazı İhzarat Usta, Kazı Yedek, Kazı İhzarat İşçi, Malzemeci-Vinççi (Yeraltı), Yağcı, Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu) ve Ağır Kamyon Şoförü meslek gruplarında ise birinci ölçüm sonuçları gürültü maruziyet sınır değeri (LEX 8Hrs = 87 dB(A)) altında iken ikinci ölçüm sonuçları maruziyet değerinin üzerinde çıkmıştır. Delikçi Usta, Ateşleyici (Barutçu), Hidrolik Pompacı-Hortumcu, Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı ve Monoray Operatörü meslek grubu çalışanları her iki ölçüm sonucunda da maruziyet sınır değerinin üzerindedirler. Gürültü maruziyet sınır

değerinin üzerinde olan bu meslek grubu çalışanlarında barete entegre edilebilen kulak koruyucu donanım kullanılmakta ve çalışanlarda gürültü maruziyeti azaltılmaktadır.

6. Tartışma ve Sonuçlar

Kapalı bir çalışma ortamı olan yeraltı madenciliğinde gürültü önemli bir sorundur. Gelişen teknolojiyle birlikte yeraltı madenciliğinde mekanizasyona geçilmesiyle gürültü sorunu daha önemli hale gelmiştir. Mekanizasyon üretimi artırarak çalışan üzerindeki yükü hafifletmesinin yanında gürültünün artmasına neden olabilmektedir. Çünkü madencilikte gürültünün asıl kaynakları makine, ekipman ve teçhizatlardır. Bu makine ve teçhizatları kullanan çalışanlar ister istemez gürültüye maruz kalmaktadır.

Yapılan bu çalışmada; yeraltı maden işletmelerinde çalışan işçilerin meslek gruplarına göre bir vardiya boyunca maruz kaldıkları kişisel gürültü düzeyleri belirlenmiştir. 52 farklı meslek grubuna farklı zamanlarda çalıştıkları vardiya boyunca iki ayrı gürültü ölçümü yapılmıştır. Aynı meslek gruplarında yapılan

ölçümlerde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumun başlıca nedenleri ise, o meslek grubundaki çalışanın her zaman aynı çalışma ortamında olmaması, aynı çalışma ortamında olduğunda ise kendisinin veya etrafındaki diğer çalışanların kullandığı makine ve ekipman farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Çalışma bölgesindeki makine ve ekipmanların çalışma süreleri, işin işleyişindeki farklılıklardan dolayı değişebilmektedir. Beraber çalıştıkları iş arkadaşlarının yaptıkları işlerden, yakınlık-uzaklık mesafesinden,

sürekli veya aralıklı olarak yüksek ya da düşük tonlarda konuşma farklılığı olmasından değişkenlik görülmektedir. Gürültü ölçümlerinin birincisinde 10 farklı meslek grubunda, ikincisinde de ise 14 farklı meslek grubunda 87 dB(A)'in üzerinde gürültü maruziyet değerleri çıkmıştır. Bunların içinden 5 meslek grubu her iki ölçümde de 87 dB(A) üzerindedir. Buna göre toplam 19 farklı meslek grubunda maruziyet sınır değerinin aşıldığı görülmüştür (Tablo 4).

Tablo 4. Gürültü düzeyinin maruziyet sınır değeri üzerinde çıkan unvanlar

Sıra No	Meslek Grubu (Unvan)	1. Ölçüm	2. Ölçüm
		LEX 8Hrs dB(A)	
1	Tamir-Bakım Postabaşı	87,2	77,7
2	Elektrik Usta	81,9	91,5
3	Tamir-Bakım Usta	88,1	84,0
4	Şilt Sürücü (Tahkimatçı)	82,0	87,9
5	Kesici Makine Operatörü(Tamburlu Kesici Operatörü)	87,6	83,3
6	Kazı İhzarat Usta	84,9	93,3
7	Kazı Yedek	79,5	91,6
8	Kazı İhzarat İşçi	82,5	88,2
9	Tamirci-Taramacı Usta	90,4	83,3
10	Delikçi Usta	88,2	88,2
11	Ateşleyici (Barutçu)	87,9	90,1
12	Hidrolik Pompacı-Hortumcu	106,1	95,3
13	Marangoz Usta	92,8	81,8
14	Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı	87,7	88,5
15	Malzemeci-Vinççi (Yeraltı)	84,2	90,9
16	Monoray Operatörü	89,0	88,2
17	Yağcı	76,4	87,1
18	Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu)	80,5	89,7
19	Ağır Kamyon Şoförü	77,9	87,2

Ancak ülkemizde yayınlanan Çalışanların Gürültü ile İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmelik'te "Maruziyet sınır değeri uygulanırken, çalışanın kullandığı kişisel koruyucu donanımların koruyucu etkisi de dikkate alınır" denilmektedir. Çalışanları kullandığı kişisel koruyucular içerisinde yer alan kulak tıkaçları 15-25 dB(A), kulak maskeleri ise 25-45 dB(A)'lık gürültü azaltma yeteneğine sahiptirler (Esen, 2010). Tablo 4'de verilen sınır değerinin üzerinde yer alan unvanlarda çalışanların kullandığı barete entegre edilebilen kulak maskeleri ve kulak tıkaçları ile çalışmada gürültü maruziyeti azaltılabilmektedir.

Yapılan ölçümlerde Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü) 1. ölçüm sonucu 87,6 dB(A) ile maruziyet sınır değerini geçmekte iken 2. ölçüm sonucunda 83,3 dB(A) ile maruziyet sınır değerinin altında kalmaktadır. Bu meslek grubunda farklı zamanlarda görevi gereği ayak içinde ölçüm yapılmıştır. Yani aynı çalışma yerinde farklı zamanlı 2 defa ölçüm yapılmıştır. Gürültü ölçüm sonucunun farklı olmasının

en temel nedeni kesici makinenin fiili çalışma süresinden kaynaklanmaktadır. Bu durumun benzeri Marangoz Usta meslek grubunda da geçerlidir.

Şilt Sürücü (Tahkimatçı) meslek grubu çalışanı da her iki ölçümde mekanize ayakta olmasına rağmen, ikinci ölçüm sonucu 87,9 dB(A) çıkararak gürültü maruziyet sınır değerinin üzerinde bulunmaktadır. Bunun nedeni, ayak içerisinde farklı gürültü kaynaklarının bulunmasıdır.

Elektrik Usta, Malzemeci-Vinççi (Yeraltı), Yağcı meslek gruplarındaki 2 ölçüm arasında farklılığın en büyük nedeni ölçümlerin yapıldığı zamanlarda buldukları çalışma ortamlarıdır.

Tamir-Bakım Postabaşı, Tamir-Bakım Usta, Yol Tamir Bakımcı meslek gruplarındaki ölçümler arasındaki farklılığın sebebi ise kullandıkları ekipmanlardan kaynaklanmaktadır. Ayrıca ölçümler esnasında buldukları ortamlardaki gürültü kaynakları da etkili olmuştur.

Ağır Kamyon Şoförü meslek grubundaki ölçümler arasında ki 9,3 dB(A)'lik fark ile ikinci ölçüm sonucunun 87,2 dB(A) ile sınır değerinin üzerinde olmasının temel nedeni ise kullandığı aracın dışında ki diğer iş makineleri ve aracın kullanıldığı sahadaki muhtemel gürültü kaynaklarıdır.

Kazı İhzarat Usta, Kazı Yedek, Kazı İhzarat İşçi, Tamirci-Taramacı usta gibi kazı gruplarında ise çalışma yerleri aynı olabileceği gibi değişiklikte gösterebilmektedir. Örneğin; Tamirci-Taramacı Usta 1. ölçüm sonucu 90,4 dB(A) ile maruziyet sınır değerinin üstünde iken 2. ölçüm sonucu 83,3 dB(A) ile maruziyet sınır değerinin altındadır veya Kazı Yedek 1. ölçüm sonucu 79,5 dB(A) iken 2. ölçüm sonucu 91,6 dB(A) ile maruziyet sınır değerinin üzerine çıkmaktadır. Bu meslek gruplarında ölçüm sonuçlarının farklı olmasının nedenleri arasında çalışma yerlerinin aynı olmaması, kullandığı ekipman ve teçhizatı (martopikör, kazma, kürek, tokmak vb.) fiili olarak kullanma sürelerine ve farklı çalışma ortamlarındaki gürültü kaynaklarına göre değişkenlik göstermektedir.

Delikçi Usta, Ateşleyici (Barutçu), Hidrolik Pompacı-Hortumcu, Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı ve Monoray Operatörü meslek grubu çalışanları her iki ölçüm sonucunda da maruziyet sınır değerinin üzerinde gürültüye maruz kaldıkları görülmektedir. Bu 5 meslek grubunda çalışanlar için çalışma ortamları ve ekipmanları gürültü konusunda incelenerek gürültüden korunma yöntemleri uygulanmalıdır, eğer mühendislik ve teknik önlemler alınamayacaksa ya da alınan önlemler yeterli olmayacaksa gürültüye karşı kişisel korunma yöntemleri uygulanmalıdır. Özellikle Hidrolik Pompacı-Hortumcu meslek grubunda olan personelin gürültüye karşı kişisel koruyucu donanım kullanması gereklidir. Ayrıca, işveren kulaklık montajlı baret vermeli, çalışma süresi sınırlandırılmalı, maruziyet süresini düşürmek adına dönüşümlü bir iş organizasyonu yapılmalıdır.

Delikçi Usta ve Ateşleyici (Barutçu) meslek grubu çalışanları iş gereği birlikte çalışmaktadırlar ve her ikisinin de delik delme işleminden patlatma işlemine kadar geçen süreç boyunca maruz kaldıkları gürültü düzeyleri birbirine yakındır. Bu meslek gruplarında teknik veya mühendislik yöntemlerinden ziyade kişisel maruziyeti önleme yöntemleri uygulanmak zorunda kalmabilir.

Hidrolik Pompacı-Hortumcu, Monoray Operatörü ve Konveyör Çalıştırıcı-Bakımcı meslek gruplarında çalışanlar ise çalışma ortamlarında bulunan makine ve ekipman kaynaklı gürültülere maruz kalmaktadırlar. Bundan dolayı gürültüyle mücadele kapsamında çalışma bölgelerindeki gürültü kaynaklarıyla ilgili teknik yöntemler uygulanabilir. Gürültü kaynağında yok edilebilir ya da kaynaktan alıcı arasında azaltılabilir.

Gürültü ölçüm sonuçları arasında farklılıklar olan Tamir-Bakım Postabaşı, Tamir-Bakım Usta, Kesici Makine Operatörü (Tamburlu Kesici Operatörü), Tamirci-Taramacı usta, Marangoz Usta, Elektrik Usta, Şilt Sürücü (Tahkimatçı), Kazı İhzarat Usta, Kazı Yedek, Kazı İhzarat İşçi, Malzemeci-Vinççi (Yeraltı), Yağcı, Yol Tamir Bakımcı (Yol Marangozu) ve Ağır Kamyon Şoförü meslek gruplarında yapılan iş, yapılan işin süresi, görevleri, iş tanımları, çalışma ortamı, çalışma ortamında ki gürültü kaynakları ve çalışma ortamında bulunan diğer işçiler gibi parametreler tek tek değerlendirilmeye alınmalıdır.

Genel olarak maruziyet sınır değerinin üzerinde veya yakınında olan meslek gruplarının çalışma ortamları ve çalıştıkları makine ve ekipmanlar gürültü konusunda değerlendirmeye alınmalıdır. Sınır değerlerin aşıldığı meslek gruplarının çalışma ortamlarındaki gürültü kaynaklarında ölçümler yapılarak makine ve teçhizatların gürültü düzeyleri belirlenmelidir. Öncelikle gürültü kaynağında kontrol altına alınmalıdır. Gürültü seviyesi yüksek olan makine ve ekipmanlarda mümkünse değişikliğe gidilmeli, bakımları yapılmalı, titreşen, vuran parçaları değiştirilmelidir. Eğer gürültü kaynağında yok edilemiyorsa veya yeteri kadar azaltılamıyorsa, gürültü kaynağı olan makine ve ekipman mümkün olduğu kadar ses emici malzemelerle kapatılmalı veya ortamdan izole edilmelidir. Sabit gürültü kaynaklarında gürültü kaynağı izolasyon malzemeleriyle kapalı bir alan içerisine alınmalıdır. Hareketli gürültü kaynakları ile çalışan arasındaki mesafe mümkün olduğunca artırılmalıdır. Uzaktan kumandalarla kontrol edilebilen, göstergeli panellere sahip makine ve ekipmanlar kullanılmalıdır.

Gürültünün iş ve madenci üzerindeki olumsuz etkileri, geçici ya da kalıcı işitme kayıpları göz önünde bulundurulduğunda hem kişisel hem de makine ve ekipman üzerinde gürültü ölçümlerinin belirli periyotlarla yapılarak gürültü seviyesine göre kişisel koruyucu donanım kullanımı aktif şekilde uygulanarak kişisel maruziyet önlenmeye çalışılmalıdır. Çalışanlarda gürültüden etkilenmenin belirlenmesi için periyodik olarak işitme testlerinin yapılması gürültüden etkilenmenin azaltılması açısından önemlidir. Ayrıca gürültüye maruz kalma süresini azaltmak veya gürültülü ortamda dönüşümlü çalıştırmak ve iş programını değiştirmek gibi önlemler alınabilir. Bu şekilde gürültüye bağlı olan işitme kayıplarının önüne geçilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2015-11 nolu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında desteklenmiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Serkan DOLĞUN'un "Yeraltı Maden İşletmelerinde Çalışanların Gürültü Maruziyetinin Belirlenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş olup, Şahin YUVKA tez danışmanı, Önder UYSAL ortak danışmandır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Akbay, D., Altındağ, R. ve Şengün, N. (2019). *Geleneksel yöntemle açılan karayolu tünellerinde çalışanların gürültü maruziyetlerinin değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi, 22(4), 1053-1060. Erişim adresi: <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

Casella dBadge2. (2021). Erişim adresi: https://www.casellasolutions.com/product_support/noisemonitoring/dbadge2/documentation.html

Çetin, O. (2000). *Orta Anadolu Linyitleri'nde (OAL'de) gürültüye bağlı işitme kayıplarının incelenmesi*. Bilimsel Madencilik Dergisi, 39(4), 39-45. Erişim adresi: http://www.madencilik.org.tr/article/c9f1f42421a3027_ek.pdf

Dolgun, S. (2021). *Yeraltı maden işletmelerinde çalışanların gürültü maruziyetinin belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kütahya.

Doğan, H. ve Aslan Çataltepe, Ö. (2018). *Gürültünün insan sağlığı üzerine etkileri*. Sağlık ve Spor Bilimleri Dergisi, 1(1), 29-38.

Ediz, İ. G., Beyhan, S., Akçakoca, H. ve Sarı, E. (2002). *Madencilikte gürültü sorunu ve gürültüye bağlı işitme kayıpları*. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı 3, 50-64. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpufbed/issue/36343/411227>

Erdem, B., Duran Z., Doğan, T. ve Yüksel H. (2017). *Açık maden işletmelerindeki iş makinesi operatörlerinin gürültü maruziyetinin incelenmesi*. Bilimsel Madencilik Dergisi, 56(4), 148-165. Erişim adresi: <http://www.mining.org.tr/en/download/article-file/420910>

Erol, İ. ve Su, O. (2015). *Mekanize bir yeraltı maden işletmesinde gürültü seviyelerinin incelenmesi*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık

Fakültesi Dergisi, 30(2), 191-200. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.242766>

Esen, M. (2010). *Üretim sahasında gürültü kontrol uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Harper, GS & O'Brien, T. M. (2006). The prediction of underground drilling noise. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 106(8), 533-543. Erişim adresi: https://journals.co.za/doi/epdf/10.10520/AJA0038223X_3187

Şahin, E. (2003). *Gürültü kontrol yöntemleri-bir uygulama*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (4), 68-69. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/76226>

Şensöğüt, C. (2007). *Occupational noise in mines and its control-a case study*. Polish Journal of Environmental Studies, 16(6), 939-942. Erişim adresi: <http://www.pjoes.com/pdf-88069-21928?filename=Occupational%20Noise%20in.pdf>

Şensöğüt, C. ve Çınar, İ. (2006a). *Çevresel faktörlerin gürültü yayılımına etkisi*. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı:10, 131-138. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/443482>

Şensöğüt, C. ve Çınar, İ. (2006b). *Açık ocaklarda gürültü yayılımının geliştirilen bir model ile incelenmesi*. Madencilik Dergisi, 45 (3), 27-33. Erişim adresi: <http://www.mining.org.tr/en/download/article-file/375505>

Onder, S. ve Onder M. (2017). *Statistical investigation of the noise levels in coal mining industry*. The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University 26(1), 30-35. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.331278>

Uysal, Ö., Yuvka, Ş., Özgür, A. ve Dolgun, S. (2019). *Maden işletmelerinde çalışan personelin gürültü maruziyetlerinin araştırılması*. Bilimsel Akademik Proje, Proje No: 2015-111.

ANALYSIS OF RAFT FOUNDATION ON SANDY SOILS BY WINKLER AND PSEUDO-COUPLED METHODS

İlyas ÖZKAN^{1*}, Yavuz YENGİNAR², Ali Serdar ECEMİŞ³

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9660-8229>

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-6916-4068>

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-7332-3738>

Keywords

subgrade reaction coefficient,
Winkler method,
Pseudo-Coupled method,
rigid,
flexible

Abstract

The settlements occurred in building foundations depend on many soil parameters. Thus, these parameters make the solution both difficult and complex during the calculating process. Therefore, finite element programs use the subgrade reaction coefficient to facilitate the foundation solution. Two different methods, which are Winkler method and Pseudo coupled method, are used in the basic solutions with the coefficient of subgrade reaction. While the Winkler method can be solved with a single field, the pseudo method can be solved with 2 or more fields. In this study, a 10 story building with a 36 m x 36 m square foundation was separately designed on four different sand soils. Two of these soils are classified as C and the others are classified as D according to Eurocode 8. The foundation of this building built on four different soils was divided into six different areas (one region, two regions, three regions, five regions, seven regions, 10 regions). Consequently, 24 analyzes were performed by using the ETABS program. According to the results obtained from these analyzes, while it is appropriate to use the Winkler method in weak sand soils for rigid foundation acceptance, it is more appropriate to use the Pseudo-coupled method in dense sand soils. Pseudo-coupled method should be used in flexible foundation solutions built on weak sand soils. The Winkler method should be used for flexible foundations built on dense sand soils. In the Pseudo-coupled method, the highest settlements were obtained in the two-region solutions. An optimum number of fields was found to be 7 for Pseudo-coupled method.

KUMLU ZEMİN ÜZERİNDEKİ RADYE TEMELLERİN WİNKLER VE PSÜDO-EŞLENİK YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

Anahtar Kelimeler

Zemin yatak katsayısı,
Winkler metot,
Psüdo-Eşlenik metot,
rijit,
esnek

Öz

Bina temellerinde meydana gelen oturmalar birçok zemin parametresine bağlıdır. Dolayısıyla bu parametreler, hesaplama sürecinde çözümü hem zor hem de karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar programları, temel çözümünü kolaylaştırmak için zeminin yatak katsayısını kullanır. Zemin yatak katsayısına sahip temel, çözümlerde Winkler yöntemi ve Psüdo-Eşlenik yöntem olmak üzere iki farklı metot kullanılarak çözülmektedir. Winkler yöntemi tek bir alanla çözülebilirken, Psüdo-Eşlenik yöntem 2 veya daha fazla alanla çözülebilir. Bu çalışmada dört farklı kum zemin üzerinde, 36 m x 36 m ölçülerinde kare temelli 10 katlı bir bina ayrı ayrı tasarlanmıştır. Bu zeminlerden ikisi Eurocode 8'e göre C, diğerleri D sınıfındadır. Dört farklı zemin üzerine inşa edilen bu binanın temeli altı farklı bölgeye (bir bölge, iki bölge, üç bölge, beş bölge, yedi bölge, 10 bölge) bölünmüştür. Sonuç olarak, 24 adet analiz ETABS programını kullanarak yapılmıştır. Bu analizler elde edilen sonuçlara göre, rijit temel kabulü için zayıf kum zeminlerde Winkler metodu kullanılması uygun iken, sıkı kum zeminlerde ise Pseudo-coupled metodunun kullanılması daha uygundur. Zayıf kum zeminler üzerine inşa edilen esnek temel çözümlerinde Psüdo-Eşlenik yöntemi kullanılmalıdır. Sıkı kum zeminler üzerine inşa edilen esnek temeller için ise Winkler metodu kullanılmalıdır.



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Psüdo-Eşlenik yöntemde en yüksek oturmalar iki bölge çözümlerinde elde edilmiştir. Psüdo-Eşlenik yöntemi için optimum alan sayısı 7 olarak bulunmuştur.

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 25.12.2022	Submission Date : 25.12.2022
Kabul Tarihi : 12.06.2023	Accepted Date : 12.06.2023

* Sorumlu yazar: e-posta; ozkan.ilyas@hotmail.com
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1224081>

1. Introduction

The behaviors of structures subjected to horizontal and vertical loads generally depend on the local soil properties under the building foundation. While the foundations of structures exposed to vertical static loads tend to settle and rotate, the connection between foundations and soils gradually reduces under the horizontal dynamic loads. Thus, the interaction between the soil and structure should be correctly determined during the structural analysis (Özer and Yüksel, 2021).

The differential settlements occasionally occur at the structure foundations built on the weak soil layers due to the loads and moments. Structural damage will occur if the differential settlement at the foundation base exceeds the allowable value. In weak soils, raft foundation design should be preferred so that the structural loads can be transferred to the ground uniformly. The installation of raft foundations reduces differential settlements but does not stop completely. Differential settlements are also affected by many factors such as column loads, soil layers under the structures (coefficient of subgrade reaction), the geometry of the foundation plate (shape, thickness, and width), foundation girders, the shape, etc. (Ma and Chen, 2019).

The mechanism of soil-structure interaction affects the raft foundation behavior. A raft foundation may be analyzed as either a rigid or flexible foundation due to the stiffness of the foundation and subsoil. In these designs, several linear elastic springs represent subgrade soil under the raft foundation. The stiffness of springs is determined according to the coefficient of subgrade reaction obtained from either plate load test or correlations of field/laboratory tests. The coefficient of subgrade reaction depends on many parameters of the foundation (shape, size, thickness, rigidity), soil layer (soil type, durability, void ratio, compressibility), superstructure (stiffness of structural elements, geometry), and loading (location, magnitude, eccentricity) (ACI, 2002; Teodaru and Toma, 2009).

The coefficient of subgrade reaction, one of the considerable parameters in the raft foundation analysis, is called base pressure. This pressure develops until its magnitude reaches up to the bearing capacity of soil when the superstructure load is transferred to subsoil layers. Two considerable parameters that are physical and mechanical properties of subsoil and the elastic

properties of the foundation affect the base pressure. Moreover, the ratio of contact pressure to settlement in any place of foundation varies in every place of the raft foundation. This situation complicates the raft foundation analysis. Therefore, the behavior of the raft foundation under loading should be properly specified. The behavior of the raft foundation depends on the subgrade reaction coefficient and raft thickness that causes the foundation to be flexible or rigid. In many cases, raft foundation is generally analyzed by accepting rigid behavior as the solution complexity diminishes. However, flexible behavior is valid for most of the raft foundations under real conditions (Todorovska et al., 2001; Rashedul and Chowdhury, 2013; Bhartiya, 2020; Teli et al., 2020; Modak and Singh, 2022).

The assumption of defining the soils with spring constants ensures that the raft foundation analysis can be performed quickly. Structural software analyzes the foundations according to this assumption and is preferred by many structural engineers. However, there is a handicap to determine the value of the coefficient of subgrade reaction or spring constant by many different approaches. Therefore, analyses made according to this assumption can yield many different results (Bhartiya, 2020).

The elastic raft foundation can be analyzed as an elastic plate. A square flexible raft foundation has been shown as a suitable example of this acceptance. Some researchers stated that a boundary element method, based on the Winkler spring approach, has been utilized for elastic raft foundation analyses. However, the settlements obtained from this method are not reliable due to only one soil parameter, which is the subgrade reaction coefficient, calculated from either plate load test or indirect methods (Fox, 1948; Cheung and Zienkiewicz, 1965; Fraser and Wardle, 1976; Katsikadelis and Armenkas, 1984; Costa and Brebia, 1985; Mandal and Ghosh, 1999; Subramanian et al. 2005).

The Winkler approach is a mathematical method based on the coefficient of subgrade reaction. In this method, the soil under the structure represents by a group of springs that have stiffness. This method is used by many structural analysis software for the solution of soil-foundation problems. The main handicap of this method is the determination of the coefficient of subgrade

reaction since it alters due to soil properties, foundation rigidity, loads, etc. (El-garhy and Osman, 2002).

The Pseudo-coupled method is an alternative method preferred instead of the Winkler method. In this method, the mat foundation is carried by springs that represent the soils underneath the structure. The main difference between the Winkler and the Pseudo-coupled methods is the value of the coefficient of subgrade reaction used in the analysis. While the value of the coefficient of subgrade reaction is the same in every point of the raft foundation in the Winkler method, this value changes for any position of the raft foundation in the Pseudo-coupled method. The alteration of this value in the pseudo-coupled method is generally done for improving the Winkler method during soil-foundation problems (Loukidis and Tamiolakis, 2017).

Most of the structural analysis software that uses the finite element method generally takes the Winkler approach into account to make the calculations simpler and easier during the raft foundation analysis. However, the same value of the coefficient of subgrade reaction is defined in every part of the raft foundations solved with this approach. During the analysis, this condition results in that all points on the raft foundation are independent of each other (Prabhu and Mutalikdesai, 2023). Considering the real conditions, this analysis is far from giving accurate results, especially for soil that has low bearing capacity. To solve this problem, the Pseudo-coupled approach has been developed in the literature. In this approach, the raft foundation is divided into two or more regions, and different coefficients of subgrade reaction are defined for each region. Thus, it is assumed that all points on the raft foundation move together.

In the present study, a 36m·36m raft foundation of a 10-story symmetrical building was separately analyzed on four different sand soil layers that have different coefficients of subgrade reaction. First, the raft foundation was analyzed for all soil layers with the Winkler approach. Because most of the software package programs make calculations using only the Winkler method. However, when this solution is considered under real conditions, settlement values can often be calculated incorrectly. Then, the raft foundation was analyzed according to the Pseudo-coupled method by dividing it into 2, 3, 4, 7, and 10 regions. The purpose of the study is to compare the Winkler and Pseudo-coupled approaches, which are used by package program, during raft foundation analysis by considering local subsoil properties. The raft foundation behaves either rigid or flexible according to the subsoil conditions. Moreover, the optimum number of regions was determined if the raft foundation is analyzed by using the Pseudo-coupled method. In addition, the effect of subsoil properties on both approaches was also examined.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

A raft foundation of the 10 story-building was separately analyzed with two different methods that are the has a Winkler and the Pseudo-coupled methods. The building symmetrical structure (Figure 1). The floor plan of the building is given in Figure 2. The raft foundation of the building was square by 36m in width and 36m in length. The thickness of the foundation is 75 cm. The other parameters of the building are given in Table 1.

2.2 Methods

The soil layer under the raft foundation was simulated with springs in the Winkler and Pseudo-coupled methods. The stiffness of the springs is the most essential parameter in the analysis of these methods. The stiffness of spring is the coefficient of subgrade reaction (k) calculated by using Equation 1.

$$k = \frac{q}{s} \left(\frac{kN}{m^3} \right) \tag{Eq. 1}$$

where k is the coefficient of subgrade reaction, q is the base pressure, and s is the settlement resulted from base pressure.

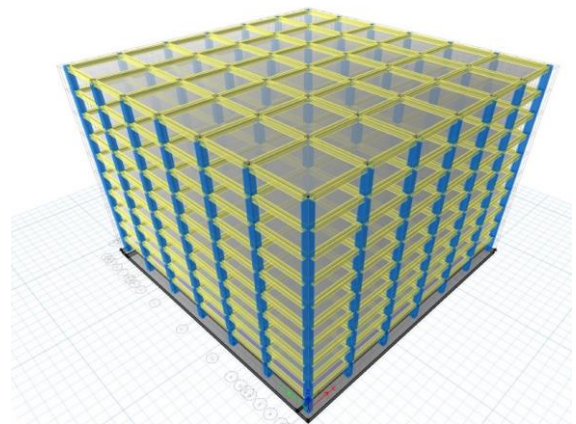


Figure 1. The perspective view of 10 story building

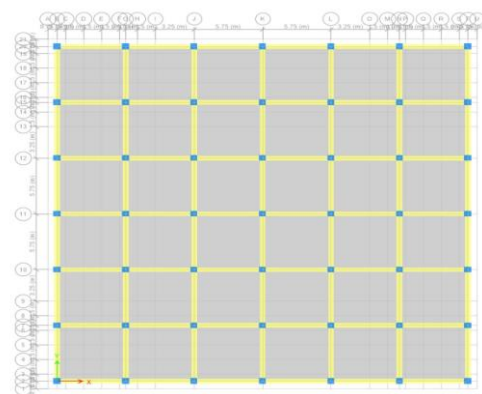


Figure 2. The floor plan of the building

Table 1. Analysis parameters of the building

Number of Story	10	Column Dimensions (m)	60 x 60
Story Height (m)	3	Beam Dimensions (m)	40 x 60
Structure Height (m)	30	Slab Thickness (m)	0.15
Span X-Y (m)	5.75	Dead Load (t/m²)	0.250
Number of Span X-Y	6	Live Load (t/m²)	0.350
Building Dimensions (m)	34.5 x 34.5	Concrete Class	C30/37
Analysis Type	Vertical	Reinforcement	S420a

2.2.1 Winkler Method

The basic assumption of the Winkler method is no relationship between the springs. In other words, each spring is independent of the others. All springs that represent the soil have the same value which is the coefficient of the subgrade reaction of the soil layer. Furthermore, these springs are presumed to have both tension and compression capacity.

In Winkler method, all springs have same subgrade reaction coefficient during the analysis (Figure 3). This assumption reveals that the stresses on the foundation are applied only to the point at which they act.

Considering the real conditions, the shape of the raft foundation becomes dishing shape after it is subjected to uniform loading (Figure 4). Thus, the loading at each point of the raft foundation affects other points. Therefore, the spring constant or the value of the coefficient subgrade reaction varies from point to the point of the raft foundation. In summary, this state is the most critical handicap of the Winkler springs method during the raft foundation analysis (Subramanian et al. 2005). Winkler method may be applied for the foundation soils that are very stiff layers such as bedrock since foundation settlements are uniform.

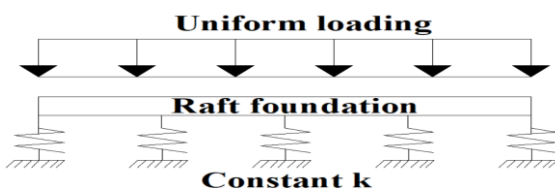


Figure 3. Winkler spring method

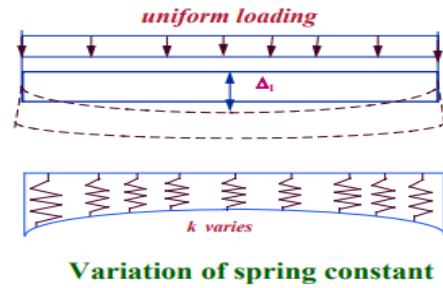


Figure 4. Dishing shape of raft foundation (Subramanian et al. 2005)

2.2.2 Pseudo-coupled Method

The soil underneath the structure should have continuity space when the real condition was taken into consideration. Loading at each point on the foundation affects all other points placed at the foundation. This situation is tried to be achieved by reducing the subgrade reaction coefficient defined by the Pseudo-coupled method. Thus, each spring affects the surrounding springs. While the most affected springs are located in the center region of the raft foundation, the less affected springs are positioned at the corner region of the raft foundation (Figure 4). In conclusion, the Pseudo-coupled method was developed for solving this shortcoming of the Winkler method.

The two important rules given below are taken into account in the Pseudo-coupled analysis method.

- 1- The raft foundation is divided into two or more loading areas. The innermost region should be arranged to have half of the width and length of the raft foundation.
- 2- The coefficient of subgrade reaction is determined for each region. At this stage, it should be noted that the bearing coefficient of the innermost region increases from the innermost region to the outside and that the bearing coefficient of the outermost region is approximate twice the bearing coefficient of the innermost region (Horwath, 1993).

To sum up, the coefficient of the subgrade reaction should be increased from the center region to the corner region during the analysis (Figure 3 and Table 4).

2.3 ETABS Analysis

The raft foundation is meshed into parts with different areas with respect to the number of regions of the model for finite element analysis performed with the ETABS program. Then both settlement and pressure applied to the raft foundation are calculated using Equation 1 by the program.

A 36m:36m raft foundation belonging to a 10-story symmetrical building was separately designed on four

different sand soil subgrade layers that have different coefficient of subgrade reaction. The subgrade soil was assumed as homogeneous and infinite in depth. First, raft foundation was analyzed for all soil layers with the Winkler method. Then, the raft foundation was divided into 2, 3, 4, 7, and 10 regions and it was separately analyzed five more times with the Pseudo-coupled approach. Each model is illustrated in Figure 5. The regions in each model are numbered from the inside to the outside, such as A₁, A₂, A₃...

The raft foundation was divided into different regions in each model to be identified different coefficients of subgrade reaction. Thus, each region placed in these models has a different coefficient of subgrade reaction.

The values of the coefficient of subgrade reaction were calculated by using Equation 2.

$$k_1 \cdot A_1 + k_2 \cdot A_2 + \dots + k_n \cdot A_n = k_{avg} \cdot A_{total} \quad Eq. 2$$

where k_n is the coefficient of subgrade reaction at the region n, A_n is the area of region n, k_{avg} is a value of the coefficient of subgrade reaction used in the Winkler method, and A_{total} is the total area of the raft foundation.

The area of each region in six models is given in Table 3. The unit of each value given in Table 3 is m^2 .

The coefficients of subgrade reaction identified for each region in the model are in relationship. Equation 3 shows this relationship between these parameters used in this study. Provided that x, n positive integer, $x \geq 2$ and $x \geq n$, Eq. 3 can be used for any model.

$$k_1 = \dots = \frac{(x-1) \cdot k_{x-n}}{2x-6} = \dots = \frac{(x-1) \cdot k_{x-3}}{2x-5} = \frac{(x-1) \cdot k_{x-2}}{2x-4} = \frac{(x-1) \cdot k_{x-1}}{2x-3} = \frac{k_x}{2} \quad Eq. 3$$

When the above equation is examined, the coefficients of subgrade reaction values should be multiplied by a separate ratio for both each model and each region. These ratios are given in Table 4.

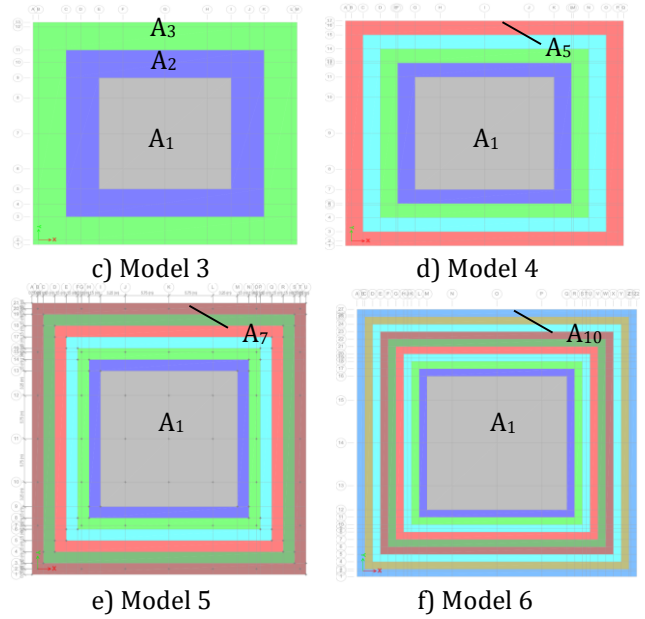
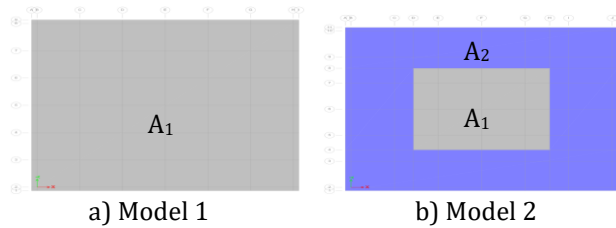


Figure 5. Division of the foundation into suitable regions: a) The Winkler Method and Pseudo-Coupled Method by b) 2 regions, c) 3 regions, d) 5 regions, e) 7 regions, and f) 10 regions

Table 3. The area of each region in six models

Region	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
A ₁	1296	324	324	324	324	324
A ₂	-	972	405	182.25	117	76
A ₃	-	-	567	222.75	135	84
A ₄	-	-	-	263.25	153	92
A ₅	-	-	-	303.75	171	100
A ₆	-	-	-	-	189	108
A ₇	-	-	-	-	207	116
A ₈	-	-	-	-	-	124
A ₉	-	-	-	-	-	132
A ₁₀	-	-	-	-	-	140
A _{total}	1296	1296	1296	1296	1296	1296

Table 4. Ratios of subgrade reaction coefficients for both each model and each region

Region	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
A ₁	1.000	0.571	0.627	0.663	0.688	0.686
A ₂	-	1.142	0.941	0.829	0.801	0.762
A ₃	-	-	1.254	0.994	0.915	0.838
A ₄	-	-	-	1.160	1.030	0.914
A ₅	-	-	-	1.326	1.144	0.990
A ₆	-	-	-	-	1.259	1.067
A ₇	-	-	-	-	1.373	1.143
A ₈	-	-	-	-	-	1.219
A ₉	-	-	-	-	-	1.295
A ₁₀	-	-	-	-	-	1.371

The coefficient of subgrade reaction can be calculated from SPT-N values for sandy soils (Equation 4) (Scott, 1984).

$$k = 1800 \cdot N \quad \text{Eq. 4}$$

In the raft foundation analysis, four soils are defined under the foundation to represent the different subsoil conditions. According to Eurocode 8, the local soil class of Soil 1 and Soil 2 is C, and Soil 3 and Soil 4 is D. In addition, the SPT-N value of each soil is different. In this way, different soil conditions from low to high bearing capacity and durability were taken into account in the foundation analysis. SPT-N values and subgrade reaction values of the soils are given in the Table 5.

Table 5. SPT-N values and subgrade reaction values of foundation soils

Soils	Local soil class	SPT – N	k (kN/m ³)
Soil 1	D	5	9000
Soil 2	D	14.999	26999
Soil 3	C	30	54000
Soil 4	C	50	90000

The 10-story building were individually analyzed by using subgrade reaction values given in Table 5 with ETABS software. As a result of these analyzes, the change of the raft foundation shape and the settlements (at center point and corner point) were examined.

3. Results and discussions

The load combination (G+Q) acting on the structure during the analysis includes dead (G) and live (Q) loads. In addition, there is no horizontal force acting on the structure.

The foundation of the structure had 10 story building were separately analyzed for six models by using both Winkler and Pseudo-Coupled method. All analyzes were performed by using ETABS software.

3.1. Axial force and moment at column base

In the foundation analyses according to the Winkler method, the axial force transferred to the center column base is not much affected by the local soil class (Figure 6). In the analyzes performed according to the Pseudo-Coupled method, the axial force decreases by approximately 13% in Soil 1 in Model 2, and the axial force increases as the number of regions in the foundation increases. Similar behavior is observed in designs of other local soil classes. Especially as the bearing capacity of the soil increases (C class subsoil), the axial force transferred to the central column base comes closer to the Winkler solution. Since the building in which the foundation system is analyzed is symmetrical and has a square floor area, no moment is transferred to the central column because all the effects that come from the beams neutralize each other.

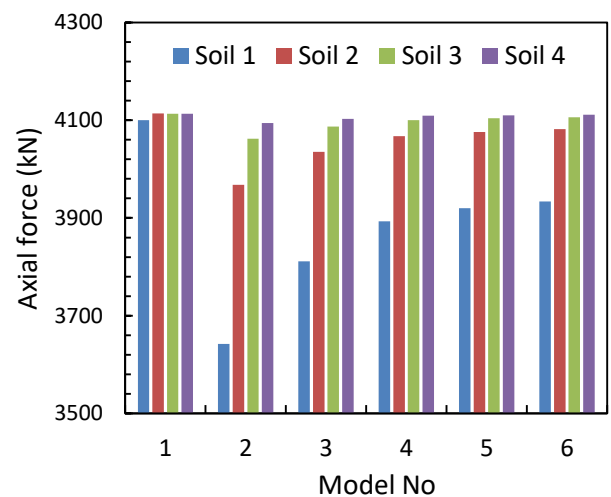


Figure 6. Axial force at center column base

The axial load transferred to the corner columns is about one-third of the center column. In all analyses in Winkler and Pseudo-Coupled methods, the axial force transferred to the corner column base increases as the

bearing capacity of the foundation soil increases (from Soil 1 to Soil 4). In addition, as the number of regions in the foundation increases, the axial force at the corner column base increases (Figure 7). Moreover, contrary to the axial force, the moment values transferred to the corner column base decrease as the number of regions in the foundation and the bearing capacity of the foundation soil increase (Figure 8). The changes in the axial force and moment values vary according to the analysis type and the characteristics of the foundation soil, and this is due to the different settlements in the foundation (see Figure 15). Yao and Zhang (1985) reported that forces in members of superstructures affect the relatively stiffness between raft foundation and subgrade soils. The large internal forces in members of superstructures resulted from the differential settlement occurred in raft foundation (Zilch, 1993).

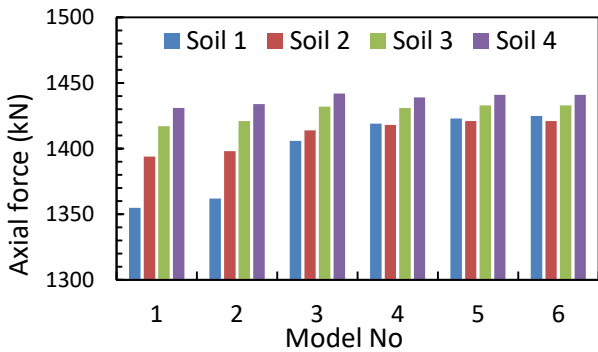


Figure 7. Axial force at corner column base

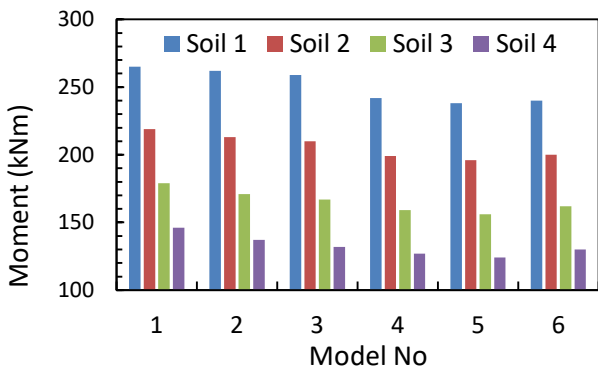


Figure 8. Moment values at corner column base

3.2. Subgrade reaction coefficient

The raft foundation built on the sandy soils with different subgrade coefficient values was analyzed with six different models. In the first model, the raft

foundation has one area and each point of this foundation that has same subgrade coefficient. In other models, the raft foundation is divided into two or more areas. The subgrade coefficient values for these areas were multiplied with the ratios given in Table 4. As the raft foundation is square, the ratios defined for these regions in each model are shown according to the width and length of the foundation in Figure 9.

As seen in the Figure 9, ratios of subgrade reaction coefficients give very close values for solutions with 5 regions (Model 5) and greater regions.

3.2. Settlements of foundation

The foundation shapes obtained from analyzes are given in Figure 10 and Figure 11.

After ETABS analyzes for each model, the settlements that were calculated at the corner and center points of the raft foundation are given in Table 6.

Model 1 was analyzed by using Winkler method that each point placed in the raft foundation has same subgrade reaction coefficient. Although the maximum settlement is formed at corner points of raft foundation, the settlements occurred under the foundation are approximately close each other. In other words, there is a very little differences between the corner settlements and center settlements. In addition to this, the increase of subgrade coefficient of soil result in the reduction of differential settlements. The foundation shape obtained from this analysis is almost similar to the shape of the rigid foundation. In addition, the behavior of rigid raft foundation depends on the value of subgrade reaction of soil since the greater the subgrade reaction of soil leads to more rigid behavior of raft foundation. Model 1 could be used for analysis of the rigid raft foundation. However, the increase in subgrade reaction value triggers the rigid behavior of raft foundation.

Models, other than Model 1, were analyzed with respect to Pseudo-coupled method. The values of subgrade reaction coefficient changes at the different foundation regions identified in this method.

Five different models prepared with Pseudo-coupled method were analyzed by using ETABS software. While the maximum settlements of these models were occurred at the center point of the raft foundation, the minimum settlements were occurred at the corner point of the raft foundation. These outputs means that the raft foundation behave flexible.

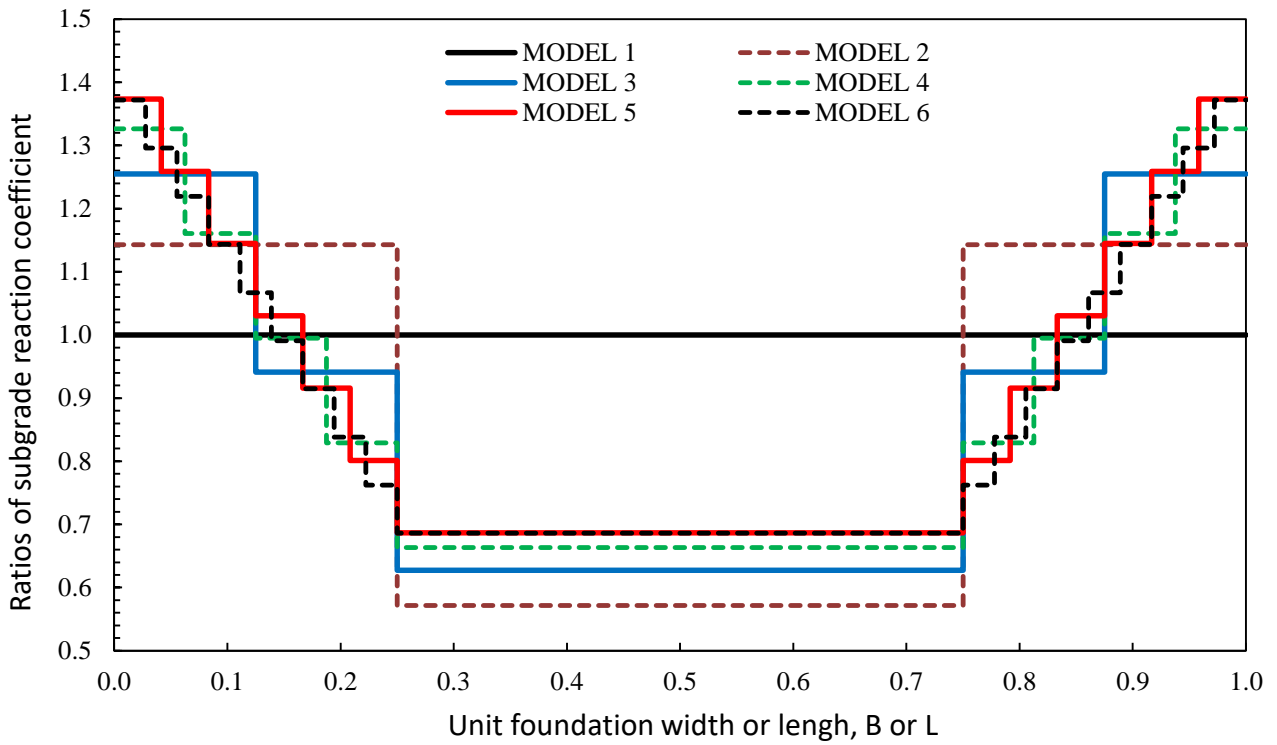


Figure 9. Ratios of subgrade reaction coefficients with respect to foundation width or length

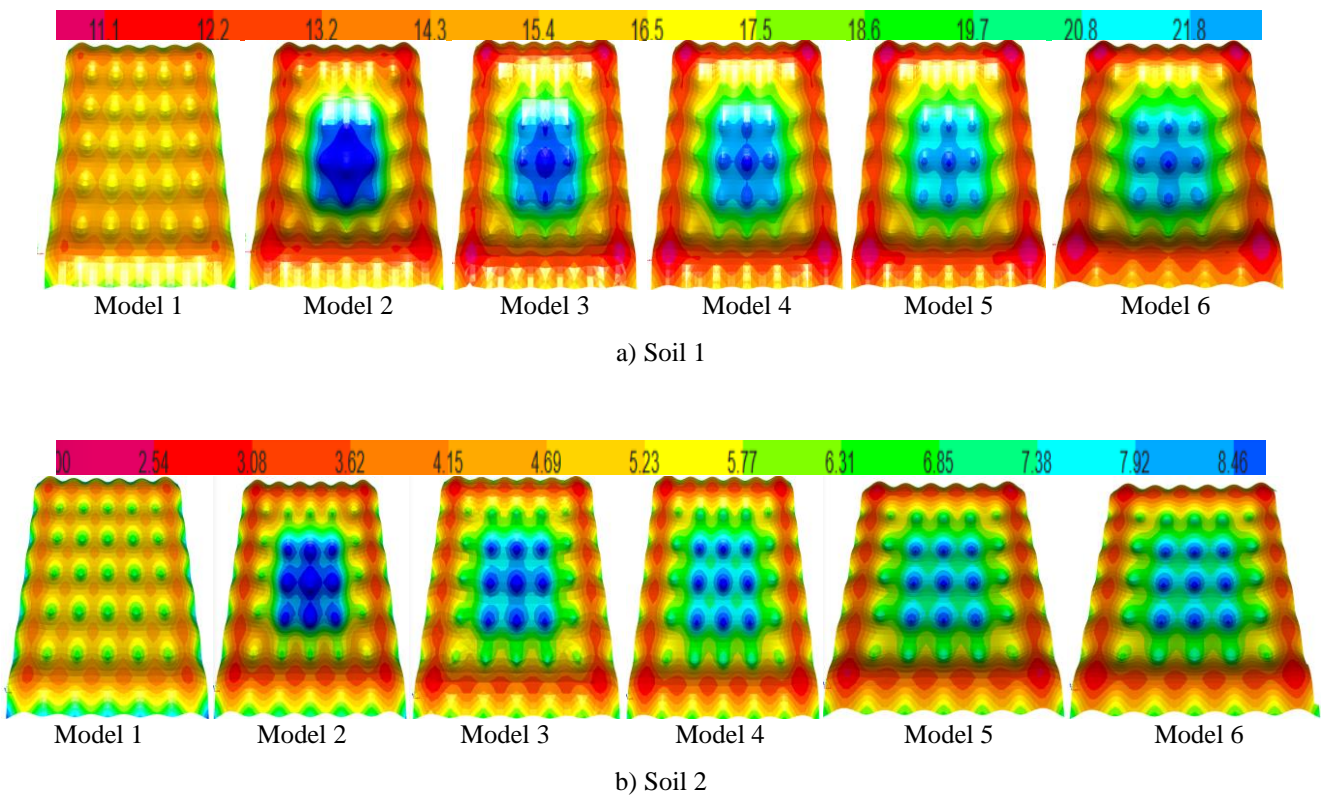


Figure 10. The foundation shapes designed on a) Soil 1 and b) Soil 2 (units in mm)

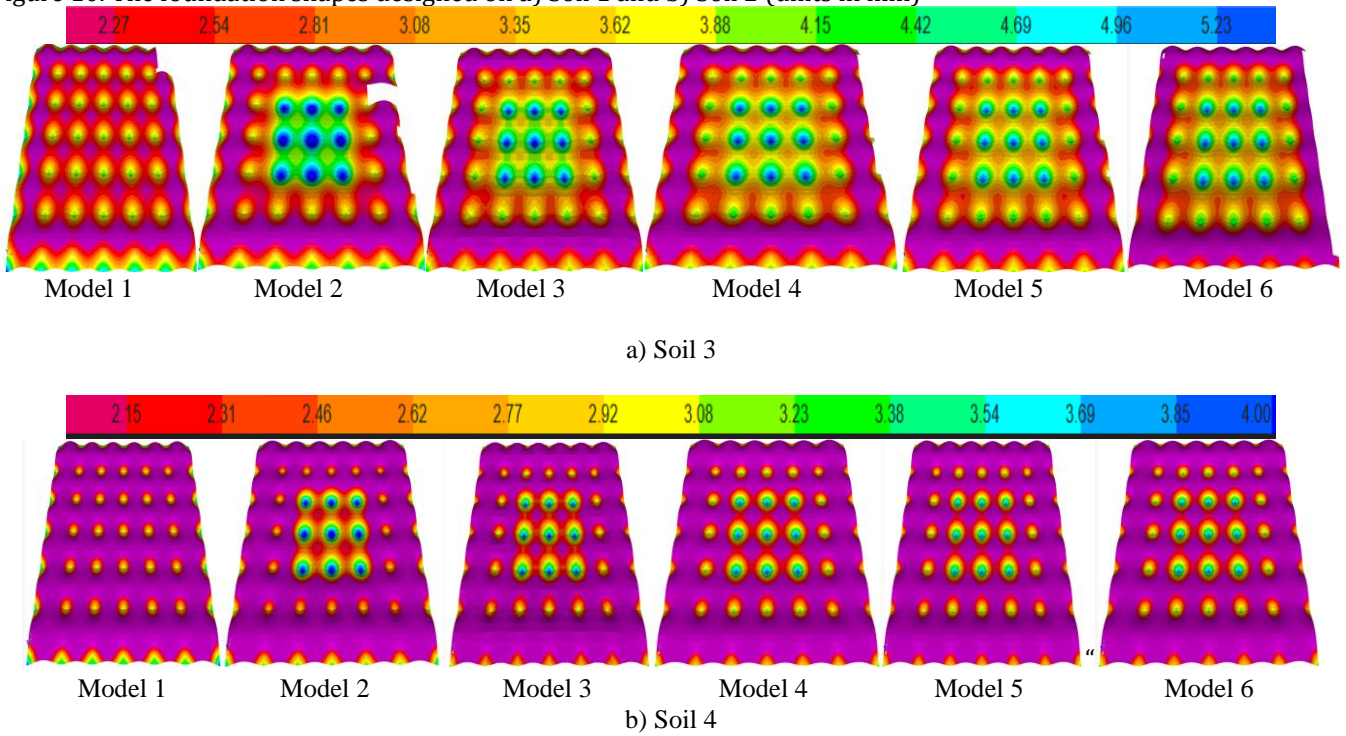


Figure 11. The foundation shapes designed on a) Soil 3 and b) Soil 4 (units in mm)

Table 6. Settlements at corner and center points of foundation

Models	Settlements (mm)							
	Soil 1		Soil 2		Soil 3		Soil 4	
	Centre point	Corner point	Centre point	Corner point	Centre point	Corner point	Centre point	Corner point
Model 1	17.712	20.287	7.07	9.06	4.349	5.711	3.207	4.093
Model 2	27.713	18.241	11.100	8.27	6.443	5.235	4.505	3.747
Model 3	26.161	16.717	10.304	7.484	6.029	4.687	4.263	3.306
Model 4	25.150	16.448	9.812	7.432	5.755	4.720	4.086	3.376
Model 5	24.456	16.139	9.535	7.281	5.611	4.617	3.998	3.297
Model 6	24.533	16.342	9.544	7.383	5.614	4.695	4.000	3.363

The maximum settlement value at corner and center points gives maximum differential settlement were determined in the analysis of Model 2. When the number of the regions into the model increases, the settlement values at corner and center points of the raft foundation gradually decrease. The differential settlements values decrease with the number of the regions into the model.

Figure 12 shows that ratios of center settlement to corner settlement calculated with respect to the outputs of analyzes given in Table 6.

The highest settlement ratios between center and corner points are obtained in Model 3 that has three different areas for all subsoil conditions.

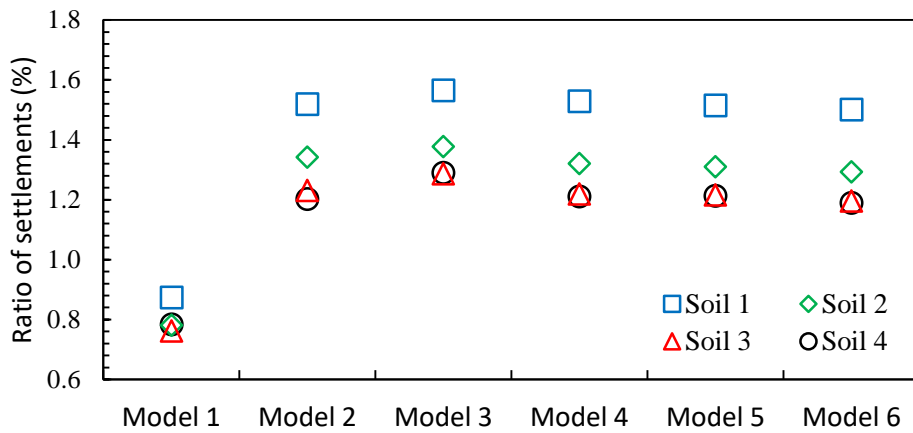


Figure 12. Ratios between center settlements and corner settlements

Maximum settlement ratios between center and corner points were obtained from analyzes performed on Soil 1 had lowest stiffness for each model. The settlement ratios gradually decrease with the increment of soil stiffness. The settlement ratios of Model 1 are lower than 1 and are approximately similar for all subsoil conditions. Thus, the settlements obtained from Winkler method are suitable for rigid foundation assumption. However, the settlement ratios obtained from Pseudo-Coupled method are greater than 1. The settlement ratio

is around 1.5 for Soil 1 and the increase of soil stiffness reduces the settlement ratio.

In the Pseudo-Coupled method, settlement values at the corner and center points decreases up to Model 5 has 7 regions and then increases. Figure 13 clearly shows this phenomenon in the case of Soil 1. It is concluded that an optimal region number for foundation analysis in the Pseudo-Coupled method is 7.

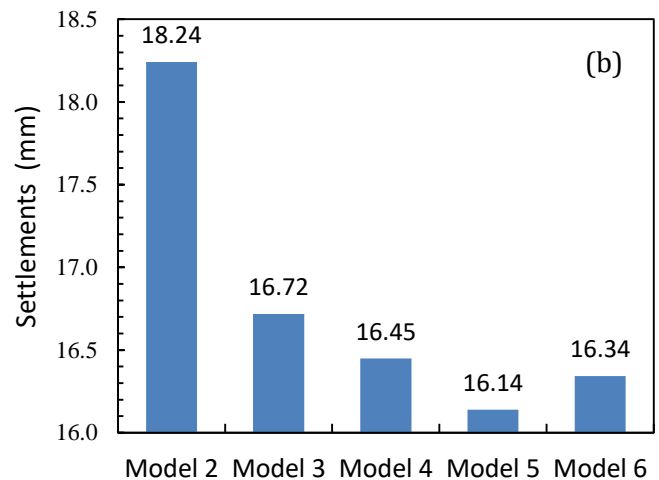
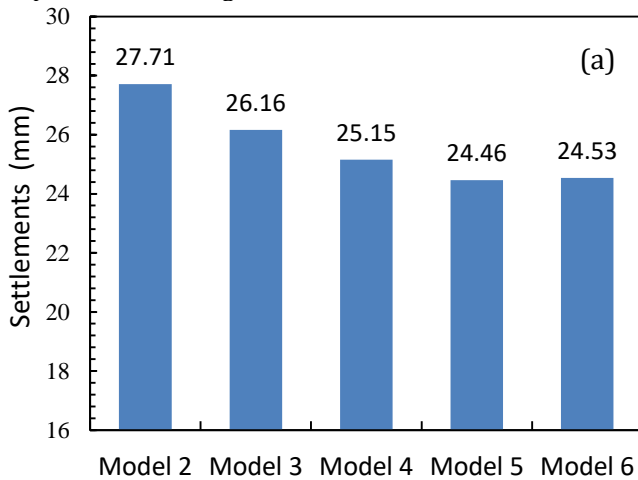


Figure 13. Settlements at the foundation a) corner and b) center points for subbase of Soil 1

3.3. Effect of local soil class

The settlement values given in Table 6 has to be evaluated with respect to the local soil class of the subsoil under the superstructure. According to Eurocode 8, while Soil 1 and Soil 2 is classified as C, Soil 3 and Soil 4 is classified as D. Settlements values calculated from both center point and corner point are illustrated in Figure 14 with respect to soil types.

The maximum settlement of corner point of soils that are both Class C and Class D is calculated from Model 1

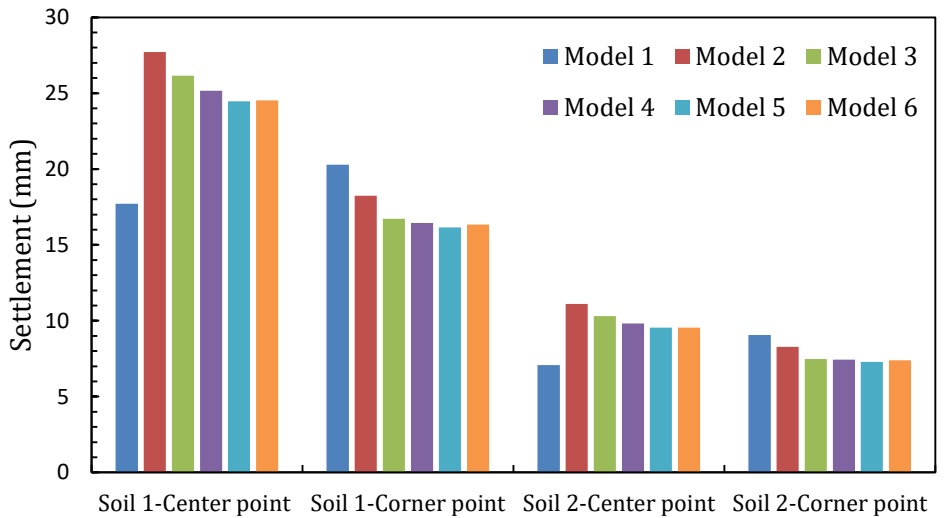
that has one region. The maximum settlements of center point of soils that are both Class C and Class D is calculated from Model 2 that has two regions.

Differential settlements are a considerable parameter for raft foundation. Since, one of the aims of raft foundation construction is the reduction of differential settlements. For this reason, differential settlement has to be controlled during the analysis of this foundation type. Figure 15 show the values of differential settlement calculated from analyzes done in this study. The maximum differential settlement values were

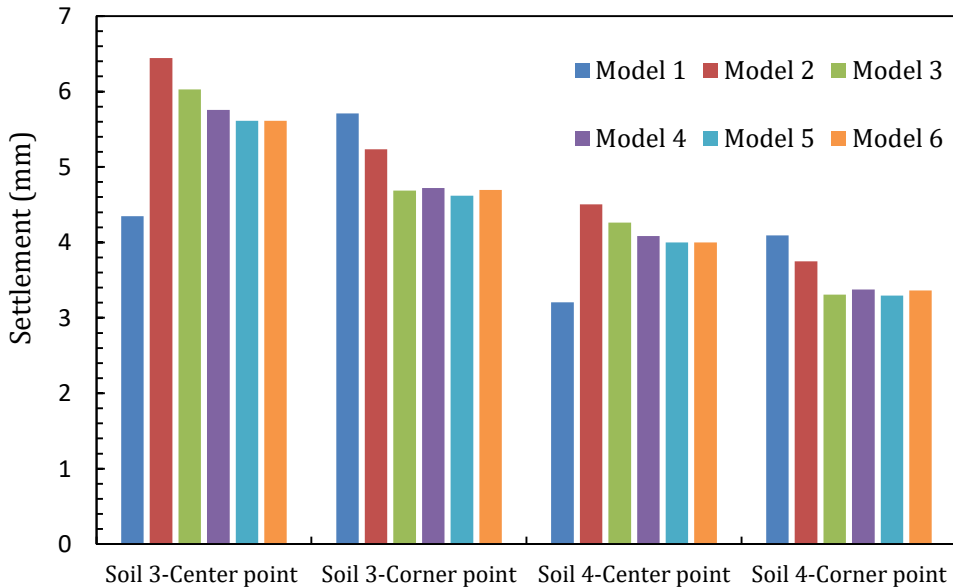
calculated from Model 2 analysis for soils classified as D with respect to Eurocode 8. Thus, Model 2 is suitable for flexible foundation assumption. However, the minimum differential settlement values were calculated from Model 1 analysis for soils classified as D with respect to Eurocode 8. Thus, the rigid foundation assumption is a suitable Model 1 for the soils that is classified as D according to Eurocode 8.

The minimum values of differential settlements were calculated from the analysis of Model 6 for both Soil 3 and Soil 4. To sum up, the rigid foundation assumption

is a suitable Model 6 for the soils that is classified as C according to Eurocode 8. The maximum differential settlement values were calculated from models that were divided into three or less regions for both Soil 3 and Soil 4. Flexible foundation assumption is valid for these models analyzed on C class soils. These models analyzed on C class soils. Yao and Zhang (1985) reported that both the differential settlements and forces in members of superstructures affect the relatively stiffness between raft foundation and subgrade soils. To sum up, the differential settlement reduces with the stiffness of subgrade soil in this study.



a) Settlements at the D class subsoil



b) Settlements at the C class subsoil

Figure 14. Effect of local soil class on foundation settlement

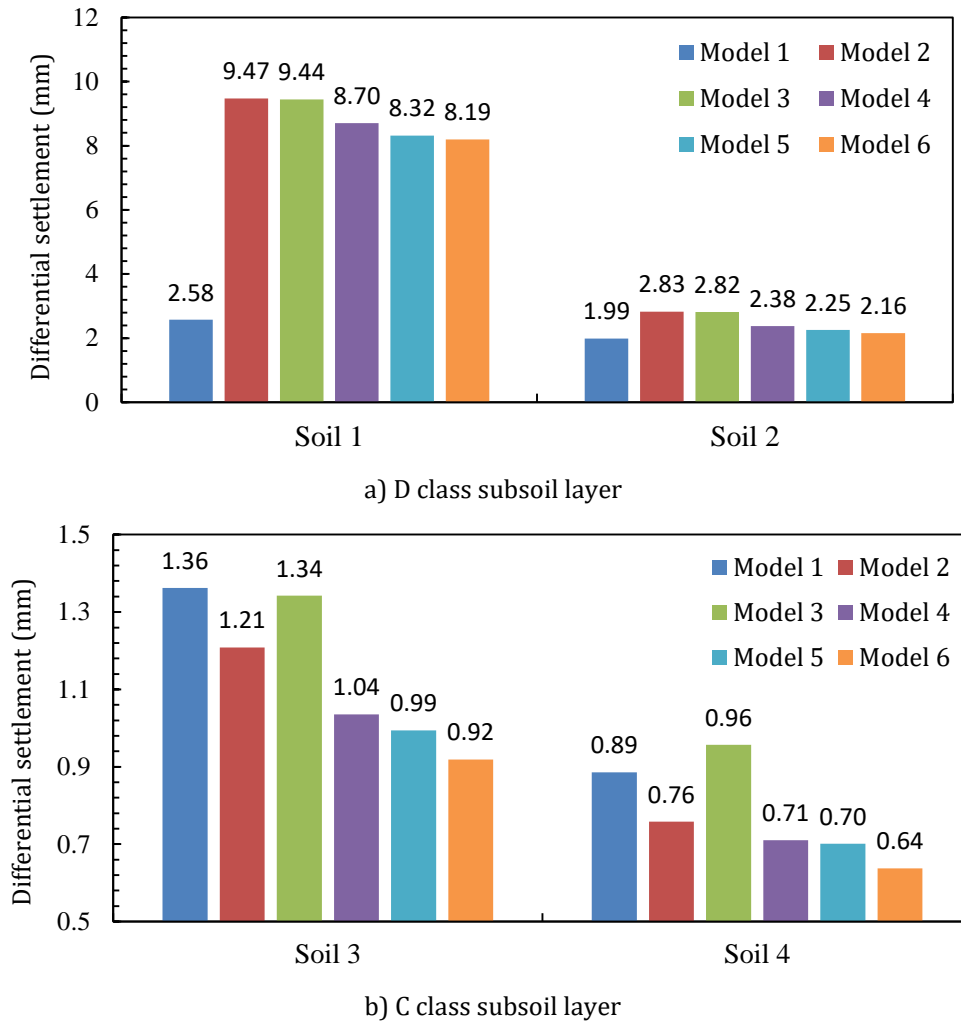


Figure 15. Differential settlements values considering local soil class of subsoil

4. Conclusions

The settlements of raft foundation were separately analyzed by using Winkler and Pseudo-coupled methods. The main scope of this study is that the comparison of Winkler method and Pseudo-coupled method by doing ETABS analyzes. Then, the effect of subgrade reaction values on the behavior of the raft foundation were investigated by using four different sand soils. In addition to these, two of these soils are classified as C and the others are classified as D according to Eurocode 8.

The behavior of raft foundation analyzed by using Winkler method and Pseudo-Coupled method changes with respect to soil class that are C and D.

Winkler spring approach used at finite element analysis can be considered as a suitable method for the rigid foundation done on D class soils. Since, the settlements calculated at each point of the raft foundation are close to each other. For the flexible foundation assumption of

D class soils, raft foundation should be divided into either two regions or more regions.

Pseudo-coupled spring approach used at finite element analysis can be considered as a suitable method for the rigid foundation done on C class soils. Since, the differential settlement between corner point and center point of the raft foundation was determined as a serious value. However, raft foundation should be divided into either three regions or less. Therefore, the flexible foundation assumption of C class soils is generally valid for raft foundation analyzed by using both Winkler method and Pseudo-Coupled method that has maximum three regions.

The values of both highest settlement and differential settlement were found from the two regions among the Pseudo-coupled methods. When the number of zones at Pseudo-coupled method increase, the settlement values determined at any point of the raft foundation and differential settlement generally decrease with respect to the outputs obtained from ETABS analyzes. In conclusion, the highest settlement values are

determined from ETABS analysis that include two-zone Pseudo-coupled method.

Model that has 7 regions is an optimum model for Pseudo-coupled method.

The maximum settlement ratio between center point and corner point of raft foundation are determined from model that has three regions. The optimum settlement ratios can be found from models that consists of three regions.

The other output related to both Winkler and Pseudo-coupled methods is that the behavior of raft foundation (rigid or flexibly) depends on the subgrade reaction coefficients of soils placed under the structure. Since, the increase of the values of this parameter means that the less settlement value form at any point of raft foundation. Thus, the values of settlements at both corner and center point decrease and differential settlement value gradually reduces. At this point, the value of subgrade reaction coefficient should be determined properly prior to the design of raft foundation.

Acknowledgements

The authors would like to express their thankfulness and a deep sense of gratitude to the Department of Civil Engineering, Necmettin Erbakan University for providing the facilities, and equipment to conduct and accomplish this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Contribution of Researchers

İ. ÖZKAN and Y. YENGİNAR contributed to literature review, Winkler and Pseudo-coupled methods implementation and evaluation of the results of this study. A. S. ECEMİŞ contributed to design of building and raft foundation, conducted ETABS analysis, and evaluation of the results of this study.

References

- ACI 336.2R-88 (2002) suggested analysis and design procedures for combined footings and mats, Report by ACI Committee 336
- Bhartiya, P., Chakraborty, T., & Basu, D. (2020). Nonlinear subgrade modulus of sandy soils for analysis of piled raft foundations. *Computers and Geotechnics*, 118, 103350.
- Cheung Y. K., Zienkiewicz O. C., (1965), Plates and tanks on elastic foundations-an application of finite elementmethod, *Int J. Solids Struct.*,1,451–461.

- Costa J. A., Brebia C. A., (1985), Bending of plates on elastic foundation using the boundary element method, *Proc.2ndInt.Conf.ariational Methods in Engineering*, University of Southampton, 1985, pp. 523–533.
- El-garhy, B., Osman, M. (2002). Winkler coefficient for Beams on Elastic Foundation. *ERJ. Engineering Research Journal*, 25(3), 1-18.
- Fox E. N., (1948), The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface.*Proc.2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engg.*, Rotterdam, Vol 1, 1948, pp. 129–132.2.
- Fraser R. A., Wardle L. J., (1976), Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations, *Geotechnique.*,26(4),613–630.
- Horvath, J.S., (1993), *Subgrade Modeling Jr Soil-Structure Interaction Analysis of Horizontal Foundation Elements*, Manhattan College Research Report No. Celge-93-I, Manhattan College, New York.
- Katsikadelis J. T., Armenakas A. E., (1984), Analysis of clamped plates on elastic foundation by BIE method , *J.Appl.Mech.*,51,574–586.
- Loukidis D., Tamiolakis G.P., 2017, Spatial distribution of Winkler spring stiffness for rectangular mat foundation analysis, *Eng Struct*, 153 (2017), pp. 443-459
- Ma, C.M., Chen, Y.Y. (2019). Research on the differential settlements of mat foundations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 351(1).
- Mandal, J. J., & Ghosh, D. P. (1999). Prediction of elastic settlement of rectangular raft foundation—a coupled FE–BE approach. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 23(3), 263-273.
- Modak, R., & Singh, B. (2022). A parametric study of large piled raft foundations on clay soil. *Ocean Engineering*, 262, 112251.
- Özer Ö., Yüksel, B., (2021), Comparison of the effect of foundation analysis methods on structural analysis results of tall buildings. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(1), 106-112.
- Prabhu, P., & Mutalikdesai, V. G. (2023). Soil-Solid Raft Interaction Analysis Subjected To Seismic Forces. [//doi.org/10.21203/rs.3.rs-2437896/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2437896/v1)
- Rashedul H. Chowdhury, Mavinakere E. Raghunandan AM (2013) Study on the analysis of mat foundation using different approach. *Icsdec* 818–825
- Scott, R. F. (1984). "Foundation analysis", 143. London: Prentice Hall International.

- Subramanian, K.V., Kashikar, A.V., Nath, C., and Shintre, C.C. (2005). "Analysis of raft foundations for spent fuel pool in nuclear facilities." Proc. 18th Intl. Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, China: 3165- 3178.
- Teli, S., Kundhani, P., Choksi, V., Sinha, P., & Iyer, K. K. (2020). Analytical Study on the Influence of Rigidity of Foundation and Modulus of Subgrade Reaction on Behaviour of Raft Foundation. In *Advances in Computer Methods and Geomechanics: IACMAG Symposium 2019 Volume 2* (pp. 181-194). Springer Singapore.
- Teodoru IB, Toma IO (2009) Numerical analyses of plate loading test. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, Romaina, Section LV (LIX), 57-65
- Todorovska, M. I., Hayir, A., & Trifunac, M. D. (2001). Flexible versus rigid foundation models of soil-structure interaction: incident SH-waves. In Proc. 2nd US-Japan Workshop on Soil-Structure Interaction.
- Yao Z. E. and Zhang J. R., (1985). Assessment of the effects of structure/raft/soil interaction. in Proceedings of the 5th international conference on Numerical Methods in Geomechanics, Japan Soc of Civil Engineers, pp. 813-819, A. A. Balkema, Nagoya University, Nagoya, Japan.
- Zilch K., (1993). Soil - structure interaction, in Proceedings of the safety and performance concepts: contributions to the workshop-sessions "model uncertainties", "new concepts" and "full scale testing", organized by task groups of commission 1, pp. 73-98, Comit'e Euro-International du B'eton (CEB), London, United Kingdom.

HAVACILIKTA KULLANILAN BAZI SÜPERALAŞIMLARIN YÜKSEK SICAKLIK GAZ OKSİTLENME DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Hacer Bahar BİLGİÇ ÖZEN¹, Uğur Gökşen HALICI², İlyas BAYRAK³, Neşe ÖZTÜRK KÖRPE⁴

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

ORCID No : <http://0000-0002-2795-1143>

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ORCID No : <http://0000-0002-4320-3188>

³TUSAS Motor Sanayii A.S. (TEI), Eskişehir

ORCID No : <http://0000-0003-2451-2054>

⁴Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ORCID No : <http://0000-0002-6868-8126>

Anahtar Kelimeler	Öz
Nikel Esaslı Süperalaşımalar Oksitlenme Kinetik	<i>Havacılıkta yüksek sıcaklık bölgelerinde kullanılan malzemeler, korozyona dirençli ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalıdırlar. Sektörden temin edilen ısıtma işlem görmüş Ni esaslı süperalaşımaları (Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738) öncelikle metalografik olarak hazırlandıktan sonra optik mikroskopta mikroyapıları görüntülenmiştir. Daha sonra oksitlenme deneyi için uygun boyuta getirilen numunelere 600 ve 900 °C sıcaklıklarında termogravimetrik analiz (TGA) cihazı ile 48 saat havada oksitlenme işlemi uygulanmıştır. Oksitlenen numunelerin yüzeylerinde oluşan oksit tabakaları tarayıcı elektron mikroskobu (SEM/ EDS) ile görüntülenmiş ve elementel analizi gerçekleştirilmiştir. Arrhenius eşitliği kullanılarak difüzyon kat sayıları hesaplanmış ve oksijen difüzyon kinetiği belirlenmiştir. Bu çalışmanın önemi bazı süperalaşımaların oksitlenme kinetiklerinin ortaya çıkarılarak karşılaştırılması ve sektörün ihtiyacı olan kullanım açısından değerlendirme verilerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktır.</i>

COMPARISON OF HIGH-TEMPERATURE GAS OXIDIZATION BEHAVIORS OF SOME SUPERALLOYS USED IN AVIATION

Keywords	Abstract
Nickel Based Superalloys Oxidation Kinetics	<i>Materials used in high temperature regions in aviation must be corrosion-resistant and have high strength values. Heat-treated Ni-based superalloys (Hastelloy X, Inconel 718 and Inconel 738) supplied by the industry were prepared metallographically, then their microstructures were visualized under an optical microscope. Then, the oxidation process in air was applied to the samples, which were brought to the appropriate size for the oxidation test, with a thermogravimetric analysis (TGA) device at 600 and 900 °C temperatures for 48 hours. The oxide layers formed on the surfaces of the oxidized samples were visualized with a scanning electron microscope (SEM/EDS) and elemental analysis was performed. Diffusion coefficients were calculated using the Arrhenius equation and oxygen diffusion kinetics were determined. The importance of this study is to reveal and compare the oxidation kinetics of some superalloys and to facilitate access to evaluation data in terms of usage that the industry needs.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 06.02.2023

Submission Date : 06.02.2023

Kabul Tarihi : 10.07.2023

Accepted Date : 10.07.2023

*Corresponding author: neseoz@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1243242>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Havacılıkta kullanılacak 120.000'in üzerinde malzeme tanımlanmıştır. Bunları 65.000'in üzerinde metaller, 15.000'in üzerinde plastikler, 10.000'in üzerinde seramikler ve geri kalanını kompozitler ile ahşap gibi doğal malzemeler oluşturmaktadır. Fakat bu malzemelerin kullanılabilirliği, hafiflik, mukavemet, oksitlenme, sürünme direnci ve kırılma tokluğu gibi özelliklerle sınırlandırıldığından bu oranın ancak % 0,05'i havacılık malzemesi olarak kullanımı mümkün kılınmaktadır. Havacılıkta kullanılan temel malzeme grubunu alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, çelikler ve kompozitler oluşturmaktadır. Bu malzemelere ilave olarak nikel esaslı alaşımlar jet motorları için önemli yapısal malzemeleri oluşturmaktadırlar. Gelişen teknoloji ile malzemelerin kullanım alanları da geliştirilmektedir (ASM International, 1991). Korozyon direnci malzemelerin tasarımında en önemli parametrelerdendir. Özellikle havacılık malzemelerinde yüksek maliyetli bakım onarım işlemlerinden dolayı korozyona dirençli malzemelerin üretilmesi önemlidir.

"Süperalaşımlar" terimi büyük ölçüde yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve genellikle VIII. Grup elementlerine dayalı bir grup alaşım tanımlamak için kullanılır (Kahraman, 2008). Süperalaşımların gelişim süreci 1930 yıllarında başlamıştır (uçak motorlarında turbo kompresörlerindeki malzemelerin ısıya karşı daha çok dayanıklılık ihtiyacı ile gelişim göstermiştir). Bundan sonraki adım 1940'lı yılların başlarında gelişmekte olan gaz türbin motorları teknolojileridir. Bu çalışmalar doğrultusunda süperalaşımlar: kobalt esaslı, nikel esaslı ve demir esaslı süper alaşımlar şeklinde 3 ana gruba ayrılırlar. Uçaklarda, gemilerde, endüstride ve taşıtlarda bulunan gaz türbinine ek olarak artık süperalaşımlar uzay araçlarında, roket motorlarında, deneysel uçaklarda, nükleer reaktörlerde, buharlı enerji tesislerinde, petrokimyasal teçhizatlar ve diğer yüksek sıcaklık barındıran uygulamalarda da kullanılmaktadır (Kahraman, 2008).

Süper alaşımların mukavemeti, alaşım elementleri, belirli bir sıcaklıkta mevcut olan kararlı fazlar, korozyona karşı dirençleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Patil ve Vagge, 2022).

Alaşım elementlerinin periyodik tablodaki konumu, süper alaşımda oluşan fazın kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nikel, kobalt, demir, krom, molibden ve tungsten gibi elementler östenitik γ' fazına ayrılır ve bu da kararlılığı sağlar. Böylece alaşım elementlerinin çoğu geçiş metallerinin d bloğundan alınmaktadır. Bu elementlerin atomik yarıçapları neredeyse Nikel elementinin atomik yarıçapına eşittir. Alüminyum, titanyum, niyobyum ve tantal gibi başka bir grup element ise nikelde daha büyük atomik yarıçaplara sahiptir.

Bu elementler Östenit γ' fazı olarak bilinen $Ni_3(Al, Ta, Ti)$ bileşiği gibi düzenli fazların oluşumunu sağlamaktadır (Patil ve Vagge, 2022).

Inconel 718, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan ve çökeltme sertleşmesi ile mukavemetlendirilmiş demir-nikel esaslı süperalaşımların en yaygın kullanılan çeşididir (Sims, Stoloff ve Hagel, 1987).

Hastelloy X bir Ni-Cr-Fe-Mo alaşımıdır. İstisnai bir birleşime sahip yüksek sıcaklık dayanımı (Mo bakımından zengin karbürlerin varlığından dolayı (Pillai, Dryepondt ve Pint, 2019; Zhao, Larsen ve Ravikumar, 2000) mükemmel şekillendirme ve kaynak özellikleri ile oksitlenme ve stres-korozyon çatlaklarına karşı dirençli bir malzemedir. Hastelloy X alaşımı şu anda yanma bölgesi bileşenleri için gaz türbini motorlarında kullanılmaktadır. Ayrıca, geçiş kanalları, yanma kutuları, püskürtme çubukları ve alev tutucular gibi brülörlerde, egzoz boruları ve kabin ısıtıcılarında da Hastelloy X kullanılır. Sulu kekler, katalizör destek ızgaraları, fırınlar için kimyasal işlem endüstrisinde perdelerde, piroliz işlemleri için kullanılan tüplerde ve flaş kurutma bileşenlerinde de yine bu malzeme tercih edilir (Tanner, 2009).

Inconel 738, mukavemetin yanı sıra iyi korozyon direnci gösteren nikel esaslı bir süperalaşımdır. Türbin, roket motorları ve denizcilik uygulamaları gibi alanlar, iyi bir mukavemete ve nispeten iyi bir korozyona ihtiyaç duymaktadır (Patil ve Vagge, 2022).

Bu çalışmada Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738 malzemelerinin yüksek sıcaklık oksitlenme davranışlarının belirlenmesi ve birbiriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738 alaşımları üzerinde oksitleme işlemleri 48 saate kadar olan sürede; 600 ve 900°C'de sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin Elektron mikroskopu(SEM) ile oksitlenmiş yüzey görüntülenmiş, SEM/EDS ile elementel analizleri yapılmıştır. Termal gravimetrik analiz ile oksitlenme kinetikleri çıkarılmıştır. Alaşımlar kimyasal bileşimdeki ve mikroyapısal farklılıklarından dolayı farklı oksitlenme kinetiği göstermişlerdir. Ek olarak, difüzyon katsayıları ve oksijen difüzyonunun aktivasyon enerjisi iki alaşım için 600-900°C sıcaklık aralığında tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

2.1. Materyal

Çalışmalarda kullanılan Hastelloy X, Inconel 718, ve Inconel 738 numunelerinin kimyasal analizleri Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3 ile verilmiştir (Kahraman, 2008).

Tablo 1. Hastelloy X'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	C	S	W	P	Co	Mn	Si
Min(%)	50	17	12	2,8	-	-	0,2	-	0,5	-	-
Maks(%)	55	21	24	3,3	0,08	0,015	1,0	0,04	2,5	1,0	1,0

Tablo 2. Inconel 718'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	B	P	S	Al	Co	Ti
Min(%)	50	17	12	2,8	4,75	-	-	-	-	-	-	0,2	-	0,65
Maks(%)	55	21	24	3,3	5,50	0,08	0,35	0,35	0,06	0,015	0,015	0,8	0,3	1,15

Tablo 3. Inconel 738'in Kimyasal Bileşimi (ağ.%)

Element	C	Mn	Si	Cr	Ti	Al	Fe	B	Zr	Nb	Ta	Mo	W	Co	Cu	P	S	Ni
Min(%)	0,09	-	-	15,7	3,2	3,2	-	0,007	0,03	0,6	1,5	1,5	2,4	8,0	-	-	-	-
Maks(%)	0,13	0,2	0,3	16,3	3,7	3,7	0,35	0,012	0,08	1,1	2,0	2,0	2,8	9,0	0,1	0,01	0,015	kalan

2.2. Metot

Numunelerden bir kısım kesilerek mikro yapılarını incelemek üzere bakalit ile kalıplanmıştır. Kalıplanan numuneler, 180-320-600-1200 mesh ölçülü zımpara kâğıtları ile zımparalanarak, elmas pasta ile 15-20 dakika parlatılmıştır. Daha sonra numuneler nikel süperalaşmaları için hazırlanmış olan solüsyon (10 ml Hidroklorik asit (HCl) - 10 ml Methanol - 2 ml Hidrojen peroksit (H₂O₂) ile dağlanarak optik mikroskopta görüntüleri elde edilmiştir. Mikro-yapı görüntüleme çalışmaları ESOĞÜ Metalürji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan optik mikroskop ve buna bağlı görüntü analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

TGA testi ile oksitleme deneyleri için kullanılmak üzere hazırlanan numuneler yaklaşık 3 cm² alanına sahip boyutlarda kesilerek ultrasonik olarak asetonda temizlenmiştir. Termogravimetrik analizler farklı sıcaklıklarda izotermal olarak bölüm bünyesindeki Perkin Elmer Diamond marka termogravimetrik/diferansiyel termal analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Oksitleme işlemi için numuneler, 48 saat boyunca, 20 °C/dk hız ile çıkılan 600-900 °C sıcaklıklarında havada oksitlenmişlerdir. Termogravimetrik analiz sonuçlarından, ağırlık değişimi (Δm), elde edilen ağırlık değerlerinden başlangıçtaki ağırlık değeri çıkarılarak elde edilmiştir.

Oksitleme deneylerinden elde edilen termogravimetrik verilerden şekilde gösterildiği gibi parabolik hız sabitleri hesaplandı. Parabolik korozyon hız sabitlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır (Kutz, 2018):

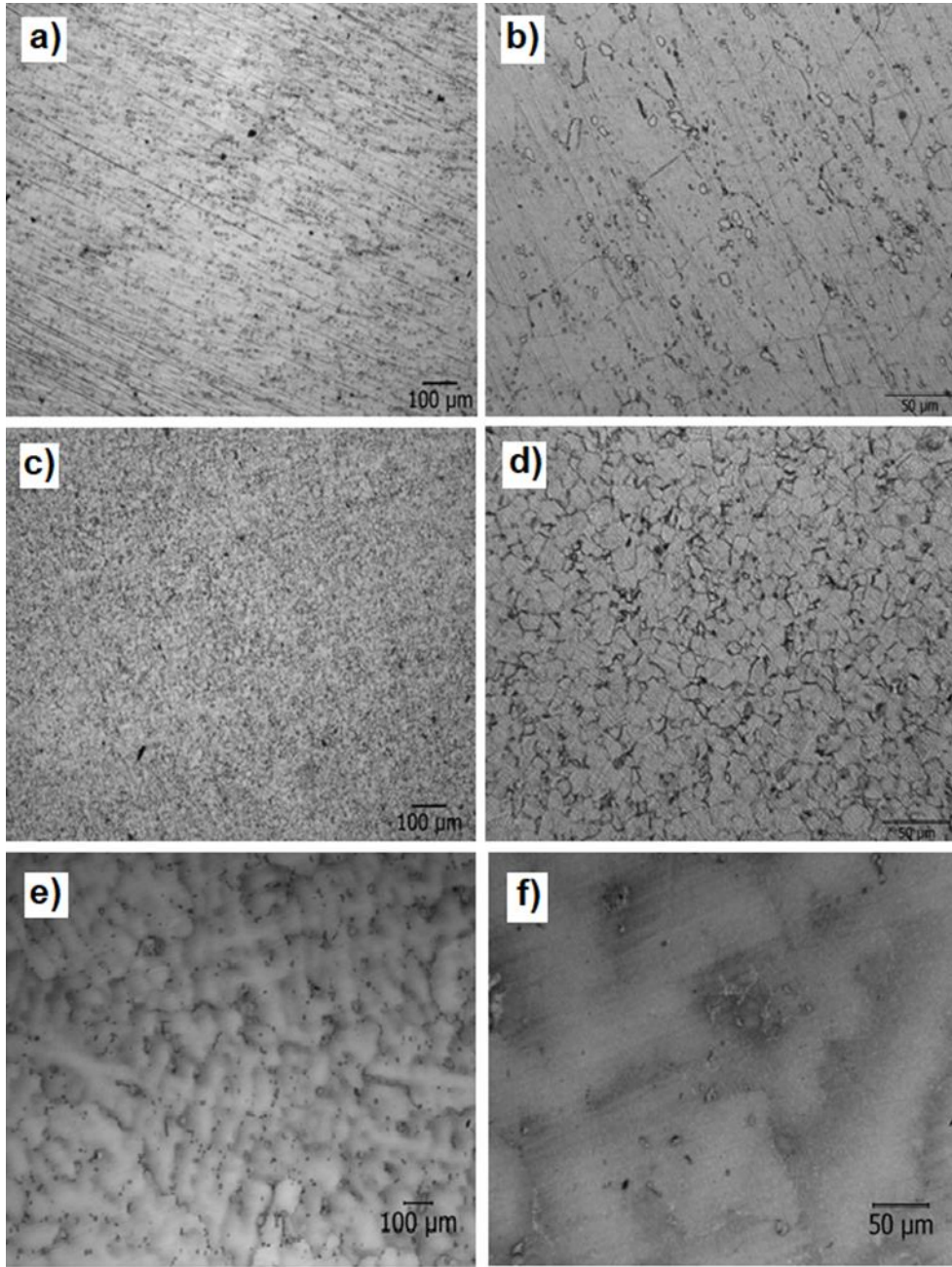
$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right)^2 = k_p t. \quad (1)$$

Burada Δm numunenin ağırlık değişimi, A yüzey alanı, k_p parabolik hız sabiti ve t işlem süresidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde Hastelloy X alaşımı için γ matris içerisinde krom ve molibden zengin karbür fazlarının varlığı tanımlanmıştır (Erdoğan, Çakmakaya ve Erol, 2005). Mikroyapıda görülen küreciklerin bu fazlar olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 1a-b). Inconel 718 alaşımında NbC fazı baskındır ve α -Cr metallerarası bileşiği nikelin az olduğu bölgelerde kürecik halinde oluşur (Şekil 1c-d) (Davis, 1997).

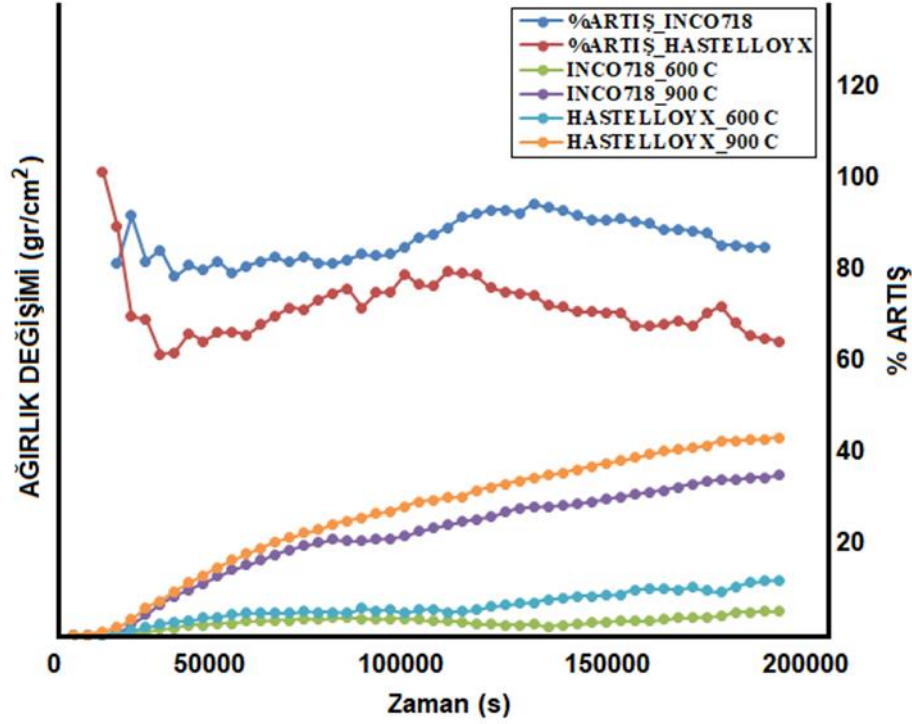
Önemli oranda Al ve Ti içeren Ni esaslı alaşımlarda Ni₃(Al,Ti) çökeltilerinin (γ') çözünmesi ısıl işlem şartlarına bağlıdır. Bir miktar çözünmemiş çökeltiler (Çelik, 2006), Inconel 738 alaşımının mikroyapısında görüntülenmiştir (Şekil 1e-f).



Şekil 1. Hastelloy X Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi a) 50X, b) 200X; Inconel 718 Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi c) 50X, d) 200X; Inconel 738 Numunesinin Optik Mikroskop Fotoğrafi e) 50X, f) 200X

Hastelloy X, Inconel 718 ve Inconel 738'in oksitlenme davranışının belirlenmesi için 600°C ve 900°C' de havada oksitlenme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

48 saat boyunca elde edilen ağırlık değişimleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hastelloy X ve Inconel 718 600°C ve 900°C'de Ağırlık Değişimi-Süre Grafikleri

600°C ve 900°C sıcaklıklarında oksitlenen alaşımlar için hesaplanan k_p , parabolik hız sabitleri Tablo 4' te gösterilmiştir. Inconel 738 alaşımı için başlangıçta ve işlem sırasında yüksek Ti içeriğine bağlı olarak koruyucu olmayan oksit tabakasına bağlı olarak ağırlık azalması tespit edildiğinden değerlendirmeye alınmamıştır (Şekil 2). Yüksek Mn ve Si içerikli alaşımlarda daha hızlı oksitlenme kinetikleri gözlenmiştir (Tablo 4).

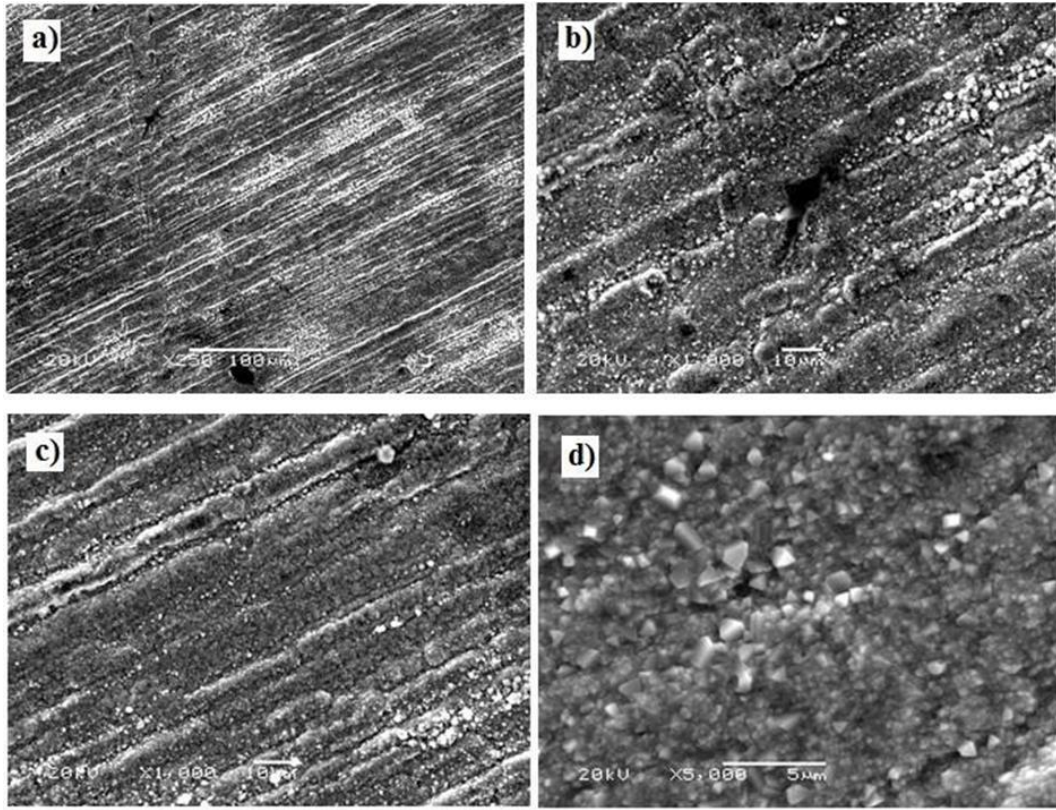
Tablo 4. Inconel 718 ve Hastelloy X Süperalaşımlarının Hesaplanan k_p Parabolik Oksitlenme Hız Sabiti ($\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$) Değerleri

Malzeme	600°C	900°C
	$k_p (\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_p (\text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1})$
Inconel 718	2,00E-08	7,00E-07
Hastelloy X	1,00E-07	6,00E-06

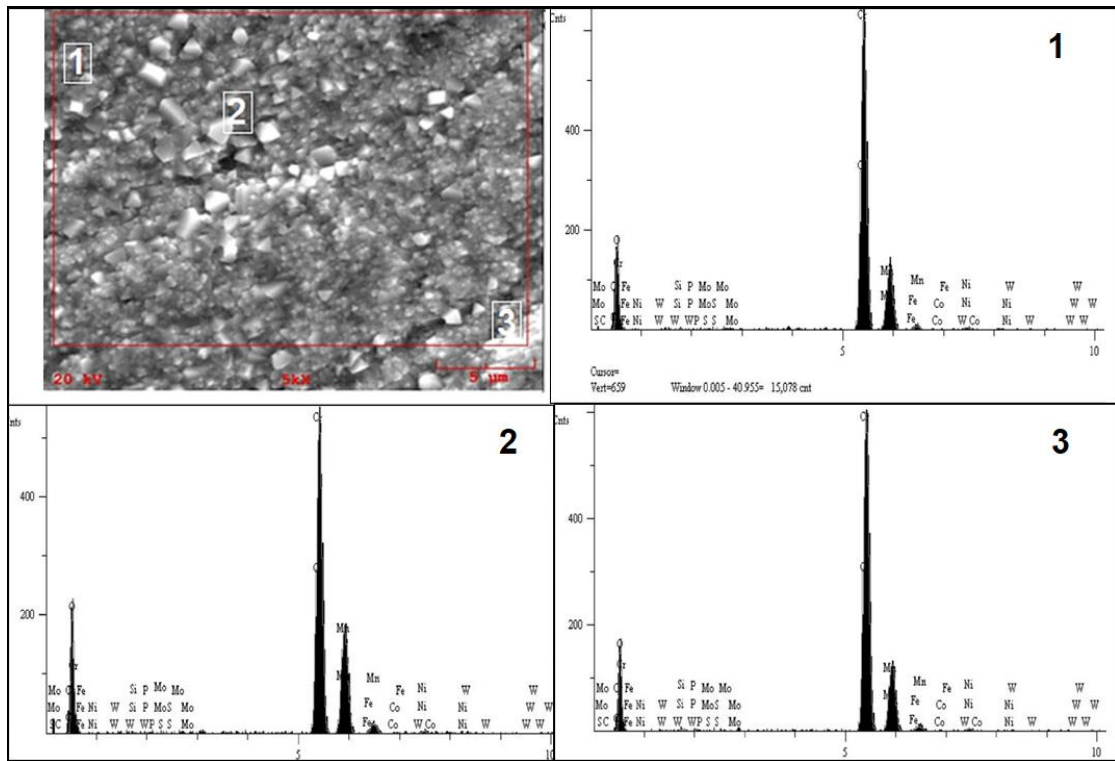
900°C' de gerçekleşen oksitlenme işlemlerinden sonra numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve elementel analizleri yapılmıştır.

Literatürde genel olarak, yüksek sıcaklıklarda Hastelloy X alaşımları yeterli Mn içeriyorsa, bir iç koruyucu Cr_2O_3 tabakası ve kısmi SiO_2 alt tabakası ile birlikte bir dış $(\text{Ni,Fe,Cr})_2\text{O}_4$ veya MnCr_2O_4 spinel oluşturduğu gözlemlenmiştir (Schütze, 1995). Mevcut çalışmada da SEM/EDS elementel analizine göre Hastelloy X için çoklu tabaka ($\text{SiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{MnCr}_2\text{O}_4$) olduğu söylenebilir (Şekil 3, Şekil 4).

Literatürde (Mn, Si) içeren süperalaşımlar için daha yüksek oksitlenme ve bozulma oranları bulunmuş ve bu da tane sınırlarında Mo, Si bakımından zengin karbürlerin varlığı ile ilişkilendirilmiştir (Dryepondt, Kirka ve List, 2019).



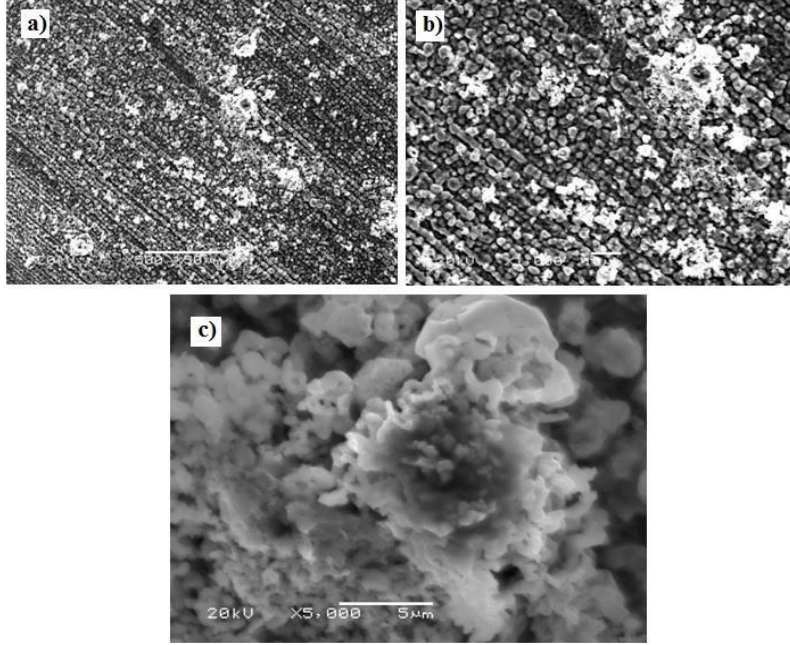
Şekil 3. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Hastelloy X Alaşımı SEM Görüntüleri a) 250X, b) 1000X, c) 1000X, d)5000X



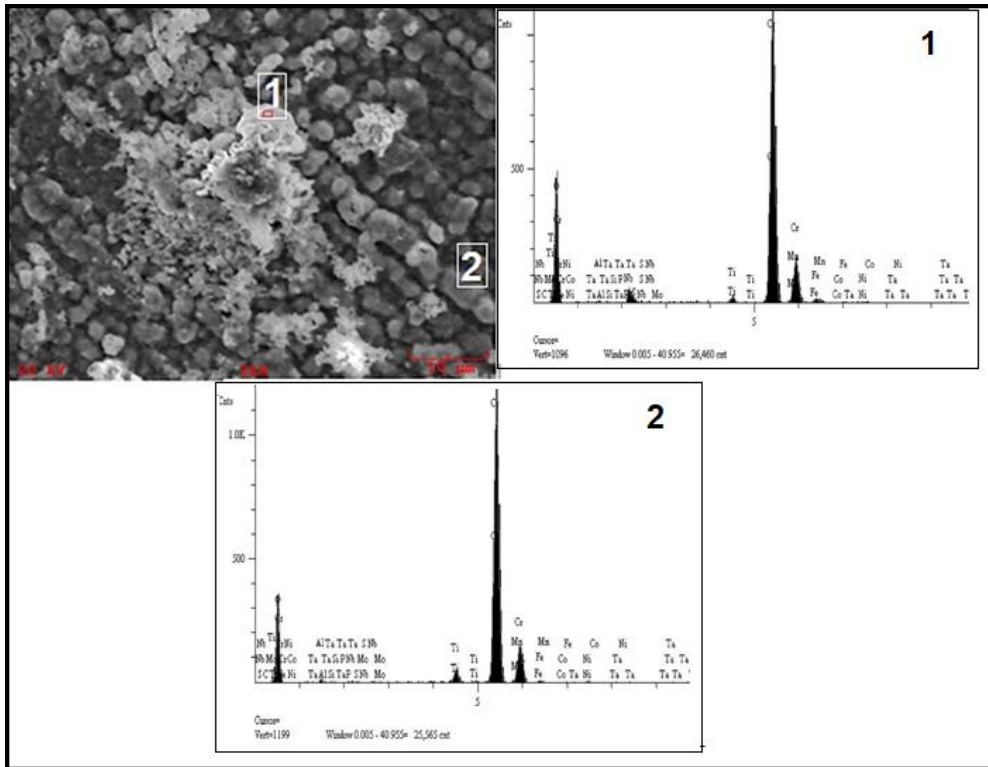
Şekil 4. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Hastelloy X Alaşımı EDS Analizleri

Hastelloy X alaşımlarına benzer olarak yüksek Mn ve Si içerikli alaşımlar, altta SiO_2 çökeltileri bulunan bir Cr_2O_3 tabakasının üzerinde MnCr_2O_4 'ten oluşan bir dış oksit tabakası oluşturmuştur.

Bir MnCr_2O_4 tabakasının varlığında, alttaki alaşımda daha ince bir Cr_2O_3 tane mikroyapısı ve daha büyük Mn tüketimleri gözlenmiştir (Şekil 5, Şekil 6).



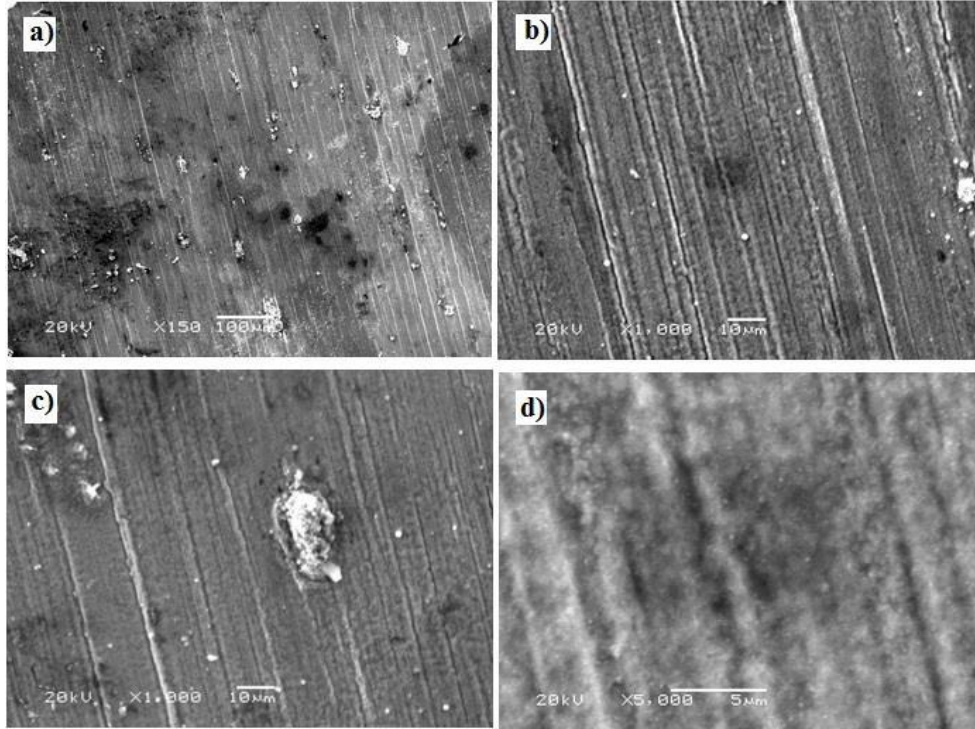
Şekil 5. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 718 Alaşımı SEM Görüntüleri a)600X, b) 1000X, c) 5000X



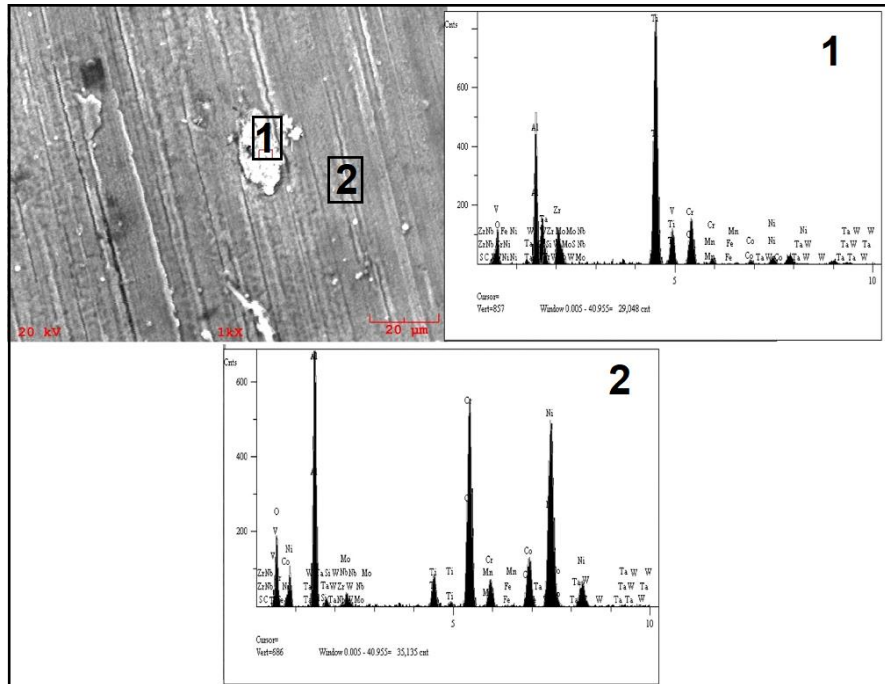
Şekil 6. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 718 Alaşımı EDS Analizleri

Yüksek Ti içeren Inconel 738 alaşımında daha yüksek oksitlenme oranlarının Ti elementinin uygulama sıcaklığında koruyucu olmayan oksit oluşturmasının

yanı sıra daha ince Cr_2O_3 tane mikro yapısı ile ilişkilendirilmiş ve geniş tabakada dökülme gözlemlenmiştir. Cr tükenmesi ile oksit tabakası direncinin azaldığı düşünülmektedir (Şekil 7, Şekil 8).



Şekil 7. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 738 Alaşımı SEM Görüntüleri a) 150X, b) 1000X, c) 1000X, d) 5000X



Şekil 8. 900°C 'de 48 Saat Boyunca Oksitlenen Inconel 738 Alaşımı EDS Analizleri

4. Sonuç ve Öneriler

Bazı Nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklık oksitlenme davranışının belirlendiği mevcut çalışmada 600°C' de çok az ağırlık değişimi tespit edilmiştir. Hastelloy X ve Inconel 718 alaşımlarında 900°C' de yapılan oksitlenme işlemlerinde iyi oksitlenme direncine sahip oldukları gözlenmiştir. Hastelloy X ve Inconel 718 alaşımlarında Cr₂O₃ koruyucu oksit tabakasının yanı sıra Cr-Mn spineli oluşumu saptanmıştır. Bu spinel fazın yüksek sıcaklıklarda uçucu kromoksit oluşumunu engellediği bilinmektedir (Bradley, 1988; Tillack, 2007). Inconel 738 alaşımının yüksek sıcaklık oksitlenmesinde oksit tabakasının çok ince oluşumu ve yüksek Ti içeriğine bağlı olarak koruyucu olmadığı saptanmıştır. Çalışma kapsamında mevcut malzemelerin yüksek sıcaklık gaz oksitlenme davranışlarının ortaya çıkarılmasıyla mevcut malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kullanımında ortaya çıkabilecek hasarın değerlendirilmesinde kullanılacak somut verilere ulaşılmıştır. Ancak özellikle ince tabaka oluşumu nedeniyle tabakanın görüntülenmesi için EPMA analizi ve ince film XRD analizi gibi ileri tetkiklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür

Bu makale Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), TUSAŞ Motor Sanayi (TEI) ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi arasında 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında 1139B411701481 numaralı yürütülen projenin bir çıktısıdır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada verilerin elde edildiği projede, Yazar 1 yürütücü, Yazar 2 sanayii danışmanı, Yazar 3 araştırmacı, Yazar 4 danışman olarak görev almışlardır. Tüm yazarlar makalenin yazımında katkı sağlamışlardır. Dört yazar da makalenin son halini okumuş ve onaylamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Bradley, E. F. (1988). Superalloys-A technical guide ASM International. Metals Park, OH.

Çelik A. (2006). Nikel esaslı süperalaşımların talaşlı işlenmesi için SiALON esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi (Yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Davis, J.R., (1997). Heat Resistant Materials. ASM Specialty Handbook, ASM International, 221-254..
- Dryepondt, S., Kirka, M. M., & List, F. A. (2019, March). Oxidation behaviour of Ni-based alloys fabricated by additive manufacturing. Paper presented in CORROSION 2019, Nashville, Tennessee, USA.
- Erdoğan, M., Çakmakkaya, M. ve Erol A. (2005). Katkı elementlerinin süperalaşımlara kazandırdığı genel özellikler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Bölümü Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, www.teknolojekarastirmalar.com, Erişim Tarihi: 19.12.2017.
- Kahraman, F. (2008). Süperalaşımların nitrürlenerek yüzey özelliklerinin incelenmesi (Doktora tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kutz, M. (2018). Handbook of environmental degradation of materials. William Andrew Applied Science Publishers, Elsevier.
- Patil, A. R., & Vagge, S. T. (2022). Hot corrosion behaviour of Inconel 738 superalloy in presence of NaCl, Na₂SO₄, V₂O₅. Materials Today: Proceedings, 65, 74-80. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.068>.
- Pillai, R., Dryepondt, S., & Pint, B. A. (2019). High temperature oxidation lifetime modelling of thin-walled components. In Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, American Society of Mechanical Engineering, 58677, V006T24A008. doi: <https://doi.org/10.1115/GT2019-90505>.
- Schütze, M. (1995). Mechanical properties of oxide scales. Oxidation of Metals, 44(1), 29-61. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01046722>.
- Sims, C. T., Stoloff, N. S., & Hagel, W. C. (1987). Superalloys II (Vol 8). New York: Wiley.
- Tanner, D. W. J. (2009). Life assessment of welded INCONEL 718 at high temperature (PhD Thesis). University of Nottingham.
- Tillack, D. J. (2007). Welding superalloys for aerospace applications. Welding Journal, 86(1), 28-32. Retrieved from <http://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=18441725>.
- Zhao, J. C., Larsen, M., & Ravikumar, V. (2000). Phase precipitation and time-temperature-transformation diagram of Hastelloy X. Materials Science and Engineering: A, 293(1-2), 112-119. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01049-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01049-2).

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF HIGH ENTROPY OXY-HYDROXIDES FOR ELECTROCATALYTIC OXYGEN EVOLUTION AND REDUCTION REACTIONS

Cigdem TOPARLI¹

¹ Department of Metallurgical and Materials Engineering, Middle East Technical University, 06800, Ankara, Turkey, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-4374-4910>

Keywords	Abstract
High entropy materials Water splitting	<i>The need for energy is rising quickly, and the usage of fossil fuels is contributing to the greenhouse effect and environmental pollution, both of which are raising public concerns. The development of novel electrochemical energy storage techniques as well as the creation of cleaner, more sustainable energies have both become highly researched topics as a result of this condition. New functional materials are being investigated for the advancement of energy storage. High entropy hydroxides have lately been emerged as promising electrocatalyst for universal water splitting reactions, which are central for solid oxide fuel cells, hydrogen production and metal-air batteries. In this work, a cost-effective and scalable fabrication method was applied to fabricate several high entropy hydroxides on Nickel foam through single-step electrodeposition technique. Results showed that high-entropy FeCoNiMnOOH exhibits excellent OER activity with a low overpotential of 151 mV at current density of 100 mA cm⁻², which is associated with the presence of defects in the structure.</i>

YÜKSEK ENTROPİLİ OKSİ-HİDROKSİTLERİN ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE OKSİJEN ÇEVİRİM REAKSİYONU ELEKTRO KATALİZÖRÜ OLARAK UYGULANMASI

Anahtar Kelimeler	Öz
Yüksek entropili malzemeler Su ayrışma reaksiyonu	<i>Artan enerji talebini karşılamak ve çevre kirliliği endişelerini azaltmak için yenilenebilir enerji sistemleri ve verimli enerji dönüşüm cihazları kullanmak, yeni elektrokimyasal enerji depolama sistemleri geliştirmek gerekmektedir. Bu bağlamda, hidrojen üretimi, katı yakıt hücreleri ve metal-hava bataryaları gibi yeni nesil enerji üretme ve depolama sistemlerinde oksijen çevrim reaksiyonları sistemlerin performanslarında önemli rol oynamaktadır. Dolayısı ile bu reaksiyonları hızlandırmak için yeni fonksiyonel malzemeler araştırılmaktadır. Yüksek entropili hidroksitler, son zamanlarda, katı oksit yakıt hücreleri, hidrojen üretimi ve metal-hava pilleri için merkezi olan evrensel su ayırma reaksiyonları için umut verici bir elektrokatalizör malzemesi olarak ön plana çıkmıştır. Bu çalışmada, tek adımlı elektrodpozisyon tekniği ile Nikel köpük üzerinde farklı kompozisyonlarda yüksek entropili hidroksitler' in direkt üretimi araştırılmıştır. Elde edilen elektrokatalizörlerin elektrokimyasal performanslarına üretim voltajı, suresi ve elementel etki incelenmiştir. Sonuçlar, yüksek entropili FeCoNiMnOOH' un 100 mA cm⁻² lik akım yoğunluğunda 151 mV' lik düşük bir aşırı potansiyeli sergilediğini göstermiştir. FeCoNiMnOOH yüksek oksijen oluşum reaksiyonu katalitik aktivitesi ise yapıda bulunan oksijen hataları ile ilişkilendirilmiştir.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 01.05.2023

Kabul Tarihi

: 17.07.2023

Research Article

Submission Date

: 01.05.2023

Accepted Date

: 17.07.2023

* Sorumlu yazar: ctoparli@metu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1290574>

1. Introduction

Energy obtained from hydrogen has been foreseen to be the greenest way to meet the demand for carbon-free

society and to produce hydrogen, electrochemical water splitting has been noticed as the most feasible method. Electrochemical water splitting depends on two half-cell reactions, oxygen evolution reaction (OER) and oxygen



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

reduction reaction (ORR), which have sluggish kinetics (Zhou et al., 2022). To mitigate the high overpotentials of these reactions, state-of-the-art electrocatalysts Pt/C, IrO₂, and RuO₂ have been applied but they are scarce, expensive and also exhibit potential swings in a long term utilization (Wang et al., 2022). It is also not feasible to use two different catalysts to foster OER and ORR separately, since it would increase weight and cost in practical applications. Therefore, developing cost-effective and both structurally and electrochemically stable bifunctional oxygen electrocatalysts are essential to drive the cost down (Erdil et al., 2022).

Among the various approaches to design high performance bifunctional oxygen electrocatalysts, high-entropy effect driven based materials have been explored as a promising solution. High-entropy materials (HEMs) are single-phased materials that can consist of five or more metal cations in equimolar or near equimolar ratios (Rost et al., 2015). Mixed cationic sites of high entropy materials can interact with the intermediate species successfully; as a result, they may exhibit excellent catalytic activity (Bayraktar, Lökçü, Ozgur, Erdil and Toparli, 2022). HEMs can have various compositions, and they are tailorable; hence, their electrocatalytic activity can also be tuned.

2. Literature review

Several HEMs materials such as oxides, alloys, fluorides and sulfides have been explored and applied in numerous electrochemical applications. For example, it has been shown that high entropy fluorides exhibit a overpotential of 314 mV at a current density of 10 mA cm⁻² (Wang, Chen, Yang, Liang and Dai, 2020). High entropy MnFeCoNi HE alloys present OER overpotential of 302 mV at a current density of 10 mA cm⁻² (Dai, Lu and Pan, 2019).

One type of HEMs is high-entropy (oxy) hydroxides (HEHs) and they are considered to be a promising candidate as OER electrocatalysts. Yet, very few investigations have performed on quaternary or multinary (oxy)hydroxides, while most recent developments and discoveries have focused on pure binary (oxy) hydroxide materials and ternary (oxy)hydroxide composites. Typically, OER performance is can be enhanced via 3d-5d orbital repulsion and thus trimetallic (oxy)hydroxides are frequently combined with noble metal elements; nevertheless, this method is not economical.

FeCoNi hydroxide has been used as a quaternary material for OER after being doped with lanthanide. Due to their synergistic impact and electrical structure, most researchers believe that multimetal (oxy)hydroxides have outstanding water splitting properties (Liu et.al, 2020).

Another study demonstrated that the Fe element can modify the NiOOH electronic structure in NiFe-LDHs during the electrochemical reaction to enhance water

splitting (Trotochaud, Young, Ranney, and Boettcher, 2014).

The electronic structure of NiFeCo-LDH is modified and stabilized the Fe local environment in NiFe-LDHs to promote activity. Therefore, researching multi-metal (oxy)hydroxides in the water splitting reaction is a worthwhile endeavor.

Another critical issue in designing and application of electrocatalysts in water splitting is the contact between the catalysts and substrate. Typically, the catalysts are dropped on a substrate, but this method suffers from the conductivity. Therefore, it is crucial to grow the catalysts directly on a substrate to be used as working electrode.

In this work, for the first time we successfully grow three different high entropy hydroxides on a Nickel foam with a single step electrodeposition technique. The results show that increasing the deposition voltage increases OER activity due to higher surface coverage. On the other hand, substitution of Ni with Fe in the composition extremely enhances the OER performance which is attributed to the oxygen vacancy formation.

3. Method

In this study, research and publication ethics were complied with. High-entropy FeCoNiMnOOH and NiCoCrMnOOH powders were grown as in situ on Nickel foam through electrodeposition technique. Electrodeposition was carried out for different minutes at different voltages to investigate the time and voltage influence on the catalytic activity of samples. FeCoNiMnOOH and NiCoCrMnOOH were obtained on a Nickel foam. Co(NO₃)₂·3H₂O, Ni(NO₃)₂·6H₂O, Mn(NO₃)₂ and Fe(NO₃)₃·9H₂O as determined ratios were dissolved in ultrapure water to prepare the electrolyte solution for electrodeposition. The variations and compositions of catalysts on NF are; FeCoNiMnOOH (90 min, -1.5 V), FeCoNiMnOOH (60 min, -1.0 V), NiCoCrMnOOH (30 min, -1.5 V), NiCoCrMnOOH (60 min, -1.0 V), NiCoCrMnOOH (60 min, -2.0 V).

3.2. Characterization of High Entropy Oxy(Hydroxides)

The crystal structures of the series of FeCoNiMnOOH/NF and NiCoCrMnOOH/NF were studied by powder X-ray diffraction (XRD, Rigaku) with Cu K α radiation in a 2 θ range of 10–90°. Surface morphologies of the samples were investigated by SEM analysis. The SEM pictures of the synthetic high-entropy FeCoNiMnOOH/NF and NiCoCrMnOOH/NF at various magnifications are obtained. The chemical composition and nature of the high entropy hydroxides were studied using X-ray photoelectron spectroscopy with Al K α radiation. All the peaks were calibrated with standard C 1s spectrum at 284.6 eV.

3.3. Electrochemical tests

The electrochemical measurements were performed on a three-electrode system with a GAMRY Reference 3000 potentiostat/galvanostat/ZRA. Ag/AgCl electrode was used as a reference, and a platinum wire was used as a counter electrode. All tests were measured in an O₂ saturated solution of 0.1 M KOH prepared from deionized water and KOH pellets.

4. Results

The XRD patterns of electrodeposited Ni-foams and bare Ni-foam are provided in Figure 1.

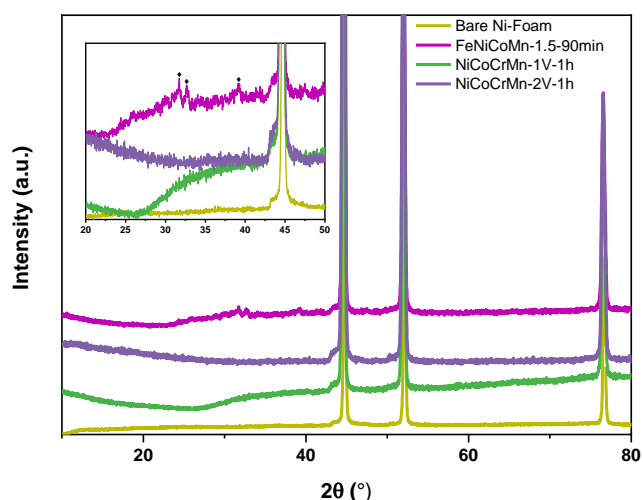


Figure 1. XRD spectra of Nickel foam, FeCoNiMnOOH and NiCoCrMn on Nickel foam.

The distinctive diffraction peaks of the Ni-foam at 44.3° , 51.8° , and 76.4° are represents the (111), (200) and (220) planes. The electrodeposited Ni-foams display amorphous nature as shown from the XRD graph. There is no obvious diffraction peak other than Ni-foam peaks. Only FeCoNiMn displays small diffraction peaks at 32° , 34° and 40° . These peaks can be corresponded to FeNiOOH peaks, such as $(\text{Fe}_{0.67}\text{Ni}_{0.33})\text{OOH}$, $(\text{Fe}_{0.67}\text{Mn}_{0.33})\text{OOH}$ and/or $(\text{Fe}_{0.67}\text{Co}_{0.33})\text{OOH}$. The others are display the typical amorphous XRD pattern. The extraordinary electrocatalytic performance of FeCoNiMn with respect to others can be also related to these crystalline (oxy)hydroxide peaks.

SEM images of bare Nickel foam and deposited FeNiCoMn and NiCoCrMn are shown in Figure 2. The images indicate that the foam was successfully coated with HEO-OH.

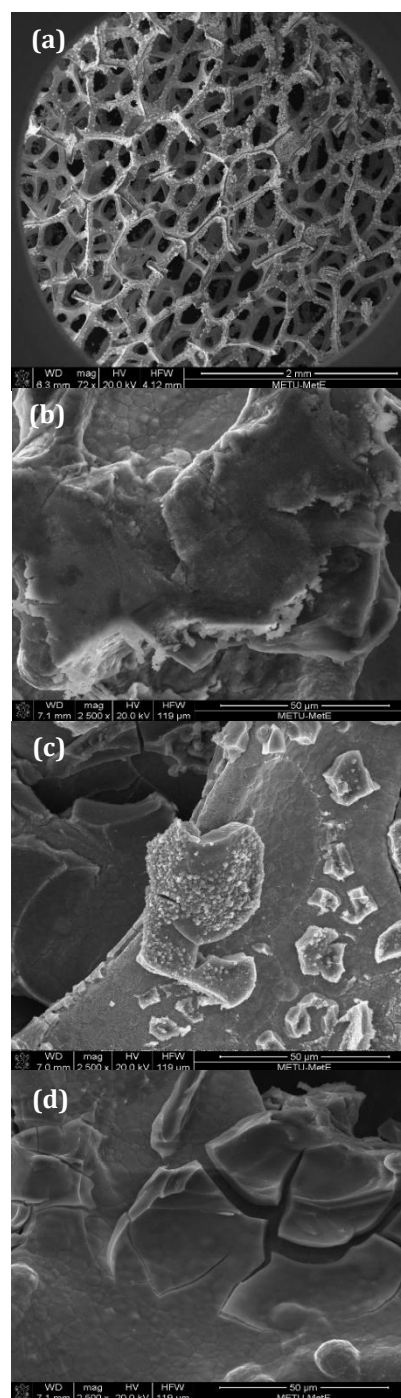


Figure 2. SEM image of a. the bare Nickel foam b. SEM image of the FeNiCoMn-1.5V-90 min c. SEM image of the NiCoCrMn-1.0 V-60 min d. SEM image of the NiCoCrMn-2.0V-60 min.

Figure 3 shows the XPS core level spectra of O1s from FeNiCoMn and NiCoCrMn samples.

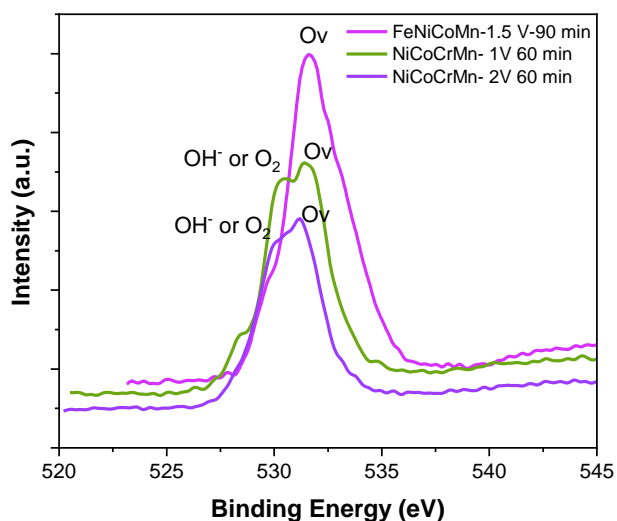


Figure 3 XPS core level spectra of O1s.

Here, it is clearly seen that the peak related to the oxygen vacancy formation at ~531 eV becomes more dominant in the spectra of FeNiCoMn deposited at -1.5 V during 90 min. (Lokcu, Toparli and Anik, 2020) Nickel, Cobalt, Chromium, Manganese, and Iron were electrodeposited to bare nickel foam with various voltages and time. Firstly, to investigate the OER performance of the electrocatalysts, linear sweep voltammetry (LSV) in 0.1 M potassium hydroxide (KOH) electrolyte was investigated with rotating disc electrode (RDE). During the experiments, Ag/AgCl reference electrode was used, then all the potential values were converted according to the reversible hydrogen electrode (RHE). After that, at 100 mA.cm⁻² current density, the overpotential values, which shows us the electrocatalytic activity of the OER catalysts according to the literature, were measured for all the electrocatalysts. The overpotential values for cobalt, chromium, and manganese electrodeposited samples (NiCoCrMn) which, -1.0 V for 1 hour and -2.0 V for 1 hour were 725, and, 446 mV, respectively as shown in Figure 4.

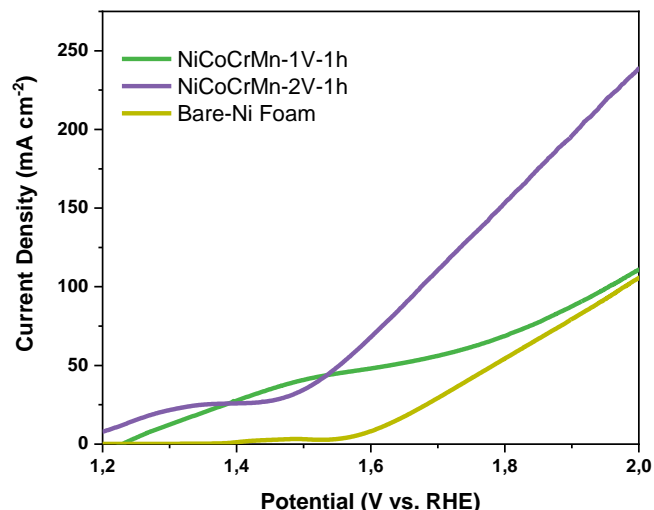


Figure 4. OER activity curves of NiCoCrMn on Nickel foam in 0.1 M KOH electrolyte.

Hence, NiCoCrMn produced with -2.0 V with 1 hour has the lowest overpotential. As compared to bare nickel foam with an overpotential of 750 mV, OER activity of electrodeposited sample were enhanced as shown in Figure 4. Moreover, when iron deposited on the nickel foam instead of chromium (FeNiCoMn), the overpotential value becomes 151 mV as shown on Figure 5. Hence, it can be concluded that iron increases the electrocatalytic OER activity significantly.

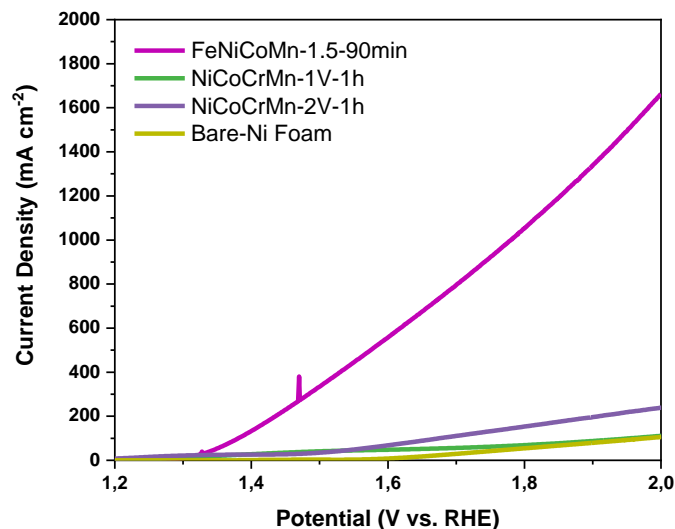


Figure 5. OER activity curves of FeNiCoMn and NiCoCrMn on Nickel foam in 0.1 M KOH electrolyte.

Figure 6 shows the Tafel plots which were obtained to understand the reaction kinetics of the electrocatalysts.

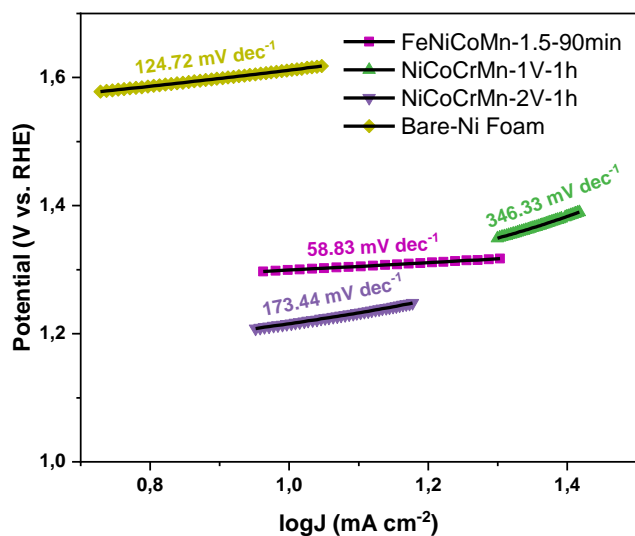


Figure 6. Tafel analysis of FeNiCoMn and NiCoCrMn on Nickel foam in 0.1 M KOH electrolyte.

Tafel slopes of NiCoCrMn produced under -1.0 V for 1 hour and -2.0 V for 1 hour were 346.33, and 173.44 $\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$, respectively. Hence, NiCoCrMn produced with -2.0 V for 1 hour has the lowest Tafel slope which means that reaction kinetic is faster than the other samples. Hence, when cobalt, chromium, and manganese electrodeposited on the nickel foam at -2.0 V for 1 hour, OER activity is better than the other samples that are produced with various voltage and time. Additionally, iron deposited on nickel foam shows the lowest Tafel slope among the other electrocatalysts with a 58.83 $\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$. Hence, deposition of iron instead of chromium promotes the reaction kinetics. As a result, FeNiCoMn produced at -1.5 V for 90 minutes has the best electrocatalytic OER activity with low overpotential and faster reaction kinetic among the other electrodeposited electrocatalysts. Since, iron deposited sample has the highest OER electrocatalytic activity, to understand its bifunctional activity the electrocatalytic oxygen reduction reaction (ORR) activity was measured with RDE in O_2 saturated 0.1 M KOH solution. Then, ORR activity of FeNiCoMn was compared with ORR activity of bare nickel foam as shown in Figure 7. At -1 mA/cm^2 current density, the potential was 1.04 V for FeNiCoMn. Hence, FeNiCoMn has better electrocatalytic ORR activity than bare nickel foam.

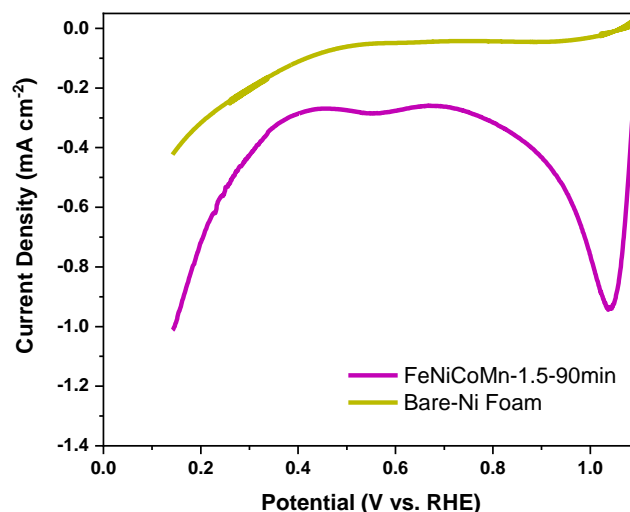
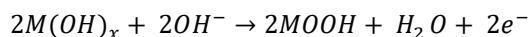
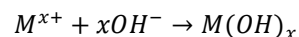
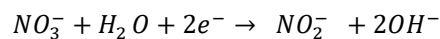


Figure 7. ORR activity curves of FeCoCrMn on Nickel foam in 0.1 M KOH electrolyte.

5. Discussion

Electrodeposition is a facile and fast technique of fabricating self-assembled oxyhydroxide electrocatalysts than the traditional wet chemistry methods. Therefore, electrodeposition technique holds a great potential to fabricate electrocatalysts directly on a gas diffusion layer. The reduction reaction of NO_3^- is driven by the electrodeposition with constant voltage, as shown in Eqs.



The production of the nanosheets was successful, according to SEM pictures. The SEM pictures of the synthetic high-entropy FeCoNiMnOOH/NF and NiCoCrMnOOH/NF at various magnifications are shown in Figure 2. The FeCoNiMnOOH and NiCoCrMnOOH nanosheets created small nano-nests and grew uniformly on the Nickel foam surface, which improved the capacity for gas spilling. These nanosheets also form a protective shell around one another with various angles and morphologies, increasing their surface area and exposing numerous active sites. Surface area and active sites were also increased by the twisted and uneven nanosheets. The OER performance benefits from the microstructure and morphology. When comparing the deposited surfaces, FeCoNiMnOOH with 90 min and -1.5 V shows the best deposited performance so that the bare Nickel foam under the deposit is not even seen. However, as the time and applied voltage decreases, the amount of the deposited material decreases accordingly.

Also, it can be observed that, when the formula is changed by replacing Fe with Cr, the deposited amount is decreased. The evidence of the deposited material are the crack formations and the bubble-like structure on

the foam structure. Table 1 compares the state-of-the-art electrocatalysts performance with this work.

Table 1. Literature Review Of State-Of-The-Art Electrocatalysts And Comparison With This Work

Electrocatalysts	Overpotential for OER (mV)	Overpotential for ORR (mV)
RuO ₂ Erdil et al., 2022	0.82	1.62
IrO ₂ Erdil et al., 2022	0.38	1.57
NiCoCrMn This work	0.44	-
FeNiCoMn This work	0.15	1.04

According to the LSV results, FeCoNiMnOOH/NF (90 min, -1.5 V) shows the highest electrocatalytic activity with the lowest overpotential. NiCoCrMnOOH/NF (60 min, -1.0 V) shows the lowest activity with the highest overpotential. Moreover, XPS O1s core level spectra of HEO-OH indicates that oxygen vacancy peak dominates the O1s core level spectra of FeCoNiMnOOH. Therefore, the higher OER activity of FeCoNiMnOOH can be associated with the defective structure, which is well aligned with the literature.

6. Conclusion

FeCoNiMnOOH and NiCoCrMnOOH were synthesized through one-step electrodeposition technique directly on a Nickel foam. Electrochemical OER test results represent that FeCoNiMnOOH has superior OER performance in 1 M KOH than the state-of-art electrocatalysts. The high OER performance of FeCoNiMnOOH is associated with moderate surface surface coverage and defective structure. Therefore, electrodeposition technique is foreseen to be facile approach for direct fabrication of HEHs on a substrate which also reduces contact problem and enhances charge transfer. Overall, synthesizing electrocatalyst via electrodeposition technique holds a great potential for industrial applications.

Acknowledgments

The author acknowledges the financial support of TUBITAK under Project Number: 118C330.

Author Contributions

The author (Cigdem Toparli) is responsible for conceptualization, methodology, formal analysis, investigation and discussion of results, writing and reviewing of the manuscript.

Conflict of Interest

The author (Cigdem Toparli) has no conflicts of interest to disclose. This study complies with scientific research and publication ethics and principles.

References

- Bayraktar, O., Lökçü, E., Ozgur, C., Erdil, T. & Toparli, C. (2022). Effect of synthesis environment on the electrochemical properties of (FeMnCrCoZn)₃₀₄ high-entropy oxides for Li-ion batteries. *International Journal of Energy Research* 46, 22124–22133. doi: <https://doi.org/10.1002/er.8749>
- Dai, W., Lu, T. & Pan, Y. (2019). Novel and promising electrocatalyst for oxygen evolution reaction based on MnFeCoNi high entropy alloy. *Journal of Power Sources* 430, 104-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.05.030>
- Erdil, E., Lökçü, E., Yildiz I., Okuyucu, C., Kalay, Y. E., Toparli, C. (2022). Facile Synthesis and Origin of Enhanced Electrochemical Oxygen Evolution Reaction Performance of 2H-Hexagonal Ba₂CoMnO_{6-δ} as a New Member in Double Perovskite Oxides. *ACS Omega* 7(48), 44147–44155. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05627>
- Liu, P. F., Yin, H., Fu, H.Q., Zu, M.Y., Yang, H.G., Zhao, H. (2020). Activation strategies of water-splitting electrocatalysts. *Journal of Materials Chemistry A* 8, 10096-10129. doi: <https://doi.org/10.1039/D0TA01680B>
- Lokcu, E. Toparli, C. & Anik, M. (2020). Electrochemical Performance of (MgCoNiZn)_{1-x}Li_xO High-Entropy Oxides in Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials Interfaces* 12 (21), 23860–23866. doi: <https://doi.org/10.1021/acscami.0c03562>
- Rost, C. M., Sachet, E., Borman, T., Moballeghe, A., Dickey, E. C., Hou, ... Maria, J. P. (2015). Entropy-Stabilized Oxides. *Nature Communications* 6 (1), 8485. doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms9485>
- Trotochaud, L., Young, S. L., Ranney, J. K., & Boettcher, S. W. (2014). Nickel–Iron Oxyhydroxide Oxygen-Evolution Electrocatalysts: The Role of Intentional and Incidental Iron Incorporation. *Journal of American Chemical Society* 136 (18), 6744–6753. doi: <https://doi.org/10.1021/ja502379c>
- Wang, T., Chen, H., Yang, Z., Liang, J. & Dai, S. (2020). High-Entropy Perovskite Fluorides: A New Platform for Oxygen Evolution Catalysis. *Journal of American Chemical Society* 142 (10), 4550–4554. doi: <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12377>
- Wang, Q., Li, J., Li, Y., Shao, G., Jia, Z., Shen, B. (2022). Non-Noble Metal-Based Amorphous High-Entropy Oxides as Efficient and Reliable Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction. *Nano Research* 15, 8751–8759. doi: <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4179-8>

Zhou, C., Chen, X., Liu, S., Han, Y., Meng, H., Jiang, Q., ...Zhang, R. (2022). Superdurable Bifunctional Oxygen Electrocatalyst for High-Performance Zinc-Air Batteries. *Journal of American Chemical Society* 144 (6), 2694-2704. doi: <https://doi.org/10.1021/jacs.1c11675>

YATAYA YAKIN KALIN KÖMÜR DAMARLARINDA DAMAR EĞİMİNİN UZUNAYAK YÖNTEM VERİMLİLİĞİNE ETKİSİNİN FİZİKSEL MODEL İLE ARAŞTIRILMASI

Arif ÇELİK^{1*}

¹ Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Çan Linyitleri İşletmesi, Çanakkale
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-2914-3369>

Anahtar Kelimeler	Öz
Uzunayak Fiziksel model Damar eğimi Kaya karışım oranı Tavan kömürü akma sınırları	<i>Göçertmeli uzunayak yöntemi geleneksel yöntemle ek olarak tavan kömürü göçertme işleminin yapıldığı etkili bir yeraltı üretim yöntemidir. Yöntem kömür damarının eğiminde ya da yatay kalınlığında ayak oluşturulmak suretiyle iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bu çalışmada damarın eğiminde ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yöntemi araştırılmıştır. Yapılan araştırmada, yataya yakın kalın kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin yöntem verimliliğine etkisi çalışma kapsamında geliştirilen 2 boyutlu fiziksel bir model ile incelenmiştir. Fiziksel model çalışmaları sonucunda, çekilen tavan kömürü miktarı ile damar eğimi arasında doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir. Buna karşın kaya karışım oranının damar eğimindeki artışa bağlı olarak belirli bir noktaya kadar arttığı sonrasında ise azalmaya başladığı belirlenmiştir. Ayrıca tavan kömürü akma sınırlarının da damar eğimindeki artışa bağlı olarak ayak ilerleme yönüne doğru yöneldiği gözlemlenmiştir.</i>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SEAM INCLINATION ON LONGWALL METHOD WITH A PHYSICAL MODEL IN THICK COAL SEAMS CLOSE TO HORIZONTAL

Keywords	Abstract
Longwall Physical model Seam slope Rock mixture ratio Top coal flow boundaries	<i>The longwall top coal caving is an effective underground production method in which the top coal caving process is in addition to the traditional method. The method can be applied in two different ways by forming a face in the inclination of the coal seam or in the horizontal thickness. In this study, the longwall top coal caving method, which is applied by creating a face on the slope of the seam, was investigated. In the research, the effect of the seam slope on the method efficiency in the longwall top coal caving method applied in thick coal seams close to horizontal was investigated with a 2D physical model developed within the scope of the study. As a result of the physical model studies, a linear relationship was determined between the amount of top coal drawn and the inclination of the seam. On the other hand, it was determined that the rock mixture ratio increased up to a certain point depending on the increase in seam slope, and then started to decrease. In addition, it has been observed that the top coal flow boundaries are also oriented towards the face progression direction depending on the increase in the seam slope.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 13.03.2023

: 20.07.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 13.03.2023

: 20.07.2023

* Sorumlu yazar: arif.Rester@hotmail.com
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1264290>

1. Giriş

Küresel ısınma ve iklim krizi problemlerinden kaynaklı olarak dünya çapında kullanımı azaltılmaya çalışılan kömürün üretimi, Rusya-Ukrayna savaşının neden olduğu enerji krizinden dolayı 2022 yılında bir önceki yıla kıyasla %5,70 oranında artarak 8,17 milyar tona ulaşmıştır (BP, 2022). Günümüzde yaşanan enerji krizi

kömürün önemini dünya çapında bir kez daha gündeme getirmiş ve kömüre dayalı enerji üretimindeki stratejilerin/politikaların yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Önemli bir enerji kaynağı olan kömürün üretimi açık ocak ve yeraltı işletmecilik yöntemleri ile gerçekleştirilmekte olup, günümüzde açık ocak



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

işletmeciliği ile üretilen kömür rezervlerindeki azalmaya bağlı olarak yeraltı işletmeciliği her geçen gün önem kazanmaktadır (Çelik, 2022).

Kömür üretiminin büyük bir çoğunluğu kalın kömür damarlarından (Xu, 2004; Quang, 2010; Singh, 2011; Çelik, 2022) sağlanmakta olup, bu damarların üretiminde oda-topuk, hidrolik kazı ve uzunayak yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Tian, Chen ve Liu, 1979; Ünver, 1997; Garcia, Camara ve Torres, 2019; Çelik, 2022). Bu yöntemler arasında uzunayak yöntemlerinden biri olan göçertmeli uzunayak yöntemi dünya genelinde en yaygın kullanılan yeraltı üretim yöntemidir (Schneiderman, 1980; Tien 1998; Öğretmen, 2003; Klishin ve Klishin, 2010; Tarakki, Quamruzzaman, Ahmed, Rahman, Alam ve Rayhan, 2016; Guo, Feng, Wang, Qi, Zhang, ve Yan 2018;

Mesutoğlu, 2019; Shahani, Wan, Zheng, Guichen, Liu, Siddiqui ve Bin, 2020; Çelik ve Özçelik, 2022).

Göçertmeli uzunayak yöntemi geleneksel uzunayak yöntemine ek olarak tavan kömürü göçertme işleminin yapıldığı etkili bir yeraltı üretim yöntemidir. Yöntemde kömür damarının alt kısmı (kesme yüksekliği) geleneksel uzunayak yönteminde olduğu gibi ayak içerisinde kazılarak üretilmekte iken kömür damarının tavan kısmı (göçertme yüksekliği) ya madencilik faaliyetlerinin neden olduğu tabaka basınçlarından dolayı ya da ön gevşetme patlatması yapılarak kırılmakta ve kırılan tavan kömürü genellikle ayak içerisindeki tahkimat ünitelerinin arkasından çekilmektedir (Çelik, 2022). Bu yöntemdeki genel madencilik operasyonları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Göçertmeli Uzunayak Yöntemi

Göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömürünün ayak içerisinden göçertilerek üretimi, kömür üretim maliyetini önemli ölçüde azalttığından dolayı yöntemin dünya çapında kullanımı hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Ayrıca, yöntemin popülerliği akademik alanda da ses getirmiş olup, günümüzde yeraltı kömür madenciliği ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunu göçertmeli uzunayak yöntemi araştırmaları oluşturmaktadır. (Zhang, Zhao ve Gao, 2011; Guo, Ma, Wang, ve Wang, 2017; Zhu, Chen, Du, Zhang, ve Zhou, 2018; Song ve Konietzky, 2019; Song, Konietzky ve Herbst, 2020; Çelik ve Özçelik 2021; Wang, Yang, Wei, Zhang ve Song, 2021)

Göçertmeli uzunayak yöntemi her ne kadar dünya çapında yaygın bir şekilde kullanılan yeraltı üretim yöntemi olsa da yöntemin kullanıldığı kömür damarlarının kalınlığı ve eğimi ile ilgili literatürde herkesçe kabul görmüş net bir sınıflama sistemi bulunmaktadır.

Singh (2004), kömür damarı kalınlıklarının ülkeden ülkeye değiştiğini ortaya koyduğu çalışmasında bazı ülkelerin kalın kömür damarı alt sınırlarını Tablo 1'de özetlemiştir.

Tablo 1. Kalın Kömür Damarının Alt Sınırı (Singh, 2004)

Ülke	Kalın kömür damarının alt sınırı, (m)	Ülke	Kalın kömür damarının alt sınırı, (m)
Türkiye	3,5	Avustralya	4,0
Çin	3,5	ABD	3,0
Kanada	4,0	Japonya	2,25
Fransa	4,0	Polonya	3,3
Hindistan	4,8	Macaristan	3,5

Kömür damarı kalınlığında olduğu gibi damar eğiminde de durum aynıdır. Dünya çapında bazı araştırmacılar tarafından önerilen kömür damarının eğim sınıflaması ile ilgili yapılan çalışmalar Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Kömür Damarının Eğim Sınıflaması

Düz (°)	Orta (°)	Eğimli (°)	Dik eğimli (°)	Referans
< 25	-	25 - 45	> 45	Shevyakov, 1958
< 6	7 - 17	18 - 45	> 46	Akçın, 1986
< 20	-	20 - 55	> 55	Nicholas, 1993
< 15	15 - 35	35 - 55	> 55	Quang, 2010
< 5	5 - 25	25 - 45	> 45	Nieto, 2011
< 8	8 - 25	25 - 45	> 45	Liu, Wang, Liu, Wang, Guo ve Sun, 2014

Tablo 1 ve 2'den de görüleceği üzere dünya çapında kömür damarının eğim ve kalınlığı ile ilgili net bir sınıflama bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada kömür damarının eğimi ile ilgili yataya yakın terimi kullanılmış ve bu terim 20 dereceden daha düşük damarlar olarak ifade edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yöntemi damar eğimine bağlı olarak uygulamada farklılık gösterebilmektedir. Genellikle dik eğimli kalın kömür damarlarında damarın yatay kalınlığında düz ayaklar oluşturulmakta iken yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca eğimli ayaklar oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin yöntem verimliliğine etkisi fiziksel model ile araştırılmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Göçermeli uzunayak yönteminde karşılaşılan problemlerin çözümünde yeraltı üretim koşullarının belirli ölçeklerde simüle edildiği sayısal ve fiziksel modeller günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yaşılı ve Ünver, 2005; Zhang vd., 2011; Zhang, Liu ve Pei, 2015; Kang, Lou, Gao, Yanga ve Lia, 2018; Zhu vd., 2018; Song ve Konietzky, 2019; Wang, Wei ve Zhang, 2019a; Kang, Yang, Zhan ve Li, 2020; Zhang, Yuan, Wang, Li, Li ve Zhang 2020; Çelik ve Özçelik 2023). Bu çalışmada özellikle dünya kömür üretiminin büyük bir çoğunluğunu tek başına karşılayan Çin'de yaygın bir şekilde kullanılan fiziksel modelleme çalışmaları tercih edilmiştir (Huang, Liu, Wu ve Wang, 2006; Wang, 2008; Wang, Yang, Li, Wei ve Liui 2014; Zhu vd., 2018).

2.1. Fiziksel Modelleme

Fiziksel modelleme çalışmalarında kullanılan fiziksel modeller araştırılacak konuya uygun olarak geliştirilen laboratuvar test cihazlarıdır. Bu cihazların gelişiminde ölçek ve boyut faktörü son derece önemli iki parametre olup, alt bölümlerde kısaca açıklanmıştır.

2.1.1. Ölçek Faktörü

Göçertmeli uzunayak yönteminde kullanılan fiziksel modeller ölçek bakımından değerlendirildiğinde genel olarak 2 grup oluşmaktadır. Birinci gruptaki fiziksel

modellerin ölçeği genel olarak 1/100'den daha küçüktür. Bu modellerde göçertmeli uzunayak yöntemindeki tasman ve tabaka hareketleri ile üretim bölgesi basınç dağılımları araştırılmaktadır (Wang, Zhao, Chugh ve Wang, 2017; Li, Wang ve Zhang, 2017; Kang vd., 2018; Yang, Ma, Ji, Kang ve Guo, 2018; Yang, Guo ve Tan., 2019; Lang, Wu, Wu, Lin ve Luo, 2021). İkinci gruptaki fiziksel modellerin ölçeği ise genel olarak 1/40'dan daha büyüktür. Bu tip modellerde, tavan kömürü çekim mekanizması, çekim gövdesi, çekim sınırları, tavan kömürü kaybı, kömür seyrelmesi gibi konular araştırılmaktadır (Huang, Liu, Niu ve Wang, 2008; Wang, 2008; Liu, Huang ve Wu, 2009; Wang vd., 2014; Wang ve Song, 2015; Zhu vd., 2018; Liang, Li, Li, Wang, Chen, Sun ve Yang, 2019; Çelik ve Özçelik, 2023)

2.1.2. Boyut Faktörü

Fiziksel model test cihazları 2 ve 3 boyutlu olarak geliştirilebilmektedir. Burada, tasman ve tabaka hareketleri gibi büyük çaplı konuların araştırıldığı fiziksel modeller 2 boyutlu olarak geliştirilmekte (Wang, Zhao, Chugh ve Wang, 2017; Yang vd., 2019; Lang vd., 2021) iken tavan kömürü göçme mekanizması, tavan kömürü kaybı ve kömür seyrelmesi gibi üretim bölgesi problemleri 2 ve 3 boyutlu fiziksel modeller ile araştırılmaktadır (Zhang vd., 2011; Zhu vd., 2018; Wang vd., 2019a; Çelik ve Özçelik 2023).

2.2. Fiziksel Model Çalışmaları

Fiziksel modeller, birçok madencilik probleminin araştırılmasında yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, bu bölümde yalnızca çalışmada kapsamında değerlendirilen probleme benzer problemlerin araştırılmasında kullanılan fiziksel modellere ilişkin örnekler sunulmuştur.

Özırat, Şimşir, Gönen ve Pamukçu (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde yürüyen tahkimat penceresinin kömür kaybına etkisi fiziksel bir model ile araştırılmıştır. Çalışma sonucunda tahkimat pencere alanının büyütülmesi doğrultusunda kömür kaybında %30'luk bir azalma tespit edilmiştir.

Zhang ve diğerleri (2011), geliştirdikleri 2 boyutlu fiziksel model ile yatay kömür damarlarında ayak ilerleme miktarının göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında ayak ilerleme miktarındaki artışın kömür kaybını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir.

Zhu ve diğerleri (2018) yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde stokastik ortam teorisinin uygulanabilirliğini geliştirdikleri fiziksel model ile test etmişlerdir. Çalışma sonucunda teorisinin yumuşak kömür damarlarındaki göçme mekanizmasının araştırılmasında uygulanabileceği değerlendirilmiştir.

Song ve Konietzky (2019) yatay kömür damarlarındaki göçme mekanizmasını sayısal modelleme ile araştırdıkları çalışmalarında sayısal modelleme sonuçlarını fiziksel modelleme sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda çekim turlarından çekilen malzemelerin çekim turu bazında dağılımlarının fiziksel model ve sayısal model çalışmalarında örtüştüğü tespit edilmiştir.

Wang, Wei ve Zhang (2019b) eğimli kömür damarlarında çekim gövdesinin şeklini teorik olarak tanımlamaya çalıştıkları çalışmalarında fiziksel modellemeden yararlanmışlardır.

Wang ve diğerleri (2021), yatay kömür damarlarında uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde tavan kömür geri kazanım oranı ile tahkimat ünitesi çekim sırası arasındaki ilişkiyi fiziksel bir model ile incelemişlerdir. Çalışmalarında tahkimat ünitelerinin aralıklı çekimlerinin tavan kömür geri kazanım oranını arttırdığı tespit edilmiştir.

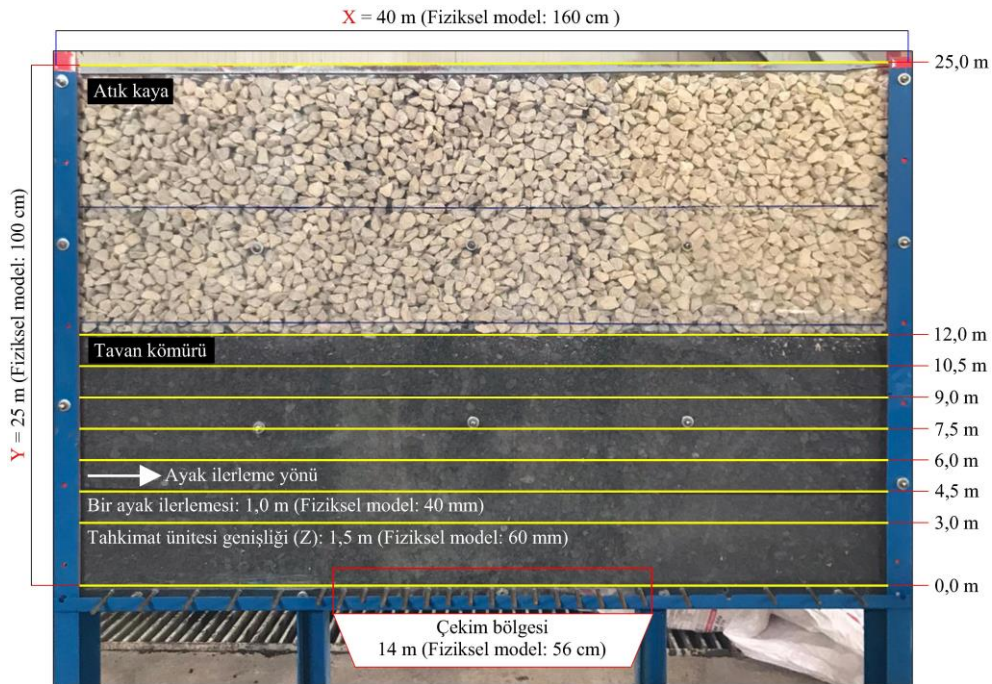
Çelik ve Özçelik (2022), dik eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğini, geliştirdikleri fiziksel bir model ile

araştırmışlardır. Çalışmalarında damar eğimindeki artışın kömür kaybını önemli ölçüde azalttığı buna karşın göçertme yüksekliğindeki artışın kömür kaybını önemli derecede arttırdığı tespit edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yöntemi ve fiziksel model çalışmaları değerlendirildiğinde, yataya yakın kömür damarlarında kömür damarı eğiminin yöntem verimliliği üzerindeki etkisine dair bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmada sırasıyla 1°, 8°, 14° ve 20° damar eğimlerinde göçertmeli uzunayak yöntem uygulaması fiziksel bir model ile test edilmiş ve test sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak damar eğiminin yöntem verimliliği üzerindeki etkisine dair değerlendirmeler yapılmıştır.

3. Yöntem

Çalışma kapsamında araştırma yöntemi olarak tercih edilen fiziksel model araştırma konusuna uygun olarak 2 boyutlu ve 1/25 ölçeğinde geliştirilmiştir. Şekil 2'de geliştirilen fiziksel modele ait görsel verilmiştir.



Şekil 2. Fiziksel Modelin Atölyede Oluşturulmuş Test Öncesi Görünümü

Fiziksel model çalışmalarında ölçek ve boyut faktörü kadar önemli diğer bir faktörde modelde kullanılacak malzemelerdir. Çalışmada, göçme mekanizmasına ilişkin problemler incelendiğinden dolayı fiziksel modelde yerindeki koşulları yansıtabilecek ölçüde malzemelerin kullanımı değerlendirilmiştir. Göçertme işleminde tavan kömürü, ya tabaka basınçları altında kendiliğinden, ya da gevşetme patlatması ile akmaya

uygun hale gelmektedir/getirilmiştir. Bu nedenle fiziksel modelde de yerindeki koşullara uygun olarak akmaya uygun kırılmış malzemeler kullanılmıştır. Kırılmış malzemelerin parça boyut dağılımı da göçme mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Kvapil, 1992). Bu nedenle malzeme seçimi aşamasında fiziksel modelde kullanılacak kömür malzemesi için 0-5, 5-12 ve 12-20 mm parça boyut dağılımları ve kireçtaşı

malzemesi için 12-20, 20-25 ve 20-30 mm parça boyut dağılımları ön teste tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen testlerde malzemelerin akma açısı, akma sürekliliği ve çekim bölgesindeki tıkanma durumları dikkate alınmıştır. Arazi tecrübelerine dayalı olarak; tavan kömürünün akma açısının 65-80° arasında olması, tavan kömürü çekim işleminde çekilen kömür ve atık kaya karışımı malzemenin akışının kısmen kesikli olması ve birlikte çekilen malzemelerin çekim bölgesini ara ara müdahale edilerek açılabilir şekilde tıkanması gerekmektedir. Bu bilgiler ışığında gerçekleştirilen ön

testler sonucunda uygun tavan kömürü çekim mekanizması 12-20 mm parça boyut dağılımına sahip kömür malzemesi ile 20-25 mm parça boyut dağılımına sahip kireçtaşının malzemesinin birlikte kullanımı ile sağlanmıştır. Test malzemelerine ilişkin görseller Şekil 3'de verilmiştir.

Fiziksel modelde kullanılan kömürün, yoğunluğu 1,45 t/m³ (yığın yoğunluğu 0,741 t/m³) iken kireçtaşının yoğunluğu 2,72 t/m³ (yığın yoğunluğu 1,533 t/m³)'dür.



Şekil 3. Fiziksel Model Test Malzemeleri

4. Laboratuvar Testleri

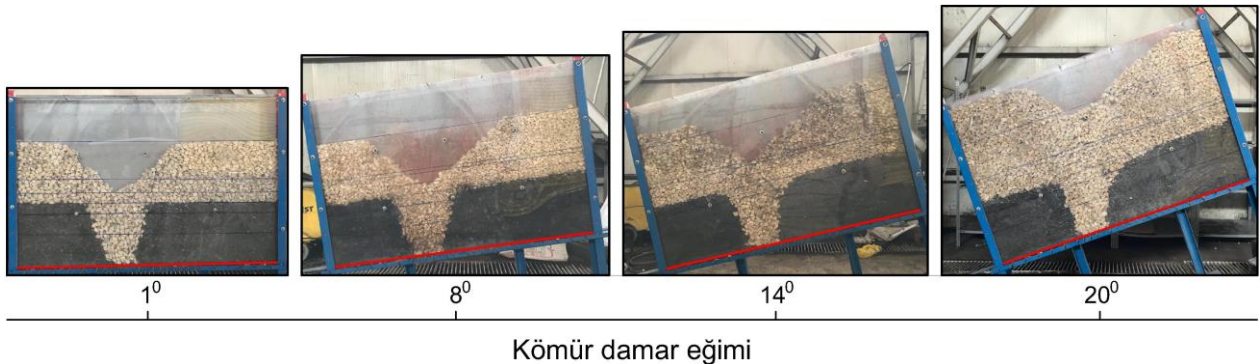
Yataya yakın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğini araştırmak için gerçekleştirilen fiziksel model testleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Fiziksel Model Test Verileri

Laboratuvar testleri					Tekrar testleri				
Test no	D _E (°)	G _Y (m)	T _Y (m)	C _T	Test no	D _E (°)	G _Y (m)	T _Y (m)	C _T
1	1,0	9,0	9,0	14	1a	1,0	9,0	9,0	14
2	8,0	9,0	9,0	14	2a	8,0	9,0	9,0	14
3	14,0	9,0	11,2	14	3a	14,0	9,0	11,2	14
4	20,0	9,0	14,3	14	4a	20,0	9,0	14,3	14

Tablo 3'de damar eğimi D_E, göçertme yüksekliği G_Y, tavan taşı yüksekliği T_Y ve çekim turu C_T olarak ifade edilmiştir. Fiziksel model testlerinde tavan kömürü çekim işleminden kaynaklı oluşabilecek hatalarının test sonuçları üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak için tekrar testleri gerçekleştirilmiştir. Benzer parametreler ile gerçekleştirilen tekrar testlerinde test sonuçlarının laboratuvar test sonuçlarına kıyasla, çekilen kömür miktarında %5 ve çekilen atık kaya miktarında %10'dan fazla farklılık göstermesi durumunda testin tekrarlanması değerlendirilmiştir.

Fiziksel modelde yürütülen testlere ait test cihazının görselleri Şekil 4'de verilmiştir.



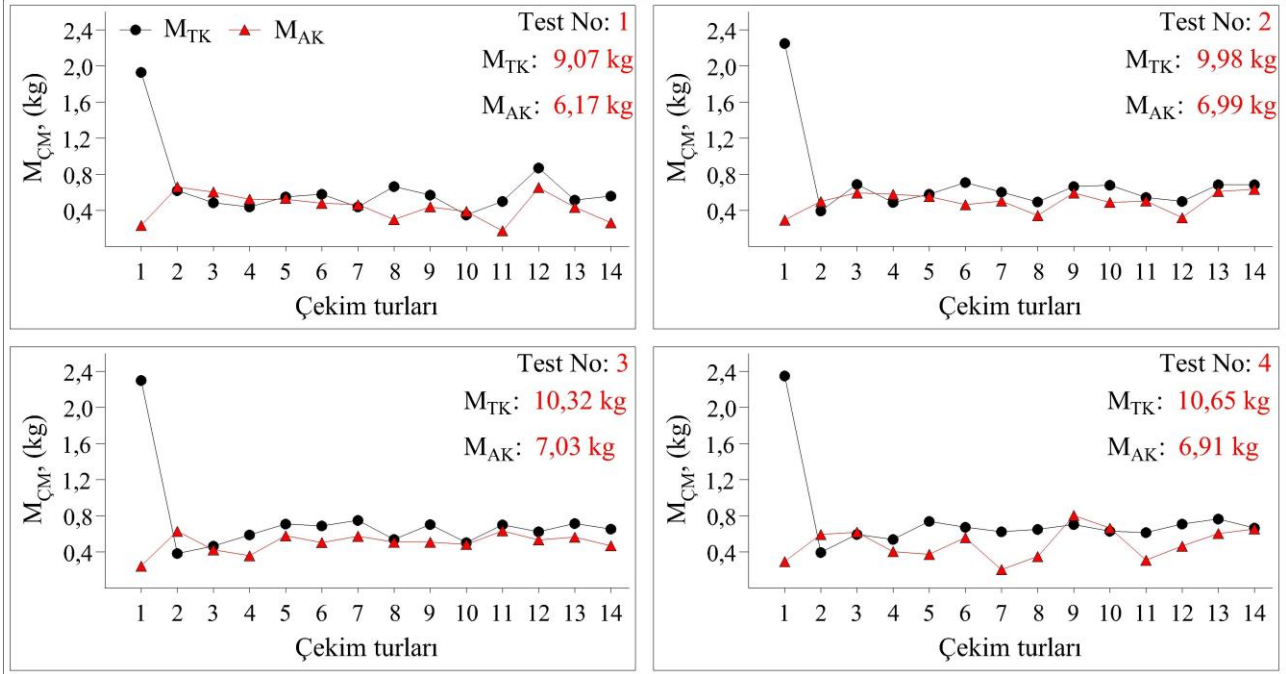
Kömür damar eğimi

Şekil 4. Fiziksel Model Testlerine Ait Test Cihazı Görselleri

4.1. Çekim Turlarının Değerlendirilmesi

Fiziksel modelde gerçekleştirilen 4 testin her bir çekim turundan çekilen malzeme miktarları Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 5'de fiziksel model testlerinden

çekilen malzeme miktarı $M_{ÇM}$, çekilen tavan kömürü miktarı M_{TK} ve çekilen atık kaya miktarı M_{AK} olarak ifade edilmiştir.



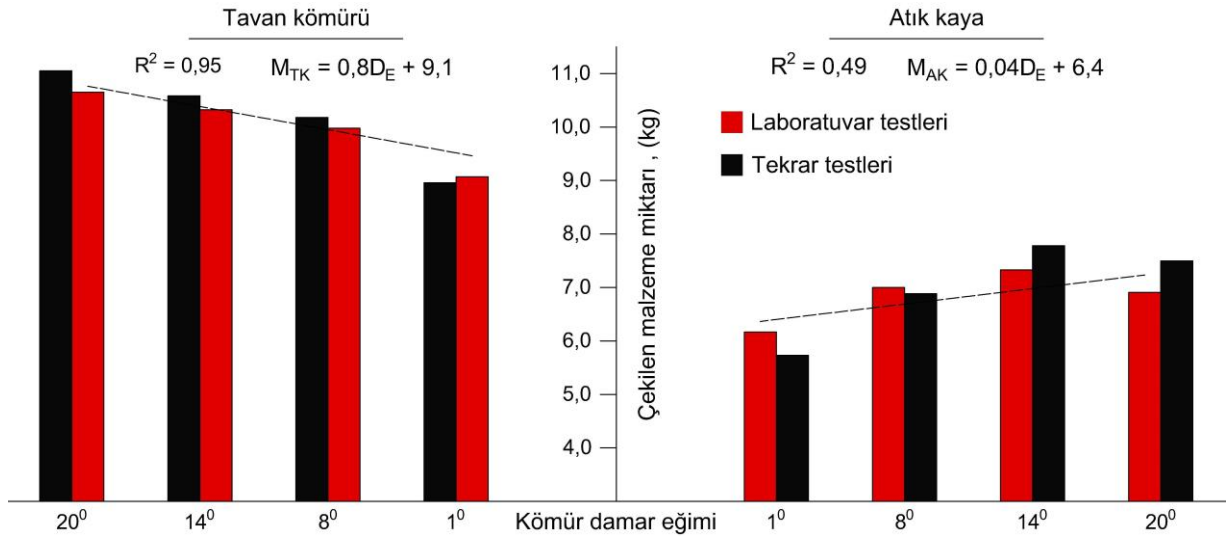
Şekil 5. Çekim Turu Sonuçları

Tavan kömürü çekim işleminin ilk çekim turunda, tavan kömürü ve tavan taşı (atık kaya) arasındaki akma sınırları oluşmakta ve sonraki çekimler bu akma sınırları dahilinde gerçekleşmektedir. Bu durum, Şekil 5'den net bir şekilde gözlemlenebilir. Ayrıca fiziksel model testlerinin ilk çekim turundan çekilen tavan kömürü miktarı 1,93 – 2,35 kg arasında değişmekte iken

sonraki çekimlerden çekilen tavan kömürü miktarı 0,35 – 0,87 kg arasında değişmektedir.

4.2. Çekilen Malzeme Miktarlarının Değerlendirilmesi

Fiziksel model testlerinden çekilen tavan kömürü ve atık kaya miktarları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Damar Eğimi ve Çekilen Malzeme Miktarları Arasındaki İlişki

Şekil 6'dan görüleceği üzere, damar eğimindeki artışa bağlı olarak çekilen tavan kömürü miktarı yüksek bir korelasyon ilişkisi ($R^2 = 0,95$) ile doğrusal olarak artmaktadır. Buna karşın çekilen atık kaya miktarı, 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen testlerde damar eğimindeki artışa bağlı olarak artmakta iken 20° damar eğiminde gerçekleştirilen testlerde bir önceki teste kıyasla azalmaktadır. Çekilen kömür miktarındaki anlamlı ilişki ile çekilen atık kaya miktarındaki anlamsız ilişkinin temel nedeni tavan kömür çekim sınırları ve damar eğimi arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Bu nedenle buradaki ilişkilerin değerlendirilmesi, tavan kömürü akma sınırlarının değerlendirildiği Bölüm 4.5'de yapılmıştır.

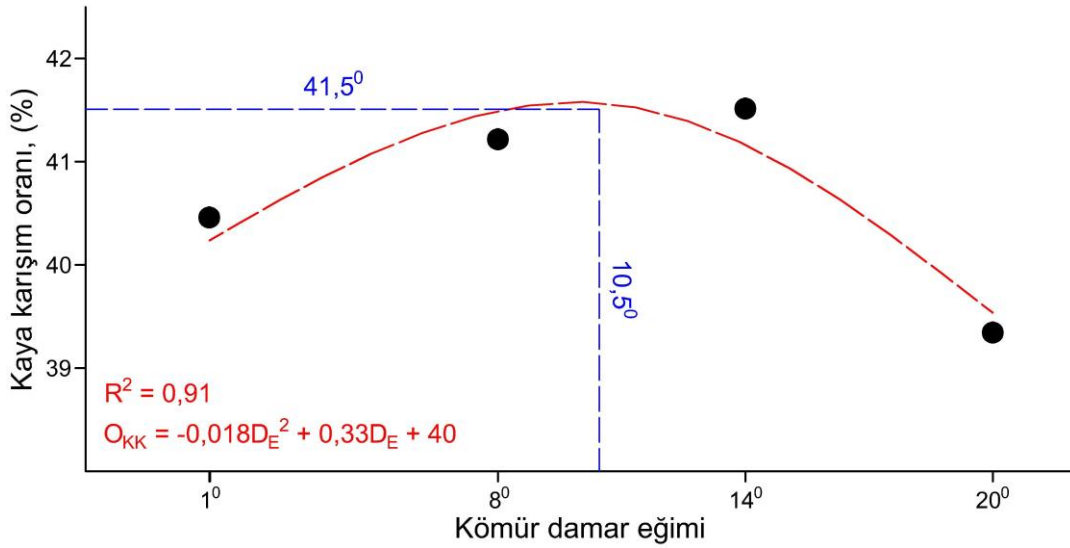
Laboratuvar testlerinin güvenilirliği açısından gerçekleştirilen tekrar testlerinin test sonuçları ile

laboratuvar test sonuçları arasında; çekilen tavan kömürü miktarında en fazla %3,76 ve çekilen atık kaya miktarında en fazla %8,54 farklılık tespit edilmiştir. Bu değerler kabul edilebilir değer aralıkları içerisinde kaldığından dolayı çalışmada herhangi bir fiziksel model testi iptal edilmemiştir.

4.3. Kaya karışım oranının değerlendirilmesi

Kaya karışım oranı (O_{KK}) Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmış olup, her bir testten belirlenen kaya karışım oranları Şekil 7'de gösterilmiştir.

$$O_{KK} = 100 \times \frac{M_{AK}}{M_{TK} + M_{AK}} \quad (1)$$



Şekil 7. Kaya Karışım Oranı ve Damar Eğimi Arasındaki İlişki

Şekil 7'den görüleceği üzere, kömür damar eğiminin yataydan $10,5^\circ$ 'ye kadar yükseltilmesi sonucunda damar eğimindeki artış ile kaya karışım oranının arttığı, $10,5^\circ$ kömür damar eğiminden sonra ise damar eğimindeki artışa bağlı olarak kaya karışım oranının azaldığı tespit edilmiştir. Damar eğiminin $10,5^\circ$ olduğu durumda en yüksek kaya karışım oranı %41,5 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük kaya karışım oranı 20° damar eğiminde %39,3 olarak tespit edilmiştir.

Göçertmeli uzunayak yönteminde, herhangi bir sebeple üretim bölgesinin genişletilmesi doğrudan çekilen kömür miktarının ve dolaylı olarak da çekilen tavan taşı miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen testlerde beklenildiği gibi sonuçlanmış ve damar eğimindeki artışa bağlı olarak meydana gelen tavan kömürü akma sınırlarındaki pozitif değişim, üretim bölgesinin genişlemesini sağlamakla birlikte çekilen tavan kömürü ve çekilen tavan taşı miktarını arttırmıştır. Buna karşın

20° damar eğiminde gerçekleştirilen testte çekilen tavan kömürü miktarı beklenildiği gibi artmasına rağmen çekilen tavan taşı miktarı bir önceki teste kıyasla azalmıştır. Fiziksel model testlerinden gerçekleştirilen gözlemlerde, 20° damar eğiminde gerçekleştirilen tavan kömürü çekim sürecinde, çekilen tavan taşlarının önemli bir kısmının çekim bölgesi merkezinden göçük bölgesine doğru yöneldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak çekim mekanizmasında meydana gelen pozitif yönelim hem çekilen tavan taşı miktarının hem de kaya karışım oranının düşmesini mümkün kılmıştır.

4.4. Tavan Kömürü Kaybının Değerlendirilmesi

Fiziksel model sonuçlarının birbirleri ile mukayese edilebilmesi için tavan kömürü kayıp oranı ile kaya karışım oranından herhangi birinin tüm testlerde birbirlerine yakın sonuçlar vermesi gerekmektedir. Fiziksel model testlerinde bu durumu sağlayabilmenin en basit yolu tavan kömürünün tamamının

üretimidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde tavan kömürü kaybının %5'den daha fazla olması durumunda testin iptali değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen testlerden tavan kömürü kaybı aşağıda belirtilen Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmış olup, her bir testten belirlenen tavan kömürü kayıp oranları Tablo 4'de verilmiştir.

$$O_{TK} = 100 \times \frac{M_{TKK}}{M_{TKK} + M_{TK}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de tavan kömürü kayıp oranı O_{TK} ve tavan kömürü kayıp miktarı M_{TKK} olarak ifade edilmiştir.

Tablo 4. Tavan Kömürü Kayıp Oranları

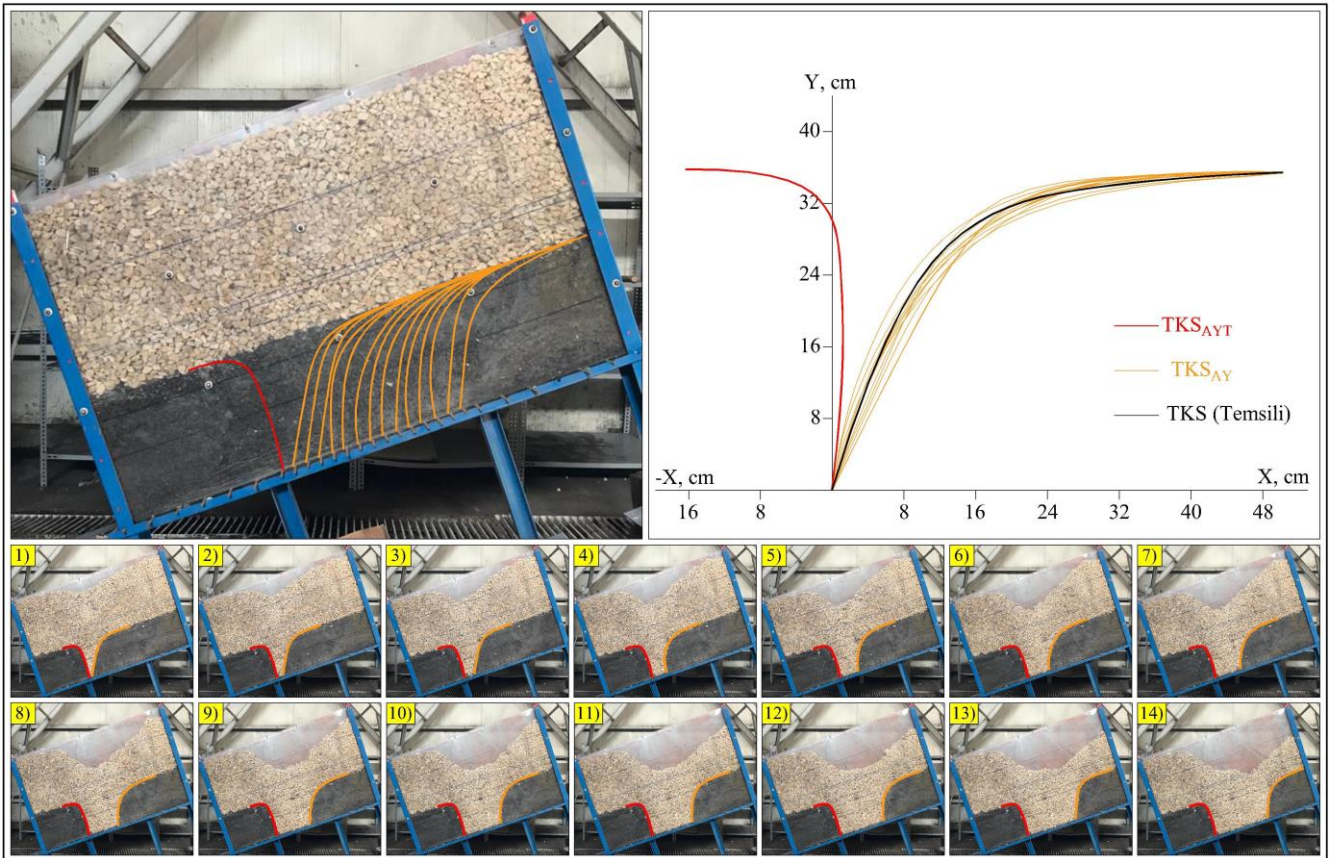
Test no	M_{TK} , (kg)	M_{TKK} , (kg)	O_{TK} , (%)
1	9,07	0,25	2,68
2	9,98	0,16	1,58
3	10,32	0,33	3,10
4	10,65	0,25	1,34

Tablo 4'den görüleceği üzere test sonuçlarının birbirleri ile mukayesesi açısından en fazla %5 olarak belirlenen tavan kömürü kaybı, gerçekleştirilen testlerde en yüksek %3,10 olarak tespit edildiğinden dolayı

çalışmada tavan kömürü kaybına bağlı olarak herhangi bir test iptal edilmemiştir.

4.5. Tavan Kömürü Akma Sınırlarının Değerlendirilmesi

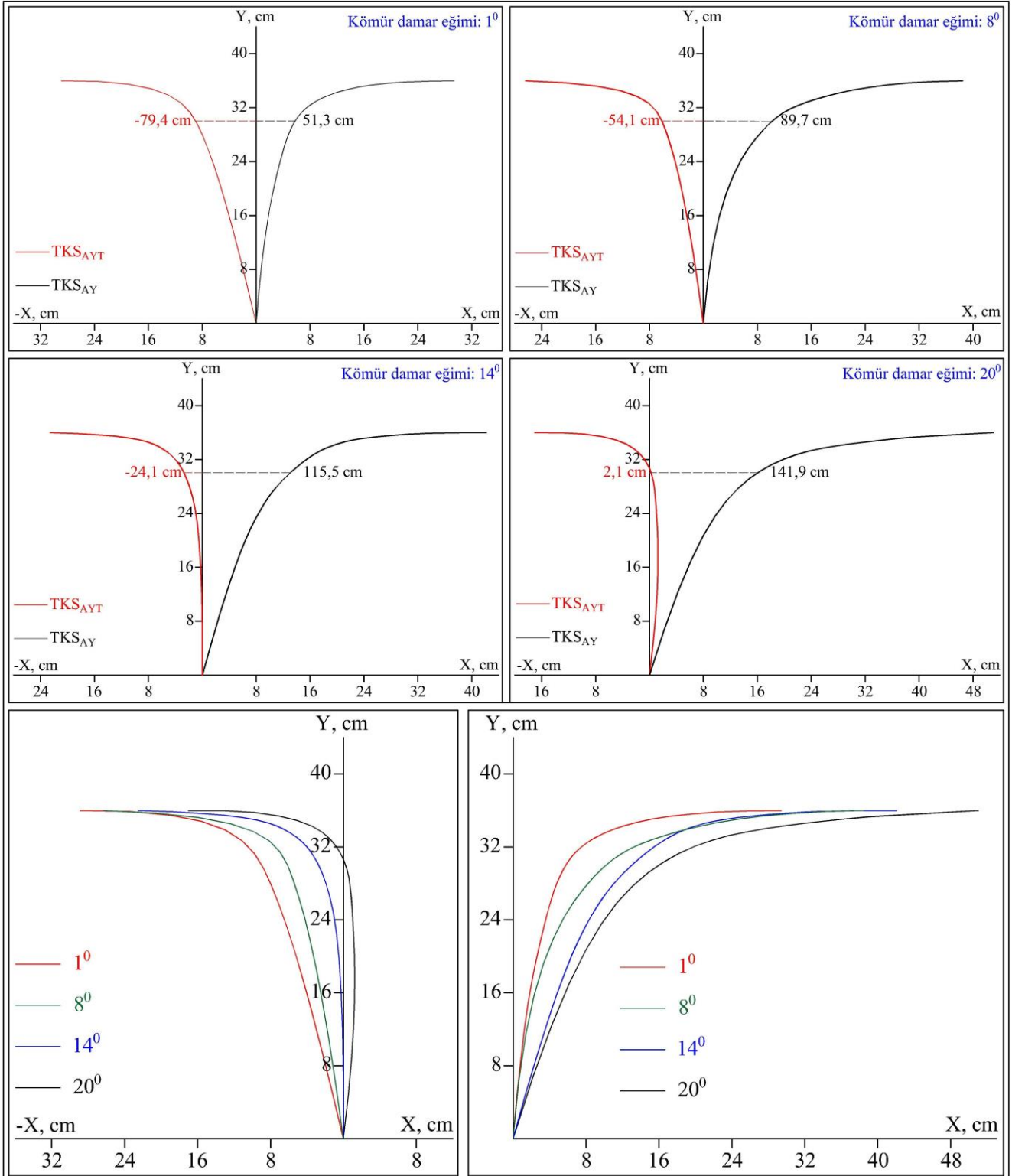
Tavan kömürü göçme mekanizması literatürde "top coal boundary" (Song ve Konietzky, 2019; Song vd., 2020; Wang vd., 2021) olarak adlandırılan tavan kömürü akma sınırlarının kontrolünde gerçekleşmektedir. Bu sınırların oluşumunda yer çekimi kuvveti ana etken parametredir. Ayrıca malzemelerin içsel sürtünme açısı ve parça boyut dağılımı da bu sınırların oluşumunda etkili parametrelerdir. Bu nedenle çalışma kapsamında tavan kömürü akma sınırları fiziksel model üzerinden gözlemlenmiştir. Burada, her bir fiziksel model testinde gerçekleştirilen tavan kömürü çekim işlemi modelin hemen karşısında konumlanan kamera ile fotoğraflanmakta ve ardından çekilen fotoğraflar üzerinden tavan kömürü akma sınırları bir bilgisayar programı vasıtasıyla sayısallaştırılmaktadır. Tavan kömürü akma sınırının sayısallaştırılması işlemlerine ait görseller Şekil 8'de her bir fiziksel model testinden belirlenen akma sınırları ise Şekil 9'de verilmiştir.



Şekil 8. Tavan Kömürü Akma Sınırlarının Sayısallaştırılması

Şekil 8'de ayak ilerleme yönünde oluşan tavan kömürü akma sınırı TKS_{AY} ve ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırı TKS_{AYT} olarak ifade edilmiştir. Ayrıca her bir çekim turundan belirlenen ayak ilerleme yönünde oluşan tavan kömürü akma

sınırları koordinat sistemi üzerinde bir noktada birleştirilerek tüm akma sınırlarının ortalamasından temsili bir TKS_{AY} sınırı oluşturulmuştur. Bu sınır Şekil 8'de TKS olarak ifade edilmiştir.



Şekil 9. Tavan Kömür Akma Sınırları ile Damar Eğimi Arasındaki İlişki

Şekil 9'dan görüleceği üzere damar eğimi artışına bağlı olarak tavan kömürü akma sınırları ayak ilerleme yönüne (+X) doğru kaymaktadır. Örneğin, ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının -X yönündeki koordinat sistemine uzaklığı, referans değer olarak belirlenen 7,5 metre yüksekliğinde (fiziksel modelde 30 cm) 1° damar eğiminde 7,7 cm iken 20° damar eğiminde 0,0 cm'dir.

Damar eğimindeki artışa bağlı olarak tavan kömürü akma sınırlarının ayak ilerleme yönüne doğru yönelmesi çekim bölgesinin genişlemesine neden olmaktadır. Şekil 9'dan görüleceği üzere 1° damar eğiminde 291 cm² olan çekim bölgesi hacmi 20° damar eğiminde %15,12 oranında artarak 335 cm²'ye ulaşmaktadır. Çekim bölgesinde oluşan artış çekilen tavan kömürü miktarı üzerinde doğrudan etkilidir. Bu durumun sonucu Şekil 6'da belirtilen damar eğimi ve çekilen kömür miktarı arasındaki anlamlı ilişkiden gözlemlenebilir. Ayrıca fiziksel model testlerinde akma sınırlarında meydana gelen %15,12'lik artışa paralel olarak çekilen tavan kömürü miktarında %17,41'lik bir artış tespit edilmiştir.

Ek olarak, Şekil 9'da belirtilen tavan kömürü akma sınırlarından görüleceği üzere, ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının tamamı, 14° damar eğimine kadar gerçekleştirilen fiziksel model testlerinde -X yönünde iken 20° damar eğiminde gerçekleştirilen fiziksel model testinde bu sınırının büyük bir kısmı +X yönündedir. Ayak ilerleme yönünün tersinde oluşan akma sınırının ayak ilerleme yönüne doğru yönelimi üst bölümlerde de belirtildiği üzere çekilen tavan taşı miktarının ve kaya karışım oranının düşmesine neden olmuştur.

5. Sonuçlar

Damar eğiminde ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde ayak eğimi, üretim organizasyonunu, iş verimini ve iş sağlığı ve güvenliği koşullarını önemli derecede etkileyen bir parametredir. Bu nedenle dünya çapında eğimli ve dik kömür damarlarının üretiminde göçertmeli uzunayak yöntemi genellikle damarın eğimi boyunca ayak oluşturmak yerine damarın yatay kalınlığında düzayaklar oluşturularak uygulanmaktadır. Ancak bu uygulama yataya yakın kömür damarlarında, damarın kalınlığına da bağlı olarak genellikle teknik ve ekonomik açıdan mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla yataya yakın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak yöntemi damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanmaktadır. Bu çalışma da yataya yakın kalın kömür damarlarında damarın eğimi boyunca ayak oluşturularak uygulanan göçertmeli uzunayak yönteminde damar eğiminin göçme mekanizmasına olan etkilerinin araştırılması için gerçekleştirilmiştir.

Yapılan araştırma sonucunda, damar eğimindeki artışa bağlı olarak çekim bölgesini hacminin genişlediği ve çekilen tavan kömürü miktarının arttığı tespit edilmiştir.

Ayrıca 20° damar eğiminde gerçekleştirilen testte ayak ilerleme yönü tersinde oluşan tavan kömürü akma sınırının bir kısmının diğer testlere kıyasla +X yönüne kaydığı belirlenmiştir. Tavan kömürü akma sınırında görülen bu yer değiştirme çekilen tavan taşının bir kısmının çekim bölgesi merkezinden göçük bölgesine doğru yöneldiğinin göstergesidir. Tavan kömürü akma sınırındaki pozitif yönlü yönelim çekilen tavan taşı miktarının düşmesine neden olmakla birlikte ve kaya karışım oranının azalmasını mümkün kılmıştır.

6. Öneriler

Günümüzde gelişen teknolojiye bağlı olarak damarın eğimi boyunca göçertmeli uzunayak yönteminin tam mekanize olarak uygulanması dik eğimli kalın kömür damarlarında da mümkün hale gelmiştir. Yöntemin uygulaması yeni yeni popülerlik kazandığından dolayı akademik alanda yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışma paralelinde damar eğiminin dik eğimli kalın kömür damarlarında da göçertmeli uzunayak yöntem verimliliğine etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Yazar, fiziksel model test sürecinde yardımlarını esirgemeyen Oktay TÜRK'e teşekkürlerini sunar.

Araştırmacıların Katkısı

Makale tek yazarlıdır.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Akcın, N. A. (1986). Batı Karadeniz taşkömürü havzasında hidrolik kömür madenciliğinin uygulanabilirliği, Türkiye 5. Kömür Kongresinde Sunulmuş Bildiri, Zonguldak.

BP. (2022) Statistical Review of World Energy 2022. Erişim adresi : <https://www.bp.com>.

Çelik, A. (2022). Eğimli kalın kömür damarlarında göçertmeli uzunayak üretim yöntem verimliliğinin fiziksel modelleme ile araştırılması (Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çelik, A. ve Özçelik Y. (2021). Investigation of the efficiency of longwall top coal caving method applied

- by forming a face in horizontal thickness of the seam in steeply inclined thick coal seams by using a physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 148, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104917>.
- Çelik, A. ve Özçelik Y. (2022). Investigation of the effects of coal seam slope and top coal drawn height on top coal recovery ratio in longwall top coal caving method applied in steep inclined thick coal seams. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 181. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09466-9>.
- Çelik, A. ve Özçelik Y. (2023). Investigation of the effect of caving height on the efficiency of the longwall top coal caving production method applied in inclined and thick coal seams by physical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 162, 105304. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105304>.
- Garcia, G. F. N., Camara, T. R. ve Torres, V. F. N. (2019). Optimization of room and pillar dimensions using automated numerical models. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29, 797-801.
- Guo, J., Feng, G., Wang, P., Qi, T., Zhang, X. ve Yan, Y. (2018). Roof strata behavior and support resistance determination for ultra-thick longwall top coal caving panel: A case study of the Tashan coal mine. *Energies*, 11, 1041. <https://doi.org/10.3390/en11051041>.
- Guo, J., Ma, L., Wang, Y. ve Wang, F. (2017). Hanging wall pressure relief mechanism of horizontal section top-coal caving face and its application-a case study of the Urumqi coalfield, China. *Energies*, 10, 1371. <https://doi.org/10.3390/en10091371>.
- Huang, B., Liu, C., Niu, H. ve Wang, J. (2008). Research on coal-gangue flow field character resulted from great cutting height fully mechanized. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 25, 415-419.
- Huang, B., Liu, C., Wu, F. ve Wang, Z. (2006). Experimental research on drawing top-coal with loose medium model under dead-unconsolidated sandstone roof. *Journal of China University of Mining and Technology*, 35, 351-355.
- Kang, H., Lou, J., Gao, F., Yanga, J. ve Lia, J. (2018). A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining. *International Journal of Coal Geology*, 188, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.01.013>.
- Kang, X., Yang, S., Zhan, P. ve Li, L. (2020). Simulation study of roof fracture pattern of a horizontal sublevel caving a steeply inclined thick coal seam. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 8370634. <https://doi.org/10.1155/2020/8370634>.
- Klishin, V. I. ve Klishin, S.V. (2010). Coal extraction from thick flat and steep beds. *Journal of Mining Science*, 46, 149-159. <https://doi.org/10.1007/s10913-010-0020-y>.
- Kvapil, R. (1992). *Sublevel Caving*, SME Mining Engineering Handbook. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Colorado.
- Lang, D., Wu, X., Wu, Y., Lin, H. ve Luo, S. (2021). Boundary distribution of top-coal limit-equilibrium zone in fully mechanized caving in steeply dipping coal seams. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 2561-2589. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1969450>.
- Li, X., Wang, Z. ve Zhang, J. (2017). Stability of roof structure and its control in steeply inclined coal seams. *International Journal of Mining Sciences and Technology*, 27, 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.01.018>.
- Liang, Y., Li, L., Li, X., Wang, K., Chen, J., Sun, Z. ve Yang, X. (2019). Study on roof-coal caving characteristics with complicated structure by fully mechanized caving mining. *Shock and Vibration*, 2019, 6519213. <https://doi.org/10.1155/2019/6519213>.
- Liu, C., Huang, B. ve Wu, F. (2009). Technical parameters of drawing and coal-gangue field movements of a fully mechanized large mining height top coal caving working face. *Mining Science and Technology*, 15, 549-555. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60103-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60103-4).
- Liu, C., Wang, X. H., Liu, K., Wang, J., Guo, H. ve Sun, Z. Q. (2014). Occurrence features of coalbed methane in inclined coal seam of Junggar basin, Xinjiang. *Advanced Materials Research*, 868, 696-699.
- Mesutoğlu, M. (2019). Uzunayak tabanyolu galerisi tavan tabaka kontrolünde kullanılan kaya saplama ve demir bağ davranışlarının sayısal analizler ile belirlenmesi (Doktora Tezi). Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Nicholas, D. E. (1993). *Selection procedure*, SME Mining Engineering Handbook, Vol. 2, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Nieto, A. (2011). *Selection methods*, SME Mining Engineering Handbook, Vol. 3, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Öğretmen, S. (2003). Ömerler mekanize uzunayakta yürüyen tahkimatlar üzerindeki basınçların analizi

- (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özfirat, M. K., Şimşir, F., Gönen, A. ve Pamukçu, C. (2008). Yürüyen tahkimat penceresinin kömür kaybına etkisi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 10(1), 15-26.
- Quang, D. H. (2010). The effect of seam dip on the application of the longwall top coal caving method for inclined thick seams (PhD Thesis). The University of New South Wales, Sydney.
- Shahani, N. M., Wan, Z., Zheng, X., Guichen, L., Liu, C., Siddiqui, F. I. ve Bin, G. (2020). Numerical modeling of longwall top coal caving method at Thar coalfield. Journal of Metals, Materials and Minerals, 30, 57-72.
- Shevyakov, L. (1958). Mining of mineral deposits, Foreign Languages Publishing House, Moscow.
- Singh, R. (2004). Staggered development of a thick coal seam for full height working in a single lift by the blasting gallery method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 745-759. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.01.008>.
- Singh, S. K. (2011). Extraction of thick coal seams (MSc Thesis). National Institute of Technology, Rourkela.
- Song, Z. ve Konietzky, H. (2019). A particle-based numerical investigation on longwall top coal caving mining. Arabian Journal of Geosciences, 12, 556. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4743-z>.
- Song, Z., Konietzky, H. ve Herbst, M. (2020). Drawing mechanism of fractured top coal in longwall top coal caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 130, 104329. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104329>.
- Tarakki, N. S., Quamruzzaman, C., Ahmed, M. T., Rahman, M., Alam, B. ve Rayhan C. (2016). Longwall top coal caving method for Barapukuria coal field, Dinajpur, Bangladesh. International Journal of Scientific and Engineering Research. 7, 285-293.
- Tian, J., Chen, J. ve Liu, Y. (1979). Mining of thick seams in Chinese coal mines. Journal of Mines, Metals and Fuels, 27, 278-284.
- Tien, J. (1998). Longwall caving in thick seams. Coal Age, 103, 52-54.
- Ünver, B. (1997). Arakatlı göçertme uygulanan kalın kömür damarlarında işletme veriminin artırılması, Türkiye 15. Madencilik Kongresinde Sunulmuş Bildiri, Ankara.
- Wang, J. (2008) Study on coal rock caving laws and technological parameters of top coal caving of fully-mechanized mining with great cutting height for thick coal seam. (PhD Thesis). China University of Mining and Technology, Beijing.
- Wang, J. ve Song, Z. (2015). Characteristic and control method of initial interface between coal and rock under fully mechanized loose top coal caving. Journal of Coal Science and Engineering, 47, 1-4.
- Wang, J., Wei, W. ve Zhang, J. (2019a). Effect of the size distribution of granular top coal on the drawing mechanism in LTCC. Granular Matter, 21, 70. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0923-5>.
- Wang, J., Wei, W. ve Zhang, J. (2019b) Theoretical description of drawing body shape in an inclined seam with longwall top coal caving mining. International Journal of Coal Science and Technology, 7(1), 182-195. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00286-z>.
- Wang, J., Yang, S., Li, Y., Wei, L. ve Liu, H. (2014). Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 71, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.024>
- Wang, J., Yang, S., Wei, W., Zhang, J. ve Song, Z. (2021). Drawing mechanisms for top coal in longwall top coal caving (LTCC): A review of two decades of literature. International Journal of Coal Science and Technology, 8, 1171-1196. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00453-1>.
- Wang, P., Zhao, J., Chugh, Y. P. ve Wang, Z. (2017). A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits. Minerals, 7, 60. <https://doi.org/10.3390/min7040060>.
- Xu, B. (2004). Application of the longwall top coal caving system in Australian thick seam coal mines (MSc Thesis). The University of New South Wales, Sydney.
- Yang, D., Guo, W. ve Tan, Y. (2019). Study on evolution characteristics of two-zone failure mode of the overburden strata under shallow buried thick seam mining. Advances in Civil Engineering, 2019, 9874769. <https://doi.org/10.1155/2019/9874769>.
- Yang, Y., Ma, Y., Ji, C., Kang, T. ve Guo, X. (2018). Effect of mining thickness on overburden movement and underground pressure characteristics for extra thick coal seam by sublevel caving with high bottom cutting height. Advances in Civil Engineering, 2018, 6871820. <https://doi.org/10.1155/2018/6871820>.

- Yaşıtlı, N. E. ve Ünver, B. (2005). 3D numerical modeling of longwall with top coal caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 219-235.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.08.007>
- Zhang, J., Zhao, Z. ve Gao, Y. (2011). Research on top coal caving technique in step and extra-thick coal seam. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 145-149.
<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.024>.
- Zhang, N., Liu, C. ve Pei, M. (2015). Effects of caving-mining ratio on the coal and waste rocks gangue flows and the amount of cyclically caved coal in fully mechanized mining of super-thick coal seams. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25, 145-150.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.014>
- Zhang, Q., Yuan, R., Wang, S., Li, D., Li, H. ve Zhang, X. (2020). Optimizing simulation and analysis of automated top-coal drawing technique in extra-thick coal seams. *Energies*, 13, 232.
<https://doi.org/10.3390/en13010232>.
- Zhu, D., Chen, Z., Du, W., Zhang, L. ve Zhou, Z. (2018). Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining based on stochastic medium theory. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 621.
<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3987-3>.

GÖZ KIRPMA TESPİTİ İÇİN YENİ BİR UYARLAMALI EŞİK DEĞERİ ALGORİTMASI

Nur Yasin PEKER^{1*}, Ahmet Zengin², Çiğdem EROĞLU ERDEM³, Mert Süleyman DEMİRSOY⁴

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ORCID No :

<http://orcid.org/0000-0003-2468-2627>

² Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ORCID No :

<http://orcid.org/0000-0003-0384-4148>

³ Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Maltepe, İstanbul, ORCID No :

<http://orcid.org/0000-0002-9264-5652>

⁴ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ORCID No :

<http://orcid.org/0000-0002-7905-2254>

Anahtar Kelimeler	Öz
Görüntü işleme Yüz tanıma Göz en-boy oranı Göz kırpma algılama Uykululuk	<i>Uykululuk halinin önceden tespit edilmesi, uykuluğa bağlı trafik kazalarını önlemek, fiziksel ve ekonomik kayıpların önüne geçmek açısından önemlidir. Bir kamera yardımı ile kişilerin görüntüleri üzerinde görüntü işleme teknikleri uygulanarak uykululuk halini önceden kestirmek mümkündür. Bu çalışmada, literatürdeki veri kümelerinden yararlanılarak uykululuk halinin tespit edilmesinde büyük bilgiye sahip olan göz bölgesinden gelen öznelikler ile göz kırpma tespiti yapmak için sabit ve uyarlamalı eşik değerleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece, önerilen yöntem ile göz kırpma tespitindeki zorlukların ve buna bağlı hatalı ölçümlerin giderilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada önerilen uyarlamalı eşik değerinin sabit bir eşik değerinden çok daha başarılı göz kırpma tespiti sonuçları verdiği, iki farklı veri kümesi üzerinde yapılan deneyler ile doğrulanmıştır.</i>

A NEW ADAPTIVE THRESHOLD ALGORITHM FOR EYEBLINK DETECTION

Keywords	Abstract
Image processing Face detection Eye aspect ratio Eyeblink detection Drowsiness	<i>Detecting drowsiness in advance is very important for preventing traffic possible accidents due to fatigue which result in physical and economic losses. It is possible to predict drowsiness by applying computer vision techniques to facial videos captures using a camera. In this study, the features from the eye region, which carry a lot of information for drowsiness detection were evaluated for eye-blink detection with fixed and adaptive thresholds using the datasets in the literature. Thus, the aim is to eliminate the difficulties in detecting eye blinking with the proposed method and the resulting incorrect measurements. It was experimentally confirmed on two different datasets that the proposed adaptive thresholding method gives more accurate eye-blink detection results as compared to the fixed threshold.</i>

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 21.09.2022	Submission Date : 21.09.2022
Kabul Tarihi : 28.04.2023	Accepted Date : 28.04.2023

* Sorumlu yazar: peker@outlook.com
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1178364>

1. Giriş

Son yıllarda, uykululuk hali, trafik kazalarının en önemli nedenlerinden biri olmuştur ve ciddi fiziksel yaralanmalara, ölümlere ve önemli ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Uykulu sürücülerin karar verme ve uygulama yetisi bozulduğu için herhangi bir kazaya meyilleri yüksektir. İstatistikler, özellikle sürücülerde erken aşamada uykululuğu tespit etmenin gerekliliğini göstermektedir (Belge ve Yıldız, 2018; Sahayadhas, Sundaraj ve Murugappan, 2012).

Kameralar tarafından müdahaleci olmayan uykululuk tespitindeki yaklaşımlar, el yapımı yöntemler veya Evrişimsel Sinir Ağı (CNN) gibi otomatik olarak öğrenilen yöntemler olarak ikiye ayrılır. El yapımı yöntemlerde uykululuk hakkında en bilgilendirici yüz bölgesi gözlerdir ve yaygın olarak kullanılan öznelikler genellikle göz kırpma ile ilgilidir. Araştırmacılar reaksiyon süresini ölçerek ve bir göz izleyici kullanarak, göz kırpma frekansının ve süresinin normal olarak yorulma ile nasıl arttığını tespit etmektedirler (McIntire,



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

McKinley, Goodyear ve McIntire, 2014). Göz kırpma genliğinin de önemli bir faktör olabileceğini belirlemişlerdir (Svensson, 2004). Göz açma hızı, ortalama göz kapatma hızı, göz kırpma süresi, mikro uyku ve göz kırpma enerjisi ve kafa hareketi bilgisi gibi birçok göz kırpma bilgisi tespit edilip işlenmektedir (Suzuki, Yamamoto, Yamamoto, Nakano ve Yamamoto, 2006).

Işık ve Anagün yaptıkları çalışmada trafik kazalarını önlemek için Uzun- Kısa Süreli Hafıza (LSTM) tabanlı bir sürücü uyarı sistemi önermişlerdir. Sürücülerin elektrokardiyogram (EKG) sinyallerini izleyerek uykuya geçiş geçmediğini kontrol etmek amacıyla anlık olarak işlemiş ve yapılan çalışmaların fizyolojik ölçümlerle birlikte desteklenebileceğini göstermişlerdir (Işık ve Anagün, 2021).

Bununla birlikte, sürücüler ve çalışanlar için, bu tür açık işaretler, kazadan yalnızca birkaç dakika öncesine kadar görünmeyebilir. Bu nedenle, uygun tepkilere daha fazla zaman sağlamak için yüz ifadeleri ile uykululuk tespiti yapan sistemlerde göz kapağı hareketlerinden uykululuğun erken aşamada ve doğru şekilde tespit edilmesi çok önemlidir (Ghodoosian, Galib ve Athitsos, 2019).

Bu çalışmada, göz bölgesinden gelen bilgilerin yeni bir uyarlamalı eşik değeri ile değerlendirilmesi ve göz kırpma tespitindeki başarıyı arttırması amaçlanmıştır. Göz bölgesinden gelen bilgiler, göz kırpma sayısı, göz açıklık oranı (Eye Aspect Ratio: EAR) (Cech ve Soukupova, 2016) ve uzun süreli göz kapanmalar olarak belirlenmiştir. Göz bölgesinden bilgi edinmek için ilk olarak Dlib (King, 2009) kütüphanesinin 68 noktalı yüz işaretlemesinden faydalanılarak gözler için belirlenmiş noktalardan göz açıklığı sayısal olarak elde edilmiştir. Göz açıklık oranı bir dizi video çerçevesi boyunca belirlenen eşik değerinin altında kalırsa göz kırpma, uzun çerçeveler boyunca bu değerinin altında kalırsa uzun süreli göz kapama olarak değerlendirilip uykululuk göstergesi sayılmıştır. Ancak sabit olarak belirlenen bir eşik değeri her zaman doğru sonuçlar üretmemektedir. Kişilerin kameraya olan uzaklıkları, göz büyüklükleri, yüz ifadeleri, ışık yansımaları gibi faktörlerle beraber göz kırpma veya uzun süreli göz kapanmaları algılamak zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, ilk olarak sabit bir eşik değeri ile literatürdeki veri setleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Daha sonrasında ise uyarlamalı (adaptif) bir eşik değeri önerilmiş ve aynı veri setleri üzerinde

çalışmalar tekrarlanmıştır. Uyarlamalı eşik değerinde, medyan(ortanca) filtre ve kayan ortalama filtre sistem parametreleri olarak belirlenmiştir. Son olarak, sabit ve uyarlamalı eşik değeri ile yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar paylaşılmış ve karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalarda elde edilen göz kırpma sayıları ile tespit edildikleri video çerçevesi, veri setleri tarafından bildirilmiş olan gerçek göz kırpma sayısı gerçekleştikleri video çerçeveleri ile büyük oranda uyusmaktadır. Sonuç olarak, uyarlamalı bir eşik değerinin, sabit bir eşik değerinden çok daha doğru sonuçlar üreterek göz kırpmaların tespitinde büyük bir rolü olduğu gösterilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatürde makine öğrenmesi, derin öğrenme ve el yapımı yöntemler olmak üzere farklı yöntemlerle göz kırpma ve uykuluk tespiti çalışmaları yapılmıştır.

Ibrahim ve arkadaşları gömülü bir sistemde video çerçevesi üzerinde makine öğrenmesi yöntemleri (OpenCV kütüphanesi) kullanarak göz kırpma tespiti çalışması yapmıştır. Çalışmalarında sabit bir eşik değeri kullanarak (0.20) gözün açık ve kapalı olduğu çerçeveleri etiketlemişlerdir (B. R. Ibrahim ve diğ., 2021).

Ryan ve arkadaşları olay kamerası kullanarak yüz ve gözleri aynı anda tespit etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada tamamen evrişimli tekrarlayan bir sinir ağı mimarisi sunarak ve olay kameralarının yüksek zamansal çözünürlüğünden yararlanarak sürücülerin göz kırpmalarını algılamak ve analiz etmek için bir yöntem önermişlerdir (Ryan ve diğ., 2021).

Diğer bir çalışmada araştırmacılar gözün açık ve kapalı olma durumunu sınıflandırmak için iki aşamalı evrişimli bir sinir ağı önermişlerdir. CNN kullanılarak her bir video karesinin özellikleri ayıklanmış ve ardından görsel özellik dizisinde kodlanmış zamansal bilgileri birleştirmek için LSTM kullanılmıştır. Önermiş oldukları modeli eğitmek ve değerlendirmek için kendi veri kümelerini oluşturmuş ve çerçeveleri manuel olarak etiketlemişlerdir (Bennett ve Joshi, 2021).

Ancak bahsedilen çalışma sonuçları büyük veya kamuya açık bir veri setine dayanarak doğrulanmamaktadır.

Tablo 1. Uykululuk tespiti için kullanılan göz kırpma parametreleri (Soleimanloo ve diğ., 2019).

Ölçüm	Açıklama
Olay Süresi (milisaniye olarak)	Göz kapağının maksimum kapanma hızı ile kapanması ve maksimum açılma hızı ile açılmasında geçen göz kırpma süresi.
Toplam Göz Kırpma Süresi	Tüm göz kırpma aşamalarının ortalama toplam süresi; her göz kırpmada gözün kapanması ve yeniden açılması için geçen süre.
Pozitif genlik / hız oranı	Dakikadaki göz kırpmaların kapanma aşaması için göz kapağının maksimum genliğinin maksimum hızına oranı.
Negatif genlik / hız oranı	Gözün açılması sırasında maksimum genlik oranının, göz kapağının maksimum hızına oranı (bir dakika boyunca oluşan kırpmalar için).
Uzun göz kapanışları (%)	10 milisaniyeden uzun süre gözlerin tamamen kapalı kaldığı süre (%). "Blink Closing Phase" (Göz Kırpma Kapama Aşaması) sonrasında gözler, göz kapağı hareketinin hızının bir hız eşliğinin altına düştüğü andan itibaren "Blink Reopening Phase" başlangıcını gösteren süratin bu eşğin üstüne çıktığı zamana kadar kapalı kabul edilir.
Uzun göz kapanışları (oran)	Saatte 10 veya daha fazla milisaniye boyunca gözlerin kapalı kalma sayısı.
John's Uyku hali Puanı	Çoklu oküler değişkenlerin birleşiminden hesaplanan ve sırasıyla 4,5 ve 5'e eşit veya daha büyük puanlara sahip bileşik bir uykululuk skoru (0-10), sırasıyla ihtiyati seviyeyi ve yüksek uykululuk riskini gösterir.

Ayrıca el yapımı yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalar sabit bir eşik değeri yöntemi kullanılarak yapılmış olup, yüksek hassasiyette ölçüm yapan bir eşik değeri modeli ile değerlendirilmemektedir.

Uyku hali ve göz kırpma hareketlerini incelemek ve önceden bilgi edinebilmek için literatürde bulunan veri setleri incelenmiş ve alt başlıklarda bu veri setlerinin avantajları, dezavantajları, içerikleri ve zorlukları hakkında bilgi verilmiştir.

Göz kapağı kapanma parametreleri, uyku halini izlemek, müdahalelerinin etkinliğini değerlendirmek ve uyku halinin önceden tahmin etmek için kullanılabilir araçlardır ve Tablo 1'de gösterilmiştir (Soleimanloo ve diğ., 2019).

2.1. Uykululuk Hali ve Göz Kırpma Tespiti için Kullanılan Veri Kümeleri

Göz kırpma parametreleriyle uykululuk tespiti için pek çok çalışma vardır. Ancak pek azı hem halka açık hem de gerçekçi bir veri seti kullanmamaktadır. Sonuç olarak, önceki yöntemleri birbirleriyle karşılaştırmak zordur. Var olan birkaç yöntem, videoları paylaşmadan ve az sayıda denek üzerinde değerlendirilmiştir. Bazı durumlarda (Jo, Lee, Park, Kim ve Kim, 2014; Reddy, Kim, Yun, Seo ve Jang, 2017) deneklere uykulu davranmaları talimatı verilmiş, bazen de gerçekten uykulu olan deneklerden veri elde edilmeye çalışılmıştır.

Bazı veri setleri (Li, Pfister, Huang, Zhao ve Pietikainen, 2013; Yan ve diğ., 2014; Yan, Wu, Liu, Wang ve Fu, 2013), özellikle uykululuk tespiti için geçerli olmayan kısa ve genel mikro ekspresyon tespiti için oluşturulmuştur. NTHU sürücü uykululuk tespit veri seti, sürüş simülasyonu yaparken 36 kişinin kızılötesi (IR) kamera ile kaydedilen videosunu içeren halka açık bir veri setidir (Weng, Lai ve Lai, 2017). Bununla birlikte, uykulu gibi davranan kişilerden kaydedilmiştir.

Rol yaparak uykululuk videolarının, özellikle erken bir aşamada, gerçek uykululuğun tespitinde faydalı eğitim verileri olup olmadığı ve ne ölçüde faydalı olduğu tartışılmaktadır (Ghoddoosian ve diğ., 2019).

DROZY veri kümesi (Massoz, Langohr, Francois ve Verly, 2016), Elektroensefalografi (EEG), Elektrokülografi (EOG) ve yakın kızılötesi (NIR) görüntüler gibi sinyaller dâhil olmak üzere birden fazla uykululukla ilgili veri türü içerir. Bu veriler, uzun süre uyanık kalmanın neden olduğu artan uyku yoksunluğu koşullarında art arda üç adet 10 dakikalık psikomotor uyanıklık testi yapan 14 genç ve sağlıklı denekten (3 erkek, 11 kadın) toplanmıştır. DROZY veri setinin bir avantajı, uykululuk verilerinin, uykulu gibi davranmanın aksine, gerçekten uykulu kişiler ile elde edilmesidir.

Bir diğer veri seti olan UTA veri seti, DROZY veri setiyle karşılaştırıldığında, UTA veri setinin üç avantajı vardır: Birincisi, daha fazla sayıda denek (60 sağlıklı katılımcı) mevcuttur. İkincisi, UTA veri setinde 60 katılımcıya ait uyanık, yarı uykulu ve uykulu etikete sahip üç video olmak üzere toplamda 180 video bulunmaktadır. DROZY veri setinde bazı denekler üç durumda da kaydedilmemiştir. Üçüncüsü ise DROZY'de tüm videolar kontrollü laboratuvar koşullarında aynı kamera pozisyonu ve arka plan kullanılarak çekmiştir. UTA veri setinde ise her denek kendi cep telefonunu ve farklı bir arka planı kullanmıştır. Bu veri setinin kullanıldığı çalışmada araştırmacılar göz kırpmalar ile beslenen Hiyerarşik çok ölçekli Uzun Kısa Süreli Bellek (HM-LSTM) ağı önermişlerdir. (Ghoddoosian ve diğ., 2019).

Bazı araştırmacılar (Friedrichs ve Yang, 2010), yöntemlerini eğitmek ve değerlendirmek için 90 saatlik gerçek sürüş kullanmıştır. Ancak veri kümeleri özel olduğu için kıyaslama yapılamamaktadır.

Literatürde bulunan uykululuk tespiti çalışmalarının sonuçları büyük veya kamuya açık bir veri setine dayanarak doğrulanmamıştır.

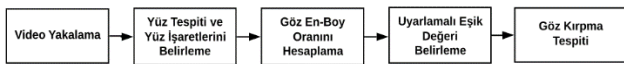
Bir diğer çalışmada (Drutarovsky ve Fogelton, 2015) EyeBlink8 veri kümesi üzerinde göz kırpması yapılmıştır. Eyeblink8 veri kümesi 4 kişiden (1 gözlük takan) ve 8 videodan oluşmaktadır. Videolar, çoğunlukla kişilerin yüzü doğrudan kameraya dönük olacak şekilde ve farklı koşullar altında kaydedilmiştir. Bu veri kümesi, 353 göz kırpması ve 82600'den fazla çerçeveden oluşmaktadır. Tüm videolar 30 fps (saniyedeki çerçeve sayısı) ile 640x480 çözünürlükte kaydedilmiştir. Veri kümesiyle birlikte videolardaki gerçek göz kırpması sayıları da paylaşılmıştır.

Literatürde göz kırpması tespiti için kullanılan bir veri kümesi de Talking Face veri kümesidir. Talking Face veri kümesi, 61 göz kırpması ve 5000 çerçeveden (720x576) oluşan bir video kaydı içerir. Kayıt sırası konuşma yapan bir adam bulunmaktadır ve çoğunlukla yüzü kameraya dönük veya hafifçe yana dönüktür (Drutarovsky ve Fogelton, 2015).

Göz kırpması tespiti için kullanılan yöntemler sabit bir eşik değeri kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, kişilere ve zorluklara (ışık kırılmaları, kameraya uzaklık, kameraya bakış açısı ve yüz hareketlerine) uyum sağlayacak uyarlamalı bir eşik değeri önerilmiştir.

3. Göz Açıklığı ve Göz Kırpması Tespit Algoritması

Eyeblink8 (Drutarovsky ve Fogelton, 2015) ve Talking Face veri setleri (Eyeblink - Research, 2019) üzerinde yüz noktaları belirlenmesi ve bu yüz noktaları arasından göz bölgesi için kullanılan noktalar ile göz açıklığı ve göz kırpması deneyleri yapılmıştır. İlk olarak göz kırpmayı algılamak için sabit bir eşik değeri kullanılmış daha sonrasında değişken bir eşik değeri için çalışmalar yapılmıştır. Önerilen algoritmanın blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Elde edilen göz kırpması sayıları ve uzun süreleri göz kapamaları veri setlerinin gerçek değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. Önerilen sistemin blok şeması.

3.1. Kullanılan Veri Setleri

Yukarıda da belirtildiği üzere göz kırpması bilgileri uyku testinde kullanılan önemli bir bilgidir. O nedenle göz kırpması tespiti çalışmalar yapılmış ve göz kırpması çalışmaları için literatürde kullanılan EyeBlink8 ve Talking Face veri setlerinden yararlanılmıştır.

Eyeblink8 (Drutarovsky ve Fogelton, 2015) veri kümesi 8 videodan oluşmaktadır. Her videonun uzunluğu birbirinden farklıdır. Videodaki kişiler kafa hareketleri, konuşma, gülme gibi eylemlerde bulunmaktadır. Ayrıca videoların bazı bölümlerinde kişiler eliyle veya farklı bir cisimle yüzünü kapatmaktadır (Şekil 2). Bu gibi durumlar yüz ve yüz işareti (landmark) tespiti

yapılmasını zorlaştırmaktadır. Geliştirilen algoritma ile bazı videolardaki bahsedilen yüz tespiti problemi genel başarı oranını düşürmektedir. Ancak yüz tespitinin tüm video boyunca yapıldığı videolarda başarı oranı oldukça yüksektir.

Kullanılan bir diğer veri kümesi ise Talking Face (Eyeblink - Research, 2019) veri kümesi ve 1 videodan oluşmaktadır. Bu veri setinde de kafa hareketleri konuşma ve gülme eylemleri bulunmaktadır. Ancak Eyeblink8 veri setine göre yüz tespiti yapmak daha kolaydır. Bundan dolayı ulaşılan sonuçlar doğruya oldukça yakındır.



Şekil 2. Eyeblink8 (Eyeblink - Research, 2019) göz kırpması veri setinde yer alan zorlayıcı videolardan örnekler. Yüzün kapanması veya yüzün ve gözlerin kamera ile olan açısından dolayı yüz işaretlerinin tespiti zorlaşmaktadır.

3.2. Yüz İşaretlerinin Belirlenmesi

Yüz üzerindeki nirengi noktalarının belirlenmesi için Dlib kütüphanesi kullanılmaktadır (King, 2009). Dlib kütüphanesinin içinde önceden eğitilmiş yüz işaretleme detektörü kullanılarak 68 noktanın koordinatları hesaplanır. Bu koordinatlar Şekil 3'te verilmiştir. Bu çalışmada gözler için gerekli olan noktalar kullanılmıştır (37-48. Noktalar).

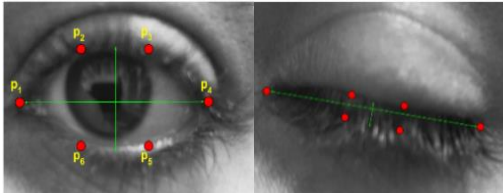


Şekil 3. Dlib kütüphanesi ile tespit edilen 68 tane yüz işareti (Amato, Falchi, Gennaro ve Vairo, 2018).

3.3. Göz En-Boy Oranının Hesaplanması

Tespit edilen yüz işaretlerinden gözlerin açıklık değerinin bulunması için göz bölgesindeki noktalar kullanılır (Örneğin Sağ Göz için: 43, 44, 45, 46, 47, 48 numaralı noktalar). Bu noktaların göz üzerine yerleştirilmiş farklı bir görseli Şekil 4'te verilmiştir. Bu görseldeki noktalar (1) numaralı denklemde belirtilen şekilde kullanılarak iki gözün açıklık oranı hesaplanır ve ortalaması alınarak her bir video çerçevesi için bir göz en-boy oranı (Eye Aspect Ratio: EAR) belirlenir. Göz kırpma sırasında gözlerin açık ve kapalı olduğu durumlardaki EAR değerlerine örnek Şekil 4'te gösterilmiştir. Gözlerin açık olduğu sırada EAR değeri 0.25 civarında iken, göz kırpma sırasında 0.1'in altına düşmektedir.

$$EAR = \frac{||p_2 - p_6|| + ||p_3 - p_5||}{2||p_1 - p_4||} \quad (1)$$



Şekil 4. EAR Değişim Grafiği (x eksen: video çerçevesini, y eksen: göz açıklığı oranını temsil etmektedir.)

3.4. Uyarlamalı Eşik Değerinin Belirlenmesi

EAR değerleri hesaplandıktan sonra ilk olarak sabit bir eşik değeri seçilmiştir (örn. T=0.18). Daha sonra veri setlerindeki videolar üzerinde denemeler yapılmıştır. Belli bir video çerçevesi süresinde EAR değerinin bu T'nin altında kaldığı çerçeveler göz kırpma sayılmıştır. Aynı şekilde uzun süreli göz kapama durumları farklı bir uykululuk göstergesi olduğu için uzun çerçeveler boyunca EAR değerinin bu eşik değerinden küçük olması göz kırpma olarak değil uzun süreli göz kapama olarak değerlendirilmiştir.

Ancak, tüm kişiler ve videolar için sabit bir eşik değeri kullanmak her durumda doğru sonuçlar vermemektedir. Örneğin, kamera pozisyonu göz hizasından aşağıda ise, göz açık bile olsa EAR değeri küçük olabilmektedir. Veri setlerindeki videolar içinde farklı kişilerin olmasından kaynaklı farklı EAR değerlerinin çıkması, kamera açısının farklı olması ve

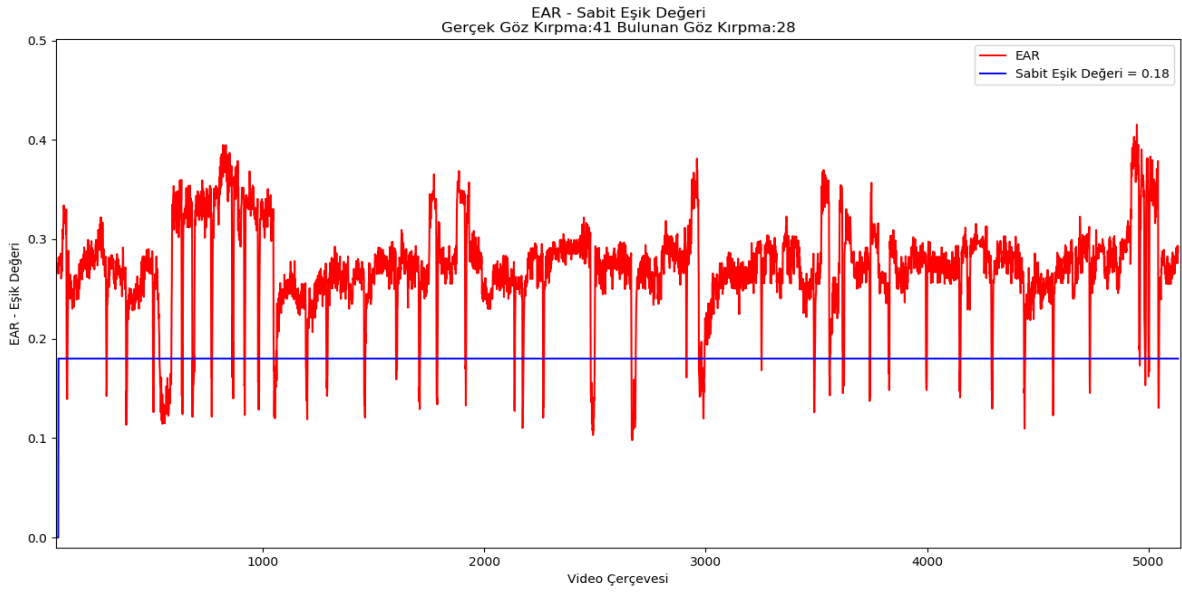
anlık hareketler (gülme vb.) ile EAR değerlerinde sapmalar olduğu için her kişi ve her duruma uyum sağlayabilen uyarlamalı (adaptif) bir eşik değerine ihtiyaç duyulmuştur.

Bu uyarlamalı eşik değerini kestirmek için zamansal EAR değerleri önce ortanca (medyan) filtre ile filtrelenerek büyük ve ani sapmalar ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Her video çerçevesi için medyan filtreden yeni değerler alınmıştır. Daha sonrasında Medyan filtreden geçen değerlerin belirlenen boyutta geriye dönük kayan ortalaması alınmıştır.

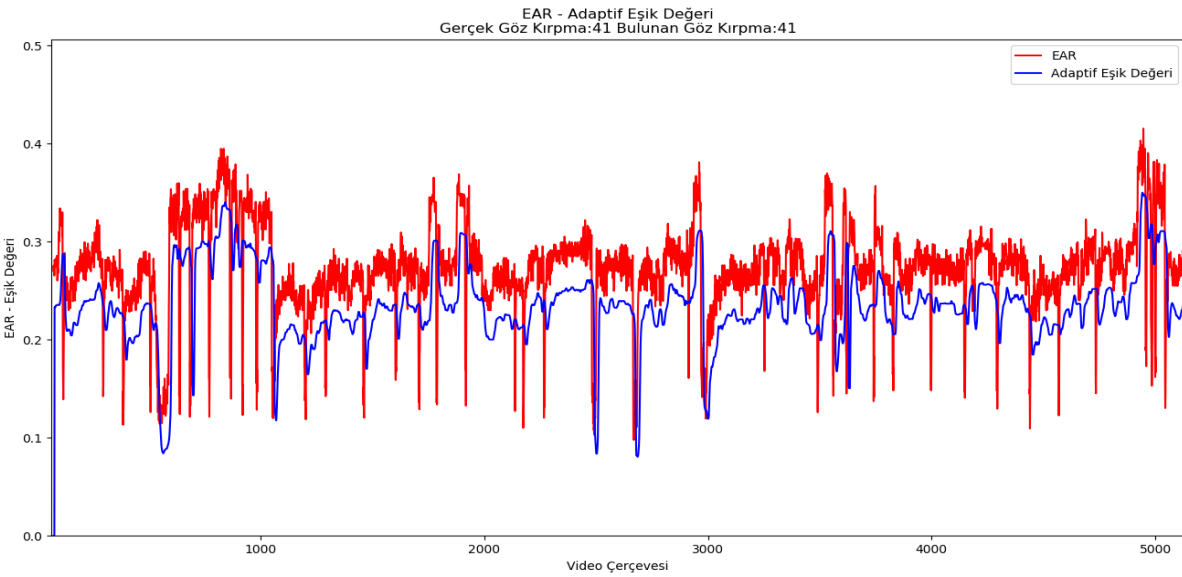
Göz kırpmaların algılanması için eşik değerinin EAR değerinden daha küçük bir değere sahip olması gerekmektedir. Ancak ani EAR değişikliklerinin olduğu anlarda eşik değerinin EAR değerinden yüksek olduğu anlar gözlemlenmiştir. Bu yüzden medyan filtre ve kayan ortalama işlemi sonrasında elde edilen sonuçtan göz kırpma sırasında oluşabilecek EAR farkından çok daha küçük bir sabit değer çıkarılarak her çerçevede kendini yenileyen uyarlanabilir bir eşik değeri bulunmuştur. Medyan filtre uzunluğu, kayan ortalama filtresinin uzunluğu ve çıkarılan sabit değer yöntemin parametreleridir ve aşağıda açıklanacağı gibi değerleri deneysel olarak belirlenmiştir.

Şekil 5'te Eyeblink8 veri setindeki 9 numaralı video için örnek bir EAR değeri çerçeve numarasına göre çizdirilmiştir (kırmızı çizgi). Sabit bir eşik değeri seçildiğinde (mavi çizgi) eşik değeri üzerinde oluşan göz kırpmalar ve kısa süreli eşik değeri altında kalma (göz kırpma sayılması için en az 4 video çerçevesi boyunca eşik değeri altında kalmalıdır) durumları gerçek göz kırpma sayısından uzaklaşmaya sebep olmaktadır. Bir insanın ortalama göz kırpma süresi 100-400 ms arasında olduğu için, en az 4 çerçeve boyunca eşik değerinin altında kalan EAR değerleri göz kırpma olarak değerlendirilmiştir. Örnek olarak verilen videoda (Şekil 5), 41 tane gerçek göz kırpma bulunmasına rağmen, sabit eşik değeri ile 28 tane göz kırpma bulunmuştur.

Şekil 6'da ise aynı video ve EAR değerleri için uyarlamalı (adaptif) eşik değeri gösterilmektedir. Videodaki kişinin uyanık halinin EAR değerleri ile orantılı olarak değiştiği için hemen hemen her EAR değerindeki göz kırpmayı yakalar ve kısa süreli göz kırpmalar gerçek bir göz kırpma ise tespitini yapar. Uyarlamalı eşik değeri sayesinde gerçek göz kırpma sayısı (41 kırpma) ile aynı değere kestirilmiştir. Ancak göz kırpma sayılarının aynı olması kestirimin her çerçevede doğru olduğunu göstermeye yetmez. Her çerçeve üzerindeki doğruluğun değerlendirilmesi ise bir sonraki başlıkta açıklanan F1-Değerlendirme yöntemi ile yapılmaktadır.



Şekil 5. Sabit Eşik Değeri Grafiği - Kırmızı çizgi, Eyeblink8 veri setindeki 9 numaralı video için EAR değerlerini, mavi çizgi ise eşik değerini göstermektedir. Sabit bir eşik değeri seçildiğinde (mavi çizgi) eşik değeri üzerinde oluşan göz kırpmalar ve kısa süreli eşik değeri altında kalma (göz kırpma sayılması için en dört video çerçevesi boyunca eşik değeri altında kalmalıdır) durumları gerçek göz kırpma sayısından uzaklaşmaya sebep olmaktadır. Doğru kırpma sayısı 41, kestirilen kırpma sayısı ile 28'dir.



Şekil 6. Uyarlamalı (Adaptif) Eşik Değeri Grafiği - Kırmızı çizgi Eyeblink8 veri setindeki 9 numaralı video için EAR değerlerini, mavi çizgi ise uyarlamalı (adaptif) eşik değerini göstermektedir. Doğru kırpma sayısı 41, kestirilen kırpma sayısı da 41'dir.

3.5. F1-Değerlendirme Yöntemi ve Parametre Seçimi

Göz kırpma tespitinin performansını ölçmek için Eyeblink8 ve Talking Face veri setlerinde bulunan tüm videolar ile deneyler yapılmıştır. Eşik değeri yöntemi belirlendikten sonra veri setlerinde bildirilmiş olan göz kırpma gerçek referansları ile kendi sonuçlarımız karşılaştırılmıştır. Her video çerçevesinde bildirilen göz kırpma var/yok gerçek referans bilgisinin kendi sonuçlarımız ile ne kadar eşleştiği bulunmuştur.

Eşleşme sonucunu görmek için F1-Değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Hesaplama yöntemi (2) numaralı denklemde verilmiştir. Bu hesaplama yönteminde her çerçeve için gözde kırpma olması 1 değeri ile kırpma olmaması 0 değeri ile gösterilmektedir. Bir çerçevede her iki değer de (doğru ve kestirilen) 1 olması doğru pozitif (DP), her iki değer de 0 olması doğru negatif (DN), diğer iki durum ise yanlış pozitif (YP) ve yanlış negatif (YN) olarak sayılmaktadır. Bu değerlerden ise F1 skoru hesaplanır.

$$Hassasiyet = \frac{DP}{DP+YN}, \quad Keskinlik = \frac{DP}{DP+YP}$$

$$F1 \text{ Değerlendirme} = 2 \frac{Hassasiyet \times Keskinlik}{Hassasiyet + Keskinlik} \quad (2)$$

DP: Doğru Pozitif, YP: Yanlış Pozitif, YN: Yanlış Negatif

4. Bulgular ve Tartışma

En iyi F1-Değerlendirme başarı oranını veren parametreleri seçmek için medyan filtre çerçeve sayısı ortalama boyutu ve sabit değer için parametre değeri belirleme çalışması yapılmıştır. Tablo 2’de Talking Face ve Eyeblink8 veri kümesindeki her bir video için farklı parametre değerleri ile elde edilen en iyi F1 değerlendirme sonuçları verilmiştir. Eyeblink8 veri setinde bulunan Video 3’te yüz tespiti yapılamadığı için herhangi bir sonuç elde edilememiştir.

Bir videoda en iyi sonucu veren parametre değerleri diğer videolarda en iyi sonucu veren parametre

değerleri olmayabileceğinden deneme yapılan veri setlerindeki (Eyeblink8 ve TalkingFace) tüm videoların parametre değerli birbiriyle karşılaştırılarak en iyi sonucu veren parametre değerleri kullanılmıştır. Medyan Filtre çerçeve sayısı 17, kayan ortalama boyutu 5 ve sabit değer 0.04 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametre değerleri ile EyeBlink8 veri kümesinde F1 değerlendirme sonucu 0.665, TalkingFace veri setinde ise 0.846 olarak bulunmuştur. Ek olarak, veri setlerinden alınan göz kırpma değerleri ile bu çalışma sonucunda kestirilen göz kırpma sayıları Tablo 3’te gösterilmiştir. Bazı videolarda gerçek göz kırpma sayısı tam olarak tespit edilmiştir. Diğer videolarda ise elin yüze gitmesi gibi göz takibini zorlaştıran durumlar olduğu için tespit edilen değerlerde sapmalar vardır. Ayrıca Eyeblink8 veri setinde bulunan üçüncü videoda yüz tespiti yapılamadığı için herhangi bir değer elde edilememiştir. TalkingFace videosunda da tespit edilen kırpma sayısı gerçek kırpma sayısına oldukça yakındır (gerçek göz kırpma sayısı 61, kestirilen göz kırpma sayısı 58).

Tablo 2. Veri Setlerinin her videosundan farklı parametre değerleri ile elde edilen en iyi F1 değerleri.

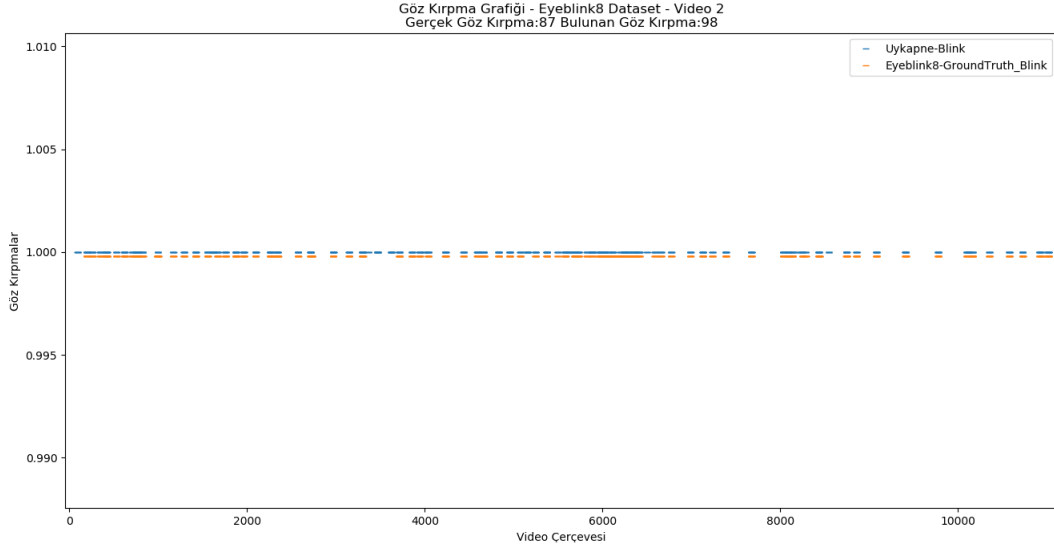
Veri Seti	Farklı Parametre Değerleri ile En İyi F1-Değerlendirme Sonuçları
Eyeblink8 – Video 1	0.389
Eyeblink8 – Video 2	0.814
Eyeblink8 – Video 3	-
Eyeblink8 – Video 4	0.721
Eyeblink8 – Video 8	0.661
Eyeblink8 – Video 9	0.817
Eyeblink8 – Video 10	0.689
Eyeblink8 – Video 11	0.547
Talking Face	0.852

Tablo 3. Tüm videolardaki gerçek göz kırpma sayıları ve kestirilen göz kırpma sonuçları

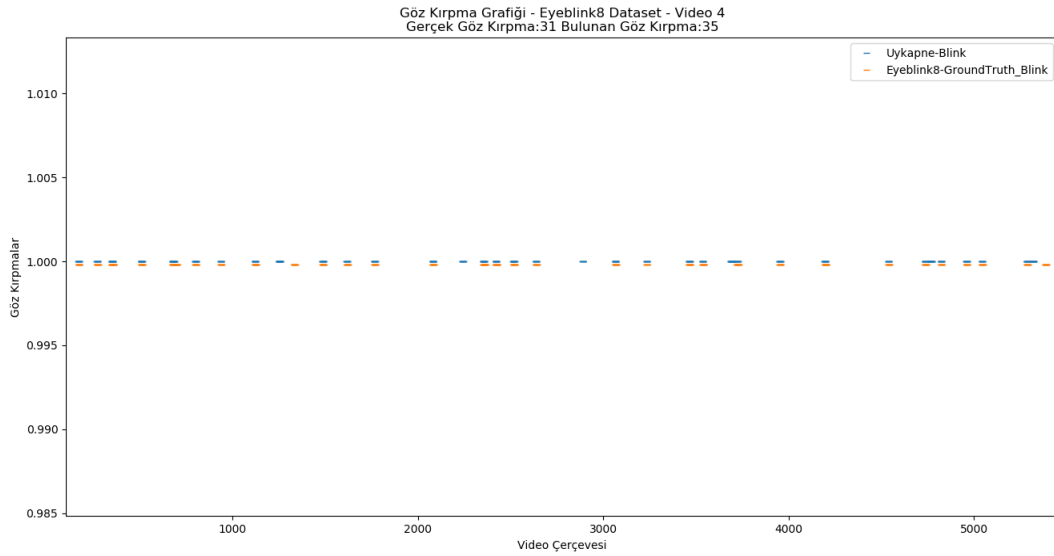
Veri Seti	Gerçek Göz Kırpma Sayısı	Bulunan Göz Kırpma Sayısı
Eyeblink8 – Video 1	35	62
Eyeblink8 – Video 2	87	98
Eyeblink8 – Video 3	65	-
Eyeblink8 – Video 4	31	35
Eyeblink8 – Video 8	30	39
Eyeblink8 – Video 9	41	41
Eyeblink8 – Video 10	72	85
Eyeblink8 – Video 11	43	43
Talking Face	61	58

Bunlara ek olarak gerçek ve çalışma sonucu kestirilen göz kırpmaların aynı video çerçevelerinde gerçekleşip gerçekleşmediğini görsel olarak kontrol etmek amacıyla

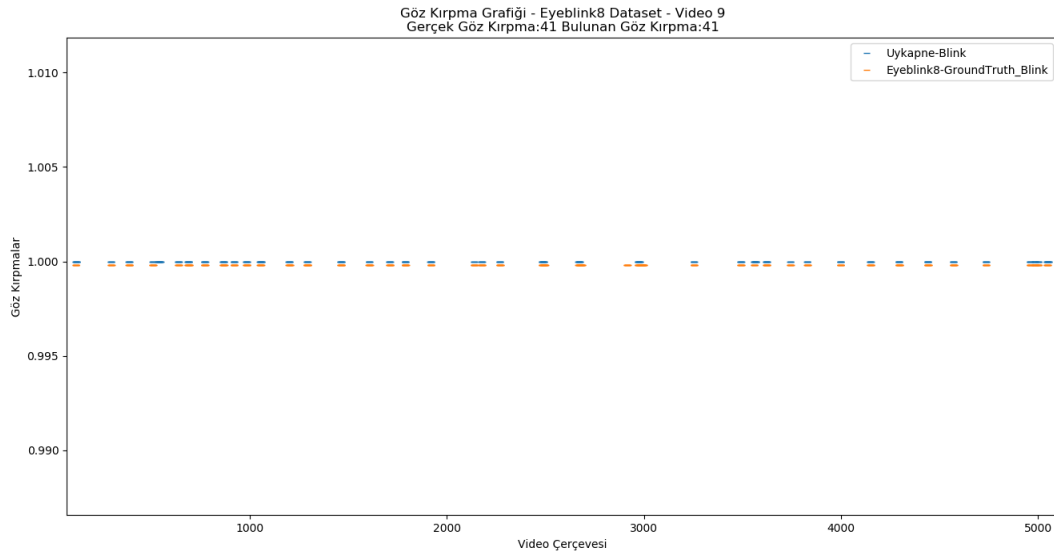
her çerçeve için göz kırpma durumlarını (varsa 1 yoksa 0) gösteren grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklere ait dört örnek, Şekil 7’de verilmektedir.



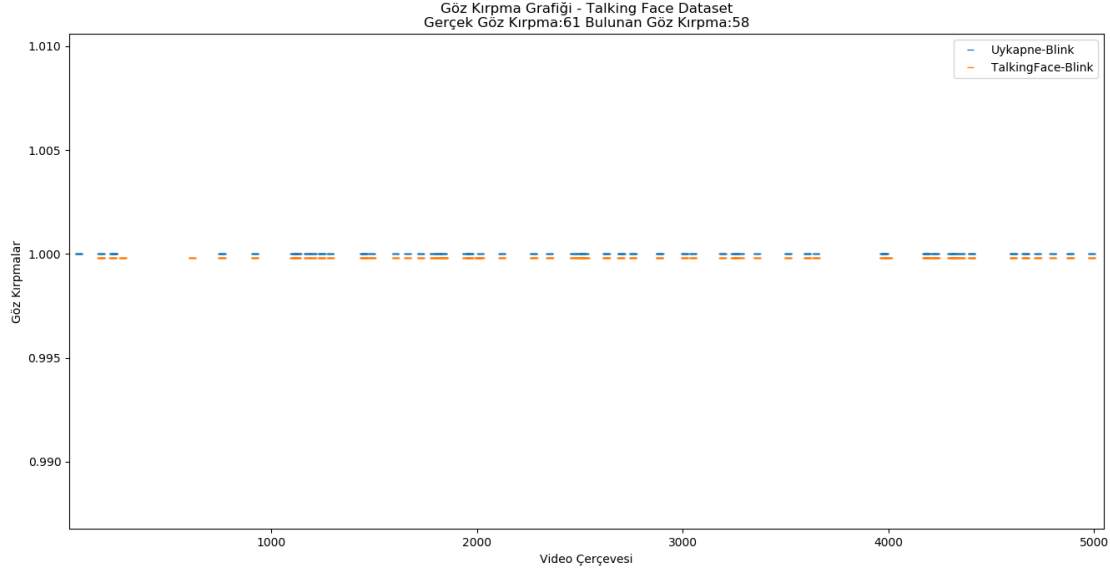
(a) Eyeblink8 Veri seti 2 Numaralı Video Göz Kırpma Sayıları ve Karşılaştırılması



(b) Eyeblink8 Veri seti 4 Numaralı Video Göz Kırpma Sayıları ve Karşılaştırılması



(c) Eyeblink8 Veri seti 9 Numaralı Video için Göz Kırpma Sayıları ve Karşılaştırılması



(d) TalkingFace Veri seti için Göz Kırpma Sayıları ve Karşılaştırılması

Şekil 7. Veri setlerindeki videolara ait gerçek ve kestirilen göz kırpma sayıları ve karşılaştırmaları.

Şekil 7 (a), (b), (c) ve (d) grafikleri, kullanılan veri setlerindeki farklı videoların işlenmesiyle elde edilmiş sonuçlardır. Tüm video boyunca her bir çerçevedeki göz kırpma ve uzun süreli göz kapama durumlarını göstermektedir. Turuncu çizgiler (Eyeblink8-GroundTruth_Blink, TalkingFace-Blink) gerçek referans kırpmaları, mavi çizgiler (Uykapne-Blink) ise kestirilen kırpmaları göstermektedir. Veri setlerindeki videolara ait Gerçek Göz Kırpma sayısı ve Kestirilen Göz Kırpma sayısı, her grafiğin başlığında belirtilmiştir. Özellikle Şekil 7 (c) ve (d) grafiklerinde gerçek göz kırpma ile kestirilen göz kırpma oldukça iyi örtüşüğü görülmektedir.

Adaptif eşik değeri, kişilerin farklı göz büyüklüğüne sahip olması, ışık kırılmaları, kameraya uzaklık ve kamera açısı gibi göz kırpma tespitini zorlaştıran durumlarda belli bir çerçeve boyutundaki davranışı izleyerek ve filtreleyerek daha tutarlı bir karar vermek üzere tasarlanmıştır. Araştırma sonucu, literatürde bulunan el yapımı yöntemler ve sabit eşik değeri kullanılarak göz kırpma tespiti yapan çalışmalara göre çok daha başarılı sonuçlar üretildiğini göstermiştir.

Önerilen yöntem, CNN ve LSTM gibi derin öğrenme algoritmalarıyla göz kırpma tespiti yapan çalışmaların (Bennett, Joshi, 2021) sonuçları ile karşılaştırıldığında kullanılan veri kümesine ait bazı videolarda daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak çalışmalar farklı veri kümeleri üzerinde yapılmış olup tam olarak bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Bu çalışma, derin öğrenme algoritmalarıyla yapılan göz kırpma tespiti çalışmalarına kıyasla daha düşük işlem performansı gerektirir ve bir gömülü sistem üzerinde kamera yardımıyla koşturulabilir. Bununla birlikte, önerilen sisteme kıyasla güncel makine öğrenmesi algoritmaları ilerleyen zamanlarda yeni güncellemeler ile daha başarılı sonuçlar verebilir.

Yapılan çalışmada uyku hali tespitinde büyük bir bilgiye sahip olan göz bölgesi özneliklerini kullanılarak göz kırpma tespitindeki başarıyı arttırmak amaçlanmıştır. Bu yüzden el yapımı yöntemlerle veya derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılan uyku hali tespiti çalışmalarında bulunan başarıyla karşılaştırmak mümkün değildir. Ancak bu çalışmada önerilen adaptif eşik değeri ile göz bölgesinden gelen bilgilerin bir arada kullanıldığı çalışmalarda başarıyı arttıracakı düşünülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda sürücülerin uyku yoksunluğu belirtilerini uyku haline geçmeden bir süre önce belirli davranışlar sergileyerek gösterdiği belirtilmiştir. Bu yüzden el yapımı yöntemlerin otomatik öğrenilen yöntemlere kıyasla bir avantajı da yüz ve göz bölgesinden gelen bilgileri ve mikro ifadeleri aynı anda kullanmaktır. Bu sayede kişilerin uyku haline geçmeden çok önce sürücü yorgunluğunu belirlemek mümkündür.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada literatürde bulunan veri seti videolarında görüntü işleme teknikleri kullanılarak göz açıklığı ve göz kırpma tespiti deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen grafiklerde göz açıklığındaki değişimlere göre hesaplanan göz kırpma sayısının ve yakalandığı video çerçevesinin gerçek değerlerle aynı sayıda ve aynı çerçevede olması uyarlamalı (adaptif) bir eşik değerinin, sabit bir eşik değerinden çok daha tutarlı ve gerçeğe yakın sonuçlar çıkardığını göstermektedir. Göz kırpma deneylerindeki bu tutarlılık hem uzun süreli göz kapanmaları doğru zamanda tespit etmek hem de göz kırpma sayılarındaki sıklığın değişiminden yola çıkarak kişinin uykululuk halini önceden tespit etme yönünden ilgili çalışmalarda başarıyı arttıracakı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda, uyarlamalı eşik değeri ile göz bölgesinden gelen farklı bilgiler bir araya

getirilerek uykululuk halinin tespiti için çalışmalar yapılacaktır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Nur Yasin PEKER, bilimsel yayın araştırması, deney ortamının kurulması, deneylerin yapılması, makalenin oluşturulması, verilerin yorumlanması ve bilgisayar ortamına aktarılması; Ahmet ZENGİN, verilerin yorumlanması, makalenin genel kontrolünün yapılması; Çiğdem EROĞLU ERDEM, bilimsel yayın araştırması, deney ortamının kurulması, deneylerin yapılması, elde edilen verilerin yorumlanması ve çalışmanın genel kontrolünün yapılması; Mert Süleyman DEMİRSOY, deneylerin yapılması ve bilgisayar ortamına aktarılması konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Amato, G., Falchi, F., Gennaro, C. ve Vairo, C. (2018). A comparison of face verification with facial landmarks and deep features. *Proceedings of the 10th International Conference on Advances in Multimedia (MMEDIA 2018)*, (c), 1–6.
- Belge, E. ve Yildiz, A. (2018). Identification of Driver Doziness as Real Time With Image Processing Technique And Warning of Driver. *9th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2018*, 1400–1409.
- Cech, J. ve Soukupova, T. (2016). Real-Time Eye Blink Detection using Facial Landmarks. *Center for Machine Perception, Department of Cybernetics Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague*, 1–8.
- Drutarovsky, T. ve Fogelton, A. (2015). Eye blink detection using variance of motion vectors. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* içinde (C. 8927, ss. 436–448). doi:10.1007/978-3-319-16199-0_31
- Eyeblink - Research. (2019). 07 Eylül 2022 tarihinde <https://www.blinkingmatters.com/research> adresinden erişildi.
- Friedrichs, F. ve Yang, B. (2010). Camera-based drowsiness reference for driver state classification under real driving conditions. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings* içinde (ss. 101–106). doi:10.1109/IVS.2010.5548039

- Ghoddosian, R., Galib, M. ve Athitsos, V. (2019). A realistic dataset and baseline temporal model for early drowsiness detection. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2019-June*, 178–187. doi:10.1109/CVPRW.2019.00027
- Ibrahim, B. R., Khalifa, F. M., Zeebaree, S. R., Othman, N. A., Alkhayat, A., Zebari, R. R., & Sadeeq, M. A. (2021, April). Embedded system for eye blink detection using machine learning technique. In *2021 1st Babylon International Conference on Information Technology and Science (BICITS)*, (pp. 58-62). IEEE.
- İşık, Ş. ve Anagün, Y. (2021). A Deep Learning Based Sleepness and Wakefulness Detection for Drivers. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 311-315.
- Jo, J., Lee, S. J., Park, K. R., Kim, I. J. ve Kim, J. (2014). Detecting driver drowsiness using feature-level fusion and user-specific classification. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1139–1152. doi:10.1016/j.eswa.2013.07.108
- King, D. E. (2009). Dlib-ml: A machine learning toolkit. *Journal of Machine Learning Research*, 10, 1755–1758.
- Li, X., Pfister, T., Huang, X., Zhao, G. ve Pietikainen, M. (2013). A Spontaneous Micro-expression Database: Inducement, collection and baseline. *2013 10th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition, FG 2013* içinde . doi:10.1109/FG.2013.6553717
- Massoz, Q., Langohr, T., Francois, C. ve Verly, J. G. (2016). The ULg multimodality drowsiness database (called DROZY) and examples of use. *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2016* içinde . doi:10.1109/WACV.2016.7477715
- McIntire, L. K., McKinley, R. A., Goodyear, C. ve McIntire, J. P. (2014). Detection of vigilance performance using eye blinks. *Applied Ergonomics*, 45(2 PB), 354–362. doi:10.1016/j.apergo.2013.04.020
- Reddy, B., Kim, Y. H., Yun, S., Seo, C. ve Jang, J. (2017). Real-Time Driver Drowsiness Detection for Embedded System Using Model Compression of Deep Neural Networks. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2017-July*, 438–445. doi:10.1109/CVPRW.2017.59

- Ryan, C., O'Sullivan, B., Elrasad, A., Cahill, A., Lemley, J., Kielty, P., ... & Perot, E. (2021). Real-time face & eye tracking and blink detection using event cameras. *Neural Networks*, 141, 87-97.
- Sahayadhas, A., Sundaraj, K. ve Murugappan, M. (2012). Detecting driver drowsiness based on sensors: A review. *Sensors (Switzerland)*, 12(12), 16937-16953. doi:10.3390/s121216937
- Soleimanloo, S. S., Wilkinson, V. E., Cori, J. M., Westlake, J., Stevens, B., Downey, L. A., ... Howard, M. E. (2019). Eye-blink parameters detect on-road track-driving impairment following severe sleep deprivation. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 15(9), 1271-1284. doi:10.5664/jcsm.7918
- Suzuki, M., Yamamoto, N., Yamamoto, O., Nakano, T. ve Yamamoto, S. (2006). Measurement of driver's consciousness by image processing - A method for presuming driver's drowsiness by eye-blinks coping with individual differences. *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* içinde (C. 4, ss. 2891-2896). doi:10.1109/ICSMC.2006.385313
- Svensson, U. (2004). *Blink Behaviour Based Drowsiness Detection: Method Development and Validation*. (Applied Physics and Electrical Engineering, MSc). Linköping University
- Weng, C. H., Lai, Y. H. ve Lai, S. H. (2017). Driver drowsiness detection via a hierarchical temporal deep belief network. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* içinde (C. 10118 LNCS, ss. 117-133). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-54526-4_9
- Yan, W. J., Li, X., Wang, S. J., Zhao, G., Liu, Y. J., Chen, Y. H. ve Fu, X. (2014). CASME II: An improved spontaneous micro-expression database and the baseline evaluation. *PLoS ONE*, 9(1). doi:10.1371/journal.pone.0086041
- Yan, W. J., Wu, Q., Liu, Y. J., Wang, S. J. ve Fu, X. (2013). CASME database: A dataset of spontaneous micro-expressions collected from neutralized faces. 2013 10th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition, FG 2013 içinde . doi:10.1109/FG.2013.6553799

GDSC VERİLERİNİ KULLANARAK YAPAY ÖĞRENME YÖNTEMLERİ İLE AKCİĞER KANSERİ İÇİN HEDEF İLAÇ VE YOLAK TAHMİNİ

Abdullah TERCAN¹, Gıyasettin ÖZCAN^{2*}

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Bursa, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-7922-1249>

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Bursa, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-1166-5919>

Anahtar Kelimeler	Öz
Yapay öğrenme, GDSC2 veri kümesi, Hedef ilaç tahmini, Hedef yolak tahmini CTDBase veri kümesi	<i>Bu çalışmada literatürde yer alan ve uluslararası alanda öneme sahip olan GDSC veri kümesinde yer alan akciğer kanseri verileri toplanmış, ve bu veriler üzerinde yapay öğrenme yöntemleri kullanarak tahmin yapmak hedeflenmiştir. Bu amaçla ilaç dozunun yarılanma süresine bağlı hedef ilaç ve hedef yolak tahminleri yapılmıştır. Elde edilen bu iki tahminin yine literatürde yer alan CTDBase isimli bir veri kümesinden hastalık tahmini için kullanılması amaçlanmıştır. Böylece ilaçların doz kullanım bilgilerinin hangi hastalıkla ilişkili olabileceği sayısal verilerden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan tahmin işlemi makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yapılmıştır. Bu süreçte Python programlama dili ile kodlama yapılmış ve bu dilin makine öğrenmesi araçlarından faydalanılmıştır. Her biri on kere tekrarlanan deney sonuçlarına göre oluşturulan makine öğrenmesi modellerinin GDSC veri kümesinde verimli tahmin performansına ulaştığı sonucuna varılmıştır. Özellikle, Light GBM, SVC and kNN algoritmaları analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre geliştirilen LightGBM ve SVC modellerinin doğruluk oranı %84'ün üstündedir. Bu sonuçlar makine öğrenmesi algoritmalarının kanser ilaç verilerine ait bilinmeyen anlamlı örüntüleri ortaya çıkarma potansiyeli olduğunu göstermektedir.</i>

PREDICTION OF TARGET DRUGS AND TRADITIONS FOR LUNG CANCER WITH MACHINE LEARNING METHODS USING GDSC DATA

Keywords	Abstract
Machine learning, GDSC2 dataset, Lung adenocarcinoma, Drug-target prediction, Target pathway prediction CTDBase dataset	<i>In this study, lung cancer data is collected from literally cited GDSC dataset, and aimed to make predictions on the data using machine learning algorithms. For this purpose, target drug and target pathway estimates were made depending on the half-life of the drug dose. These two predictions are aimed to be used for disease prediction from a dataset called CTDBase, which is also cited in literature. Thus, it can be possible to predict relation between disease and the dose usage information of drugs. The estimation process was made using machine learning algorithms. In this process, coding was done with the Python programming language and its machine learning tools of this language were used. Ten times repeated test results of each experiments denote that our machine learning models achieved efficient prediction performance on GDSC dataset. Particularly, Light GBM, SVC and kNN algorithms were analyzed. Accuracy rates of Light GBM and kNN were no less than 84%. These results show that machine learning algorithms have the potential to reveal unknown significant patterns in cancer drug data.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 06.02.2023

Submission Date : 06.02.2023

Kabul Tarihi : 08.05.2023

Accepted Date : 08.05.2023

* Sorumlu yazar: gozcan@uludag.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1248489>

1. Giriş

Makine öğrenmesi veriden öğrenerek algoritma geliştirme esasına dayanır. Başka bir deyişle yapılan eylem, veriden öğrenme yaparak bir model oluşturmak ve bu modeli aynı özellikteki yeni verilerin özelliklerinin

tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle klasik algoritma mimarisinden farklıdır.

Şekil 1'de gösterildiği üzere Geleneksel Programlamada bilgisayar aldığı girdi değişkenlerine bağlı olarak önceden tanımlı komutları icra ederek çıktı değerlerini üretir. Algoritma komutları rastgele değişken

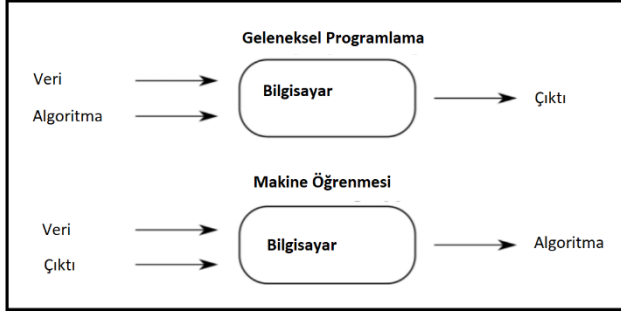


Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

kullanmadığı takdirde sonuçları deterministik bir biçimde hesaplar.

Makine öğrenmesi ise girdilerin konumu açısından farklı bir tasarıma sahiptir. Yine şekil 1'deki gösterildiği üzere hem veri, hem de çıktı makine öğrenmesi modeline girdi olarak sunulmaktadır. Bu modelin çıktısı ise bir algoritmadır. Yani algoritmanın nasıl olacağını girdiler ve çıktılar belirlemektedir.



Şekil 1. Geleneksel Programlama ve Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi algoritmaları 1960'lı yıllardan bu yana birçok alanda veriden tahmin yapabilmek için kullanılmıştır (Alpaydın, 2020). İlk zamanlarda bir sinir hücresinin potansiyel eşdeğerinin benzetimi makine öğrenmesi için araç olarak görülmüştür (McCulloch ve Pitts, 1943).

Makine öğrenmesi yöntemleri istatistiksel yöntemleri temel almaktadır. Örneğin doğrusal regresyon temelli model girdi özellikleri arasında doğrusal bir fonksiyon bulmaya çalışır. Elde edilen fonksiyon katsayıları, yeni girdi sunulduğunda çıktıyı hesaplamının kolayca yapılmasını sağlamaktadır (Hastie, Tibshirani ve Friedman, 2009).

Makine Öğrenmesi çalışmalarında Destek Vektörleri kullanmak ta alternatif öğrenme olanağı sunmaktadır. Bu yöntemin amacı bağımlı değişkenleri sınıflarına göre ayırabilmek için çok boyutlu düzlemler tanımlamaktır (Noble, 2016).

Literatürde, çok sayıda farklı makine öğrenmesi algoritması mevcuttur. SVM (Boser, Guyon ve Vapnik, 1992), kNN (Fix ve Hodges, 1951), Gradient Boosting (Ke ve diğ., 2017) yakın tarihte kullanılan algoritmalarından üçüdür. Diğer algoritmalara dair kapsamlı bilgi literatürde mevcuttur (Alpaydın, 2020). Algoritmaların doğruluk başarımları oranı verilerin özelliğine göre değişmektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarında bağımlı değişken ayırık ya da sürekli olabilmektedir. Bağımlı değişkenlerin alabileceği sınırlı sayıda ayırık değer olması sınıflandırma problem olarak tanımlanmaktadır. Öte yandan bağımlı değişkenin sürekli olması durumunda yaklaşımlar regresyon olarak çözülmek zorundadır.

En yakın k komşu algoritması, kNN, sınıflandırma yapmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu algoritmada vektör elemanı olarak tanımlanan veriler, komşularının çoğul oyuna bağlı olarak sınıflandırma yapmaktadır. Başka bir deyişle, en yakın k komşusu arasında çoğunluk oyun belirlediği sınıfa atanır.

Algoritmada ideal k değeri veriye bağlı olarak değişmektedir. Ancak büyük k değerleri gürültünün etkisini azaltmaktadır. Bu nedenle overfitting ile karşılaşılması büyük k değerleri için daha düşük ihtimaldir. kNN algoritmasının optimizasyonu amacıyla geliştirilen yöntemlerden birisi de Komşu bileşen analizidir. Bu amaçla Goldberger, Hinton, Roweis ve Salakhutdinov (2004) kNN sınıflandırmada kullanmak üzere mesafe ölçüm yöntemi geliştirmişlerdir.

Sağlık alanında toplanan verilerin işlenmesi sürecinde Makine öğrenmesi algoritmaları önem arz etmektedir. Yakın geçmişte birçok alanda olduğu gibi akciğer kanseri konusunda elde edilen veriler makine öğrenmesi algoritmaları ile işlenebilmektedir (Huang, Chang, Hsu, Huang, ve Ng, 2016). Elde edilen veri analiz sonuçları önleyici veya tedavi edici araçların ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır (Qureshi ve diğ., 2022).

Kanser ilaç direnci çalışmaları, tedavi edici araçlar geliştirmeyi hedefler. Bu amaçla insan dokusunu oluşturan proteinlerin ilaçlarla etkileşimleri araştırılmaktadır. Bunun yanı sıra sağlıklı ve kanserli hücrelerde proteinlerin etkileşiminin bütününe içeren kimyasal tepkimeler(yolaklar) araştırılmaktadır (Alison ve diğ., 2014). Yolak, hücre içinde meydana gelen bir dizi kimyasal tepkimedir. Hücrenin sağlıklı işleyişi için yolakların uyumlu çalışması gerektiği biyoloji camiasında anlaşılmıştır (Alison, Papachristodoulou, Despo, Elliott ve Elliott, 2014).

Bu amaçla yazarlar GDSC veri tabanı kullanıcılara sunmuştur. Zira gen mutasyonları sonucu ortaya çıkan hastalıkları geri döndürebilmek için etkili ilaçların keşfi gereklidir. Başka bir deyişle ilaçlardaki etken kimyasalların genlerle etkileşiminin en iyi şekilde anlaşılması gereklidir. Bir diğer önemli tanım ise yolaktır.

Bu çalışmada GDSC ilaç direnç veri tabanından (Yang ve diğ., 2013) akciğer kanseri ilaç verileri toplanmıştır. Toplanan veriler üzerinde makine öğrenmesi modelleri geliştirilerek hedef ilaç ve hedef yolak tahminleri yapılmıştır. Bu iki özelliğin birlikte doğru tahmin edilmesi hastalık ilaç ilişkisinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilecektir.

2. Sağlıkta Yapay Zeka Bilimsel Yayın Taraması

Gelişen tıbbi cihaz teknolojileri nedeniyle üretilen tıbbi veri miktarında artış gözlenmektedir. Öte yandan hastalıkların ön işaretini belirleyen biomarker yakalama, hastalık teşhisinin bilgisayar yardımı ile doğru tahmin

edilmesi, tedavi için doğru ilaç kombinasyonunun belirlenmesi gibi süreçler büyük veri nedeniyle bilgisayar desteğini zorunlu kılmıştır. Bu gelişim süreci Sağlıkta yapay zekâ konusunda araştırmalarının hızla artmasına neden olmuştur (Yu, Beam ve Kohane, 2018).

Yapay zekâ sağlık biliminin bir çok alanında araç olarak kullanılmaktadır. Literatürde Oftalmoloji (Atwany, Sahyoun ve Yaqub, 2022), Radyoloji (Erickson, Korfiatis, Akkus ve Kline, 2017), Genel Cerrahi, Dermatoloji (Özcan ve Yazici, 2022), Onkoloji (Ali ve Aittokallio, 2019), ve Genetik (Libbrecht ve Noble, 2015) alanlarında çok sayıda çalışma veya inceleme örneği mevcuttur. Elde edilen veriler analiz edilerek hastalık ve tedavi öngörülerinin yapay zekâ ile yapılması hedeflenmektedir.

Literatür incelendiğinde, özellikle görüntü verilerinde derin öğrenme yöntemlerinin tercih edildiği görülmektedir (Shen, Wu ve Suk, 2017). Resim dosyalarının çok boyutlu olması ve resim dosya sayısının çok fazla olması daha verimli bir öğrenme olanağı sağlamaktadır. Derin Öğrenme convolution, max pooling, fully connected ve softmax katmanlarının doğru kombinasyon ve sırada kullanılması yüksek tahmin başarımını sunabilmektedir. (Bengio, 2008). Bu fikirden yola çıkarak (Qiu, Lee, Kim, Yoon, ve Kang, 2021) kanser hücre hat verileri üzerindeki çalışmasında hem derin öğrenme, hem de makine öğrenme algoritmalarını kullanarak tahmin yapmıştır.

Resim ya da video verilerinin aksine, metinsel verilerin işlenmesinde makine öğrenmesi yöntemleri öne çıkabilmektedir. Zira metinsel veriler, derin öğrenme katmanlarında ağırlıkların doğru belirlenmesini sağlayacak kadar büyük miktarda veri içermeyebilir (Tan ve diğ., 2020).

Makine öğrenmesi algoritmaları doğru parametrelerin bilinmesi ya da öngörülmesi durumunda verim sunabilmektedir. SVM (Boser, Guyon ve Vapnik, 1992), kNN (Fix ve Hodges, 1951) ve türevleri sağlıkta yapay zeka alanında kullanılmıştır (Rafique ve diğ., 2021). Öte yandan (Menden ve diğ., 2013) Doğrusal Regresyon, Lasso, yapay sinir ağları ve Rastgele Orman yaklaşımlarını kullanmıştır. Öte yandan Gao ve diğ. (2021) akciğer kanserinde Cisplatin direncini makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin etmiştir. Bu amaçla Destek Vektör Makinelerini kullanmış ve Diferansiyel Gen İfadesi Analizi yapmıştır.

Yakın geçmişte biyolojik alanda büyük miktarda veri açık kaynak olarak ortaya çıkmıştır. Sunulan açık kaynaklı veri tabanları hakkında genel bilgi Özcan ve Yazici (2021) tarafından derlenmiştir.

Kanser alanında sunulan yaygın kullanıma sahip açık kaynaklı temel kaynak TCGA ve Cosmic olarak bilinmektedir. Öte yandan kanserde ilaç direnci konusunda çalışmalar önem arz etmektedir. Bu alanda GDSC (Yang ve diğ., 2013), CTDBase ilaç ve ilaç direnci

konusunda bilinen önemli kaynaklardan ikisidir. Her iki veri tabanında yer alan özelliklerin bazılar ortak olmakla birlikte bazı diğer özellikleri farklıdır. Bir veri tabanında elde edilen sonucun diğer veri tabanında girdi olarak sunulma potansiyeli vardır.

Literatürde GDSC ve CTBase veri tabanlarını kullanarak sunulan makine öğrenmesi çalışmaları mevcuttur. Xia ve diğ. (2022) kansere ilaç cevaplarının biyolojik açıdan makine öğrenmesi yöntemleri ile analizini yapmıştır. Öte yandan Tang, Powell ve Gottlieb (2022) ise Moleküler yollarda ilaç cevabını tahmin eden bir model sunmuştur. Paltun ve diğ. (2021) ise ilaç kombinasyonlarının etkisini makine öğrenmesi ile araştırılmıştır. Diğer bir çalışma ise ilaç tepkilerini tahmin etmek için Derin Öğrenme modelini sunmuştur (Kuenzi, 2020). Öte yandan Raises ve diğ. (2022) DrugnomeAI framework'u geliştirirken CTbase veri tabanını kullanmıştır.

Sunulan açık kaynak verilerinin Sağlıkta Yapay Zeka konusunda yeni araştırmalara olanak sağladığı anlaşılmaktadır. Öte yandan bu veri kümelerinin boyutlarının büyüklüğü ve karmaşıklığı makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı gereksinimi doğurmaktadır.

3. Yöntem

Bu bölümde ilk önce araştırmaya konu olan veri kümesi kaynağı, verinin toplanması ve modellenmesi açıklanacaktır. Ardından verinin makine öğrenme gereksinimleri tanımlanacaktır. Son olarak gereksinim duyulan örüntüleri bulan makine öğrenmesi modeli bulma yöntemi açıklanacaktır.

3.1. Veri Kümesi

Yapılan çalışma kapsamında kullanılan veriler GDSC veri tabanının alt kümesinden oluşan GDSC-2 veri setidir. Yapılan çalışma bu iki veri setinin içerdiği bilgileri aynı amaç altında işleyip anlamlı sonuçlar elde etmek üzerinedir.

Çalışmanın amacı GDSC2 veri kümesinden faydalanarak Drug Target ve Target Pathway değerlerini tahmin etmektir. Daha sonra elde edilen tahminlerin CTDBase ya da benzeri veri tabanlarında kullanılma potansiyellerini sunmaktır.

3.1.1 GDSC-2 Veri Kümesi

Yakın zamanda sunulan açık kaynaklı veri kümelerinden birisi Genomics of Drug Sensitivity in Cancer, GDSC'dir (Yang ve diğ., 2013). Bu kaynakta insan kanser hücreleri yüzlerce kimyasal denenerek izlenmiş ve sonuçları sunulmuştur. Sitede ilaç etki verileri ve genomik işaretçiler bulunmaktadır.

GDSC çok sayıda kanser hastalığı için veri barındıran bir sitedir. Bu veri seti içerisinde kanser hastalığı tedavisi için kullanılan ilaçların doz bilgileri bulunmaktadır. Bunun yanı sıra veri seti içerisinde bulunan ilacın hangi gene etki ettiği bilgisi ve ilacın hangi yol ile genlere etki ettiği bilgisi de yer almaktadır. Yapılan bu çalışma kapsamında GDSC-2 veri setinde akciğer kanserinin tedavisine ait ilaçların bulunduğu alt grup kullanılmıştır.

Veri setinde bulunan bu bilgiler ışığında GDSC-2 veri setinin bu çalışmadaki yeri, herhangi bir doz bilgisinin girilmesine karşın makine öğrenmesi algoritmaları yardımıyla girilen doz bilgilerinin hangi gene, hangi yolak ile etki ettiğinin tahmin edilmesidir.

Veri indirme işlemi 28 Ekin 2021'de yapılmıştır. Sitenin Download sekmesinde ANOVA alt sekmesi seçilmiştir. Bu tarih itibarı ile çalışma kapsamında kullanılan GDSC-2 veri seti yaklaşık 2.975 satırdan oluşmaktadır. Sırası önemli olmaksızın kullanılan GDSC-2 veri setinin sütun isimleri şu şekildedir;

- drug_name,
- drug_target,
- target_pathway,
- feature_ic50_t_pval,
- feature_delta_mean_ic50,
- feature_pos_ic50_var,
- feature_neg_ic50_var,
- feature_pval,
- fdr.

Üst tarafta anlatılanların yanı sıra drug_id gibi bilgiler de GDSC-2 veri seti içerisinde bulunmaktadır. Fakat bu çalışma kapsamında bu tip bilgiler işlevsiz görüldüğü için veri setinden çıkartılmıştır.

3.1.2 CTDBase Verisi

CTDBase çevresel etkenlerin insan sağlığına etkisini inceleyen bir veri setidir (Davis ve diğ., 2019). Bu veri tabanında kimsiyal gen, protein, hastalık ile ilişkilerini içeren veriler bulunmaktadır.

Araştırma amacıyla veri kaynağının sitesine erişilerek bu sitede yer alan CTD_diseases_pathways.tsv dosyası 9 Mart 2022 tarihinde indirilmiştir. Kullanılan CTDBase veri setinde hastalık ismi, hastalığın tedavisi için etki edilmesi gereken gen ve gene nasıl etki edileceği bilgisi bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan veri seti 599.032 satırdan oluşmaktadır.

Anlatılan bu bilgilerin CTDBase veri setinde bulunan isimleri aşağıdaki gibidir;

- DiseaseName,

- PathwayName,
- InferenceGeneSymbol.

Yukarıda anlatılanların yanı sıra DiseaseID dahil çok sayıda özellik CTDBase veri seti içerisinde bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada bu özellikler kullanılmamıştır.

Kullanılan bu veriler sayesinde GDSC-2 veri seti baz alınarak makine öğrenmesi yardımıyla tahmin edilen drug target ve target pathway bilgilerinin hangi hastalıkların tedavisinde kullanılabileceği tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

3.2. GDSC-2 Verisinde makine öğrenmesi

Bölüm 3.2'de belirtildiği üzere GDSC-2 veri tabanında yer alan hücre örneklerinde DrugTarget ve TargetPathway ve diğer ilaç özellikleri aynı anda yer almaktadır. Diğer ilaç özelliklerine bağlı olarak DrugTarget ve TargetPathway özelliklerinin öngörülmesi bu çalışmada amaçlanmaktadır. Dolayısıyla GDSC-2 veri tabanı analizinde bu iki özellik bağımlı değişken olarak belirlenmiştir.

Birbiriyle ilişkili olması muhtemel olan DrugTarget ve TargetPathway özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Zira DrugTarget ve TargetPathway özelliklerinin bilinmesi durumunda CTDBase veri tabanında girdi olacak ve bağımsız değişken olarak kullanılabilecektir. Bu sayede CTDBase veri tabanı kullanılarak gen, ilaç, yolak, hastalık ilişkisi incelenebilecek ve ilacın hangi gene ve hastalığa etki edebileceği konusunda yeni fikirler sunulması mümkün olacaktır.

GDSC-2 Veri tabanından faydalanarak DrugTarget ve TargetPathway tahmini için iki aşamalı bir süreç yürütülmüştür. Birinci aşamada veri kümesinde yer alan TargetPathway değişkeni veri kümesi dışına alınarak makine öğrenmesinin DrugTarget değişkenini tahmini yapması amaçlanmıştır. Daha sonra deneye katılan bağımlı değişkenler yer değiştirilerek diğer bağımlı değişken olan TargetPathway değişkeni tahmin edilmiştir.

Makine öğrenmesi algoritmalarının GDSC-2 veri setinde bağımsız değişken olarak kullandığı özellikler şunlardır:

- feature_ic50_t_pval,
- feature_delta_mean_ic50,
- feature_pos_ic50_var,
- feature_neg_ic50_var,
- feature_pval,
- fdr.

DrugTarget ve TargetPathway değişkenlerinin aynı anda tahmin edilmiş olması bir diğer veri tabanı olan CTDBase verileri için faydalı bir kaynak durumundadır. Zira bu

veri kaynağı ile Gen, Hastalık, TargetPathway ve DrugTarget ilişkisi incelenebilecektir. Bu nedenle DrugTarget ve TargetPathway değerlerinin aynı anda tahmin edilmesi gereklidir ve aynı tabloda yer alması hedeflenmiştir. Elde edilecek bulgu bize tahmini yapılan ilacın hangi hastalıkların tedavisinde kullanılabileceği konusunda bir fikir vermektedir.

3.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine Öğrenmesi algoritmalarını uygulamak için Python programlama dili ve bu dilde tanımlanmış scikit-learn kütüphanesi kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Light GBM algoritması için esas kaynağı kullanılmıştır (Ke, 2017). Dil ve kütüphane tercihi yapılırken literatürde en yaygın kullanıma sahip olma koşulu dikkate alınmıştır.

GDSC2 veri kümesinde DrugTarget ve TargetPathway özelliklerini tahmin etmek için farklı makine öğrenmesi algoritmaları denenmesi gerektiğine kanaat getirilmiştir. Denenen algoritmalarından en yüksek doğruluk oranına sahip olan model aranmıştır. Denenen algoritmalar şunlardır:

- Support Vector Classification,
- LightGBM Gradient Boosting
- K Nearest Neighbour.

Kullanılan algoritmalar hazır kütüphane yardımıyla çalışma kapsamında denenmiştir. Bu algoritmalar target pathway değişkeninin tahmini için öncelikli olarak denenmiştir.

3.4. Deneylerin icra akışı

Deneylerin icra akışı Şekil 2'de gösterilmiştir. Makine öğrenmesi Uygulama aşamasında GDSC-2 verilerinin rastgele belirlenen %80'i eğitim için ayrılmıştır. Kalan % 20 veri ise test için kullanılmıştır. Test verilerinin bağımlı değişkenleri makine öğrenmesi yöntemleri ile kıyaslanarak doğruluk oranları belirlenmiştir.

Her makine öğrenmesi yöntemi için uygulama 10 kez çalıştırılmıştır Her program çalışmasında GDSC_2 veri setinde eğitim-test için rastgele seçimler farklı olacaktır. Elde edilen 10 makine öğrenmesi model çıktısının doğruluk ortalaması o deneyin nihai performansı olarak belirlenmiştir. Böylece makine öğrenmesi modellerinde bias ve aşırı öğrenmeye karşı önlem planlanmıştır.

Her makine öğrenmesi modeli ile tahmin edilen bağımlı değişkenler DrugTarget ve TargetPathway olarak tanımlanmıştır. DrugTarget tahmin edilirken adaletli olması için makine öğrenmesi TargetPathway değişken değerini dikkate almamıştır. Sonraki deneyde ise TargetPathway tahmin edilirken DrugTarget değişken değeri dikkate alınmamıştır.

Makine öğrenme model oluşturma ve test tahminin 10 deney modeli ortalamasının hesaplanması ve her algoritmanın iki farklı tahminde bulunması nedeniyle her makine öğrenmesi algoritması toplamda 20 kez çalıştırılmıştır. Üç farklı makine öğrenmesi algoritması için toplamda 60 program icrası, model oluşumu mevcuttur.

Model oluşturmak için algoritmaların optimum parametreleri araştırılmıştır. En iyi sonucu veren makine öğrenmesi modelleri için bulunan parametreler Tablo 1'te sunulmuştur.

Tablo 1. Makine Öğrenme Algoritmaları ve Parametreleri

kNN	SVC	LightGbm
n_neighbors = 1	c = default (1.0)	learning_rate=default (0.1)
weights = default ('uniform')	kernel = default ('rbf')	num_leaves=default (31)
algorithm = default ('auto')	degree = default (3)	early_stopping_rounds= default(0)
leaf_size = default (30)	gamma = 'auto'	num_iterations= default (100)
p = default (2)	coef0 = default (0.0)	
metric = default ('minkowski')		

4. Bulgular

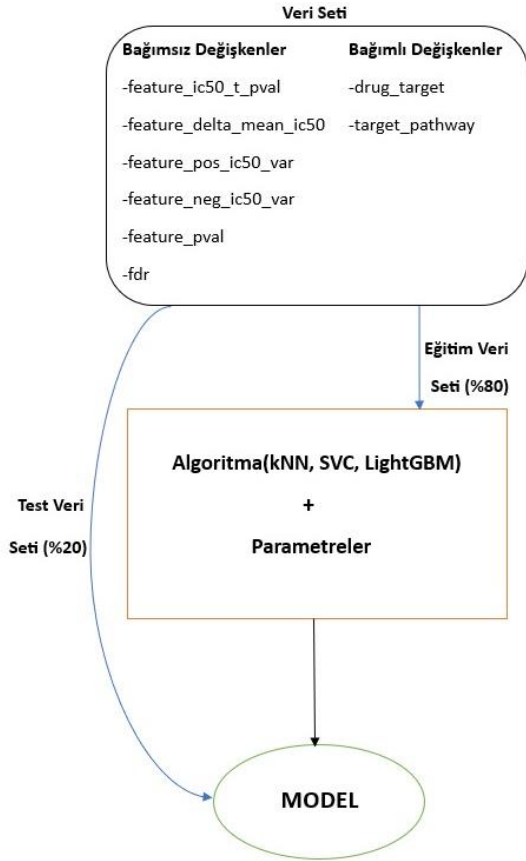
Çalışmada üç farklı algoritma için ayrı ayrı deney sonuçları elde edilmiştir. Bunun yanı sıra kNN algoritmasında tercih edilmesi gereken ideal k değeri araştırılmıştır. Ön deney çalışmalarında ideal k değerinin 1 olduğu sonucuna varılmıştır.

GDSC2 veri kümesinden iki adet bağımlı özellik tahmini yapılması amaçlanmıştır. Bunlar DrugTarget ve TargetPathway özellikleridir. Bu nedenle algoritmalar her özellik için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. CTDBase veri kümesine doğru girdi sağlanabilmesi için her iki bağımlı değişkenin de yüksek doğruluk oranına sahip olması hedeflenmiştir.

Algoritmaların doğruluk değerini belirlemek için aşağıdaki yöntem kullanılmaktadır:

Veri kümesinde yer alan satırların % 80'i eğitim, kalan %20'si test amacıyla kullanılmıştır. Eğitim kümesindeki veriler makine öğrenmesi uygulamasına girdi olarak verilmiştir.

Makine öğrenmesi tahminleri deneye edildiğinde doğruluk performansı ölçümü gereklidir. Çalışmada doğru tahmin sayısının tüm tahmin sayısına oranı analiz için kullanılmıştır. Modelin ürettiği küme tahminlerin test veri kümesinde yer alan küme ile uyumlu olması doğru tahmin, aksi takdirde yanlış tahmin olarak tanımlanmıştır. Plan doğrultusunda deneyler ve bulgular aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2. GDSC-2 Model İş akışı

Birinci deneyde üç algoritmanın Hedef Yolak Tahmin değişkeni için doğruluk oranı hesaplanmıştır. Tablo 2'de gösterilen bulgulara göre sırasıyla kNN ve LightGBM modelleri tatminkar sonuç vermiştir:

Tablo 2. Hedef Yolak Tahmin ortalaması

Algoritma	Doğruluk Oranı (%)
SVC	51.27
LightGBM	86.20
kNN	89.96

İkinci deneyde ise Algoritmalar İlaç Tahmin deneylerine tabi tutulmuştur. Tablo 3'de ise deney sonuçları sunulmuştur. İkinci deneyde de kNN ve LightGBM model ortalamaları başarılı sonuç vermiştir. Burada belirtmek gerekir ki, kNN ve LightGBM modeli performansını arttırmak için bir çok parametre denenmiştir.

Tablo 3. İlaç Tahmin ortalaması

Algoritma	Doğruluk Oranı (%)
SVC	55.24
LightGBM	84.60
kNN	88.42

Yapılan bu çalışmalar sonucunda target pathway değişkeninin tahmininde hem LightGBM hem de kNN model tahminlerinin çok daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu deney esnasında k'nın 1 olan değeri test edilmiştir.

Çalışmada kNN algoritmasının başarılı sonuçlar vermesi, veri kümesinde yer alan özelliklerin kendi aralarında uyumlu özelliklere sahip olduğu yargısını ortaya çıkarmaktadır. Zira boyut sayısı arttığında SVC'in doğruluk performansının da artması beklenir. Öte yandan 6 boyutlu ve 2975 vektör elemanı olan veri boyutu kNN'in daha iyi sonuç vermesi ile sonuçlanmıştır.

Tablo 3'te elde edilen sonuçlara göre vektör elemanları arasında ideal kümeleme yapılırken sadece en yakın bir komşuyu hesaba katmak daha verimli örüntü yakalamaktadır. Bu durumda her vektör elemanının özgün karakterini dikkate almak gerektiği kanaatine varılmaktadır.

kNN algoritmasının yanı sıra LightGBM algoritmasını baz alan model çalışmaları da kNN modellerine yakın performanslar elde etmiştir. Gradient Boosting temelli bir algoritma olan LightGBM literatürde iyi performans göstermektedir (Ke ve diğ., 2017). Hem karar ağaçlarını hem de zayıf öğrenme yaklaşımını kullanmaktadır. Öte yandan algoritmanın başarısında öğrenme oranı, ağaç derinliği ve yaprak sayısı parametrelerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir.

4. Sonuçlar

Kanserin oluşum süreci, genetik faktörlerin kansere etki şekli, ilaçların etki düzeyi, ilaçların hassasiyet düzeyi gibi konular yakın zamanda araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bunun sonucunda açık kaynaklı veri tabanları ortaya çıkmış ve araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. CTDBase ve GDSC açık kaynaklı veri setlerinden ikisini oluşturmaktadır.

Gen-hastalık-ilaç üçlüsü arasındaki etkileşiminin iyi şekilde anlaşılması kanser tedavisinde doğru ilaç ve dozaj kullanımına destek sağlayacaktır. İlaç dirençlerinin ve yolaklarının daha iyi anlaşılabilmesi için açık kaynak veri sunulan GDSC, makine öğrenmesi çalışmaları için değerli kaynak sunmaktadır.

Hastalık-Yolak verilerinin doğru öngörülmesi koşulu ile ilgili genin doğru tahmin edilmesi hem ilaç geliştirme hem de ilaç yeniden konumlandırma konu başlıklarında önem arz etmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda ilaç özelliklerinin tahmini için makine öğrenmesi algoritmaları üzerinde çalışılmıştır.

Çalışmanın gelişim sürecinde yer alan ilk ana konu GDSC veri tabanından akciğer kanser verilerini toplamaktır. Elde edilen veriler üzerinde Hedef ilaç ve hedef yolak tahminlerinin diğer özelliklere göre belirlenmesidir. Çalışmada GDSC veri setinde yer alan hedef ilaç, ilaç yolağının doğru tahmin edilebilmesi için makine

öğrenmesi tabanlı yöntemler araştırılmıştır. Bu özelliklerin doğru tahmin edilmesi durumunda CTDBase veri seti kullanılarak ilişkili hastalığın belirlenmesine yardımcı olacaktır. Böylece ilaçlara ait bazı özellikler ile hastalık ilişkisi daha iyi anlaşılacaktır.

Problemin çözümü için farklı makine öğrenmesi algoritmaları denenmiştir. Rastgeleliği en aza indirebilmek için deneyler 10'ar kez tekrar edilmiştir. Süreç içerisinde Hedef ilaç ve yolak tahminlerini doğru biçimde tahmin eden doğru parametreler araştırılmıştır.

Geliştirilen modeller arasında hem LightGBM hem de kNN doğru tahmin performansları sunmuştur. Gen-hastalık-ilac etkileşiminin daha iyi anlaşılması hastalara doğru ilacın doğru zamanda ve doğru dozajda belirlenmesi çalışmasına katkıda bulunması konusunda önem arz etmektedir.

Sunulan açık kaynaklı genomik veriler geçen yirmi yılda üstel olarak artmıştır. Bu durum, veriden öğrenme olanaklarının artmasına yardımcı olmaktadır. Bunun sonucunda gen-hastalık-ilac ilişkisini daha iyi tanımlayan makine öğrenmesi yöntemlerinin gelişmesine yardımcı olacaktır.

Etik standartlara uygunluk

Bu çalışmada kullanılan verilerin tamamı açık kaynaklıdır ve bilimsel dergilerde yayımlanmıştır. İlgili açık veri kaynakları atıfları ve Referanslara eklenmiştir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Abdullah TERCAN, kodların hazırlanması, veri toplama ve etiketleme, kavramsal tasarım, bulguların elde edilmesi, değerlendirilmesi, makalenin yazılması; Gıyasettin ÖZCAN literatür tarama, kavramsal tasarım, makalenin yazılması, araştırmanın bilimsel danışmanlığının yürütülmesi.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. Bu çalışma Abdullah Tercan'ın, Doç. Dr. Gıyasettin ÖZCAN danışmanlığında tasarladığı lisans bitirme projesinin geliştirilmiş halidir.

Kaynaklar

- Ali, M., & Aittokallio, T. (2019). Machine learning and feature selection for drug response prediction in precision oncology applications. *Biophysical reviews*, 11(1), 31-39.
- Alison, S., Papachristodoulou, D.K., Despo, K., Elliott, W.H., & Elliott, D.C. (2014). *Biochemistry and molecular biology* (Fifth ed.). Oxford. ISBN 978-0-19-960949-9. OCLC 862091499.
- Alpaydin, E. (2020) Introduction to machine learning. 4th ed. MIT press.
- Atwany, M. Z., Sahyoun, A. H., & Yaqub, M. (2022). Deep learning techniques for diabetic retinopathy classification: A survey. *IEEE Access.*, 10, 28642-28655.
- Bengio, Y. (2008) Learning deep architectures for AI. *Foundations and Trends in Machine Learning* 2(1): 1-127.
- Boser, B.E., Guyon, I.M. & Vapnik, V. (1992). "A training algorithm for optimal margin classifiers". Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory - COLT '92. p. 144.
- Brent M. K., Park J., Fong, S.H., Sanchez, K.S., Lee, J., Kreisberg, J.F., Jianzhu, M., & Ideker, T. (2020). Predicting Drug Response and Synergy Using a Deep Learning Model of Human Cancer Cells. *Cancer Cell*, Volume 38, Issue 5, Pages 672-684.e6, ISSN 1535-6108, <https://doi.org/10.1016/j.ccell.2020.09.014>.
- Callahan, A., & Shah, N. H. (2017). Machine learning in healthcare. In Key Advances in Clinical Informatics (pp. 279-291). Academic Press.
- Davis, A. P., Grondin, C. J., Johnson, R. J., Sciaky, D., McMorran, R., Wieggers, J., ... & Mattingly, C. J. (2019). The comparative toxicogenomics database: update 2019. *Nucleic acids research*, 47(D1), D948-D954.
- Erickson, B. J., Korfiatis, P., Akkus, Z., & Kline, T. L. (2017). Machine learning for medical imaging. *Radiographics*, 37(2), 505-515. <https://doi.org/10.1148/rg.2017160130>
- Fix, E., & Hodges, J. L. (1951). Discriminatory Analysis. Nonparametric Discrimination: Consistency Properties (PDF Report). *USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field, Texas*.
- Gao, Y., Lyu, Q., Luo, P., Li, M., Zhou, R., Zhang, J., & Lyu, Q. (2021). Applications of Machine Learning to Predict Cisplatin Resistance in Lung Cancer. *International Journal of General Medicine*, 14, 5911.
- Goldberger, J., Hinton, G. E., Roweis, S., & Salakhutdinov, R. R. (2004). Neighbourhood components analysis. *Advances in neural information processing systems*, 17.

- Grossman, R.L., Heath, A.P., Ferretti, V., Varmus, H.E., Lowy, D.R., Kibbe, W.A., & Staudt, L.M., (2016). Toward a Shared Vision for Cancer Genomic Data. *N. Engl. J. Med.*, 375, 1109-1112.
- Hamilton, D., Pacheco, R., Myers, B., & Peltzer, B. (2020). kNN vs. SVM: A comparison of algorithms. In: Hood, Sharon M.; Drury, Stacy; Steelman, Toddi; Steffens, Ron, eds. . *Proceedings of the Fire Continuum-Preparing for the future of wildland fire*.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction* (Vol. 2, pp. 1-758). New York: Springer.
- Huang, C. H., Chang, P. M. H., Hsu, C. W., Huang, C. Y. F., & Ng, K. L. (2016). Drug repositioning for non-small cell lung cancer by using machine learning algorithms and topological graph theory. *BMC bioinformatics* (Vol. 17, No. 1, pp. 13-26). BioMed Central.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Libbrecht, M. W., & Noble, W. S. (2015). Machine learning applications in genetics and genomics. *Nature Reviews Genetics*, 16(6), 321-332.
- Kuenzi, B.M., Park, J., Fong, S.H., Sanchez, K.S., Lee, J., Kreisberg, J.F., et al. (2020). Predicting Drug Response and Synergy Using a Deep Learning Model of Human Cancer Cells. *Cancer Cell*, 38:672-84.
- McCulloch, & W., Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: 115-133
- Menden, M. P., Iorio, F., Garnett, M., McDermott, U., Benes, & C. H., Ballester, P. J., & Saez-Rodriguez, J. (2013). Machine learning prediction of cancer cell sensitivity to drugs based on genomic and chemical properties. *PLoS one*, 8(4), e61318.
- Noble, W. S. (2006). What is a support vector machine. *Nature biotechnology*, 24(12), 1565-1567.
- Özcan G, ve Yazici S. (2022). Açık Erişimli veri kaynakları ve veri analizi. Türsen Ü, editör. *Dermatolojide Yapay Zekâ*. 1. Baskı. Ankara: Türkiye Klinikleri. p.9-15.
- Paltun, B.G., Kaski, S., & Mamitsuka, H., (2021). Machine learning approaches for drug combination therapies, *Briefings in Bioinformatics*, Volume 22, Issue 6, November, <https://doi.org/10.1093/bib/bbab293>
- Rafique, R., Islam, S. R., & Kazi, J. U. (2021). Machine learning in the prediction of cancer therapy. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 19, 4003-4017.
- Raies, A., Tulodziecka, E., Stainer, J., Middleton, L., Dhindsa, R. S., Hill, P., ... & Vitsios, D. (2022). DrugnomeAI is an ensemble machine-learning framework for predicting druggability of candidate drug targets. *Communications Biology*, 5(1), 1291.
- Qiu, K., Lee, J., Kim, H., Yoon, S., & Kang, K. (2021). Machine learning based anti-cancer drug response prediction and search for predictor genes using cancer cell line gene expression. *Genomics & informatics*, 19(1).
- Qureshi, R., Basit, S. A., Shamsi, J. A., Fan, X., Nawaz, M., Yan, H., & Alam, T. (2022). Machine learning based personalized drug response prediction for lung cancer patients. *Scientific Reports*, 12(1), 18935.
- Shen, D., Wu, G., & Suk, H. I. (2017). Deep learning in medical image analysis. *Annual review of biomedical engineering*, 19, 221.
- Tan, X., Yu, Y., Duan, K., Zhang, J., Sun, P., & Sun, H. (2020). Current advances and limitations of deep learning in anticancer drug sensitivity prediction. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 20(21), 1858-1867.
- Tang, Y.C., Powell, R.T. & Gottlieb, A. (2022). Molecular pathways enhance drug response prediction using transfer learning from cell lines to tumors and patient-derived xenografts. *Sci Rep*, 16109. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20646-1>
- Tate J.G., Bamford, S., Jubb, H.C., Sondka, Z., Beare, D.M., Bindal, N., et al. (2019). COSMIC: the Catalogue of Somatic Mutations in Cancer. *Nucleic Acids Research*, 47(D1):D941-D7. doi: 10.1093/nar/gky1015.
- Xia, F., Allen, J., Balaprakash, P., Brettin, T., Garcia-Cardona, C., Clyde, A., ... & Stevens, R. (2022). A cross-study analysis of drug response prediction in cancer cell lines. *Briefings in bioinformatics*, 23(1), bbab356.
- Yang, W., Soares, J., Greninger, P., Edelman, E.J., Lightfoot, H., Forbes, S., et al. (2013) Genomics of Drug Sensitivity in Cancer (GDSC): a resource for therapeutic biomarker discovery in cancer cells. *Nucleic Acids Res.* 41 (Database issue):D955-61
- Yu, K. H., Beam, A. L., & Kohane, I. S. (2018). Artificial intelligence in healthcare. *Nature biomedical engineering*, 2(10), 719-731.
- Zou, H., & Hastie, T. (2005). Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 67(2), 301-320.

TAŞ OCAĞI ARTIK MALZEMESİNİN YOL DOLGUSU, ALT VE ÜST TEMEL MALZEMESİ OLARAK UYGUNLUĞUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Beyza ÖZULU^{1*}, Gökhan ÇEVİKBİLEN², Berrak TEYMÜR³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-4627-9003>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-5444-1387>

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, 34469, İstanbul,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8290-5337>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kompaksiyon enerjisi Taş ocağı artığı Faydalı kullanım	<i>Türkiye’de kentsel dönüşüm projeleri için agrega ihtiyacı, özellikle büyük şehirlerdeki sınırlı sayıdaki ocak sahalarında efektif alan ve kaynak kullanımını gerektirmektedir. Bu çalışmada, İstanbul’da bir taş ocağından kırmataş üretimi sonrası açığa çıkan artık malzemenin yol kesimlerinde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Kaba dane oranı KDO %75-51 arasında olan malzeme siltli kum (SM) sınıfındadır. Standart enerji SE (600 kN-m/m³) ve modifiye edilmiş ME enerjisinde (2700 kN-m/m³) belirlenen optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri, plastik olmayan artık numunelerindeki sınırlı kil fraksiyonu nedeniyle sırasıyla %11 ve %8 ile sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Buna göre KDO ile doğru orantılı olarak artan ıslatılmış CBR değerleri SE’de %9-16, ME’de %45-67 arasında değişmektedir. D_{10} efektif çapı ile doğru orantılı olarak artan geçirgenlik değerleri SE’de $2,2 \times 10^{-6}$ - $5,0 \times 10^{-6}$ m/s ve ME’de $1,2 \times 10^{-6}$ - $3,7 \times 10^{-6}$ m/s’dir. Direk kesme kutusu testlerinde kohezyon (c) değerleri ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiş ve iç sürtünme açısı (ϕ) sıkıştırma enerjisiyle orantılı olarak artmıştır. KDO ile doğru orantılı olarak artan ϕ değeri SE’de 38-40°, ME’de 43-47° arasında değişmektedir. Sonuç olarak, incelenen ocak artığının ince dane oranının sınırlandırılmasının yol dolgu ve temel altı uygulamalarında kullanılabilirliğini sağlayacağı öngörülmektedir.</i>

EVALUATION OF THE SUITABILITY OF ROCK QUARRY RESIDUE AS ROAD FILL, SUBGRADE AND SUBBASE MATERIAL

Keywords	Abstract
Compaction energy Quarry residue Beneficial use	<i>The need for aggregates, due to urban transformation projects in Türkiye, requires optimization of space and resource use, especially at the limited number of quarry sites in big cities. In this study, the usability of the residue material, which is released after the production of crushed stone from a quarry in Istanbul, in road sections is evaluated. The material whose coarse grain fraction CGF is between 75 and 51% in silty sand (SM) soil type. Optimum water content (w_{opt}) values determined at standard energy, SE (600 kN-m/m³) and modified energy ME (2700 kN-m/m³), was observed as 11% and 8% respectively due to the limited clay fraction in the non-plastic residue samples. Accordingly, soaked CBR values which increase in direct proportion to CGF range between 9-16% in SE and 45-67% in ME. The permeability values that increase in direct proportion to D_{10} effective diameter are 2.2×10^{-6} - 5.0×10^{-6} m/s in SE and 1.2×10^{-6} - 3.7×10^{-6} m/s in ME. In direct shear box tests, the cohesion (c) values were negligible and the internal friction angle (ϕ) increased in proportion to the compression energy. The ϕ value, which increases in direct proportion to the CGF, ranges between 38-40° in SE and 43-47° in ME. As a result, it has been predicted that limiting the fine grain ratio of the quarry residue examined will ensure its usability in road fill and sub-base applications.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 14.01.2023

Submission Date : 14.01.2023

Kabul Tarihi : 09.05.2023

Accepted Date : 09.05.2023

* Sorumlu yazar: ozulu@itu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1232294>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Dünyada gelişmekte olan sanayileşme ve teknoloji ile birlikte enerji ve hammadde ihtiyacındaki artış, çeşitli çevresel kaynaklardan yararlanma zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Sanayileşme ve teknoloji gelişimine ek olarak, nüfus artışının hız kazanması da alternatif kaynak arayışına sebep olmaktadır (Menteşe ve Böbrek, 2020). Madencilik, dünyadaki bu hammadde/enerji eksikliğine ve mineral kaynağına olan taleplere çözüm olabilecek en önemli ekonomik faaliyetlerden biridir. Ancak, kazı işlemi gibi fiziksel uygulamalar sonucunda mineral/element elde edilmesinin yanı sıra ciddi miktarlarda sıyırma malzemeleri olarak adlandırabileceğimiz artık malzeme açığa çıkmaktadır. Ayrıca, madencilik faaliyetlerinde mineral veya cevher çıkarımı sırasında çevre açısından risk teşkil edebilecek çeşitli kimyasal atıklar oluşmaktadır.

Açık ocak madenciliğinden biri olan taş ocağı işletmeciliğinde amaç; kaya, çakıl, kum ve çeşitli minerallerin üzerine kaplayan örtü tabakasının kazılarak kaldırılması ve hedef madenin çıkarılmasıdır. Ancak, yapılan kazılar sonucunda zemin esaslı maden artık malzemeleri ortaya çıkmakta ve bu malzemelerin maden sahasından uzaklaştırılması gerekmektedir (Salomons, 1995). Bunlara ek olarak, taş ocağı işletmeciliğinde kullanılan su, kazılar sonucunda önemli ölçüde atık su oluşumuna neden olmaktadır. Çünkü madencilik faaliyetlerinde rezerv belirleme için yapılan sondaj işlemlerinde küçük boyuttaki malzemelerin uzaklaştırılması, kullanılan makinelerin kazıcı/delici uçlarının soğutulması ve tozumanın engellenmesi amacıyla su kullanılmaktadır (Ediz, Sunay ve Yuvka, 2001).

Taş ocağı işletmeciliğinde ortaya çıkan önemli miktarlardaki maden artık malzemeleri ve atık su, mineral çıkarımı yapılan alanın yakınında yer alan maden gölünde depolanmaktadır (US Environmental Protection Agency, 1994). En ekonomik ve yaygın bertaraf yöntemlerinden biri olarak artık malzemelerin depolanması tercih edilmektedir. Depolama yöntemine ek olarak, kaba daneli maden artık malzemesi dolgu baraj yapımında kullanılabilirken ince daneli olanlar ise maden gölü tabanında geçirimsiz bir tabaka oluşturmak amaçlı değerlendirilebilmektedir. Kaba ve ince daneli maden artık malzemelerinin bu şekilde kullanımı ekonomik ve uzun süreli bir işleyiş sağlarken belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda dolgu barajın stabilitesinin sağlanması büyük bir öneme sahiptir. Ekonomik ve uzun süreli bir işletim imkânı vermesine rağmen tüm maden sahaları için uygun olmayan bu yöntemin mühendislik açısından olumsuz etkileri de olabilmektedir. Maden gölünde biriktirilen atık suyun dolgu barajdan sızarak kaymaya ve çevresel felaketlere sebep olması ve ince daneli malzemenin rüzgâr gibi çevresel etkilerle yayılarak kirliliğe neden

olması, sürdürülebilirlik ve yapısal stabilitenin sağlanması açısından olumsuz etkiler oluşturmaktadır (US Environmental Protection Agency, 1994). Buna bağlı olarak, maden gölünde biriktirilen artık malzemelerin miktarının azaltılması ve dolgu barajın stabilite problemlerinin önlenmesi amacıyla kıyı koruma yapılarında ve altyapı projelerinde bu malzemeler değerlendirilebilmektedir.

Ülkemizde kentsel dönüşüm projeleri ile inşaat faaliyetleri için ortaya çıkan doğal agrega ihtiyacı, büyük şehirlerde sınırlı sayıda kalan taş ocaklarında yer ve kaynak kullanımını optimize etmeyi gerektirmektedir. İstanbul özelinde gerçekleştirilen önceki çalışmalarda maden artığının geotekstil tüp gibi yöntemlerle susuzlaştırılarak faydalı kullanıma yönlendirilmesinin atık havuz alanı ihtiyacını azaltacağı ifade edilmektedir (Karadoğan, 2021). Karadoğan vd. (2022) tarafından geotekstil tüp içerisinde ince dane tutabilme oranının poliakrilamid katkısı kullanımı ile artırıldığı gösterilen çalışmada artık malzemenin dane çapı dağılımının %53 kaba dane ile sınırlı kaldığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, aynı taş ocağında atık havuzuna yönlendirilen malzemenin, nakil boru hattından temin edilen daha çok sayıda numune üzerinde yapılan elek ve hidrometre analizleri ile kaba dane oranının %75 seviyelerine kadar ulaşabildiği gözlenmiştir. Bu bakımdan plastik davranış göstermeyen siltli kum sınıfına giren artık malzemenin, Karayolları Teknik Şartnamesine (KTŞ, 2013) göre yol dolgusu, alt ve üst temel malzemesi olarak uygunlukları araştırılmıştır. Bu kapsamda, ince dane oranı en az ve en çok olan iki numuneye odaklanılmış, standart ve modifiye enerjide sıkışma kapasiteleri kompaksiyon deneyleriyle belirlenen numunelerin, maksimum birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında sıkıştırılmaları sonrası mekanik ve hidrolik özellikler, ilgili şartname koşulları uyarınca değerlendirilmiştir. Bu amaçla CBR, direkt kesme kutusu ve düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzeme

Bu çalışmada, İstanbul'da yer alan bir taş ocağı açık maden işletmeciliği sonucunda ortaya çıkan ve maden gölüne depolanan artık malzeme kullanılmıştır. Bu amaçla, göl deşarj hattından alınan numuneler 15 dm³ hacimli plastik saklama kaplarında muhafaza edilmiştir. Kimyasal olarak herhangi bir işlem görmemiş olan taş ocağı artığının başlıca ağırlıkça kimyasal bileşenleri; C (%5.42), O (%36.35), F (%1.07), Na (%0.83), Mg (%4.75), Al(%13.21), Si (%24.84), K (%1.73), Ca (%0.68) ve Fe (%11.12)'dir (Karadoğan, Çevikbilen, Korkut ve Teymur, 2022). Mineralojik açıdan %84-88 kuvars, %5-7 feldspat ve kalsit, %1'den düşük mika ve opak mineral içeren numune

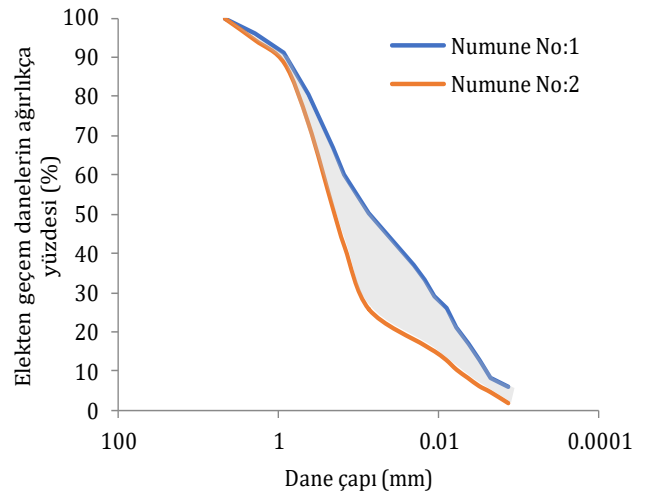
kumtaşıdır. TS 2517 standartına göre kırma kum fraksiyonunda çözünen SiO_2 27 milimol/litre ve alkali agrega azalması 79 mmol/litre belirlenmiş artık malzemenin zararsız agrega bölgelerinde kaldığı değerlendirilmiştir. Numunelerde, herhangi bir organik içerik gözlenmemiş, çalışmada 105°C etüvde kurutulan numuneler kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Taş ocağı artık malzemesi

Artık malzemedeki değişkenliği ortaya koymak amacıyla sahadan alınan numunelerden seçilen 6 adet numune ayrı ayrı kurutularak endeks özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, ASTM D6913 ve ASTM D7928 standartlarına uygun olarak, sırasıyla elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Dane çapı dağılım eğrileri çizilen numunelerin Şekil 2'de verilen taralı bölge ile temsil edildiği, kaba dane oranının %75 ile 51 arasında olduğu ve kil yüzdesinin %4 -8 arasında sınırlı

kaldığı belirlenmiştir. ASTM D4318 standardı baz alınarak gerçekleştirilen kıvam limitleri deneylerine göre incelenen numuneler plastik davranış göstermemiştir. ASTM D2487 standardında yer alan Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) uyarınca taş ocağı artığı SM (siltli kum) olarak sınıflandırılmıştır. AASHTO M145 ve ASTM D3282 sınıflandırma sistemine göre ise artığın içerisindeki ince dane oranı bakımından çoktan aza doğru A-4 veya A-2-4 sınıfına girmiştir. ASTM D854 standardına göre piknometre testi yapılmış danelerin ortalama özgül ağırlık değeri 2.77 hesaplanmıştır. Numunelere ait endeks özelliklerindeki değişim Tablo 1'de kaba dane oranı en düşük ve en yüksek olanları ile özetlenmiştir.



Şekil 2. Dane boyutu dağılım eğrilerinin değişim aralığı

Tablo 1. Seçilen Taş Ocağı Maden Artığı Numunelerinin Zemin Endeks Özellikleri

Testler	Parametreler	Numune No: 1 (NN1)	Numune No :2 (NN2)	Test Metodu
Dane Çapı Dağılımı	Çakıl (%)	1	0	ASTM D6913
	Kum (%)	50	75	ASTM D6913
	Silt (%)	41	21	ASTM D7928
	Kil (%)	8	4	ASTM D7928
	D_{10}	0.003	0.01	
	D_{30}	0.011	0.09	
	D_{60}	0.15	0.25	ASTM D6913
	C_u	50	25	& ASTM D7928
	C_c	0.27	3.24	
Kıvam Limitleri	Likit Limit (LL)			
	Plastik Limit (PL)	Plastik değil	Plastik değil	ASTM D4318
Özgül Ağırlık	G_s	2.78	2.76	ASTM D854
Zemin Sınıfı (USCS)	-	SM	SM	ASTM D2487
Zemin Sınıfı (AASHTO)	-	A-4	A-2-4	AASHTO M145

2.2. Yöntem

Belirlenen maden sahasından elde edilen taş ocağı artık malzemesinin yol dolgusu, alt ve üst temel malzemesi olarak uygunluğunun değerlendirilebilmesi amacıyla iki farklı enerji altında sıkıştırılabilirliği incelenmiştir. Her iki enerji altında da sıkıştırılmış artık malzemelerin mekanik ve hidrolik davranışlarını belirlemek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır.

ASTM D698 ve ASTM D1557 standartlarına uygun olarak, 600 kN-m/m³ standart ve 2700 kN-m/m³ modifiye olmak üzere iki farklı sıkıştırma enerjisinin kullanıldığı kompaksiyon deneylerinde en az 5 farklı su muhtevasında çalışılmıştır. İlk su muhtevası için belirlenen su miktarı ile ıslatılan numuneler homojen bir nem dağılımı için bir gece boyunca üzeri kapalı bir şekilde bekletilmesinin ardından kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış taş ocağı artık malzemesinin potansiyel mukavemetini belirlemek, alt temel veya temel tabakası olarak uygunluğunu değerlendirmek amacıyla yaş CBR deneyi ASTM D1883 standartına göre yapılmıştır. Optimum su muhtevasında 600 kN-m/m³ standart ve 2700 kN-m/m³ modifiye sıkıştırma enerjisi altında artık numuneleri CBR kalıbına sıkıştırılmıştır. Numuneler en az bir hafta süre ile 4.5 kg'lık sürşarj yükü altında, su içerisinde bekletilerek şişme davranışları düşey mikrometrelerle takip edilmiştir. Bu aşamadan sonra CBR testi yapılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. CBR deneyi

Düşen seviyeli permeabilite deneyi (ASTM D2434) için önceden belirlenen optimum su muhtevasında hazırlanan artık numuneleri kullanılmıştır. Rijit duvarlı permeabilite deney düzeneğinde 11.6 cm yükseklik ve 10 cm iç çaplı kalıp içerisinde numuneler standart veya modifiye kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kalıbın üst ve alt kapakları ile numune yüzeyi arasına numune sürüklemeyi engellemek için oldukça geçirgen filtre malzemesi konulmuştur. Kapak ile boru hatlarında bulunan hava kabarcıkları, vakum kullanılarak uzaklaştırılmış ve numune, içerisinden aşağıdan yukarıya doğru su geçirilerek doyurulmuştur. Doyurma sonrası numunede yukarıdan aşağı doğru

kararlı bir su akışı sağlandıktan sonra deneye başlanmış, başlangıç ve son durumundaki su yükseklikleri arasındaki fark zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Deney, numune içerisinden 50 ml'lik su geçişi sonrasında sonlandırılmıştır. Her numune için deney en az iki kez tekrarlanmıştır.

Kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ASTM D3080 standardı uyarınca, direkt kesme deneyleri yapılmıştır (Şekil 4). Optimum su muhtevasında standart veya modifiye enerji altında 10.0 cm yükseklik ve 11.6 cm iç çaplı kalıpta sıkıştırılan numunelerden çelik ring batırılarak 6 cm x 6 cm kesit alanlı ve 2 cm yükseklikli deney numuneleri çıkarılmıştır. Deney hücresine yerleştirilen numunelerde deney boyunca drenaj üst ve alt başlıklardan sağlanmış, ilk yüklemenin hemen ardından deney hücresine su doldurulmuştur. Numuneler deneyin yapılacağı 100, 200 veya 300 kPa normal gerilme altında en az 24 saat süreyle konsolide edilmiştir. Düşey deformasyon ölçümlerine göre birincil konsolidasyonunu tamamlayan numuneler üzerinde 0.12 mm/dk hızında kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında oluşan yatay ve düşey yer değiştirme ile kesme kuvvetleri değerleri, yatay yer değiştirmeye bağlı olarak kaydedilmiştir.



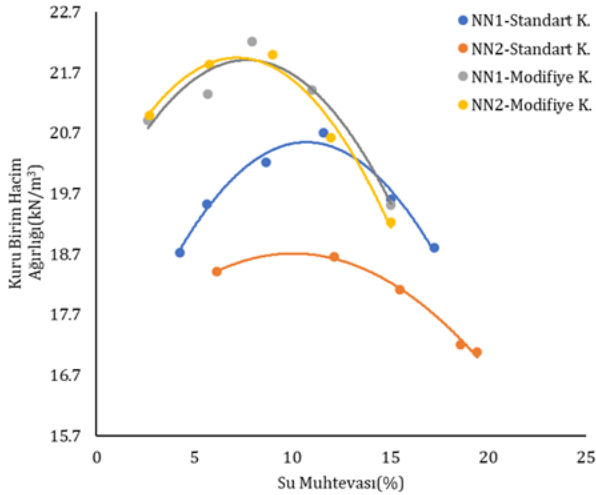
Şekil 4. Direk kesme kutusu deneyi

3. Bulgular

Taş ocağı maden gölünde biriktirilen artık malzemelerin kimyasal test analizlerinde çevre için zararlı olabilecek herhangi bir kirletici maddeye rastlanmamıştır. Buna göre taş ocağı artık malzemesinin herhangi bir ek işlem görmeden toprak işlerinde zemin esaslı dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Artık malzemenin plastik davranış göstermediği ve siltli kum (SM) zemin sınıfında olduğu belirlenmiştir. Amerikan Karayolları Sınıflandırma Sistemi'ne göre NN1 için A-4 olan zemin sınıfı, NN2 için A-2-4 sınıfındadır. Buna göre, artık malzeme içerisindeki ince dane oranının %49'dan 25'e azalması AASHTO'nun genel derecelendirilmesine göre alt temel olarak uygunluk seviyesini orta düzeyden iyiye yükseltmektedir.

Artık malzemenin sıkışma kapasitesinin araştırıldığı deneylerde standart ve modifiye sıkıştırma enerjisi altında oluşan su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık

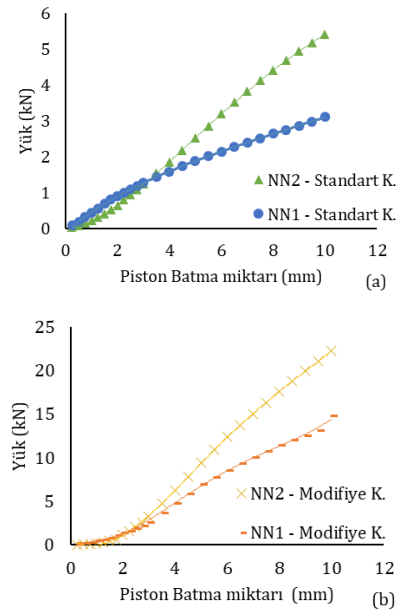
arasındaki ilişki NN1 ve NN2 numuneleri için Şekil 5'te verilmiştir. Buna göre belirlenen w_{opt} ve $\gamma_{k maks}$ değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Önceki çalışmalara göre ince dane oranı yüksek, killi numunelerde optimum su muhtevasının kaba daneli zeminlere göre daha yüksek olması beklenmektedir. Bu çalışmada standart veya modifiye enerjide sıkıştırılan numunelerde w_{opt} değerleri ince dane oranına göre değişkenlik göstermemiştir. Bunun nedeni ince dane içerisindeki kil yüzdesinin %4-8 aralığında sınırlı kalmasıdır. Deneylerde sıkıştırma enerjisinin artmasıyla w_{opt} değeri beklenildiği gibi %11'den %8'e düşmüştür. Dane çapı dağılımına göre numunelerin daha iyi derecelendirilmesi, $\gamma_{k maks}$ değerini standart enerjide 18.6'dan 20.6 kN/m³'e artırırken, modifiye enerjide sıkıştırılan numunelerde $\gamma_{k maks}$ değerinde 22.0'den - 22.2 kN/m³'e artış bulunmuş ve derecelendirmenin olumlu etkisinin sınırlı kaldığı gözlenmiştir (Tablo 2).



Şekil 5. NN1 ve NN2 numunelerine ait standart ve modifiye enerji altındaki sıkışma eğrileri

Optimum su muhtevasında standart veya modifiye enerji altında sıkıştırılarak hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin yaş CBR deneyleri yapılmıştır. Yaş CBR

deneyi öncesi şişme davranışı gözlenmemiştir. Deneyde elde edilen yük-batma miktarı eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Deneyler sonucunda standart ve modifiye enerji ile sıkıştırılan NN1 numunesinin CBR değerleri sırasıyla %9 ve 45 olarak hesaplanmış, NN2 numunesi için ise bu değerler %16 ve 67 olarak belirlenmiştir. CBR deneylerine ait veriler Tablo 2'de özetlenmiştir. Buna göre, artık malzemedeki kaba dane oranıyla doğru orantılı olarak yaş CBR değerlerinin arttığı, sıkışma enerjisinin standarttan modifiye artırılması ile NN1 ve NN2 numunelerinde CBR değerlerinin sırasıyla yaklaşık 5 ve 4 kat iyileştiği gözlenmiştir.



Şekil 6. CBR deney verilerinin a) Standart ve b) Modifiye sıkıştırma enerjisiyle hazırlanan numunede gösterimi

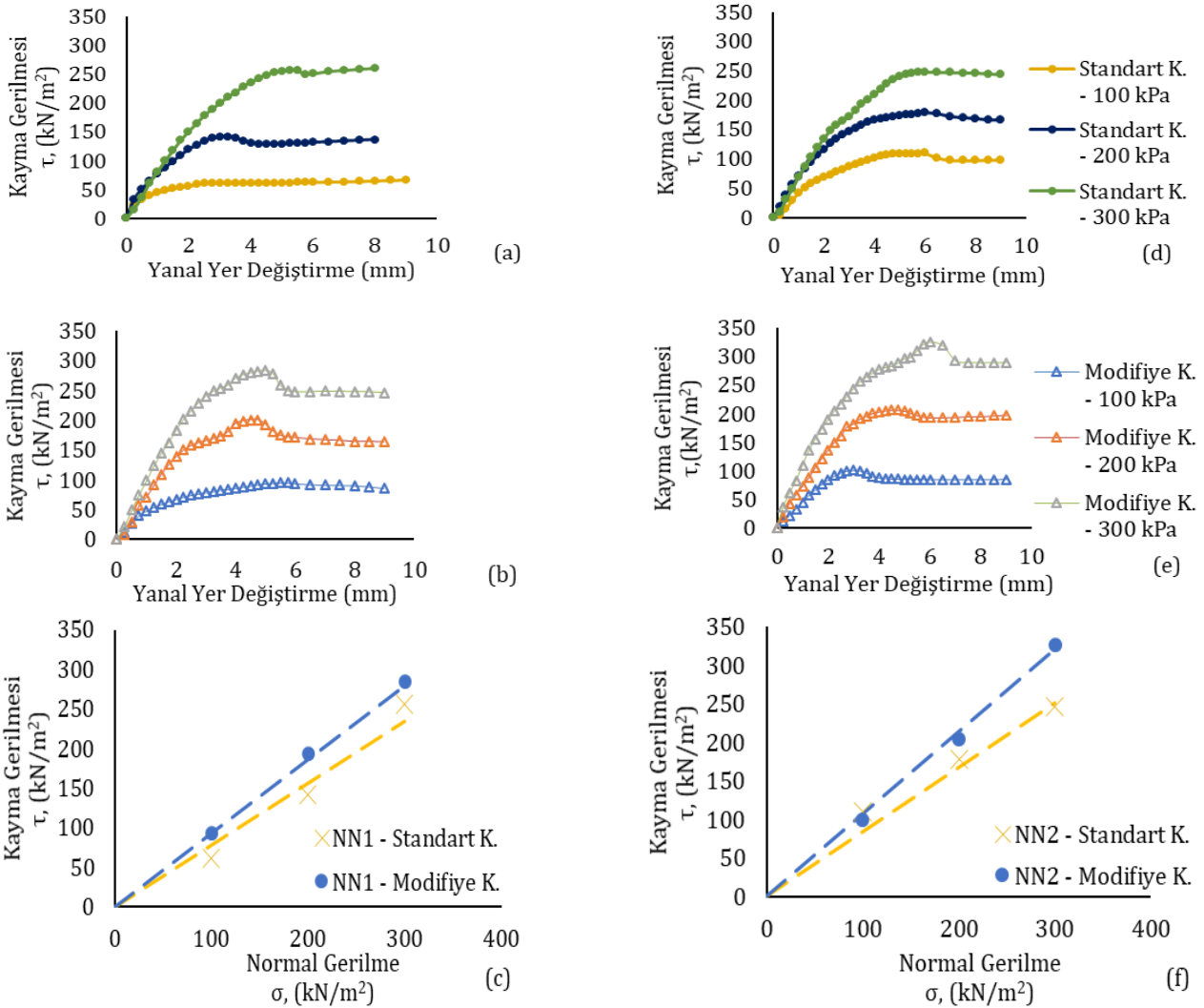
Tablo 2. Seçilen Taş Ocağı Maden Artığı Numunelerinin Mekanik ve Hidrolik Özellikleri

Testler	Parametreler	NN1		NN2		Test Metodu
		Standart	Modifiye	Standart	Modifiye	
Sıkışma potansiyeli	Optimum su muhtevası, w_{opt} (%)	11	8	10	7.6	ASTM D698 / ASTM D1557
	Maksimum kuru birim hacim ağırlık $\gamma_{k maks}$ (kN/m ³)	20.6	22.2	18.6	22.0	
CBR	Şişme yüzdesi (%)	-	-	-	-	ASTM D1883
	CBR (%)	9	45	16	67	
Hidrolik iletkenlik	Permeabilite katsayısı, k(m/s)	2.2×10^{-6}	1.2×10^{-6}	5.0×10^{-6}	3.7×10^{-6}	ASTM D2434
Kayma mukavemeti	Kohezyon, c (kN/m ²)	-	-	-	-	ASTM D3080
	Kayma mukavemeti açısı, ϕ (°)	38	43	40	47	

İnce dane oranı ve enerji değişimi ile birlikte NN1 ve NN2 taş ocağı artık malzemelerinin permeabilite katsayılarının (k) belirlenebilmesi için düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, standart ve modifiye enerji altında hazırlanan NN1 numunesinin k değerleri sırasıyla 2.2×10^{-6} ve 1.2×10^{-6} m/s olarak bulunmuştur. Aynı koşullar altında sıkıştırılan NN2 numunesi için ise k sırasıyla 5×10^{-6} ve 3.7×10^{-6} m/s değerlerini almıştır (Tablo 2). Önceki çalışmalarda çoğunlukla permeabilite ile ilişkilendirilen D10 efektif çap değeri baz alındığında, bu çalışmada da elde edilen k değerleri D10 ile doğru orantılı olarak büyümüştür. Standart enerjide sıkıştırılan numunelerde belirlenen k değerlerinin, sıkıştırma işleminde modifiye enerjinin kullanılması ile NN1 ve NN2 için sırasıyla %46 ve 25 oranında azalmıştır. Buna göre, k değerinin

düşürülmesi amacıyla sıkıştırma enerjisinin artırılması ince dane içeriği fazla olan numunede daha etkili olmuştur.

Zeminlerin geoteknik mühendisliği açısından değerlendirilebilmesi için önemli bir yere sahip olan kayma mukavemet parametreleri, direkt kesme deneyi ile belirlenebilmektedir. Bu deneyler sonucunda zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerleri elde edilmektedir (Reddy, 2002). Standart ve modifiye enerji ile sıkıştırılan NN1 ve NN2 numunelerinin direkt kesme deneyleri sonucunda, elde edilen kayma gerilmesi (τ) - yanay yer değiştirme (Δl) ilişkisini gösteren grafikler Şekil 7'de verilmiştir. Mohr Coulomb kırılma kriterine göre kohezyon değerlerinin ihmal edilebilir olduğu tespit edilmiştir. NN1 zemin numunesinin standart kompaksiyon enerjisi için içsel sürtünme açısı 38° iken, modifiye kompaksiyon enerjisi



Şekil 7. NN1 ve NN2 numunelerinin kesme kutusu deney verileri a) NN1 Standart sıkıştırma enerjisinde b) NN1 Modifiye sıkıştırma enerjisinde c) Standart ve Modifiye sıkılıktaki NN1 numunelerinin σ - τ grafikleri d) NN2 Standart sıkıştırma enerjisinde e) NN2 Modifiye sıkıştırma enerjisinde f) Standart ve Modifiye sıkılıktaki NN2 numunelerinin σ - τ grafikleri

için bu değer 43° olarak belirlenmiştir. Aynı şartlarda hazırlanan NN2 numunesinin içsel sürtünme açısı, enerjinin artmasıyla birlikte 40° den 47° ye yükselmiştir (Tablo 2). Direkt kesme kutusu deneylerinde ince dane oranının büyük çoğunluğunun silt dane boyutunda olması sebebiyle c değerinde bir değişim gözlenmezken, kaba dane oranıyla doğru orantılı olarak ϕ değeri standart enerjide 2° , modifiye enerjide 4° lik bir artış göstermiştir.

4. Tartışma

Açık maden ocağı işletmelerinden biri olan taş ocakları, kimyasal işlem görmemiş zemin esaslı artık malzemeler üretmektedir. Günümüzde bu tür artık malzemeler, inşaat ve geoteknik mühendisliği projelerinde kullanım alanı bulmaktadır. Ancak, bu tür artık malzemelerin faydalı kullanım alanlarının belirlenmesi için bir dizi ön araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu amaçla sahadan alınan numunelerin endeks ve mühendislik özelliklerinin zemin mekaniği laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi toprak işi uygulamaları için gereklidir. Bu çalışma kapsamında, İstanbul'da yer alan bir taş ocağından temin edilen maden artık malzemelerinin öngörüldüğü üzere kimyasal madde içermediği tespit edilmiştir. Maden sahasından çıkarılan temsili artık malzeme örnekleri üzerinde dane boyutu dağılım analizleri sonucunda SM zemin sınıfında olduğu ancak ince dane oranının %25-49 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Sahadaki ince dane oranı değişkenliğinin mühendislik parametrelerine yansımaları değerlendirilebilir. Amacıyla iki sınır değerli numune ile de çalışılması uygun bulunmuştur. Gerek zeminin taşıma gücünün artırılması gerekse hidrolik iletkenliğinin düşürülmesi amacıyla dolgu imalatlarında zemine katkı ekleyerek iyileştirme yöntemi yerine uygulanan sıkıştırma enerjisinin artırılması daha ekonomik ve çevre dostu bir çözüm olabilmektedir. Bu yüzden, seçilen her iki tür artık malzemesi üzerinde de standart ve modifiye sıkıştırma enerjileri altında artık malzemenin mekanik ve hidrolik davranışı modellenmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

KTŞ'ye göre dolgu malzemesi olarak kullanılması planlanan zemin numunesinin $LL < 60\%$ ve $PI \leq 35\%$ şartlarını sağlaması beklenmektedir. Yapılan kıvam limitleri deneyleri sonucunda her iki tür zemin numunesinin de plastik davranış göstermediği ve şartları sağladığı görülmektedir. Karadoğan, Çevikbilen ve Teymur (2020)' nin çalışmasında bahsedildiği üzere, SM zemin sınıfına ait maden artık malzemelerinin dolgu malzemesi olarak kullanımı uygundur. Bununla birlikte, KTŞ' de yer alan dolgu malzemesi olarak kullanım şartlarına göre standart kompaksiyon deneyi sonucunda zemin numunesinin $\gamma_{kmax} \geq 14.5 \text{ kN/m}^3$ şartını sağlaması gerekmektedir. Gerçekleştirilen standart ve modifiye kompaksiyon deneylerinde

enerjinin artırılması ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış görülürken su muhtevası değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. En iyi sıkıştırma potansiyeline sahip zemin numuneleri modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numuneleridir ve tüm numuneler KTŞ' de belirtilen maksimum kuru birim hacim ağırlık şartını sağlamaktadır.

Yol ve altyapı inşaatlarında kullanım kriterlerine bağlı olarak, belirli bir kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan zeminlerin şişme potansiyellerinin ve yaş CBR değerlerinin KTŞ' de belirtilen şartları sağlaması gerekmektedir. Standart ve modifiye enerjide sıkıştırılan NN1 ve NN2 numunelerinin, dolgu malzemesi için gerekli olan %3' ten daha az şişme potansiyeline sahip olma şartını sağladığı tespit edilmiştir. Ancak, standart enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin KTŞ' de yer alan ve CBR değerinin %10' nun altında olması durumunda zayıf zemin olarak nitelendirilmesinden dolayı dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Buna bağlı olarak literatürde yer alan geotüp ile susuzlaştırma işlemine maruz bırakılan ilgili malzemenin % 53 kaba dane oranlı fraksiyonu üzerinde yapılan deneyler sonucunda CBR değerinin %8 olduğu ve bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği belirlenmiştir (Karadoğan, 2021). Standart enerjide sıkıştırılan NN2 numunesi ise dolgular için gerekli olan $CBR \geq 15$ şartını sağlamaktadır. Modifiye sıklıktaki NN1 zemin numunesi üstyapı taban malzemesi için gerekli olan $CBR \geq 20$ şartı sağlarken aynı sıklıktaki NN2 numunesi alt temel kullanım kriteri olan $CBR \geq 50$ koşulunu sağlayıp en yüksek CBR değerine sahiptir.

Dolgu yapılarında stabilite ve oturma problemlerine yol açan en önemli faktörlerden biri dolgu gövdesinden veya temel zemini içinden gerçekleşen sızma problemidir. Meydana gelen bu sızma problemi, dolguyu oluşturan zemin danelerini sürükleyerek borulanmaya ve hatta yapının yıkımına yol açabilmektedir (Mesci, 2006). Bu aşamada, oturma ve stabilite problemlerinin engellenebilmesi için permeabilite deneylerinden yararlanılmaktadır. Galvão, Almeida, Póvoas ve Basto (2016), 10^{-5} ve 10^{-7} m/s değerleri arasında yer alan permeabilite katsayısına sahip zemin numunelerinin düşük geçirgenlik özelliği gösterdiğini belirtmektedir. Modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin standart sıklıktaki numunelere göre daha düşük permeabilite katsayısına sahip olduğu ve modifiye sıklıktaki NN1 numunesinin en düşük geçirgenliği gösterdiği belirlenmiştir. Daha önce bahsedilen permeabilite katsayısı kriterine göre standart ve modifiye sıklıkta hazırlanan tüm zemin numunelerinin, dolgu malzemesi olabileceği, ancak maden gölü taban zemininde vb. geçirimsizlik tabakası olarak kullanılması için gerekli olan $k=10^{-9}$ m/s değerine sahip olmadığı anlaşılmıştır.

Maden artık malzemesinin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi için, konsolidasyonlu ve drenajlı koşullarda kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin tamamı kohezyonsuz zemin özelliği gösterirken en yüksek içsel sürtünme açısı değerine sahip artık malzeme modifiye sıklıktaki NN2 numunesidir. Kaba dane oranı fazla olan NN2 numunelerinde, enerjinin etkisinden bağımsız olarak daha yüksek içsel sürtünme açısı elde edilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, İstanbul'daki bir taş ocağında yer alan maden gölünde biriktirilen maden artık malzemesi üzerinde bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilerek kompaksiyon enerjisi değişiminin bu zemin numunelerinin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi ve buna bağlı olarak geoteknik mühendisliği açısından uygulama alanları değerlendirilmiştir. Yürütülen deneyler sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Temin edilen artık numuneleri üzerinde yapılan dane boyutu dağılım analizleri sonucunda maden artık malzemelerinin ince dane oranı değerleri %25 (NN2) ile %49 (NN1) arasında değişkenlik göstermekte ve numuneler siltli kum (SM) zemin sınıfında yer almaktadır.
- Yapılan kıvam limitleri deneyleri doğrultusunda, NN1 ve NN2 zemin numunelerinin plastik davranış göstermediği ve KTS'de yer alan dolgu malzemesi için gerekli olan kriterlere uygun oldukları saptanmıştır.
- Kompaksiyon enerji değişiminin değerlendirilmesi baz alınarak yürütülen deneyler sonucunda standart ve modifiye enerjiyle sıkıştırılan her iki zemin numunesinin de maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artış görülmüş ve KTS'ye göre dolgu malzemesi olarak kullanım kriterini sağladığı belirlenmiştir.
- Standart enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin CBR değerleri dikkate alındığında KTS'ye göre zayıf zemin sınıfına girdiği ve dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı belirlenirken aynı enerjide sıkıştırılan NN2 numunesinin dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Modifiye enerjide sıkıştırılan NN1 numunesinin ise üstyapı taban malzemesi olarak kullanılabileceği ve NN2 numunesinin alt temel uygulamalarında değerlendirilebileceği belirlenmiştir.
- Her iki zemin numunesi için de permeabilite katsayısı kriteri baz alınarak modifiye sıklıkta hazırlanan zemin numunelerinin standart sıklıkta hazırlananlara göre daha düşük geçirgenliğe sahip olduğu tespit edilirken en düşük geçirgenliğe sahip

zemin numunesinin modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 numunesi olduğu gözlemlenmiştir.

- Direkt kesme kutusu deneylerinden elde edilen sonuçlara göre standart ve modifiye sıklıkta hazırlanan NN2 numunelerinin NN1 numunelerine göre daha yüksek içsel sürtünme açısı değerine sahip olduğu ve en yüksek değer modifiye sıklıktaki NN2 numunesinden elde edilmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde; kompaksiyon enerjisindeki artışın zemin iyileştirmesinde önemli bir rol oynadığı ispatlanırken standart enerjiyle sıkıştırılan NN1 numunesinin zayıf zemin sınıfında olduğu ve dolgu malzemesi olarak kullanılamayacağı KTS kriterlerine göre belirlenmiştir. Ancak, standart sıklıktaki NN2 numunesi dolgu malzemesi olarak kullanıma uygun olmakla birlikte, modifiye sıklıkta hazırlanan NN1 ve NN2 numunelerinin sırasıyla üstyapı taban malzemesi ve alt temel olarak kullanılabileceği saptanmıştır. Kompaksiyon enerjisinin artırılmasıyla birlikte taş ocağı maden artık malzemelerinin mekanik davranışları üzerinde iyileştirme sağlanabilirken inşaat ve geoteknik mühendisliği açısından yararlı kullanım alanlarının genişletilebileceği yorumu yapılabilmektedir. İleriki çalışmalarda saha uygulamaları için artık malzemenin içerisindeki ince dane oranını kontrol altında tutmak amacıyla yıkama eleme vb. yöntemlerle istenilen yaş CBR değerinin sağlanması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Geoteknik Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Tüm laboratuvar çalışanlarına ve numunelerin tedariki konusunda desteklerinden dolayı Dr. Öğretim Üyesi Ümit Karadoğan'a teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; B. ÖZULU, bilimsel araştırmanın deneylerinin yapılması, deney sonuçlarının yorumlanması, makalenin oluşturulması; G. ÇEVİKBİLEN, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması; B. TEYMÜR, makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

ASTM D1557. (2014). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D1557-12R21>.

- ASTM D1883. (2018). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D1883-16.1>.
- ASTM D2434. (2022). Standard Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D2434-22>.
- ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D2487-17>.
- ASTM D3080. (2012). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D3080-04>.
- ASTM D3282. (2015). Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D3282-15>.
- ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D4318-17E01>.
- ASTM D6913. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D6913-04R09E01>.
- ASTM D698. (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (600 kN-m/m³). doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D0698-12R21>.
- ASTM D7928. (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. doi: <http://dx.doi.org/10.1520/D7928-17>.
- ASTM D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Erişim adresi: <https://www.astm.org/standards/d854>.
- Ediz, İ. G., Sunay, B. ve Yuvka, Ş. (2001). MADENCİLİKTE TOZ KAYNAKLARI VE KONTROLÜ. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (002), 121-132. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/pub/dpufbed/issue/36361/411958#article_cite.
- Galvão, R. G., Almeida, N., Póvoas, Y. ve Basto, P. (2016). Pervious concrete pavement system at polytechnic school of university of pernambuco, Brazil: Product design conception. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 21, 4657-4668. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/306159864_Pervious_concrete_pavement_system_at_polytechnic_school_of_university_of_pernambuco_Brazil_Product_design_conception.
- Karadoğan, Ü. (2021). Haliç Dip Tarama Çamuru ve Maden Atığının Geotekstil Tüp ile Susuzlaştırılması ve Geoteknik Mühendisliği Açısından Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/1c45192e-8e62-4a0d-8074-545801a37c9d>.
- Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G., Korkut, S. ve Teymur, B. (2022). Dewatering of Mine Waste Using Geotextile Tubes. Mining, Metallurgy and Exploration, 39(6), 2477-2490. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s42461-022-00679-w>.
- Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G. ve Teymur, B. (2020). Deniz Dibi Tarama Malzemelerinin Yol Dolgusu Olarak Kullanımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 1059-1070. doi: <http://dx.doi.org/10.17482/uumfd.679700>.
- Menteşe, S. ve Böbrek, O. (2020). Madencilik Faaliyetlerinin Topraktaki Ağır Metaller (As, Cd, Co, Fe Ve Ni) Üzerine Etkisi: Orhaneli Ve Büyükorhan (Bursa) Örneği. Ege Coğrafya Dergisi, 29(1), 45-56. Erişim adresi: https://dergipark.org.tr/tr/pub/ecd/issue/55073/684614#article_cite.
- Mesci, S. B. (2006). Dolgu Baraj Gövdelerindeki Sızmaların ve Freatik Hattın İncelenmesi: Seferihisar Barajı Uygulaması. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/bafa8f2c-f631-465e-b721-f3b2b823bec4/content>.
- Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. Journal of Geochemical Exploration, 52(1-2), 5-23. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00039-E](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6742(94)00039-E).
- US Environmental Protection Agency. (1994). Technical Report: Design and evaluation of tailings dams. Office of Solid waste. Erişim adresi: <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/industrial/special/web/pdf/tailings.pdf>.
- Yusoff, S. A. N. M., Bakar, I., Wijeyesekera, D. C., Zainorabidin, A., Azmi, M. ve Ramli, H. (2017). The Effects of Different Compaction Energy on Geotechnical Properties of Kaolin and Laterite. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics Inc. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4998380>.

GMAW KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FARKLI PASLANMAZ ÇELİKLERİN MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNE KULLANILAN İLAVE TELİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali YÜRÜK^{1*}

¹ Kırka Eti Maden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-7160-9962>

Anahtar Kelimeler	Öz
GMAW, AISI 430, AISI 304, Kaynak Teli	<i>Ferritik ve östenitik paslanmaz çelikler birçok endüstriyel alanda bir arada kullanılmaktadır. Bu durum da bu iki paslanmaz çelik türünün birleştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde genelde kaynak akımı, kaynak hızı vb kaynak parametreleri üzerine yoğunlaşıldığı görülürken kaynak telinin birleştirmeler üzerindeki etkisi araştırılan çok az çalışmaya rastlanmıştır. Bu nedenle bu çalışmada kaynak telinin, birleştirmenin mekanik ve mikroyapısına etkilerini incelemek için AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik farklı kaynak hızlarında GMAW kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Daha sonra yapılan kaynaklı birleştirmenin makro ve mikroyapı özelliklerini tespit etmek içinde mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilirken mekanik özelliklerini belirlemek için de sertlik, çekme testleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda kaynak metalinin mikroyapısının martenzit+ östenit + ferritten oluştuğu görülmüştür. Sertlik ölçüm sonuçlarında ise en sert bölgenin kaynak metaline olduğu belirlenirken 308L kaynak teli ile birleştirilen numunelerin sertlik ölçümleri 309LSi kaynak teli ile birleştirilen numunelere oranla daha yüksek çıkmıştır. Kaynak tellerinin, kaynak metaline Mn ve Cr gibi dayanım artırıcı elementler katması sebebiyle üretilen tüm kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımı AISI 430 ana malzemeden daha yüksek ölçülmüştür.</i>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE ADDITIONAL WIRE USED ON THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF DIFFERENT STAINLESS STEELS JOINED BY GMAW WELDING METHOD

Keywords	Abstract
GMAW, AISI 430, AISI 304, Welding Wire.	<i>Ferritic and austenitic stainless steels are used together in many industrial areas. in this case has makes it necessary to join these two types of stainless steel. When the studies carried out to date are examined, it is seen that generally focused on parameters such as welding current, welding speed, etc., there are very few studies investigating the effect of welding wire on joints. There fore in this study, AISI 304 austenitic stainless steel and AISI 430 ferritic stainless steel were joined with GMAW welding method at different welding speeds in order to examine the effects of weld additional wire on the mechanical and microstructure of the joint. While microstructure studies were carried out to determine the macro and microstructural properties of the welded joint, hardness and tensile tests were applied to determine its mechanical properties. As a result of the studies, it has been observed that the microstructure of the weld metal consists of martensite + austenite + ferrite. In the hardness measurement results, it was determined that the hardest region was the weld metal, while the hardness measurements of the samples joined with 308L welding wire were higher than the samples joined with 309LSi welding wire. The tensile strength of all welded joints produced was higher than the AISI 430 base material, as the welding wires add strength-enhancing elements such as Mn and Cr to the weld metal.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 24.02.2023

Kabul Tarihi

: 05.06.2023

Research Article

Submission Date

: 24.02.2023

Accepted Date

: 05.06.2023

* Sorumlu yazar: aliyuruk@hotmail.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1255850>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

farklı yol ve yöntemlere başvurmak zorunda kalmıştır. Bu yol ve yöntemlerden birisi de farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip metal ve alaşımlarının bir arada kullanılmasıdır. Çalışma koşullarından kaynaklanan pek çok olumsuzluğu ortadan kaldırmak için otomotiv sanayi, petrokimya endüstrisi, nükleer güç santralleri ve daha pek çok alan farklı metal ve alaşımları bir arada kullanmaktadır (Nabendu ve diğ., 2017; Rahul vd.,2018). Özellikle yüksek korozyon direncinin ve mekanik dayanımın ön plana çıktığı alanlarda farklı kalitedeki paslanmaz çeliklerin birlikte kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Fattah-alhosseini ve Vafaiean 2015).

Paslanmaz çeliklerin diğer çeliklere oranla daha yüksek korozyon direncine sahip olmasının nedeni bileşimlerdeki krom oranının %12 olmasıdır (Durgutlu ve diğ., 2009). Östenitik paslanmaz çelikler mükemmel mekanik özellikleri ve yüksek korozyon direnci nedeni ile en çok tercih edilen paslanmaz çelik türüdür (Curiel ve diğ., 2011; Sajjad vd., 2012). Östenitik paslanmaz çeliğe bu özellikleri kazandıran ise bileşimindeki %12-25 Cr ve %8-25 Ni'dir. (Durgutlu ve diğ., 2009; Gözütok ve diğ., 2009). Mükemmel mekanik özelliklere, yüksek korozyon direncine ve iyi kaynak kabiliyetine sahip olan bu çelikler, termal güç santrallerinde, biyokimya ve petrokimya endüstrilerinde, otomotiv sanayinde ve kimya endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Curiel ve diğ., 2011; Jibrin vd., 2015).

Ferritik paslanmaz çelikler ise sahip oldukları mükemmel gerilme korozyonu çatlama direncine ve ayrıca klorürlü ortamlarda oyulma ve çatlama direnci özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar (Lakshminarayanan ve diğ., 2009). Ferritik paslanmaz çelikler nikel içermedikleri için östenitik paslanmaz çeliklere oranla daha ucuzdur (Ramkumar ve diğ., 2015; Mahmoud ve diğ., 2014). Bunun dışında ferritik paslanmaz çelikler östenitik çeliklere göre daha düşük genişleme katsayısına sahiptirler (Ramkumar ve diğ., 2015). Otomotif sanayinde eksoz manifoldların imalatında kullanılan ferritik paslanmaz çeliklere, paslanmazlık özelliğini içerisinde %12 oranında bulunan Cr tarafından sağlanmaktadır (Yürük ve Kahraman,2017; Mallaiah vd., 2014; Villaret vd., 2013; Mallaiah vd., 2013). Ferritik paslanmaz çelikler sahip oldukları bütün bu iyi özelliklerinin yanında kaynak bölgesinde ve ısı tesiri altındaki bölgede, kaynak sırasında tane irileşmesi meydana geldiğinden dolayı düşük kaynak kabiliyetine sahiptirler. Bu sorun ancak kaynak sırasında ısı girdisinin düşük tutulması ile önlenabilmektedir (Ramkumar ve diğ., 2015; Mallaiah vd., 2014).

Bu iki tür paslanma çelik petrokimya endüstrisi, gemi sanayi, nükleer güç üniteleri ve daha pek çok alanda yoğun bir şekilde bir arada kullanılmaktadırlar (Nabendu ve diğ., 2017). Bu kadar geniş bir alanda birlikte kullanılmaları bu iki paslanmaz çeliğin birbirine

kaynak ile birleştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Farklı paslanmaz çeliklerin kaynaklı birleştirme işlemleri pek çok kaynak yöntemi (GMAW, GTAW, elektrik ark kaynağı, sürtünme karıştırma vb) kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Ancak bu kaynak yöntemlerinden en çok tercih edilen yöntem ise GMAW kaynak yöntemi olmaktadır.

GMAW kaynak yönteminde ark kaynak sırasında otomatik olarak devamlı beslenen ilave kaynak teli ile iş parçası arasında meydana gelir. Meydana gelen bu ark aynı zamanda kaynak için gerekli kaynak ısısını da oluşturmaktadır (Kılınçer ve Kahraman, 2009). GMAW kaynağında kaynak bölgesi atmosferin zararlı etkilerine karşı Argon ve Helyum gibi gazlar tarafından korunmaktadır (Nabendu ve diğ., 2017). Bu kaynak yöntemini diğer kaynak yöntemlerinden ayıran özellikler ise yüksek kaynak hızı, otomatik kaynak olarak uyarlanabilmesi, yüksek metal biriktirme oranı, her konumda kolaylıkla kaynak yapılabilmesi ve cüruf oluşturmamasıdır (Yürük ve diğ., 2017). GMAW kaynağında kaynak kalitesini koruyucu gaz türü, kaynak akımı, ilave tel, voltaj, kaynak hızı, koruyucu gazın debisi, nozul mesafesi gibi parametreler belirlenmektedir (Nabendu ve diğ., 2017).

Bugüne kadar paslanmaz çeliklerin GMAW kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ile ilgili çok fazla çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmalarda çoğunlukla kaynak hızı, kaynak akımı ve kaynak voltajı gibi parametrelerin kaynaklı birleştirmelerin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Meena vd sinerjik GMAW kaynağı paslanmaz çelikleri farklı kaynak akımı, kaynak hızı ve gaz debisinde birleştirmişler ve birleştirmelerin mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerini araştırmışlardır (Meena ve diğ., 2017). Biswas ve diğ. GTAW kaynak yöntemi ile AISI 304 paslanmaz çelik ile orta karbonlu 45C8 çeliğini farklı kaynak akımı, kaynak hızı, ark voltajı ve gaz debisinde birleştirmişler ve birleştirmelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır (Biswas ve diğ., 2018). Ayrıca paslanmaz çeliklerin mekanik ve korozyon özellikleri mikroyapılarına bağlı olarak değişmektedir. Mikroyapı özellikleri ise kaynak sırasında tercih edilen kaynak elektrotuna ve diğer kaynak parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Pekkarinena ve Kujanpää, 2010). Bu nedenlerle bu çalışmada kaynak telinin, kaynak metalinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerinin incelenmesi amaç edinilmiştir. Bu amaçla farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, iki farklı kaynak teli kullanılarak, üç farklı kaynak hızında birleştirilmiş ve daha sonra üretilen kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı özellikleri ile mekanik özellikleri araştırılmıştır. Üretilen numunelere mekanik test olarak sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Martínez ve diğ. (2021), Derin öğrenme ve makine tekniği öğrenme teknikleri GMAW kaynak yöntemini analiz etmişler ve GMAW sürecinin, makine öğrenme teknikleri ile akıllı kontrol geliştirme konusunda büyük potansiyele sahip olduğunu söylemişlerdir. (Yürük ve diğ., 2021), GMAW kaynak yöntemi ile 5754 alüminyum alaşımını farklı kaynak hızlarında ve ark geriliminde birleştirmişler ve çalışma sonunda ark gerilimindeki artışın ısı girdisini artırırken kaynak hızındaki artışın ısı girdisini azalttığını söylerlerken, kaynak parametrelerinde meydana gelen bu değişikliğin mikroyapı değiştirdiğini bildirmişlerdir. (Yürük ve diğ., 2021), farklı alüminyum alaşımları GMAW kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve birleştirmelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları bu çalışma sonucunda kaynaktaki meydana gelen mikro boşluk kusurlarının yorulma dayanımını ve ömrünü düşürdüğünü rapor etmişlerdir. (Nabendu ve diğ., 2017), AISI 409 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerini AISI 308 kaynak teli kullanarak GMAW kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve en iyi sonuçların 100 A kaynak akımında 10 L/dk gaz debisi ve 9 mm nozul mesafesinde elde ettiklerini ifade etmişlerdir. (Yürük ve diğ., 2017), S235JR çeliği ile AISI 430 paslanmaz çeliğini GMAW kaynağı ile birleştirmişler ve Kaynaklı bağlantılarda kaynak akımının artmasıyla ısı girdisi artmış, ısı girdisindeki artış dolayısıyla kaynak sonrası soğuma hızı azaldığından sertliğin düştüğünü bildirmişlerdir. (Chuaiphan ve Srijaroenpramong, 2019), AISI 304 ve AISI 201 çeliklerini GTAW kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada kaynak hızının artması ile ısı girdisinin azaldığı için kaynak genişliğinin azaldığı ve kaynak derinliği, kaynak genişliği oranının düştüğünü söylemişlerdir. (Açar ve diğ., 2022), GMAW kaynak yöntemi AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğini birleştirdikleri ve birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada en yüksek çekme dayanımının %97 Ar+ % 3 H₂ gaz karışımında üretilen numunede elde edildiğini söylemişlerdir. (Oliveira ve diğ., 2019), AISI 304 paslanmaz çelik ile NiTi malzemesini GTAW kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak metalinin kaynak koşullarına bağlı olarak farklı mikroyapılar ve farklı kimyasal bileşim sergilediğini ifade etmişlerdir. (Serindağ ve Çam, 2021), AISI 304 paslanmaz çelik ile AISI 430 Paslanmaz çeliklerini gaz metal ark kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve östenitik çeliğin ısı iletkenlik katsayısı ferritik çeliğe oranla daha yüksek olduğu için

düşük ısı girdili birleştirmelerde çatlama meydana geldiğinin görüldüğünü ve bu nedenle farklı paslanmaz

çeliklerin kaynağında kaynak koşullarının önemli bir etkiye sahip olduğunu dile getirmişlerdir. (Durgutlu ve diğ., 2015), AISI 316 paslanmaz çeliğini TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri ve sürekli akım ile darbeli akımın mikroyapı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada darbeli akımla üretilen numunelerin kaynak metalinin tane yapısının sürekli akım ile üretilen numuneler oranla daha küçük olduğunu söylemişlerdir. (Açar ve diğ., 2023). GMAW kaynak yöntemi ile AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğini birleştirdikleri ve koruyucu gazın kaynak üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada Argon gazının içerisine %3 ve %7 oranlarında H₂ eklendiğinde tane yapısının irileştiğinin gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

3. Yöntem

Bu çalışma araştırma ve yayın etiğine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Deney Yöntemi

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ve AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeler 200×100×2 mm boyutlarında giyotin makasta kesilerek farklı kaynak hızlarında ve farklı kaynak teli kullanılarak birleştirilmiştir. AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Kaynak işlemlerinde kaynak teli olarak 1,2 mm çaplarındaki 309 LSi ve 308 L kaynak telleri kullanılmıştır. Kaynak tellerinin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Hazırlanan numunelerin kaynaklı birleştirme işlemleri Tablo 3’teki kaynak parametreleri kullanılarak Linconl Powertec 365 S gazaltı kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak esnasında koruyucu gaz olarak saf argon gazı kullanılırken atlık olarak da bakır altlıklar kullanılmıştır.

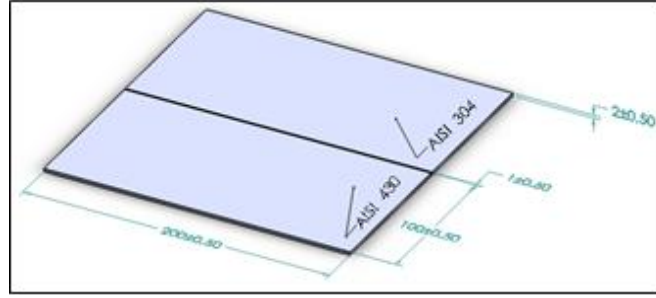
Şekil 1’deki gibi hazırlanan numunelere kaynak öncesinde yüzeylerindeki yabancı maddeleri temizlemek için mekaniksel olarak yüzey temizliği işlemi uygulanmıştır. Daha sonra aralarında 1’ er mm kaynak boşluğu kalacak şekilde 4 noktadan puntalanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden sonra kaynaklı birleştirmelerin gözle kontrolleri yapılırken makro ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mekanik özellikleri belirlemek için sertlik ve çekme deneyleri uygulanmıştır.

Tablo 1. AISI 430 ve AISI 304 Paslanmaz Çeliklerinin Kimyasal Bileşimi

Paslanmaz Çelik	Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Al	P	S	Fe
AISI 430	Bileşim	0,05	0,48	0,28	16,9	0,16	0,2	0,011			Kalan
AISI 304	Oranı (%)	0,04	0,9	0,5	18,2	8,1			0,03	0,001	Kalan
Mekanik Özellikler		Akma Dayanımı (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)			Uzama (%)		Mikro Sertlik (HV)		
AISI 430		318		424			13		220		
AISI 304		290		675			70		162		

Tablo 2. Kullanılan Kaynak Tellerinin Kimyasal Bileşimi

Kaynak Teli	Bileşim (%)	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu
309 LSi		0,03	1-2,5	0,65-1	23-25	12-14	0,03	0,03	0,75	0,75
308 L		0,03	1,5-2,2	0,30-0,95	19,5-22	9-11	0,03	0,03	0,75	0,25
Mekanik özellikler		Akma Dayanımı (MPa)			Çekme Dayanımı (MPa)			Uzama (%)		
309 LSi		410			570			38		
308 L		≥350			≥ 550			≥47		



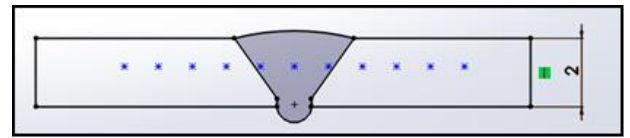
Şekil 1. Malzemelerin Kaynağının Şematik Görünümü

Tablo 3. Kaynak Parametreleri

Parça kodu	Kaynak akımı (A)	Tel Hızı (m/dak)	Kaynak Hızı (mm/dak)	Voltaj (V)	Isı Girdisi (kJ/mm)	Gaz	Gaz Debisi (lt/dak)	Kaynak Teli
LS1	197	5	30	24	7,565	Argon	12	309 LSi
LS2	197	5	40	24	5,674	Argon	12	
LS3	197	5	50	24	4,539	Argon	12	
L1	197	5	30	24	7,565	Argon	12	308 L
L2	197	5	40	24	5,674	Argon	12	
L3	197	5	50	24	4,539	Argon	12	

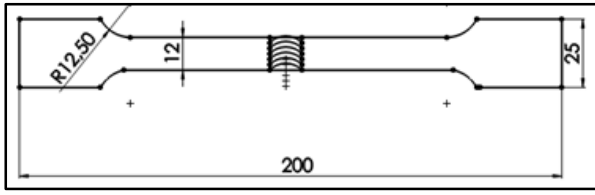
Makro ve mikroyapı incelemeleri için kaynaklı birleştirmelerden kaynak kesitine dik olarak örnekler çıkartılmış ve standart yöntemlerle zımparalama, parlatma ve dağlama işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi %10 oksalik asit ile elektrolitik olarak, 13,8 V, 3 Amper akımda 12 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Dağlama işleminden sonra optik mikroskop yardımı ile makro ve mikroyapı görüntüsü elde edilmiştir.

Sertlik ölçümleri için üretilen kaynaklı birleştirmelerden kaynak yönüne dik olacak şekilde kaynak kesitinden örnekler hazırlanmıştır. Sertlik ölçme işlemi için şekil 2'de görüldüğü gibi kaynak merkezinden her iki tarafa doğru 1mm aralıkla 11 noktadan ölçüm alınmış ve daha sonra ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak sertlik dağılım grafiği çizilmiştir.



Şekil 2. Sertlik Ölçüm Yöntemi

Çekme deneyi için numuneler ASTM E08 standardına göre Şekil 3'te verilen ölçülere göre hazırlanmış ve 100kN kapasiteye sahip olan İNSTON marka çekme test cihazı kullanılarak 4 mm/dak çekme hızında kopuncaya kadar çekilmiştir. Çekme deneyinde her kaynak hızı için üç örnek hazırlanmış ve üç örneğin ortalaması alınarak çekme uzama grafiği çizilmiş ve literatür yardımı ile yorumlanmıştır.

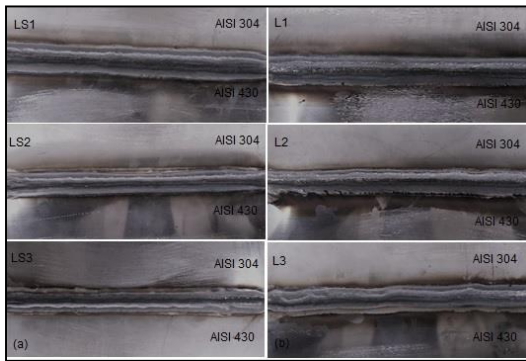


Şekil 3. Çekme Deney Numunesi Ölçüleri

4. Sonuçlar ve Tartışma

4.1. Görsel Kontrol

Farklı kaynak teli kullanılarak birleştirilen AISI 430 ve AISI 304 kalite paslanmaz çelik numunelerin kaynak dişinin yüzeyinde ve etrafında oluşmuş olabilecek olan düzensiz difüzyon, gözenek vb hataları belirlemek amacıyla numunelere gözle kontroller gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kaynaklı birleştirmelerden üretilen görüntüler Şekil 4'te verilmiştir.

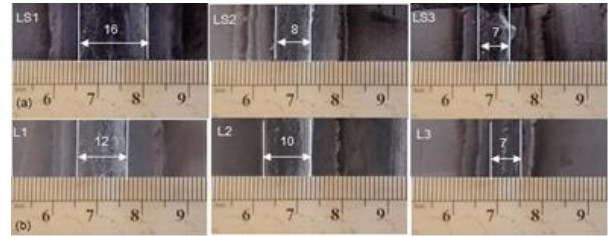


Şekil 4. Görsel Kontrol Görüntüleri A) 309Lsi ile Birleştirilen Numuneler B) 308L İle Birleştirilen Numuneler

Şekil 4'teki görüntüler incelendiğinde üretilen kaynaklı birleştirmelerin hiçbirinde kaynağın dayanımını olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir kenar yenmesi, birleşme hatası, boşluk gibi kaynak kusurlarına rastlanmamıştır. Zhi ve diğ. TIG, MIG çift taraflı olarak bakır ile paslanmaz çeliği MIG kaynağı birleştirdikleri çalışmada kaynak yüzünde birkaç sıçrama olmasına rağmen düzgün kaynak dikişleri elde ettikleri belirtmişlerdir (Zhi ve diğ., 2019).

Şekil 5'te kaynak hızının kaynak metaline olan etkisi görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde kaynak hızının

artması ile her iki kaynak teli ile üretilen numunelerin kaynak genişliğinin de azaldığı görülmektedir. Kaynak genişliği ölçümleri sonuçlarına göre 309 LSi kaynak teli ile üretilen birleştirmelerde kaynak hızının 30 mm/dk 'dan 40 mm/dk yükseltilmesi ile kaynak genişliği %50 azalırken 308 L kaynak teli ile üretilen numunelerde kaynak hızının 30 mm/dk'dan 40 mm/dk'a yükseltilmesi ile kaynak genişliği yaklaşık olarak %16,7 azalmıştır. Kaynak genişliği, kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisi nedeniyle azalmıştır. Chuaiphan ve Srijaroenpramong AISI 304 ve AISI 201 çeliklerini gaz tungsten ark kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada artan kaynak hızı ile kaynak genişliğinin azaldığını bunun da kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisinden kaynaklandığını rapor etmişlerdir (Chuaiphan ve Srijaroenpramong, 2019).

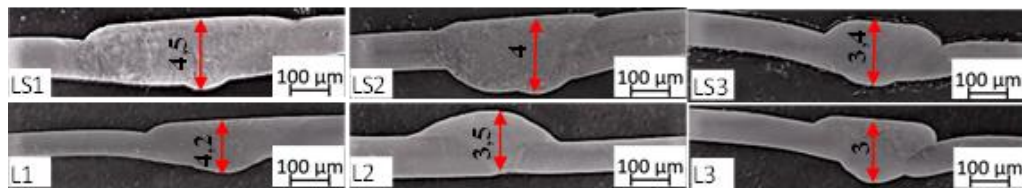


Şekil 5. Kaynak Dikiş Genişliği Ölçüm Sonuçları

4.2. Makro ve Mikroyapı

4.2.1. Makroyapı

Kullanılan farklı kaynak tellerinin ve kaynak hızlarının makroyapı üzerindeki etkileri incelemek için makroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda elde edilen makroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Makroyapı görüntüleri incelendiğinde herhangi bir birleştirme hatasına, çatlak ve gözenek oluşumuna rastlanmamıştır. Açar ve diğ., AISI 430 paslanmaz çeliğini GMAW kaynak yöntemi birleştirdikleri çalışmada, üretilen kaynaklı birleştirmelerin üst ve alt bölgelerin gözenek, çatlak gibi makro kusurlara rastlanmadığını belirtmişlerdir (Açar ve diğ., 2022).



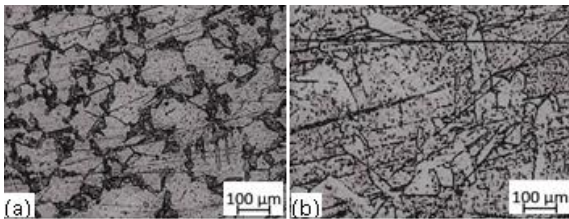
Şekil 6. Makroyapı Görüntüleri

Kaynak hızının makroyapı üzerindeki etkileri incelendiğinde ise kaynak hızının artması ile kaynak nüfuziyet derinliğinin azaldığı görülmüştür. 309LSi kaynak teli ile üretilen numunelerde kaynak hızının 30 mm/dak'dan 40mm/dak çıkartıldığında kaynak nüfuziyeti 0,5 mm azalarak 4 mm'e düşmüştür. Benzer şekilde 308L kaynak teli ile üretilen numunelerde kaynak hızının 30 mm/dak'dan 40 mm/dak'a yükseltilmesi ile kaynak nüfuziyeti 0,7mm azalarak 3,5 mm düşmüştür. Kaynak nüfuziyet derinliğinin azalmasına kaynak hızının artması ile azalan ısı girdisi sebebiyle ana metalde ve ilave telde meydana gelen erimenin azalmasının neden olduğu düşünülmektedir. Xie ve diğ., Keyhole GTAW kaynak yöntemi ile AISI 430 paslanmaz çeliğini birleştirdikleri çalışmada Düşük kaynak akımının ve yüksek kaynak hızının düşük nüfuziyet meydana getirdiğini söylemişlerdir (Xie ve diğ., 2018). Benzer şekilde Wang vd., paslanmaz çelikleri lazer kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynak hızının artması ile kaynak nüfuziyetinin azaldığını ifade etmişlerdir (Wang ve diğ., 2017).

Şekil 6'a incelendiğinde göze çarpan bir diğer nokta ise kaynak telinin değişmesi ile kaynak nüfuziyetinin azalma eğiminde olmasıdır. 30mm/dak kaynak hızında kaynak telinin 309LSi den 308L'ye değiştirilmesi ile kaynak nüfuziyetinin 4,5 mm'den 4,2 mm düştüğü görülürken aynı şekilde 40 mm/dak kaynak hızında kaynak telinin değiştirilmesi ile kaynak nüfuziyeti 4 mm'den 3,5 mm'ye düştüğü tespit edilmiştir.

4.2.2. Mikroyapı

Farklı kaynak hızlarının ve farklı kaynak tellerinin mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen görüntülerden ana metallerine ait olanlar Şekil 7'de verilmiştir.



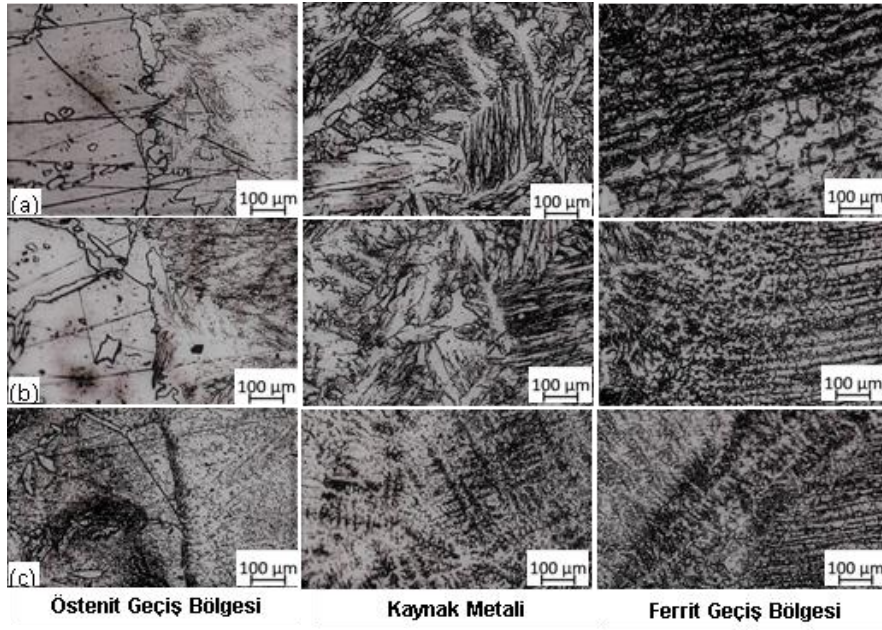
Şekil 7. Ana Malzemelerin Mikroyapıları (a) AISI 430, (b) AISI 304

AISI 430 Ferritik paslanmaz çeliğin ana metalinin mikroyapısı, taneler etrafında dağılmış karbürler içerirken, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ana malzemenin mikroyapısının ise östenit taneleri içeren tek fazlı bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Serindağ ve Çam GMAW kaynak yöntemi ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 430 paslanmaz çeliğini

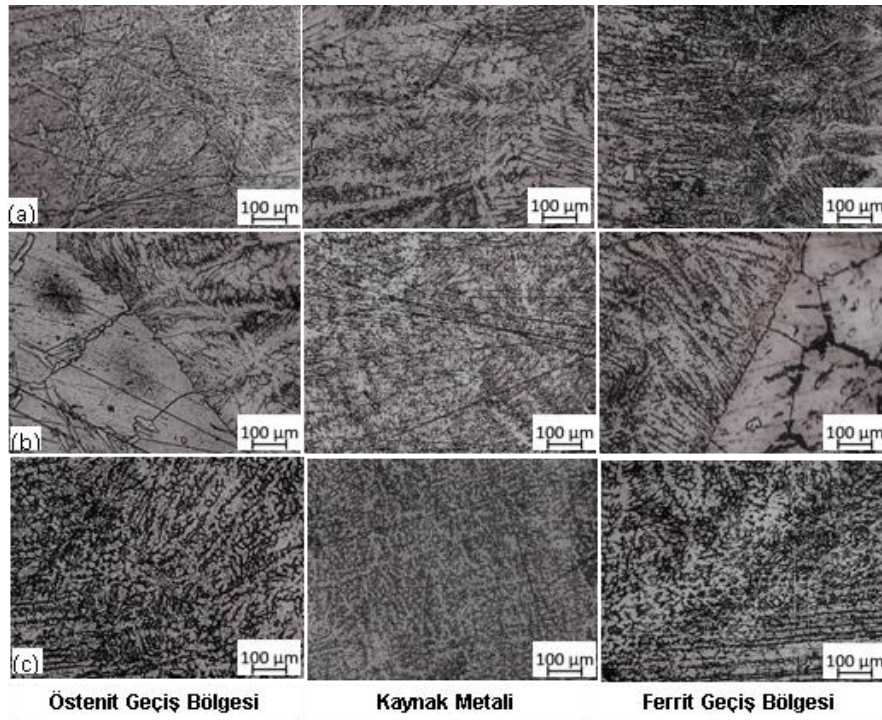
birleştirdikleri çalışmada ferritik ana malzemenin taneler boyunca ve tane içlerinde dağılmış halde karbürler içerirken, östenitik ana malzemenin östenit taneleri içeren tek fazlı bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir (Serindağ ve Çam, 2021). Benzer şekilde Şenol ve Çam AISI 430 ferritik paslanmaz çelikleri GMAW yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada ferritik ana malzemenin tane sınırlarında ve tane içlerinde dağılmış halde karbür içeren bir mikroyapıya sahip olduğunu söylemişlerdir (Şenol ve Çam, 2020).

Üretilen kaynaklı birleştirmelerden 309LSi kaynak teli ile birleştirilenler Şekil 8'de verilirken 308L kaynak teli ile birleştirilenler Şekil 9'da verilmiştir. Her iki kaynak teli ile üretilen numunelerin kaynak metallerinin mikroyapıları ile ana malzemelerin mikroyapıları karşılaştırdığımızda kaynak metalinin dentritik oluşumlardan meydana gelen bir mikroyapıya sahip olduğu görülmüştür. Kaynak sırasında meydana gelen bu yapıya ısınma ve ardında soğuma neden olmuştur. Kumar vd., östenitik ve ferritik paslanmaz çelikleri lazer ark kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinin, yavaş katılma hızı ile soğuduğu için dentritikler içerdiğini söylemişlerdir (Kumar ve diğ., 2018).

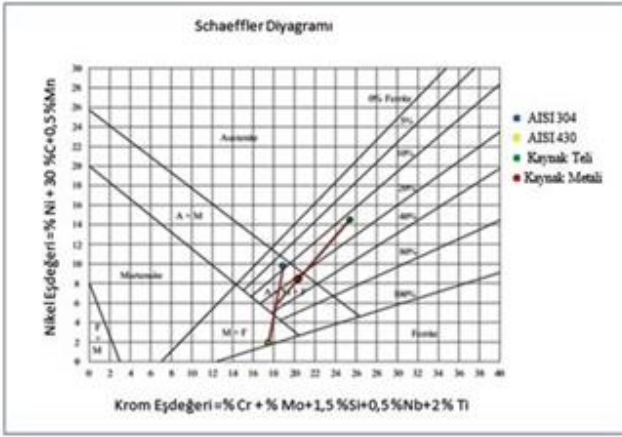
Kaynak metallerinin mikroyapıları Şekil 10 ve 11'deki schaeffler diyagramı yardımı ile incelendiğinde kaynak metalinin her iki ana metalin ve kullanılan ilave kaynak metallerinin karışımından meydana geldiği görülürken kaynak metalinin östenit + martenzit + ferrit'ten meydana geldiği belirlenmiştir. Baskutis vd., paslanmaz çelik ile yapı çeliğini kaynakta çalışmada kaynak metalinin ana metalin ve kaynak telinin homojen karışımından meydana geldiğini söylemişlerdir (Baskutis ve diğ., 2021). Kaynak sırasında kaynak havuzunun soğuması ile ferrit fazında östenit dönüşümü meydana gelirken soğumanın devamında da östenit fazında martenzitik dönüşüm meydana gelmiştir. Bunun sonucunda da kaynak metali östenit, ferrit ve martenzitten oluşan bir yapıya sahip olmuştur. Wang ve diğ., GTAW kaynak yöntemi ile AISI 430 ve AISI 304 paslanmaz çelikleri birleştirdikleri çalışmada kaynak havuzundaki soğuma nedeniyle östenitin martenzitik dönüşümün gerçekleşmesi ile kaynak metalinde martenzitik yapının bulunduğunu söylemişlerdir (Wang ve diğ., 2020). Pa'ncikiewicz ve diğ., AISI 430 paslanmaz çelik ile AISI 304 paslanmaz çeliğini lazer kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinde martenzitik oluşumların gözlemlendiğini buna ise hızlı soğumanın östeniti martenzite dönüştürmesinin neden olduğu söylemişlerdir (Pa'ncikiewicz ve diğ., 2020).



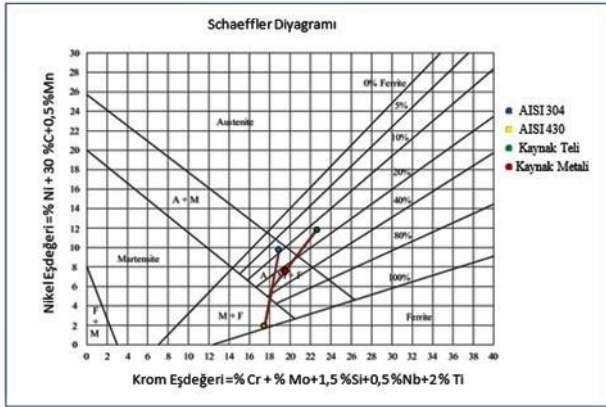
Şekil 8. 309LSi İlave Tel ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapıları (a) LS1, (b) LS2, (c) LS3



Şekil 9. 308L İlave Tel ile Birleştirilen Numunelerin Mikroyapıları (a) L1, (b) L2, (c) L3



Şekil 10. 309LSi ilave Tel ile Birleştirilen Numunelerin Schaeffler Diyagramı



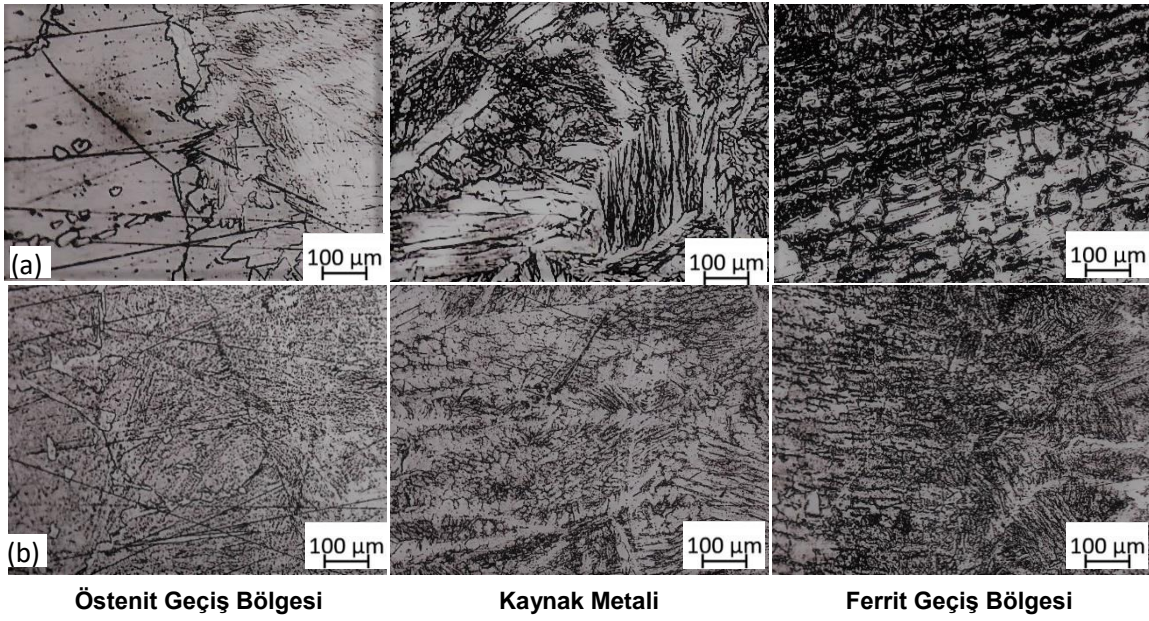
Şekil 11. 308L ilave Tel ile Birleştirilen Numunelerin Schaeffler Diyagramı

Bir kaynaklı birleştirmede, kaynak sırasında meydana gelen ısınma ve soğuma nedeniyle mikroyapısında değişiklik oluşması sebebiyle en hassas bölgelerden biri de Isı Tesiri Altındaki Bölgedir (ITAB). Her iki kaynak teli ile birleştirilen numunelerin östenit tarafındaki ITAB'ların mikroyapısı incelendiğinde östenit tanelerin etrafını çevreleyen ferrit oluşumu görülürken ferrit tarafındaki ITAB'lar incelendiğinde ise ferrit tane sınırlarında karbür çökeltilerinin bulunduğu gözlemlenmiştir.

Kumar ve diğ., plazma ark kaynak yöntemi ile östenitik ve ferritik paslanmaz çelikleri birleştirdikleri ve birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada östenit tarafındaki ITAB'da östenit tane sınırlarını çevreleyen δ delta ferrit ağının oluşumu gözlenirken ferrit tarafındaki ITAB'da ise ferrit tanelerinin etrafında karbür çökeltilerinin bulunduğunu söylemişlerdir (Kumar ve diğ., 2018). Ayrıca Mahmoud ve diğ., TIG ve Nd:YAG lazer kaynak yöntemleri ile 304 ve 316 paslanmaz çelikleri birleştirdikleri çalışmada 304 paslanmaz çelik tarafındaki ITAB'ın ferrit içerdiğini belirtmişlerdir (Mahmoud ve diğ., 2014).

Kaynak hızının mikroyapı üzerindeki etkileri incelendiğinde kaynak hızının artması ile kaynak bölgesine giren ısı miktarının azalmakta bunun sonucunda da soğuma hızı artmaktadır. Artan soğuma hızı da kaynak metalindeki dentritik yapının, incelmeye neden olmuştur. Açar vd., GMAW kaynak yöntemi ile AISI 430 paslanmaz çeliğini kaydattıkları çalışmada düşük ısı girdisinin mikroyapıda bulunan mikro partiküllerin irileşmesine müsaade etmediğini söylemişlerdir (Açar vd., 2022). Aynı şekilde Kumar ve Shahi GTAW kaynak yöntemi ile AISI 304 paslanmaz çeliğini kaydattıkları çalışmada düşük ısı girdisi ve soğuma hızının kaynak metalindeki dentritiklerin boyutları üzerinde etkili olduğunu söylemişlerdir (Kumar ve Shahi, 2011). Rizvi AISI 304 paslanmaz çeliğini MIG kaynağı ile birleştirdiği çalışmada düşük ısı girdisinin daha ince boyutlarda dentritler ürettiğini söylemiştir (Rizvi, 2020).

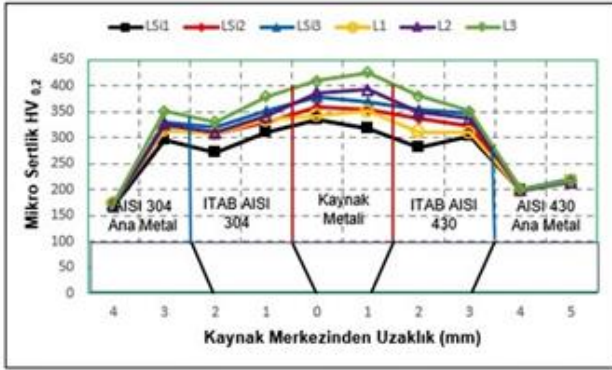
Farklı kaynak tellerinin mikroyapı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 30mm/dak kaynak hızında üretilen birleştirmelerden elde edilen görüntüler Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde mikroyapıların birbirine benzer olduğu görülürken 308L kaynak teli üretilen numunenin 309LSi kaynak teli ile üretilen numuneye oranla daha ince tane bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Mikroyapının birbirine benzer çıkmasının sebebi ise kaynak metallerinin kimyasal bileşimlerinin oranları dışında aynı olmasıdır.



Şekil 12. Farklı Kaynak Telinin Mikroyapı Üzerindeki Etkileri (a) LS3, (b) L3

4.3. Mikro Sertlik

Kaynak hızının ve kullanılan farklı tellerin kaynaklı birleştirmelerin sertlikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik ölçüm sonuçları kullanılarak elde edilen sertlik dağılım grafiği Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Sertlik Ölçüm Sonuçları

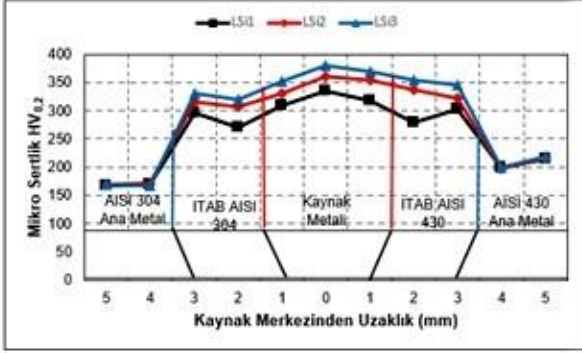
Şekil 13'te de görüldüğü üzere yapılan sertlik ölçüm sonuçlarında en sert bölge kaynak metali olurken sertlik dağılımının kaynak metali, ITAB ve ana metal şeklinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kaynak metalinde elde edilen en yüksek sertlik 426 HV_{0.2} ile L3 nolu numunede ölçülürken en düşük sertlik 318 HV_{0.2} ile LS1 nolu numunede ölçülmüştür. En sert bölge olarak kaynak metalinin belirlenmesinde kaynak metalinin martenzitik bir yapıya sahip olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Lakshminarayanan ve diğ., ferritik paslanmaz çelikleri otojen ark kaynak yöntemi ile

birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinin en yüksek sertliğe sahip olduğunu söylemişlerdir (Lakshminarayanan ve diğ., 2009). Açar ve diğ., AISI 430 paslanmaz çeliğini GMAW kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada kaynak metalinin sertliğini, mikroyapıda meydana gelen martenzitik oluşum nedeniyle ITAB'dan ve ana metalden daha büyük olarak ölçtüklerini söylemişlerdir (Açar ve diğ., 2022).

Kaynak metalinden sonra en yüksek sertlik ITAB'da ölçülmüştür. ITAB bölgesinde en yüksek sertlik değeri L3 nolu numunenin ferritik taraftaki ITAB'ında 380 HV_{0.2} olarak ölçülürken en düşük sertlik değeri ise LS1 nolu numunenin Östenit tarafındaki ITAB'ında 271 HV_{0.2} olarak elde edilmiştir.

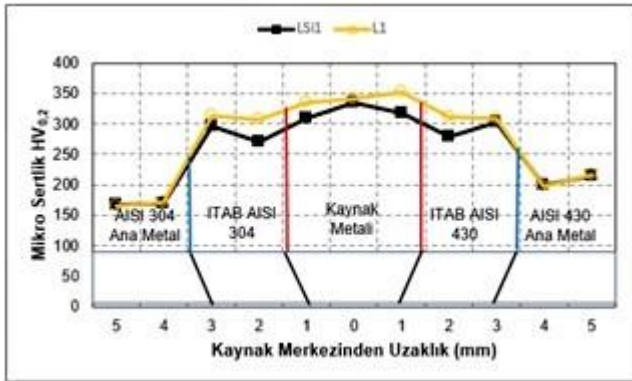
Kaynak hızının sertlik üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 309LSi kaynak teli ile birleştirilen numunelerin sertlik değerlerinden elde edilen sertlik dağılım grafiği Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14'teki sertlik dağılım grafiği incelendiğinde kaynak hızının artması ile sertlik sonuçlarının da artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kaynak hızının artması ile sertlik sonuçlarında meydana gelen artmaya, kaynak hızının artması ile kaynak bölgesine giren ısı girdisinin azalması sebebiyle artan soğuma hızı ile mikroyapıdaki tane boyutunun küçülmesi etkili olmuştur. Abioye, Gbadeyan ve Adebisi, 2019, AISI 304 paslanmaz çeliğini gaz metal ark kaynak yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada düşük ısı girdisinde sertliğin arttığını bunun da artan soğuma hızından mikroyapının etkilenmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir (Abioye, Gbadeyan ve Adebisi, 2019). Mahmoud ve diğ., AISI 304 paslanmaz çeliğini Fiber lazer kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada artan kaynak hızının düşük ısı girdisi oluşturması

sebebiyle daha küçük taneli bir mikroyapı meydana getirdiğini bunun da sertlik değerini artırdığını söylemişlerdir (Mahmoud ve diğ., 2021).



Şekil 14. Kaynak Hızının Sertliğe Etkisi

Kullanılan farklı kaynak tellerinin sertlik üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla kaynak hızı sabit tutulup, LS1 ve L1 nolu numunelerin sertlik verilerinden üretilen sertlik dağılım grafiği Şekil 15'te verilmiştir. Şekil 15 incelendiğinde L1 nolu numunenin daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. 308L kaynak telinin, 309LSi kaynak teline göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasının bunda etkili olmuş olabileceği düşünülürken aynı zamanda mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 308L kaynak teli ile yapılan kaynakların 309LSi kaynak teline oranla daha küçük taneli mikroyapı üretmesini etkili olduğu düşünülmüştür.



Şekil 15. Kaynak Telinin Sertliğe Etkisi

4.4. Çekme Deneyi Sonuçları

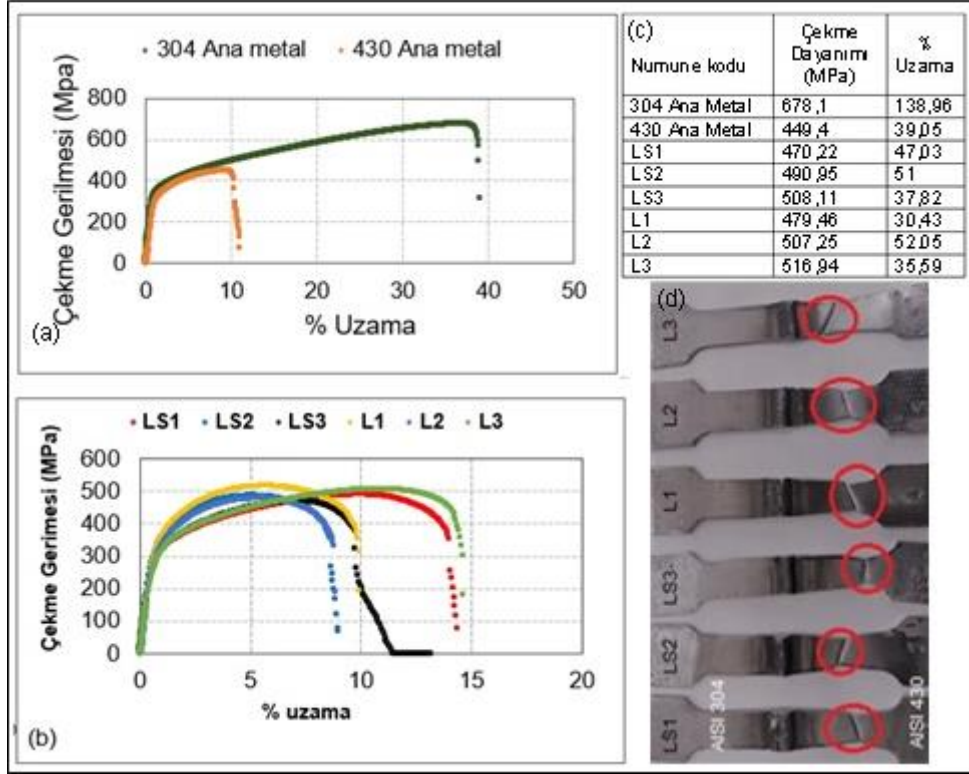
GMAW kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 430 ve AISI 304 paslanmaz çelik birleştirmelerin çekme dayanımı ve % uzama özelliklerine farklı kaynak tellerinin etkilerini belirlemek için çekme testleri uygulanmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak çekme uzama grafikleri elde edilmiştir. Çekme testi uygulamasında ana malzeme ile de karşılaştırma

yapabilmek için ayrıca ana malzemeden de hazırlanan numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testli sonucu elde edilen veriler yardımı ile çizilen çekme grafiği ve numunelerin kopma görüntüleri Şekil 16'da verilmiştir.

Şekil 16'daki çekme deneyi sonuçları incelendiğinde kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımlarının AISI 304 paslanmaz çeliğin dayanımından düşük, AISI 430 paslanmaz çeliğin dayanımından yüksek olduğu görülmüştür. Çekme sonuçlarının AISI 430 ana malzemeden büyük çıkmasına kullanılan kaynak tellerin kimyasal bileşimleri içerisinde bulunan Cr ve Ni elementlerinin kaynak metaline girmesi ve burada çökeltiler oluşturarak kaynak metalinin dayanımını artırmalarının etkili olduğu düşünülmektedir. Mahmoud ve diğ., düşük karbonlu çelik ile AISI 430 paslanmaz çeliğini GTAW kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kaynaklı birleştirmelerin çekme mukavemetlerinin her iki ana metalin mukavemetinden yüksek çıktığını buna ise östenitik kaynak telinin içeriğinde yüksek miktarda Ni ve Mn gibi dayanım artırıcı elementlerin bulunmasının etkili olduğunu söylemişlerdir (Mahmoud ve diğ., 2014). Aynı şekilde Paulraj ve Garg UNS S31803 çeliği ile UNS S32750 çeliğini GTAW kaynağı ile birleştirmişler ve çekme deneyi sonucunda kullanılan ilave kaynak teli nedeniyle kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımlarının ana malzemelerden % 5-10 daha yüksek çıktığını rapor etmişlerdir (Paulraj ve Garg, 2015).

Kaynak hızlarının ve dolayısıyla ısı girdisinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelendiğinde, üretilen tüm numunelerin çekme dayanımının AISI 430 paslanmaz çeliğin dayanımından yüksek olmasından, kullanılan her iki kaynak telinin mekanik özelliklerinin AISI 430 paslanmaz çelikten daha iyi olması ve ayrıca kaynak ilave tellerinin kaynak mikroyapısına ilave alaşım elementleri katarak dayanımını artırmasının yanı sıra kopmaların AISI 430 paslanmaz çelik ana malzemeden gerçekleşmesi sebebiyle kaynak hızının ve dolayısıyla değişen ısı girdisinin çekme dayanımı üzerindeki etkisinin göz ardı edilebileceği düşünülmektedir.

Çekme deneyleri sonuçları incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı 308 L kaynak teli ile birleştirilen L3 kodlu numunede 516,94 MPa ölçülürken en düşük çekme dayanımı 309 LSi kaynak teli ile birleştirilen LS1 kodlu numunede 470,22 MPa ölçülmüştür. AISI 304 ana malzemenin çekme dayanımı baz alınarak en yüksek ve en düşük çekme dayanımlarına göre kaynak verimliliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda en yüksek çekme dayanımının elde edildiği L3 kodlu numunenin verimliliği %76,2 olarak belirlenirken en düşük çekme dayanımının elde edildiği LS1 kodlu numunenin verimliliği %69,3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 16. Çekme Sonuçları a) Ana Malzemelerin Çekme Grafiği b) Kaynaklı Numunelerin Çekme Grafiği c) Çekme Deneyi Sonuçları Tablosu d) Kopma Bölgeleri

Şekil 16' da verilen kopma görüntüleri incelediğinde bütün kaynaklı birleştirmelerin AISI 430 ana malzemeden koptuğu görülmektedir. Kopmaların AISI 430 ana malzemede meydana gelmesi, her iki kaynak telinin ve AISI 304 paslanmaz çeliğinin akma ve çekme dayanımlarının AISI 430 paslanmaz çelikten daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. (Yürük ve diğ., 2017), S235JR ve AISI 430 paslanmaz çelik ile yaptıkları çalışmada AISI 430 paslanmaz çeliğin akma ve çekme dayanımının S235JR malzemeden daha yüksek olmasından dolayı kopmanın S235JR ana malzemede meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca bir kaynaklı birleştirmeden beklenen birincil özellik dayanımının ana malzemeye eş veya ona yakın olmasıdır. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde ise birleştirmenin dayanımının, çekme ve akma dayanımı düşük olan malzemeden daha büyük olması istenmektedir. Aynı şekilde literatürde kaynaklı birleştirmenin dayanımının ana malzemeye ile aynı ve yakın olması gerektiği belirtilirken farklı malzemelerin birleştirildiği durumlarda kaynaklı birleştirmenin dayanımının, akma ve çekme dayanımı düşük olan malzemeden daha büyük olması gerektiği söylenmiştir (Kılınçer ve Kahraman, 2009). Kaynaklı birleştirmelerde çekme deneyi sırasında kopmanın ana metalde meydana gelmesi, kaynağın kalitesi ve dayanımı açısından tercih edilen kaynak parametrelerinin uygunluğunun da bir göstergesidir. Biswas ve diğ., AISI 304 paslanmaz çelik ile düşük karbonlu 45C8 çeliğini GMAW yöntemi ile birleştirdikleri çalışmada çekme deneyi esnasında

kopmanın ana metalde gerçekleşmesinin kaynak parametrelerinin uygunluğunun ifadesi olduğunu söylemişlerdir (Biswas ve diğ., 2018).

Bir diğer önemli nokta ise kopmaların kaynaklı birleştirmelerin en zayıf noktası olan ITAB'da meydana gelmemesidir. Zira birçok çatlama ve kopma kaynaklı birleştirmenin en hassas bölgesi olan ITAB meydana gelmektedir. Her iki kaynak telinin ve AISI 304 ana malzemenin Cr, Ni ve Mn gibi dayanım özelliklerini artırıcı elementlere sahip olmaları sebebiyle kaynak esnasında kaynak metaline bu alaşım elementlerini katmaları sonucunda kaynak metalinin ve ITAB'ın dayanımının artmasına neden olmuşlardır. Bu yüzden de kopmaların kaynak metalinde ya da ITAB'da gerçekleşmediği düşünülmektedir. Kılınçer ve Kahraman AISI 409 paslanmaz çelik ile Ç1010 çeliğini GMAW kaynağı ile birleştirdikleri çalışmada kullanılan ilave kaynak telinin kompozit bir etki yapması sonucunda kopmanın ITAB'da gerçekleşmediğini belirtmişlerdir (Kılınçer ve Kahraman, 2009).

Yapılan çekme deneyi sonuçlarında, kopmaların ITAB'da meydana gelmemesi ve çekme ve akma dayanımlarının AISI 430 paslanmaz çelikten daha yüksek olması sebebiyle tercih edilen her iki kaynak ilave telinin bu iki paslanmaz çeliğin kaynağında rahatlıkla kullanılabileceğini gösterirken tercih edilen kaynak parametrelerinin de bu iki paslanmaz çeliğin kaynağı için uygun olduğunu göstermektedir.

5. Sonuçlar

AISI 304 ve AISI 430 paslanmaz çelikleri farklı kaynak teli kullanılarak üç farklı kaynak hızında başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gözle yapılan kontroller sonucunda kaynak dikişinde herhangi bir gözenek ya da kenar yenmesi gibi kusurlara rastlanmazken kaynak hızında meydana gelen değişikliklerin ısı girdisini etkilemesi sebebiyle kaynak dikiş genişliği üzerinde bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Makroyapı üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda herhangi bir birleşme eksikliği, gözenek ve çatlak gibi kaynak kusurlarına rastlanmazken artan kaynak hızı ile kaynak bölgesine giren ısı girdisinin azalması sebebiyle nüfuziyet derinliğinde azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca 309LSi kaynak teli ile üretilen numunelerin daha fazla nüfuziyet meydana getirdiği görülmüştür.

Mikroyapı çalışmaları sonucunda üretilen bütün kaynaklı birleştirmelerin kaynak metalinin martenzit+ östenitik + ferritik bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca artan kaynak hızı ile mikroyapıdaki tane yapısının inceldiği belirlenirken 308L kaynak teli ile birleştirilen numunelerin 309LSi kaynak teline oranla daha ince taneli bir mikroyapı ürettiği görülmüştür.

Sertlik sonuçlarına göre en yüksek sertlik, üretilen tüm birleştirmelerde kaynak metalinde elde edilirken kaynak metalini ITAB ve ana metaller izlemiştir. Kaynak hızının ısı girdisini ve beraberinde mikroyapıyı etkilemesi sebebiyle sertlik sonuçlarını da etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca 308L kaynak telinin 309LSi kaynak teline oranla daha küçük taneli bir mikroyapı üretmesi sebebiyle 308L kaynak teli ile birleştirilen numuneler daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

Kullanılan ilave kaynak tellerinin, kaynak metaline alayım elementleri katması sebebiyle kaynak metalinin dayanımı artırmış bunun sonucunda da bütün birleştirmelerin çekme dayanımı, AISI 430 ana malzemenin çekme dayanımından daha yüksek çıkmıştır.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Ali YÜRÜK çalışmanın bütün aşamalarında kendisi çalışarak bu çalışmayı tamamlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abioye, T.E., Gbadeyan, O.O. & Adebisi D.I. (2019), Analysis of the mechanical properties and penetration depth of gas metal arc welding on AISI 304 stainless steel. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 14(1), 47-59.
- Açar İ., Çevik B. ve Gülenç B. (2022), Analysis of mechanical and microstructural characteristics of AISI 430 stainless steel welded by GMAW. *Kovove Mater.* 60, 21–30. DOI: 10.31577/km.2022.1.21.
- Açar, İ., Çevik, B. ve Gülenç, B. (2023), The effect of shielding gas on weldability of the AISI 420 martensitic stainless steel *Pract. Metallogr.*, 60(2), 108-128.
- Baskutis, S., Baskutiene, J., Bendikiene, R., Ciuplys, A., ve Dutkus K. (2021). Comparative Research of Microstructure and Mechanical Properties of Stainless and Structural Steel Dissimilar Welds. *Materials*, 14, 6180. <https://doi.org/10.3390/ma14206180>
- Biswas, A.R., Chakraborty, S., Ghosh, P.S. & Bos, D. (2018). Study Of Parametric Effects On Mechanical Properties Of Stainless Steel (AISI 304) And Medium Carbon Steel (45C8) Welded Joint Using GMAW, *Materials Today: Proceedings* 5, 12384–12393.
- Chuaiphan, W. ve Srijaroenpramong, L. (2019), Optimization of gas tungsten arc welding parameters for the dissimilar welding between AISI 304 and AISI 201 stainless steels. *Defence Technology* 15, 170-178.
- Curiel, F.F., García, R., López, V. H. & González-Sánchez J. (2011). Effect of magnetic field applied during gas metal arc welding on the resistance to localised corrosion of the heat affected zone in AISI 304 stainless steel. *Corrosion Science* 53, 2393–2399.
- Durgutlu, A., Fındık T., Arabacı U. ve Gülenç B. (2009), Östenitik paslanmaz çeliğin TIG kaynağında akım türünün kaynak metal mikroyapısı ve sertlik değerine etkisi. *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Konferansı Ankara* 1, 591-597.
- Durgutlu, A., Fındık, T., Gülenç, Ç., Çevik, B., Kaya, Y., Kahraman, N. (2015), Effect of continuous and plus currents on microstructural evolution of stainless steel joined by TIG welding. *Pract. Metallogr.*, 52(11),627-637.

- Fattah-alhosseini, A. & Vafaeian S. (2015), Effect of solution pH on the electrochemical behaviour of AISI 304 austenitic and AISI 430 ferritic stainless steels in concentrated acidic media. *Egyptian Journal of Petroleum* 24, 333-341.
- Gözütok, E., Kahraman, N., Durgutlu, A. ve Gülenç B. (2009), AISI 304 malzemelerin TIG kaynağında argon koruyucu gazına hidrojen ilavesinin etkilerinin araştırılması. *Uluslararası Kaynak Teknolojisi Konferansı Ankara 1*, 778-786.
- Jibrin, S., Supriyo, G., Harry, C. & Thilo P. (2015), Application of local mechanical tensioning and laser processing to refine microstructure and modify residual stress state of a multi-pass 304L austenitic steels welds. *Journal of Manufacturing Processes* 18, 141-150.
- Kılınçer S. ve Kahraman N. (2009), AISI 409 VE Ç1010 çeliğin östenitik elektrod kullanarak mıg kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* 24(1), 23-31.
- Kumar, S. & Shahi A. S. (2011), Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AISI 304 stainless steel joints. *Materials and Design* 32, 3617-3623. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.017
- Kumar, S.R., Singh, A.K., Sandeep, S. & Aravind, P. (2018), Investigation on Microstructural behavior and Mechanical Properties of plasma arc welded dissimilar butt joint of austenitic- ferritic stainless steels. *Materials Today: Proceedings* 5, 8008-8015.
- Lakshminarayanan, A. K., Shanmugam, K. & Balasubramanian, V. (2009), Effect of Autogenous Arc Welding Processes on Tensile and Impact Properties of Ferritic Stainless Steel Joints. *journal of iron and steel research, international*, 16(1), 62-68.
- Mallaiiah, G., Kumar, A., Ravinder, R.P. & Madhusudhan R. G. (2013), Effect of copper and aluminium addition on mechanical properties and corrosion behaviour of AISI 430 ferritic stainless steel gas tungsten arc welds. *J. Mater. Res.technol.* 2(3), 238-249.
- Mallaiiah, G., Ravinder Reddy, P. & Kumar A. (2014), Influence of titanium addition on mechanical properties, residual stresses and corrosion behaviour of AISI 430 grade ferritic stainless steel GTA welds. *Procedia Materials Science*, 6, 1740 - 1751.
- Mahmoud, E.R.I., Almohamadi, H., Aljabri, A. & Elkotb, M.A. (2021), A Study on the Fiber YAG Laser Welding of 304L Stainless Steel. *Metals*, 11, 2022https:// doi.org/10.3390/met11122022
- Mahmoud, S.K., Mohammad, A.M., Hesam, P. & Amir H.K. (2014), Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints. *Materials Science & Engineering A* 608, 35-45.
- Martínez, R.T., Bestard, G.A., Silva, A.M.A. & Alfaro, S.C. A. (2021), Analysis of GMAW process with deep learning and machine learning techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 695-703.
- Meena, S.L., Butola, R., Murtaza, Q., JayantilalH, & Niranjana, M.S. (2017), Metallurgical Investigations of Microstructure and Micro hardness across the various zones in Synergic MIG Welding of Stainless steel, *Materials Today: Proceedings*, 4, 8240-8249.
- Nabendu, G., Pradip, K.P. & Goutam N. (2017), GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 1334-1341.
- Oliveira, M.J.C., Melo, R.H.F., Maciel, T. M. & de Araújo, C.J. (2019), Microstructural evaluation and mechanical behaviour of dissimilar nitistainless steel joints welded by micro gas tungsten arc welding. *Materials Chemistry and Physics*, 224, 137-147.
- Pańcikiewicz, K., Swierczyńska, A., Hućko, P. & Tumidajewicz, M. (2020), Laser Dissimilar Welding of AISI 430F and AISI 304 Stainless Steels. *Materials*, 13, 4540; doi:10.3390/ma13204540.
- Paulraj, P. & Garg, R. (2015), Effect of welding parameters on mechanical properties of GTAW of UNS S31803 and UNS S32750 weldments. *Manufacturing Rev.*, 2(29), 1-9. DOI: 10.1051/mfreview/2015032
- Pekkarinena, J. & Kujanpää, V. (2010), The effects of laser welding parameters on the microstructure of ferritic and duplex stainless steels welds. *Physics Procedia*, 5, 517-523.
- Rahul, K., Rutash, M., Chandan, K., Bharat, S.R., Manish, K. & Rajnish K. (2018), Fabrication and Characterization of Weldments AISI 304 and AISI 316 Used in Industrial Applications. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18475-18481.

- Ramkumar, K. D., Chandrasekhar, A., Singh, A.K., Ahuja, S., Agarwal, A., Arivazhagan, N. & Rabel, A.M. (2015), Comparative studies on the weldability, microstructure and tensile properties of autogeneous TIG welded AISI 430 ferritic stainless steel with and without flux. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 54–69.
- Rizvi, S.A. (2020), Effect of Heat Input on Microstructural and Mechanical Properties of AISI 304 Welded Joint Via MIG Welding. *IJE TRANSACTIONS C: Aspects*, 33(9), 1811-1816. doi: 10.5829/ije.2020.33.09c.16
- Sajjad, G., S., Mohsen, N., Mahmood, S. & Mehdi S. A. (2012), Gas tungsten arc welding of CP-copper to 304 stainless steel using different filler Materials. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, 2937-2942.
- Serindağ, H.T. ve ÇAM, G. (2021), Microstructure and mechanical properties of gas metal arc welded AISI 430/AISI 304 dissimilar stainless steels butt joints, *Journal of Physics: Conference Series*, 1777, 012047. doi:10.1088/1742-6596/1777/1/012047
- Şenol M. & ÇAM G. (2020). Microstructural and Mechanical Characterization of Gas Metal Arc Welded AISI 430 Ferritic Stainless Steel Joints. *EJENS*, 5 (1), 52–60.
- Villaret, V., Deschaux-Beaume, F., Bordreuil, C., Fras, G., Chovet, C., Petit, B. & Faivre L. (2013), Characterization of Gas Metal Arc Welding welds obtained with new high Cr–Mo ferritic stainless steel filler wires. *Materials and Design*, 51, 474–483.
- Wang, H., Nakanishi, M. V. & Kawahito, Y. (2017), Effects of welding speed on absorption rate in partial and full penetration welding of stainless steel with high brightness and high power laser. *Journal of Materials Processing Tech.* 249, 193–201. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.014>
- Wang, C., Yu, Y., Yu, J., Zhang, Y., Zhao, Y. & Yuan, O. (2020), Microstructure evolution and corrosion behavior of dissimilar 304/430 stainless steel welded joints. *Journal of Manufacturing Processes* 50, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.015>.
- Xie, Y., Cai, Y., Zhang, X. & Luo Z. (2018), Characterization of keyhole gas tungsten arc welded AISI 430 steel and joint performance optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 347–361. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2257-6>
- Yürük A., Bozkurt B. ve Kahraman N. (2017), S235JR karbon çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mig kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 21(2), 90-97.
- Yürük, A., Çevik, B. & Kahraman, N. (2021), Analysis of mechanical and microstructural properties of gas metal arc welded dissimilar aluminum alloys (AA5754/AA6013). *Materials Chemistry and Physics* 273, 125117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125117>
- Yürük A. & Kahraman N. (2017), Weld zone characterization of stainless steel joined through electric resistance spot welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 2975–2986.
- Yürük, A., Kaya, Y. ve Kahraman, N. (2021), Alüminyum Alaşımlarının MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 41-52.
- Zhi, C., Jihua, H., Zheng, Y., Yu, C., Jian, Y. & Shuhai C. (2019), Microstructures and mechanical properties of copper-stainless steel buttwelded joints by MIG-TIG double-sided arc welding. *Journal of Materials Processing Tech.*, 265, 87–98.