



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2023

SAYI / NUMBER : 2

CILT / VOLUME : 26



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

http://jes.ksu.edu.tr/

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



Sahibi / Owner

Prof.Dr. Alptekin YASIM
KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL
munsal@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER
zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ. TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof. Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ, TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Prof. Dr. Kristina SARIC
Geological Eng.
University of Belgrade, SERBIA
kristina.saric@rgf.bg.ac.rs

Prof. Dr. Ramazan GÖKÇE
Food Eng.
Pamukkale Univ., TURKEY
gokce@pau.edu.tr

Prof. Dr. A. Mehmet YÜCEER
Chemical Eng.
İnönü Univ., TURKEY
mehmet.yuceer@inonu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Fethullah GÖÇER
Industrial Eng.
KSU Univ. TURKEY
fgocer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Erdem SELVER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
eserver@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
fkececioglu@ksu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr. Çağrı UZAY
Mechanical Eng.
KSU Univ., TURKEY
cagriuzay@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Oğuz DOĞAN
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
oguzdogan@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Hasan BADEM
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
hbadem@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Zeyneb KILIÇ
Civil Eng.
Adıyaman Univ. TURKEY
zkilic@adiyaman.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Ayşe Ruşen DURUCAN
Civil Eng.
Fırat Univ. TURKEY
ardurucan@firat.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Elif ÇELİK
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Sermet AYMAN
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sayman@ksu.edu.tr

Res. Assist. Yalın YAMAÇ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
yalinyamac@ksu.edu.tr

Res. Assist. Arif ÇUTAY
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
arifcutay@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC

Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara. USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul. TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge,UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adiyaman Univ.
Adiyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 26 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| Murat GÜL | Ahmet Can AKINCI |
| Volkan ÖZAKSOY | İsrafil KARADÖL |
| Hakan AÇIKGÖZ | Mahmut KILIÇ |
| Merve SAĞIROĞLU | Selim HARTOMACIOĞLU |
| Yusuf SİYAMBAŞ | Yavuz CANBAY |
| Murat AYDOS | Bilgehan GÜRÜNLÜ |
| Nesrin DEMİR | Osman TURAN |
| Erdem ALIÇ | Lütfü NAMLI |
| Ebubekir KAYA | Ömür ŞAHİN |
| Erdal KILIÇ | Basri OMAÇ |
| Ümit GEÇGEL | İbrahim KARTERİ |
| Afşın Alper CERİT | Murat KARAKOYUN |
| Fatma Özge ÖZKÖK | Ceren BAŞTEMUR KAYA |
| Nükhet ŞAPÇI | Mustafa EKEN |
| Erkan YILMAZER | Mustafa AKYILDIZ |
| Yusuf URAS | İsmail KOÇ |
| Mehmet GÖK | Furkan DİNÇER |
| Mehmet Nuri ALMALI | Tayyip ÖZCAN |
| Özer OĞUZ | Mahmut Can ŞENEL |
| Muharrem PUL | Nazan YALÇIN ERİK |
| Ayşe ÖZDOĞAN DÖLÇEK | |



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Gülşehir-Özkonak-Hacıbektaş Arası (Orta Anadolu-Nevşehir) Kırşehir Masifi Ve Örtü Birimlerinin Stratigrafisi
Stratigraphy Of Cover Rocks Of The Kırşehir Massif Between Gülşehir-Özkonak-Hacıbektaş (Central Anatolia-Nevşehir) 308-330
Ramazan DEMİRCİOĞLU
- Güneş Enerji Santrallerinin Şebeke Entegrasyonunda Yük Akışı Analizlerinin İncelenmesi: Kahramanmaraş Örneği
Investigation Of Load Flow Analysis Of Solar Power Plants In The Network Integration: Kahramanmaraş Case 331-345
Zehra AYGÜN, Fatma AVLİ FIRIŞ, Mustafa ŞEKKELİ
- GFRP Donatılı Betonarme Bir Yapının Performansının Karşılaştırmalı İncelenmesi
Comparative Investigation Of The Performance Of A Gfrp Reinforced Concrete Structure 346-362
Elif TOPLU, Şeymanur ARSLAN, Osman KIRTEL, Ferhat AYDIN
- Nikel Esaslı Süper Alaşımların Delinmesinde İşleme Parametrelerinin Gri İlişkisel Analiz Ve Taguchi İle Optimizasyonu
Optimization Of Machining Parameters In Drilling Of Nickel Based Superalloys With Gray Relational Analysis And Taguchi 363-378
Harun YAKA, Ramazan ATILKAN
- Arama Algoritmalarının Yol Planlaması Performanslarının Karşılaştırmalı Analizi
Performance Analysis Of Search Algorithms For Path Planning 379-394
Mehmet GÖK, Öznur Şifa AKÇAM, Mehmet TEKEREK
- Mini İğne Kanatçıklı Bir Isı Alıcısının Isıl Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi
Numerical Investigation Of The Thermal Performance Of A Mini Pin Fin Heat Sink 395-407
Bahadır GEMİCİOĞLU, Ahmet PEKCAN, Tolga DEMİRCAN
- Investigation Of The Effect Of A Different Trapezoidal Inclination Angle In A Reverse Trapezoidal Cross-Section Flow Channel On The Performance Of The Pem Fuel Cell With The Computational Fluid Dynamic (Cfd) Method 408-423
Ters Trapez Kesitli Bir Akış Kanalında Farklı Bir Trapez Eğim Açısının Pem Yakıt Pilinin Performansına Etkisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Had) Yöntemi İle İncelenmesi
Yunus SAYAN

Sürü Zekâsı Tabanlı Algoritmalar İle Türkiye'nin Uzun Vadeli Enerji Tüketim Tahmini Long-Term Energy Consumption Forecast Of Turkey With Swarm Intelligence-Based Algorithms Merve BABAÖĞLU, Bülent HAZNEDAR	424-441
Konvansiyonel Ve Mikrodalga İle Kurutulmuş Vişne Posası Yağının Fizikokimyasal Ve Fonksiyonel Özelliklerinin Karşılaştırılması Comparison Of Physicochemical And Functional Properties Of Conventional And Microwave-Dried Sour Cherry Pomace Oil Duygu BAŞKAYA SEZER	442-450
System Design And Prototype Manufacturing For The Recovery Of Lubricant Powder Used In Wire Drawing Process Tel Çekme Proseslerinde Kullanılan Toz Sabunun Geri Kazanımı İçin Sistem Tasarımı Ve Prototip İmalatı Orhan EREN, Eyyup GERÇEKÇİOĞLU, Esra BENLİCE, Erkan YILMAZ, Ali DURAN	451-461
Combining Grey Wolf Optimization And Whale Optimization Algorithm For Benchmark Test Functions Kıyaslama Test Fonksiyonları İçin Gri Kurt Optimizasyonu İle Balina Optimizasyon Algoritmasının Birleştirilmesi Mustafa Serter UZER, Onur İNAN	462-475
Tane Boyutu Ve Dehidratasyon Sıcaklığının Anhidrit Alçı Özelliklerine Etkisi Üzerine Bir Çalışma A Study On The Effect Of Grain Size And Dehydration Temperature On Anhydrite Gypsum Properties Lütfullah GÜNDÜZ, Şevket Onur KALKAN	476-488
Kocaseyit Polimetallik Cu-As-Ni-Pb Damar Tipi Cevherleşmenin Jeokimyasal Ve Mineralojik İncelenmesi, Havran (Balıkesir), Kb Türkiye Geochemical And Mineralogical Investigation Of Kocaseyit Polymetallic Cu-As-Ni-Pb Vein-Type Mineralization, Havran (Balıkesir), Nw Türkiye Demet Kıran YILDIRIM, Amr ABDELNASSER, Mustafa KUMRAL	489-505
Uçak İtki Sistemlerinde Kullanılan Batarya Sistemlerinin Güvenilirlik Analizi Reliability Assessment Of Battery Systems Used In Aircraft Propulsion Systems Tahmineh RAOOFI, Melih YILDIZ	506-516
The Comparison Of The Effects Of Thresholding Methods On Segmentation Using The Moth Flame Optimization Algorithm Eşikleme Metotlarının Segmentasyon Üzerindeki Etkilerinin Güve Alev Optimizasyonu Algoritması Kullanılarak Karşılaştırılması Murat KARAKOYUN	517-531
Bitlis İlinin Sürdürülebilir Kalkınmasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi The Importance Of Renewable Energy Resources In The Sustainable Development Of Bitlis Province Sabir RÜSTEMLİ, Behçet KOCAMAN	532-541
Derin Transformatörlerden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri Ve Destek Vektör Makineleri İle Türkçe Film Yorumları Üzerine Duygu Analizi Sentiment Analysis On Turkish Movie Reviews With Deep Bidirectional Encoder Representations From Transformers (Bert) And Support Vector Machines Hakan GÜNDÜZ	542-549

Karma Takviyeler İle Güçlendirilmiş Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi

Fabrication And Properties Of Aluminium Matrix Hybrid Composites Reinforced With Mixed Reinforcements 550-561

Ramazan SANDAL, Metin KÖK, Alaaddin GÜNDEŞ

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

Balkan Endemik Nefropatisi Etiyolojisinde Aristolokolik Asit Ve Linyit Hipotezlerinin Değerlendirilmesi

Evaluation Of Aristolocholic Acid And Lignite Hypotheses On The Etiology Of Balkan Endemic Nephropathy 562-572

Ayça DOĞRUL SELVER



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.05.2022
Kabul Tarihi : 03.04.2023

Received Date : 30.05.2022
Accepted Date : 03.04.2023

GÜLŞEHİR-ÖZKONAK-HACİBEKTAŞ ARASI (ORTA ANADOLU-NEVŞEHİR) KIRŞEHİR MASİFİ VE ÖRTÜ BİRİMLERİNİN STRATİGRAFİSİ

STRATIGRAPHY OF COVER ROCKS OF THE KIRŞEHİR MASSIF BETWEEN GÜLŞEHİR-ÖZKONAK-HACİBEKTAŞ (CENTRAL ANATOLIA-NEVSEHIR)

Ramazan DEMİRCİOĞLU¹ (ORCID: 0000-0003-0616-0331)

¹ Aksaray Üniversitesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ramazan DEMİRCİOĞLU, ra.demircioglu@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, inceleme alanının stratigrafisi ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Çalışma alanında temeli, Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı Kırşehir Masifi'ne ait metamorfikler ile bunları kesen Geç Kretase yaşlı magmatikler oluşturur. Paleosen-Eosen yaşlı Ayhan grubu, masifin örtü kayaçlarının ilk topluluğudur. Ayhan grubu alttan üste doğru, 1-Paleosen yaşlı alüvyal yelpaze ve akarsu çökellerinden oluşmuş Saytepe formasyonu, 2-Sığ denizel (gösel?) ortamı belirten, Üst Paleosen-Alt Eosen yaşlı Esefin formasyonu, 3-Sığ denizel-lagüner özellikli, Alt-Orta Eosen yaşlı Kubaca formasyonu, 4-Karasal-sığ denizel kırıntılı kayaçlardan oluşmuş Alt-Orta Eosen yaşlı İlicek formasyonu, 5-Açık denizel ortamı yansıtan, Alt-Orta Eosen yaşlı Alıçlı formasyonu, 6-Fliş karakterli kırıntılı kayaçlardan yapıli Orta Eosen yaşlı Lalelik formasyonu ve en üstte 7-Sığ denizel resifal ortam koşullarını yansıtan Lütésiyan yaşlı Altıpınar formasyonundan oluşmuştur. Bu grup, akarsu-göl ve bataklık ortamlarını yansıtan Oligosen?-Orta Miyosen yaşlı Kızılöz formasyonu tarafından açılı uyumsuz olarak örtülmektedir. Bu birimler, açılı uyumsuz olarak Yaylacık grubuna ait Geç Miyosen yaşlı gösel, karasal ve volkanoklastikler tarafından örtülmektedir. Üst Miyosen-Pleistosen yaşlı Avanos grubuna ait birimler, bütün birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Alanın en genç birimlerini ise Kuvaterner yaşlı yamaç molozu, alüvyon ve travertenler oluşturur.

Anahtar Kelimeler: Nevşehir, Gülşehir, Kırşehir masifi, örtü birimleri, stratigrafi

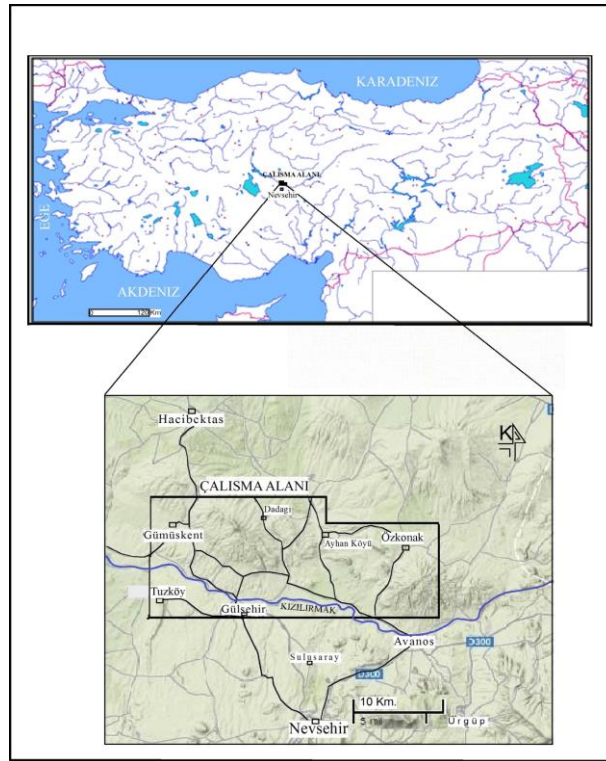
ABSTRACT

In this study, the stratigraphy of the study area was tried to be revealed. In the study area, metamorphics belonging to the Palaeozoic-Mesozoic aged Kırşehir Massif and Late Cretaceous aged igneous rocks cutting them form the basement. The Palaeocene-Eocene aged Ayhan Group is the first assemblage of the cover rocks of the massif. From bottom to top, the Ayhan Group is composed of 1) the Palaeocene-aged Saytepe Formation composed of alluvial fan and river deposits, 2) the shallow marine (lacustrine?) environment, Upper Palaeocene-Lower Eocene aged Esefin formation, 3-Shallow marine-lagoon, Lower-Middle Eocene aged Kubaca formation, 4-Lower-Middle Eocene aged İlicek formation composed of terrestrial-shallow marine clastic rocks, 5-Open marine environment, Lower-Middle Eocene aged Alıçlı formation, 6-Middle Eocene aged Lalelik formation made of clastic rocks and 7-Lutesian aged Altıpınar formation reflecting the shallow marine reefal environment at the top. This group is unconformably overlain by the Oligocene?-Middle Miocene aged Kızılöz formation reflecting the river-lake and swamp environments. These units are unconformably overlain by Late Miocene-aged lacustrine, terrestrial, and volcanoclastics belonging to the Yaylacık Group. Upper Miocene-Pleistocene-aged Avanos Group units cover all units unconformably. The youngest units of the area are Quaternary-aged slope rubble, alluvium, and travertines.

Keywords: Nevşehir, Gülşehir, Kırşehir massif, cover units, stratigraphy

GİRİŞ

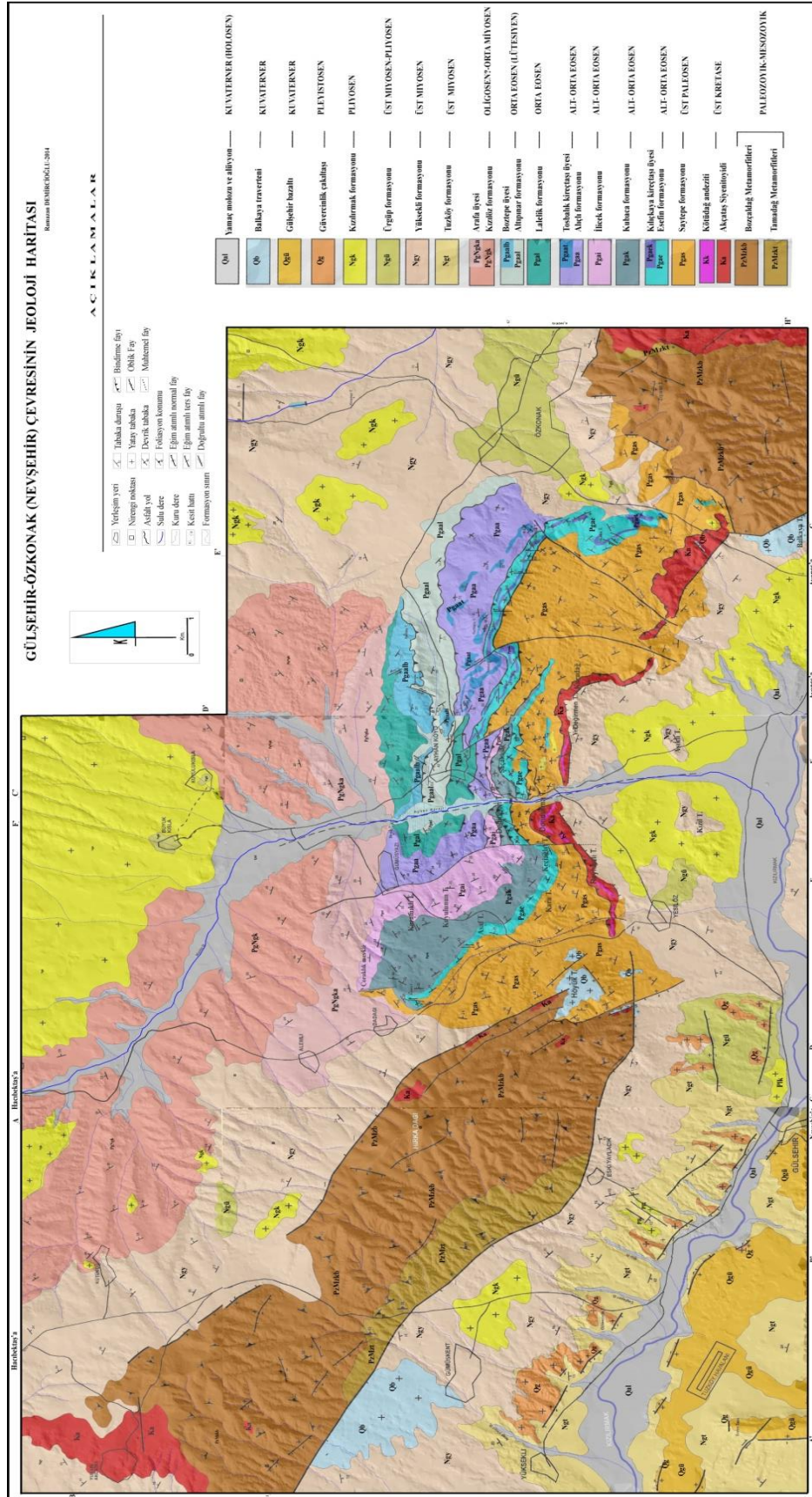
İnceleme alanı, Nevşehir ili, Avanos-Gülşehir Kuzeyi ve Hacıbektas ilçesi güney kesimlerini içerisine alır (Şekil 1, 2). Çalışma alanı ve yakın çevresinde, 1954 yılından günümüze kadar, değişik konularda birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları ise; Reul (1954) çalışmasında, Ayhan-Arafa (Gümüşyazı)-Alemlî-Dadağı arasındaki kömürlü seviyeler üzerinde araştırmalar yapmış ve kömürlü birimlerin stratigrafik özelliklerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda, kömür damarı ayırtlamıştır. Lebküchner (1957) çalışmasında, Kırşehir Masifi metamorfik kayalarından oluşan Hırka Dağı ve çevresinin, şist ve mermerlerden oluştuğunu belirtmiştir.Özkonak-Ayhan arasındaki Nummulitli kireçtaşlarından, kırmızı renkli ve Oligosen yaşlı çakıltaşı ve kumtaşlarından söz etmiştir. Ayrıca, kil, killi marn ve linyit damarlı seviyeler olduğunu tespit etmiştir. Seymen (1981a, 1981b, 1982) çalışma alanının kuzey kesimlerinde yaptığı çalışmalarda, Orta Anadolu Metamorfitlerinin tektonik özelliklerini özellikle Kırşehir-Kaman yöresinde detaylı olarak incelemiş ve tektonik deformasyon evrelerini ortaya koymuştur. Atabey ve Tarhan (1987) ile Atabey vd., (1988) çalışma alanı ile güney kesimlerinde bölgenin jeolojik özelliklerini ortaya koymaya yönelik çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, bölgedeki birimler araştırılmış ve bu birimlerin, stratigrafik, sedimentolojik ve petrografik özellikleri ortaya konmaya çalışılmıştır. Bölgedeki sedimanter birimlerin ortam analizleri (karasal, gölsel, denizel) belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Çalışma Alanı Yer Bulduru Haritası

Göncüoğlu vd. (1993) çalışma alanı ve civarının, Köksal ve Göncüoğlu (1997) çalışmalarında ise, alanın doğusunda yer alan, İdiş Dağı ve çevresinin jeolojik özelliklerini araştırmıştır. Yazarlar, Kırşehir Masifi'ne ait birimlerin, örtü birimleri üzerine bindirdiklerinden bahsetmiştir. Eldert vd., (2014), çalışma alanının Geç Kretase'de genişlemeli tektonik rejim ile açıldığını ve Paleojen döneminde, dönme hareketine uğradığından bahsetmektedir. Demircioğlu (2014) çalışmasında, inceleme alanında görülen değişik litoloji ve yaş aralığındaki birimlerin stratigrafik özellikleri ortaya konmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada, çalışma alanının 1/25.000 ölçekli, Kayseri K33-a1-a2- paftalarının bir kısmı ile Kayseri K-33-a3, K-33-a4, K-33-b4 paftalarının tamamını içine alan kesimin jeoloji haritası hazırlanmış ve birimlerin birbirleriyle olan ilişkileri ortaya koyarak, bölgede yüzeyleyen litostratigrafik birimlerin litolojik, paleontolojik, petrografik özelliklerini ve çökeltme ortamlarını açıklamıştır.

Bu çalışmada; bölgenin stratigrafisi belirlenmiş, birimlerin stratigrafik ve tektonik dokanak ilişkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, yeni formasyonlar ve üyeler ayırt edilmiş, birimlerin çökeltme ortamları yeniden değerlendirilmiştir. Önceki çalışmalarda, formasyon isimlerinde gözlenen değişiklikler, birimlerin oluşum ortamlarına ait değerlendirmeler, yeni fosil bulguları ve tektonik özellikler de dikkate alınarak yeniden değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Çalışma Alanının Jeoloji Haritası (Demircioğlu, 2014'den alınmıştır)

MATERYAL METOD

İnceleme alanı yaklaşık 600 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. İnceleme alanında, öncelikle büro çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra, arazi çalışmaları ve buna bağlı olarak, jeolojik haritalama yapılmıştır.

Ayhan grubu birimlere ait ölçülü stratigrafik kesitler hazırlanırken, jacob çubuğu, şerit metre ve Brunton pusulasından yararlanılmıştır. Buna bağlı olarak, ölçülü stratigrafik kesit alınacak alanlar belirlenmiş ve birimlerin en iyi görüldüğü yerlerde bu çalışmalar yapılmıştır.

STRATİGRAFI

İnceleme alanında, temeli, Kırşehir Masifi, Kaman grubuna ait Tamadağ ve Bozçaldağ metamorfileri oluşturur. Bu birimler, Geç Kretase yaşlı Akçataş siyenitoyidi tarafından kesilir. Temele ait bu birimler üzerine, Geç Paleosen-Orta Eosen yaşlı Ayhan grubuna ait formasyonlar uyumsuz olarak gelirler. Ayhan grubu, Saytepe, Esefin, Kubaca, İlice, Alıçlı, Lalelik, Altıpınar formasyonlarını kapsar. Bu formasyonlar birbirleriyle yanal-düşey geçişlidir.

Bu birimler üzerine, Oligosen?-Orta Miyosen yaşlı Kızılöz formasyonu ve bu formasyona ait Arafa üyesi uyumsuz olarak gelir. Bu birimler üzerine, Orta-Geç Miyosen yaşlı, Yaylacık grubuna ait Tuzköy ve Yüksekli formasyonları açılı uyumsuz olarak gelir.

Yaylacık grubu üzerine, Geç Miyosen-Pliyosen yaşlı Ürgüp formasyonu açılı uyumsuz olarak gelmektedir. Avanos grubuna ait, Pliyosen-Pleyistosen yaşlı Kızılırmak formasyonu, Güvercinlik çakıldaşı ve Gülşehir bazaltı ise, Ürgüp formasyonu üzerine, uyumsuz olarak gelmekte ve Avanos grubuna ait, Pliyosen-Pleyistosen yaşlı Kızılırmak formasyonu, Güvercinlik çakıldaşı ve Gülşehir bazaltı ise Ürgüp formasyonu üzerine açılı uyumsuz olarak gelir.

Bu birimler üzerine, Kuvaterner (Holosen) yaşlı Balkaya travertenini, güncel alüvyonlar uyumsuz olarak gelir (Şekil 3). Ayhan Grubuna ait kayaçlar, Eosen sonrasında, birbirleri üzerine ekay bindirmeli yapı kazanmıştır (Şekil 4).

Çalışma alanında, önceki araştırmacılar ile bu çalışmadaki stratigrafik bölümlendirme, tablo halinde gösterilmiştir (Şekil 5).

TEMEL BİRİMLER

Kırşehir Masifi (Kaman Grubu)

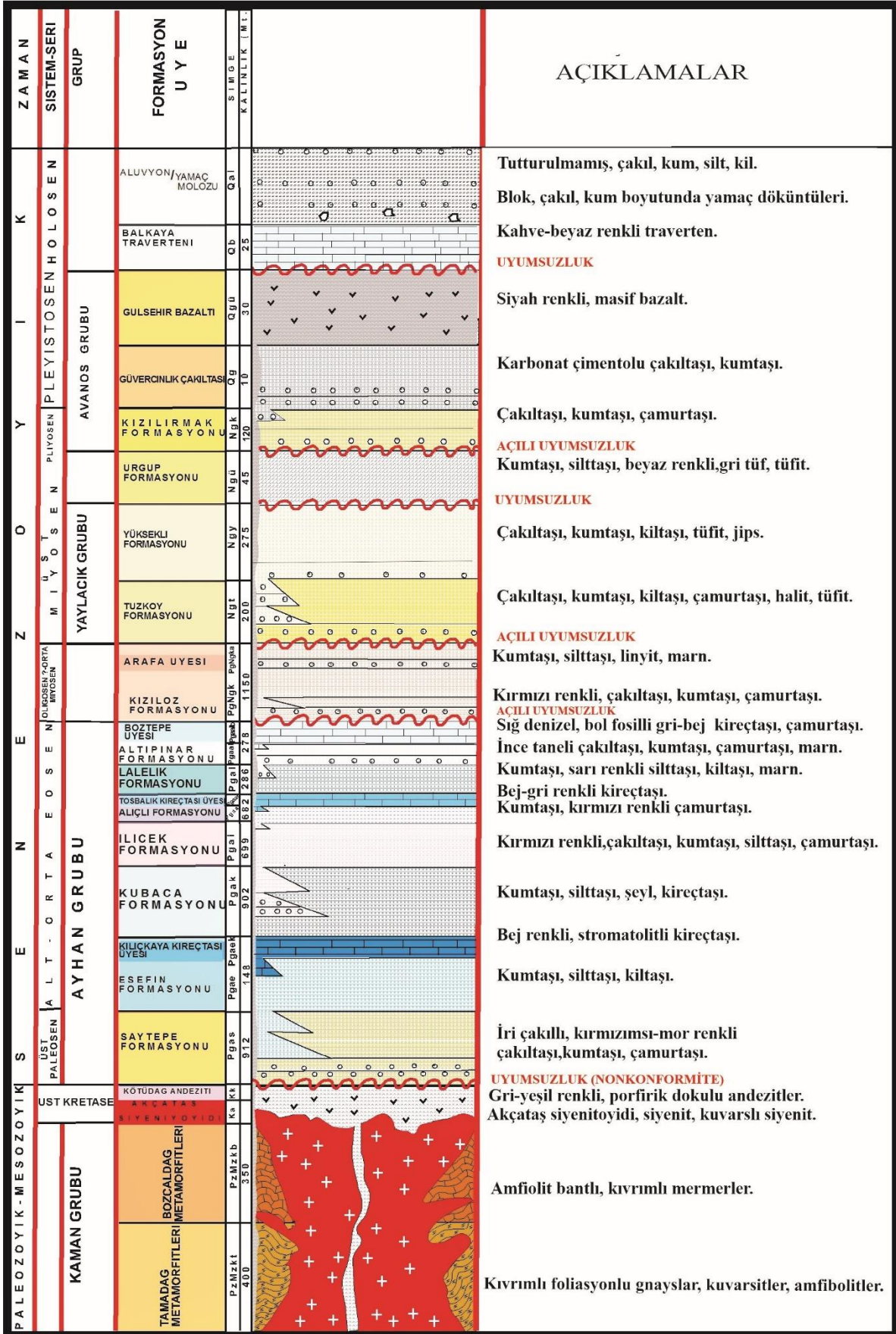
İnceleme alanında temeli oluşturan, Kırşehir masifine ait metamorfik birimler, Seymen (1981a) tarafından Kaman grubu olarak adlandırılmıştır. Çalışma alanında Kaman grubuna ait yalnızca Tamadağ metamorfileri ile Bozçaldağ metamorfilerine ait kayaçlar yüzeylemektedir (Şekil 2).

Tamadağ Metamorfileri (PzMzkt)

Genellikle, gnays, kuvarsit, amfibolit türü kayaçlardan oluşan birim, ilk kez Seymen (1981a) adlandırılmış olup, adını Kaman civarındaki Tamadağ'dan alır. Çalışma alanında, en belirgin olarak, Hırka Dağı güneybatı yamaçları ile Eski Yaylacık köyü civarında gözlenmekte olup, Gümüşkent kuzeyinde, Gülşehir-Hacıbektaş yolu üzerinde en güzel mostralarını verir (Şekil 2). Tamadağ Metamorfileri genelde; bantlı gnays, kuvarsit, amfibolit ve gri-beyaz renkli mermer ardalanmasından oluşmaktadır. Birim, yeşil şist, amfibolit-almandin fasiyesinde bölgesel metamorfizma geçirmiştir ve kalınlığı 400 m kadardır (Seymen, 1981a). Değişik kayaç türleri olsa da, hakim kayaç türü bantlı gnayslardır. Bozçaldağ Metamorfileri ile geçişlidir. Birimin yaşı Bailey ve Mc. Callien (1950) tarafından Mesozoyik Ketin (1963) tarafından ise Paleozoyik-Mesozoyik olarak değerlendirilmiştir.

Bozçaldağ Metamorfileri (PzMzkb)

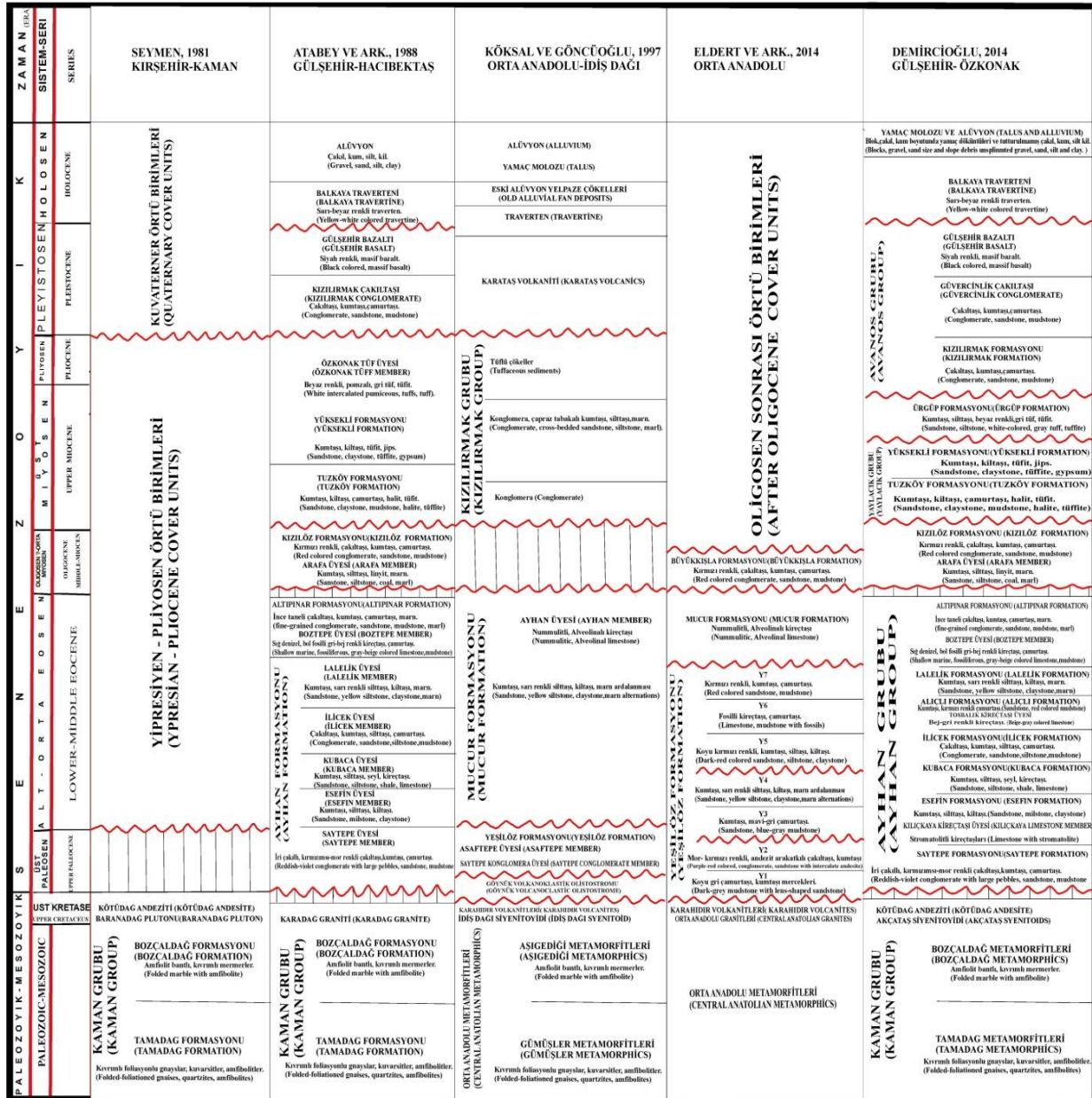
Çoğunlukla mermerlerden oluşan birim, Seymen (1981a) tarafından adlandırılmış olup, adını Kaman civarındaki Bozçal Dağ'dan alır. Çalışma alanında, Hırka Dağı en iyi görüldüğü yerlerdendir. Hırka Dağı ile Akçataş köyü güneyindeki Hümaşa Tepe arasında, kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu olarak yayılım gösterirler. Ayrıca, Özkonak kasabası güneyindeki Ziyaret Tepe ve çevresinde de geniş yayılım gösterirler (Şekil 2). Bozçaldağ Metamorfileri, gri-boz beyazımsı renkli iri kristalli, şeker dokusunda, orta – kalın tabakalı ve masif mermerlerden oluşmaktadır.



Şekil 3. Çalışma Alanının Stratigrafik Dikme Kesiti (Demircioğlu, 2014'ten alınmıştır)



Şekil 4. İnceleme Alanının Genel Görünümü (Saçaklı Tepeden batıya doğru bakış)



Şekil 5. Çalışma Alanına ait Karşılaştırmalı Stratigrafik Bölümlendirme

Akçataş Siyenitoyidi (Ka)

Hakim kayaçları, siyenit, kuvarslı siyenit v.b. türü derinlik kayaçlarından oluşan birim, ilk defa, Akçataş Köyü'ne atfen, Aydın (1984) tarafından, Akçataş granitleri olarak adlandırılmıştır. Atabey vd. (1988) ise, Karadağ graniti olarak adlandırmışlardır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, kayacın genel petrografik özelliklerine bağlı olarak siyenit özellikleri göstermesinden dolayı ve adlama önceliği kuralına dayanılarak, Akçataş siyenitoyidi olarak adlandırılmıştır. En iyi görüldüğü yer, Reyhanlı Tepe ve civarıdır. Hırka Dağ doğusunda, Höyük Tepenin yakın kuzeybatısında. Ayrıca, Akçataş köyü civarı, Ayhan Köyü güneyi ve Özkonak Kasabası ve civarında yüzlekler vermektedir (Şekil 2).

Hakim kayaç olan siyenitlerin, taneli doku özelliği el örneklerinde ve ince kesitlerde göze çarpar. Açık pembemsi, kırmızımsı renklerde görülürler. Akçataş siyenitoyidi, yer yer alterasyonlar da göstermektedir. Bölgede yüzeyleyen granitik kayaçların yaşı; Ataman (1972)'e göre, Geç Kretase, Seymen (1983)'e göre Paleosen, Göncüoğlu (1985, 1986)'na göre, Erken Senomaniyen, Güleç (1994)'e göre 110 my. yaşındadır. Demircioğlu (2014) çalışmasına göre ise, bölgede birim üzerine uyumsuzlukla gelen Geç Paleosen yaşlı Saytepe formasyonu içerisinde, Akçataş siyenitoyidine ait çakılların bulunmasına dayanarak birimin Geç Paleosen yaşlı Saytepe formasyonu içerisinde, siyenit çakılları da görüldüğünden, Geç Paleosen öncesi yaşlı olduğu düşünülmektedir. Atabey vd. (1988)

çalışmasındaki Karadağ graniti ile, ayrıca, Seymen (1981a) çalışmasındaki, Kırşehir, Kaman civarındaki Baranadağ graniti ile denestirilebilir.

Kötüdağ Andeziti (Kk)

Çalışma alanında, andezitlerden oluşan birim, ilk olarak, Seymen (1983) tarafından, Çiçekdağı (Kırşehir) civarında, Kaman grubu metamorfite üzerinde bulunan, Geç Kretase yaşlı volkanitleri, Kötüdağ volkanitleri olarak adlandırmıştır. Demircioğlu (2014), yaş ve stratigrafik benzerlik dolayısıyla, çalışma alanındaki andezitleri, Kötüdağ andeziti olarak adlandırmıştır.

Birim, çalışma alanında en iyi görüldüğü Dondurma Tepe ve Değirmen Tepe arasında, Reyhanlı Tepe sırtlarıyla Yel değirmeni Tepe arasında dar bir alanda yüzlek vermektedir (Şekil 2). Çalışma alanındaki andezitlerin yaşı, Saytepe formasyonundaki çakıltaşları içerisinde bulunan andezit çakıllarından yapılan yaş analizinde 72.1+1.7 m.y. (Kampaniyen) yaş verisi elde edilmiştir (Lefebvre vd., 2011). Buradaki andezitler, çalışma alanındaki Saytepe formasyonuna ait, çakıltaşı ve kumtaşlarına malzeme vermiştir.

ÖRTÜ BİRİMLER

Çalışma alanında, temele ait birimler üzerine gelen ve Geç Paleosen-Kuvaterner yaşlı birimler, örtü birimlerini oluşturur. Örtü birimleri de kendi içerisinde, yaş ve stratigrafik özelliklerine göre, grup, formasyon ve üye mertebesinde ayırılarak incelenmiştir (Şekil 3). Tanımlanan bu litostratigrafi birimleri aşağıda açıklanmıştır.

Geç Paleosen-Orta Eosen yaşlı, Saytepe, Esefin, Kubaca, İlice, Alıçlı, Lalelik, Altıpınar formasyonları, Ayhan grubunu oluştururlar. Bunların üzerine uyumsuz olarak, Kızılöz formasyonu ve Arafa üyesi gelir. Başka bir grup ise, Geç Miyosen yaşlı, Tuzköy ve Yüksekli formasyonlarından oluşan, Yaylacık grubudur (Demircioğlu, 2014). Yaylacık grubunun üzerine Ürgüp formasyonu uyumsuz olarak gelir. Bu birim üzerine uyumsuz olarak gelen, Pliyosen-Pleyistosen yaşlı, Kızılırmak formasyonu ve Güvercinlik çakıltaşı ve Gülşehir bazaltı ise, Avanos grubunu oluştururlar. Bu birimler üzerine, Balkaya traverteni ve güncel, yamaç molozu ve alüvyon uyumsuz olarak gelir.

Ayhan Grubu

Geç Paleosen-Orta Eosen yaşlı, birimlerden meydana gelen bu grup, ilk olarak Atabey vd., (1988) tarafından, Ayhan formasyonu olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, Ayhan formasyonu içerisinde üye mertebesinde ayırılan birimler, formasyon mertebesinde ayırtlanmıştır. Ayhan grubu kayaçlar, (bazı formasyonlar hariç) fosil içeriği bakımından fakirdir. Karasal ortamdan, açık deniz-sığ denizel ortama kadar değişen ortamlarda çökelmişlerdir. Geç Paleosen-Orta Eosen yaşlı grup, alttan üste doğru, birbirleriyle yanal ve düşey geçişler sunan, Saytepe, Esefin, Kubaca, İlice, Alıçlı, Lalelik ve Altıpınar formasyonlarını kapsar (Şekil 6). Bu birimler Ayhan ekay zonunda, birbirleri üzerine bindirmeli olarak gelirler. Ayhan grubuna ait kayaçlar, Orta Miyosen yaşlı Kızılöz formasyonu (Arafa üyesi ile birlikte) tarafından uyumsuz olarak örtülür.

Saytepe Formasyonu (Pgas)

Çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı aralanmasında oluşan birim, ilk olarak, Atabey vd. (1988) tarafından Ayhan formasyonu içerisinde, en iyi görüldüğü yer olan Say Tepe'ye atfen Saytepe üyesi olarak ayırılmıştır (Şekil 7). Göncüoğlu vd. (1993) tarafından Yeşilöz formasyonu olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, Ayhan grubu içerisinde, arazide, formasyon mertebesinde ayırılanabileceğinden ve adlama önceliği kuralına da bağlı olarak, Saytepe formasyonu adı altında incelenmiştir. Birim, çalışma alanında Yeşilöz ile Dadağı köyleri arasında kuzey-güney hat boyunca, Höyük Tepenin alt kesimleri ile Say Tepe arasında kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda, Karadağ kuzeyi ile Kılıçkaya Tepe arasında ve Ziyaret Tepenin kuzeybatı eteklerinde mostralar vermektedir (Şekil 2).

Hakim rengi, kırmızı-mor renklerde görülen birim, çakıltaşı ve kumtaşı, çamurtaşı aralanmasından oluşmaktadır. Yer yer morumsu renktedir (Yeşilöz-Dadağı yolu arası). Çakıltaşları; kırmızı-mor renkli, ince-kalın tabakalı (10cm-2 m arasında değişen), çakıllar genellikle temel kayaçlardan türeme (gnays, mermer, amfibolit, kuvarsit, siyenit, andezit vs.) olup, köşeli-yarı yuvarlak ve 2 cm-50 cm aralığındaki boyutlardadır. Çakıltaşları, kötü derecelenmeli-boylanmalı ve kötü boylanmalı-derecelenmeli yaygın kanal dolgu yapıları içermektedir. Bağlayıcısı, mor, morumsu kırmızı renkli olup volkanojenik malzemedeki demirli kesimlerin ayrışmasından türemiş gereçten oluşur (Şekil 7).

Kumtaşları ve çamurtaşları, çakıltaşları gibi alacalı renkli olup genelde volkanik (andezit) ve metamorfik kayaç parçaları içerirler. Saytepe formasyonundaki kumtaşları, kırmızı-bordo renkli olarak görünürler. Çakıltaşları ve

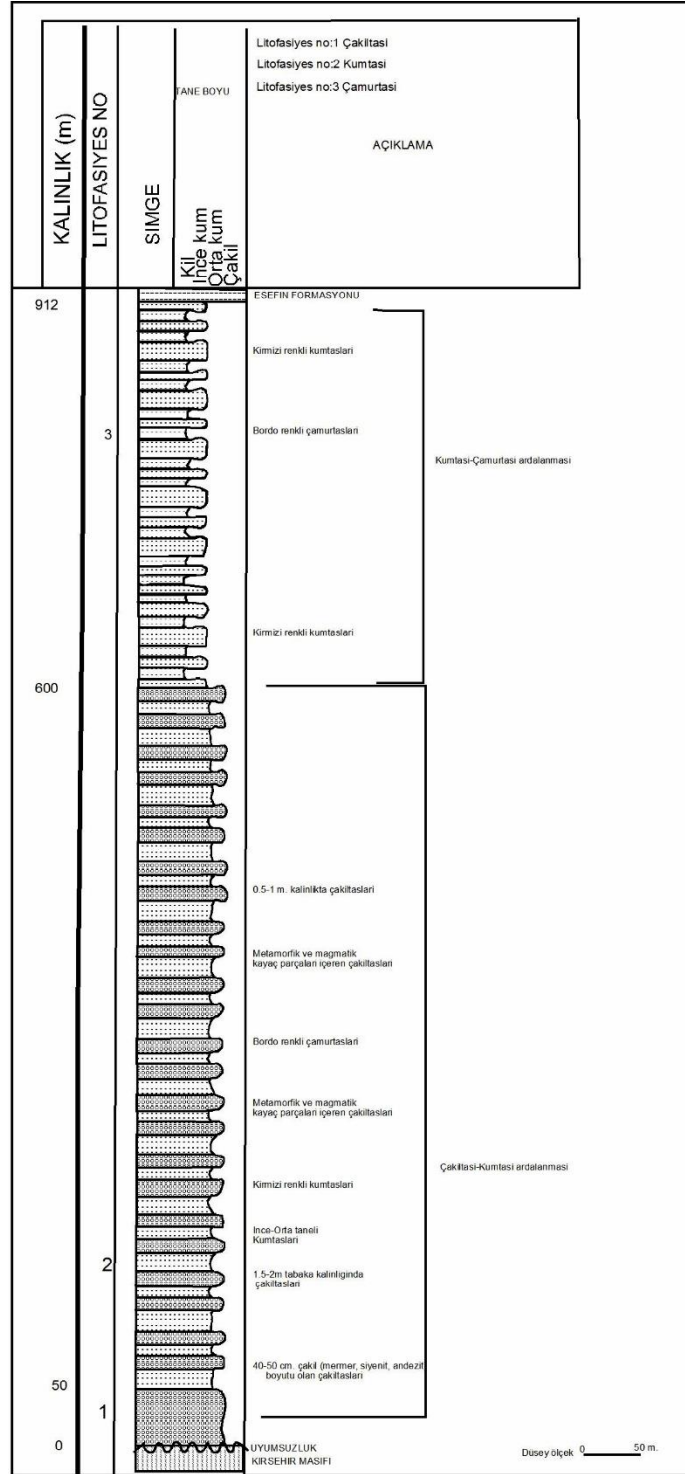
çamurtaşları ile aralanma gösterirler. Taneler, yarı köşeli olarak gözlenmektedir. Kumtaşlarına ait tabaka kalınlıkları ise, 2 cm.'den 1,60 m.'ye kadar değişir. Özellikle formasyonun alt seviyelerinde tabaka kalınlıkları daha fazladır.



Şekil 6. Ayhan Grubu Formasyonların Genel Arazi Görünümü

Formasyonun üst seviyelerine doğru çamurtaşları gözlenir. Saytepe formasyonuna ait çamurtaşları da, çakıltaşları ve kumtaşları gibi kırmızı-bordo renklidir. Paralel tabakalanma gösterirler. Karbonat bağlayıcılıdır. Çamurtaşları, özellikle formasyonun üst seviyelerinde, ayrışmaya bağlı olarak bitkisel toprak görünümü sunarlar. Ayrışmamış kesimlerde, oldukça sert ve cilalı bir görünüme sahiptirler. Keskin kırılma yüzeyleri verirler.

Saytepe formasyonunda yapılan ölçülü stratigrafik kesite göre, kalınlığı 912 m. olarak tespit edilmiştir (Şekil 7). Birim, Kırşehir Masifi metamorfite üzerine uyumsuz olarak gelir. Üstüne gelen Esefin formasyonu ile uyumludur. Birim, çalışma alanı güneydoğusunda, Göncüoğlu vd., (1993) tarafından tanımlanan, Eskiburç formasyonunun üst kesimleri ile eşlenik olarak kabul edilmiş ve algli, *Ataxophragmidae*'li birimlere göre de yaşı, Geç Daniyen-Tanesiyen olarak değerlendirilmiştir



Şekil 7. Saytepe Formasyonuna ait Ölçülü Stratigrafik Kesit

Esefin Formasyonu (Pgae)

Kumtaşı, silttaşı, kiltası ve kireçtaşından oluşan birim, ilk olarak Atabey vd. (1988) tarafından Ayhan formasyonu içerisinde, en iyi görüldüğü yer olan Esefin çeşmesi mevkiine atfen, Esefin üyesi olarak ayırtlanmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, harita ölçeğinde ayırtlanabileceğinden, Esefin formasyonu olarak adlandırılmıştır. Birim içerisindeki stromatolitli kireçtaşları ise, Kılıçkaya kireçtaşı üyesi olarak ilk kez Demircioğlu (2014) tarafından ayırtlanmıştır.

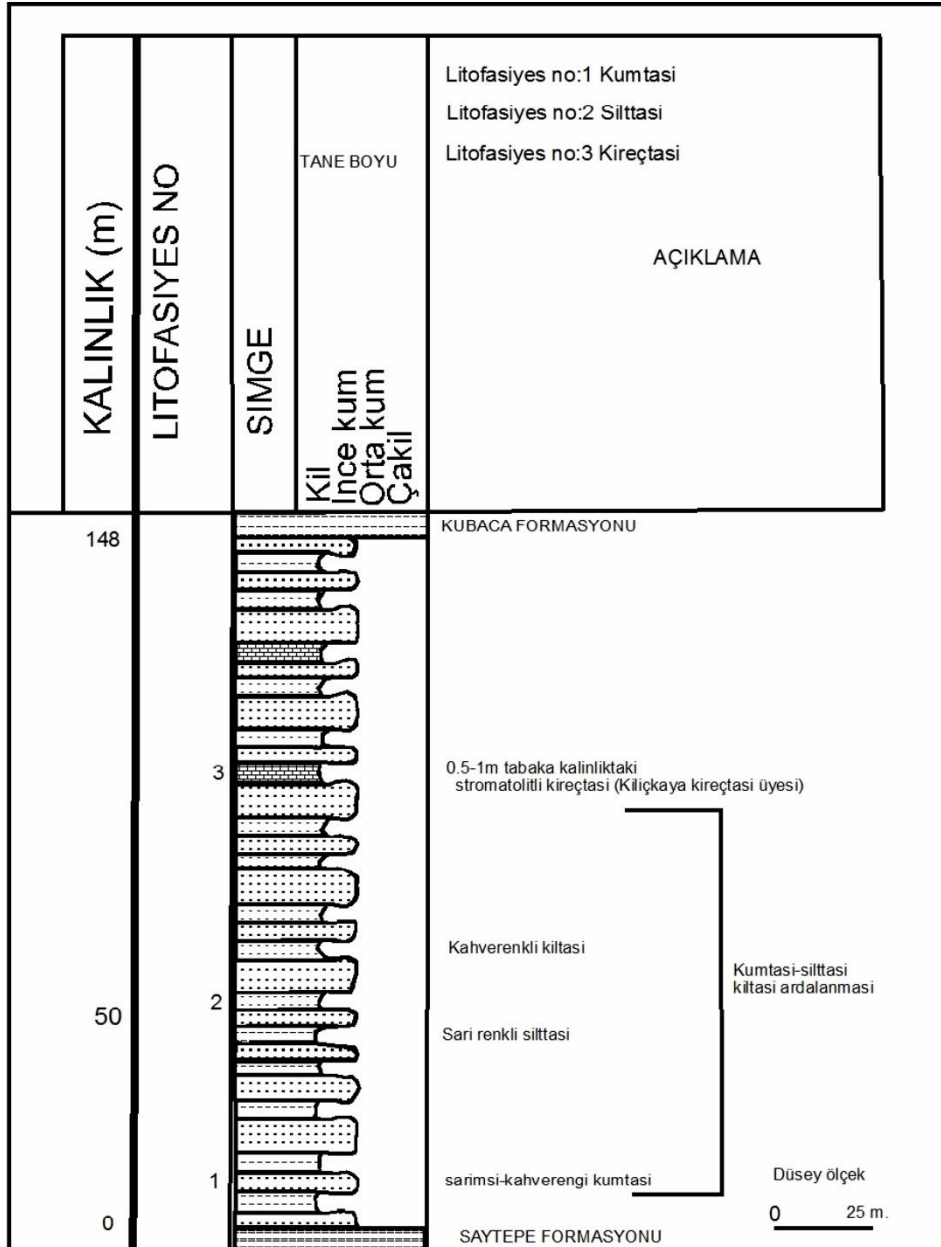
Çalışma alanında yaklaşık kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu yayılım gösterirler. Esefin çeşmesi civarı en iyi görüldüğü yerdir. Arazide, sarımsı-boz rengi ile karakteristiktir. Dadağı yolu boyunca, altındaki Saytepe formasyonu ile uyumlu dokanağı oldukça iyi görülür. Keçiğlat Tepe civarı da iyi görüldüğü yerlerdendir. Dadağı köyü ile

Keçiağlat Tepe arasında, Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultuda yayılım gösterirler. Ayhan barajının doğu ve batı kenarlarında, Değirmen Tepe ile Saçaklı Tepe doğusunda kalan alanda, diğer birimlerle bindirmeli olarak yer alır. Ayhan Köyü'nün doğusunda, Yukarı Kalın Tepe ile Kılıçkaya Tepe arasında görülürler (Şekil 2).

Hakim rengi, sarımsı-boz renkli olarak görülen birim, kumtaşı, silttaşı, stromatolitli kireçtaşlarından oluşur. Üst seviyelerine doğru stromatolitli kireçtaşlarına geçilir. Birim içerisinde görülen silttaşları, sarımsı-boz renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, 1 cm. ile 20 cm. arasında değişim gösterirler. Yer yer laminalanma da gösterirler. Esefin formasyonunda yapılan ölçülü stratigrafik kesite göre, kalınlığı 148 m. olarak tespit edilmiştir (Şekil 8). Esefin formasyonunun yaşı stratigrafik konumuna göre Alt-Orta Eosen olarak kabul edilmiştir. Stromatolitli seviyelere göre de sığ-kıyı denizel ortamda çökdikleri düşünülmektedir.

Kılıçkaya Kireçtaşı Üyesi (Pgaek)

Esefin formasyonu içerisindeki stromatolitli kireçtaşları, ilk kez bu çalışmada, Esefin formasyonu içerisinde, üye mertebesinde ayırılmış ve en iyi görüldüğü yer olan Kılıçkaya Tepe'ye göre de adlandırılmıştır. İnceleme alanında, Ayhan grubu içerisinde, kılavuz bir seviye oluşturmaktadır. Çalışma alanında, Dadağı köyü, çoraklı mevki ile Keçiağlat Tepe arasında ve Saçaklı Tepe ile Kılıçkaya Tepe arasında yaklaşık doğu-batı uzanımlı ve diğer birimlerle bindirmeli olarak bulunur (Şekil 2).

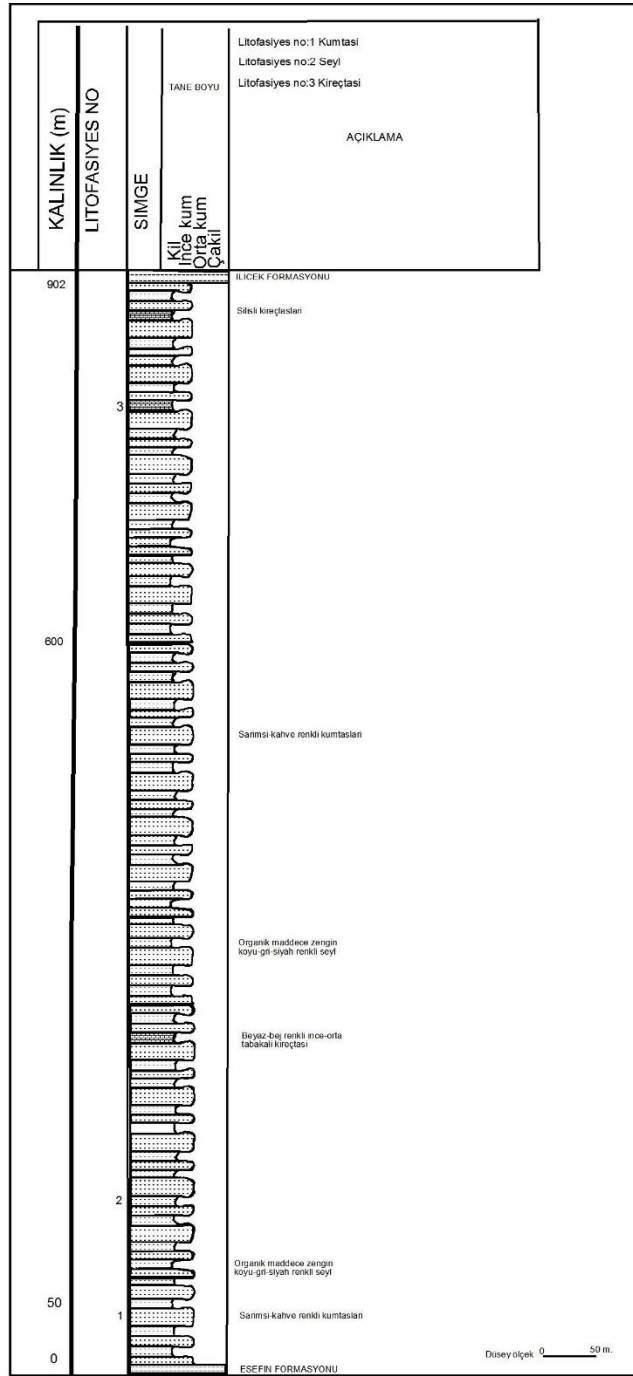


Şekil 8. Eşefin Formasyonuna Ait Ölçülü Stratigrafik Kesit

Kireçtaşlarının içerisinde, koyu renkli stromatolitli seviyeler belirgindir. Birim içerisinde görülen kumtaşları, gri-boz ve sarımsı renklidir. Genel olarak ince taneli kumtaşı özelliği gösterirler. Yer yer, kaba tanelidir. Tabaka kalınlıkları 1 cm. ile 15 cm. arasında değişir. Silttaşları ve kilttaşları ile ardalanmalı olarak görülürler.

Kubaca Formasyonu (Pgak)

Kumtaşı, silttaşı, şeyl ve kireçtaşlarından oluşan birim, ilk kez Atabey vd. (1988) tarafından, Ayhan formasyonu içerisinde, Kubaca Tepe'ye atfen, Kubaca üyesi olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, Kubaca formasyonu olarak adlandırılmıştır. Kubaca Tepe civarı istifin en iyi görüldüğü yerdir. Kubaca Tepe ile Keçiağlat Tepe arasında kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu olarak yayılım gösterirler.



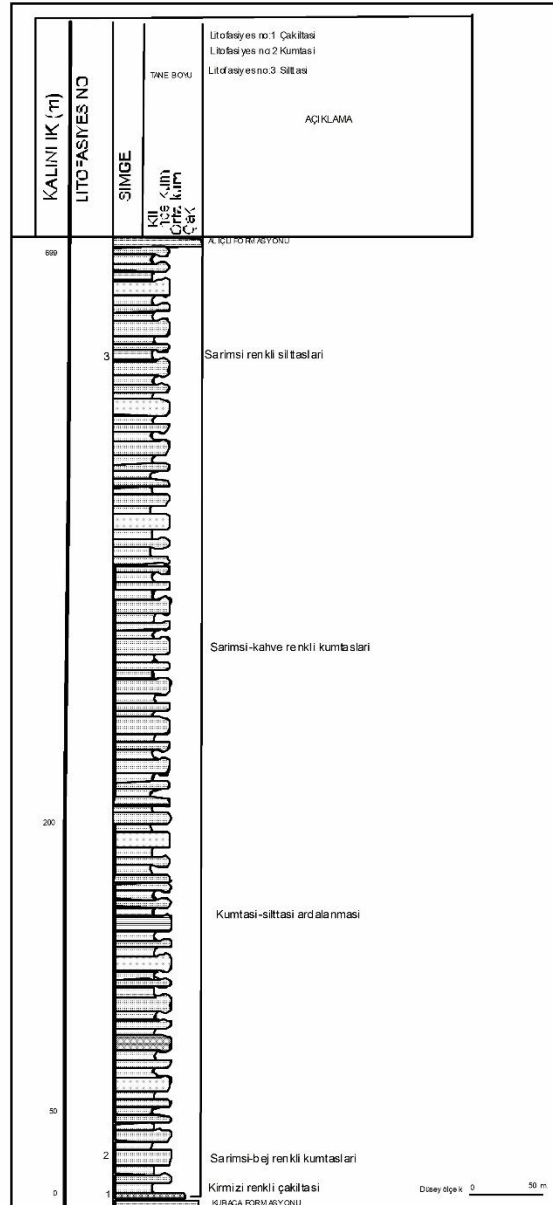
Şekil 9. Kubaca Formasyonuna ait Ölçülü Stratigrafik Kesit (Ölçsüz)

Çalışma alanında, Kubaca Tepe ile Karamıklı Tepe arasında yaklaşık doğu-batı doğrultuda bindirmeli olarak yayılım gösterirler. Asaf Tepe doğusu ve Kuyulunun Tepe arasında da ince bir bant halinde harita ölçeğinde yayılım gösterirler (Şekil 2). Genellikle, koyu gri-siyah olan birim, kumtaşı, silttaşı, şeyl, marn ve kireçtaşlarından oluşur

(Şekil 9). Birim içerisindeki kumtaşları, bej-gri renklerde görünüm sunarlar. Silttaşı ve şeyler ile arılanma gösterirler. Formasyon genel olarak, koyu gri-siyah renklerdeki şeyler oluşturur. İçerdikleri organik madde içeriğine göre, renkleri, koyu griden siyaha kadar değişim gösterir. Tabaka kalınlıkları, 1 cm ile 10 cm. arasında değişir. Şeyler laminalanma gösterirler. Bunlarda da çapraz laminalanmalar görülmektedir. Yapılan ölçülü stratigrafik kesite (Kubaca Tepe ile Karamıklı Tepe arası) göre kalınlığı 902 m. olarak ölçülmüştür (Şekil 9). Ayhan barajı batısında, Esefin çeşmesi mevkiinde, alttaki Esefin formasyonu ile uyumlu iken, barajın doğu kesiminde, Saçaklı Tepe civarında ise, Esefin formasyonu tarafından tektonik olarak (bindirmeli) üzerlenir. Bu alan, daha önce de bahsedildiği gibi, Ayhan ekay zonu diye adlandırılan kesimdir. İlicek formasyonu tarafından uyumlu olarak örtülür. Bu çalışmada birim içerisinde yaş verebilecek fosil belirlenememiş olup, yaşı stratigrafik konumuna göre erken-Orta Eosen olarak kabul edilmiştir, ancak, stratigrafik ilişkilere göre, altındaki Geç Paleosen yaşlı Saytepe formasyonu ve üzerindeki Erken-Orta Eosen yaşlı Lalelik formasyonuna göre, yaşı, Erken-Orta Eosen'dir. Ancak, altındaki ve üstündeki birimlerin litolojik özellikleri ve fosil içeriklerine bakılarak denizel ortam ürünü oldukları düşünülmektedir. Sığ deniz-lagüner ortamda çökelmişlerdir.

İlicek Formasyonu (Pgai)

Çakıltası, kumtaşı, silttaşından oluşan birim, ilk olarak Atabey vd., (1988) tarafından, Ayhan formasyonu içerisinde, çalışma alanı dışında, alanın kuzeydoğusundaki İlicek Köyü'ne atfen İlicek üyesi olarak ayırtlanmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, İlicek formasyonu olarak adlandırılmıştır.



Şekil 10. İlicek Formasyonuna ait Ölçülü Stratigrafik Kesit

Çalışma alanında, Dadağı Köyü'nün doğusundan Çoraklık mevki ile Gümüşyazı Köyü arasında, yaklaşık doğu-batı doğrultulu olarak yayılım gösterir. Buradan, kuzeybatı- güneydoğu doğrultulu olarak, Gümüşyazı Köyü ile Keçiağlat Tepe'nin kuzeyi arasında yayılım gösterirler (Şekil 2). Uzaktan bakıldığında, hakim rengi kırmızı-bordo olan birim, tabanda kırmızı renkli, orta- kalın tabakalı çakıltası ile kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşından oluşur (Şekil 10). Üste doğru ince taneli kumtaşları, silttaşlarına geçiş yapar. İnce taneli birimler formasyon içerisinde daha hakim durumdadır. Kumtaşları, hakim kayaçlarını oluştururlar. Birim içerisinde, tabandaki çakıltaları, kırmızı-bordo renkli ve orta-kalın tabakalıdır. Çakıllarını, genel olarak, temele ait, gnays, mermer, amfibolit gibi metamorfik ve siyenit, diyorit, andezit gibi magmatik kayaç parçaları oluşturur. Kanal dolgu yapıları da görülür. Çakıllar kötü boylanmalıdır. Kötü-orta derecelenme gösterirler. 2 cm.'den 25 cm.'e kadar değişen boyutlarda çakıllar içerirler. Genel olarak karbonat bağlayıcılıdır. Tabaka kalınlıkları, 2 cm.'den 1.5 m.'ye kadar değişen kalınlıklardadır. İstifte görülen silttaşları, sarımsı-boz renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, 1 cm.'den- 5-6 cm.'ye kadar değişkenlikler göstermektedir. Kumtaşı, çamurtaşları ile ardalanmalı olarak bulunurlar. Çamurtaşları ise, kırmızı-bordo renkte görülürler. Karbonat bağlayıcılıdır.

Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 15 cm.'ye kadar değişebilmektedir. Çamurtaşları, istifin üst kesimlerinde görülürler. İlice formasyonu üzerinde yapılan ölçülü stratigrafik kesite göre kalınlığı 699 m.'dir (Şekil 10). Ölçülü stratigrafik kesitte, tabanda, kalınlıkları 1-1.5 m.'ye kadar ulaşabilen çakıltaları mevcuttur. Bu birim kumtaşları ile ardalanmalı olarak bulunur. İlice formasyonu altındaki Kubaca formasyonu ile yanal-düşey geçişlidir ve uyumlu olarak örter. Üzerine gelen Alıçlı formasyonu tarafından da uyumlu olarak örtülür. Birim içerisindeki kayaçlardan alınan örneklerden yapılan ince kesit çalışmalarında fosillere rastlanılmamıştır. Stratigrafik olarak, altındaki, Erken-Orta Eosen ve üstündeki Lütesiyen yaşlı birimlere göre değerlendirildiğinde, Erken-Orta Eosen yaşlıdır. Litolojik ve fosil özelliklerine göre, muhtemelen, sığ denizel-karasal ortamda oluşmuştur.

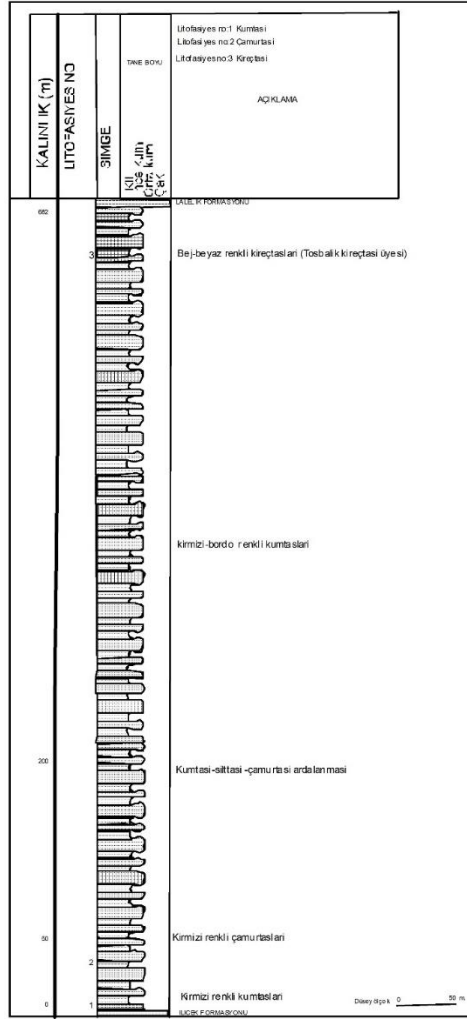
Alıçlı Formasyonu (P_{gaa})

Kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kireçtaşlarından oluşan birim, ilk olarak, Atabey vd. (1988) çalışmasında, Ayhan formasyonu içerisinde, İlice üyesi olarak tanımlanmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, litolojik özelliklerdeki farklılıklar nedeniyle, en iyi görüldüğü yer olan Alıçlı Tepe'ye atfen, Alıçlı formasyonu olarak adlandırılmış ve ayırtlanmıştır. Birim içerisindeki kireçtaşları ise, Tosbalık kireçtaşı üyesi olarak, ilk kez Demircioğlu (2014) çalışmasında ayırtlanmıştır. Gümüşyazı Köyü ile Alıçlı Tepe arasında ve Alıçlı Tepe ile Değirmen Tepe ve Kılıçkaya Tepe arasında, doğu-batı uzanımlı olarak yayılım gösterirler. Bu alanda, diğer birimlerle tektonik dokanıklı (bindirmeli) olarak bulunur (Şekil 2). Hakim rengi, koyu kahve-kırmızı-bordo renklerde olan birim, kumtaşı, silttaşı, çamurtaşı ve kireçtaşlarından oluşur (Şekil 11).

Birimin tabanındaki, koyu kahve-kırmızı renkte kumtaşları, ince-orta tanelidir. Alıçlı Tepe civarında, bindirmeli alanda, kumtaşı tabakaları devriktir. Silttaşı, çamurtaşı ve kireçtaşı tabakaları ile ardalanmalıdır. Tabaka altı yapıları (Kaval yapısı, yük kalıpları) mevcuttur. Birim içerisinde görülen silttaşları ise, genel olarak kırmızı-bordo renklerde görülmektedir. Bazı alanlarda, sarımsı-koyu kahve renklerde görülmektedir. Karbonat bağlayıcılıdır. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 10-15 cm. kadar değişebilmektedir. Silttaşları, diğer formasyon içerisindeki, kumtaşları, çamurtaşları ile ardalanmalıdır. Birim içerisinde görülen, çamurtaşları kırmızı-bordo renkte görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, birkaç cm. boyutuna kadar değişkenlik gösterir. Karbonat bağlayıcılıdır. İçerisinde, kil seviyeleri arasında, iyi korunmuş Globigerina sp.(?) fosillerine rastlanmıştır. Bu da, birimin açık deniz ortamında çökeldiğinin belirteçidir. Birimin üst kesimlerine doğru kireçtaşlarına geçiş yaparlar.. Bu kireçtaşları da (Demircioğlu, 2014) çalışmasında Tosbalık kireçtaşı üyesi olarak ayırtlanmıştır. Birim fliş karakterinde istiflenme sunar. Yapılan ölçülü stratigrafik kesite göre, birimin kalınlığı 682 m. olarak bulunmuştur (Şekil 11). Altındaki Kubaca formasyonu ile yanal-düşey geçişlidir ve uyumlu olarak örter. Lalelik Formasyonu tarafından da uyumlu olarak örtülür. Birimin litolojik özellikleri ve bulunan fosil içeriğine bakıldığında, açık deniz ortamında çökeldiği düşünülmektedir.

Tosbalık Kireçtaşı Üyesi (P_{gaat})

Bej renkli kireçtaşlarından oluşan birim, ilk kez Demircioğlu (2014) çalışmasında ayırtlanmış ve Alıçlı formasyonu içerisinde, Ayhan Köyü'nün doğusunda yer alan Tosbalık Tepe'ye atfen Tosbalık kireçtaşı üyesi olarak adlandırılmış ve tanımlanmıştır. Çalışma alanında, Kurtoğlu Tepe, Tosbalık Tepe ile Çaltepe arasında yayılım gösterirler (Şekil 2). Bej-gri renkli kireçtaşlarından oluşmuşlardır. Arazide, bazı alanlarda, dikleşmiş kireçtaşı tabakaları, balık sırt yüzgecini andıran görüntüler sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 30 cm.'den 120 cm.'ye kadar değişebilmektedir. Ayrıca, sığ ortamı işaret eden, stromatolitlere de rastlanmaz.



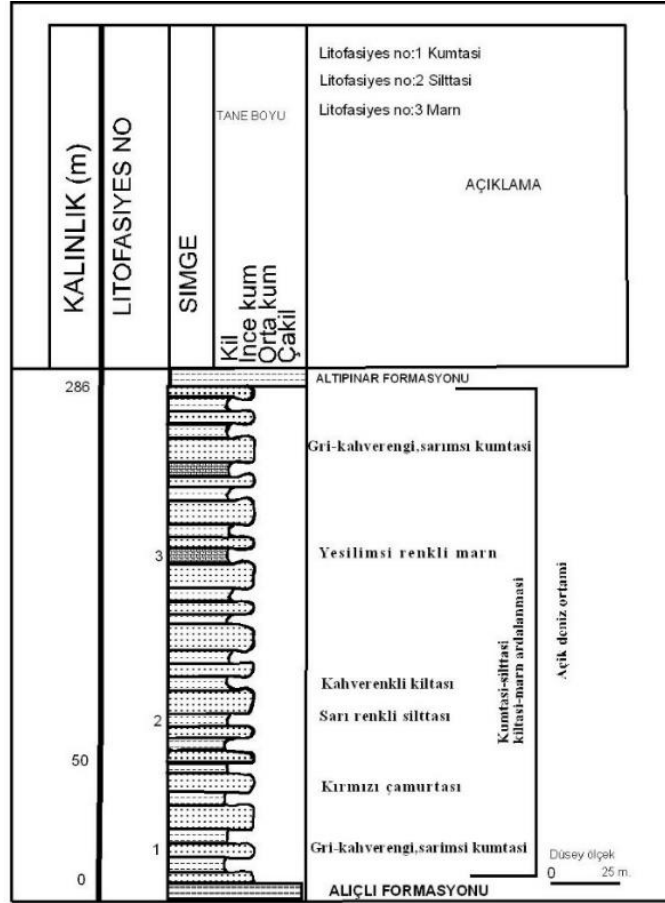
Şekil 11. Alıçlı Formasyonuna ait Ölçülü Stratigrafik Kesit

Harita ölçeğinde de kıvrımlı yapıda görülürler. Çatlak sistemleri de mevcuttur. Bu çatlaklar yer yer malakit, limonit, götit mineralleri ile doldurulmuştur. Birim içerisinde yapılan makro örnekleme, ince kesit ve nannofosil çalışmalarında fosile rastlanmamıştır. Ancak, ait olduğu Alıçlı formasyonuna ait denizel fosiller bulunan kırıntılı kayaçlarla ardalanma göstermesinden dolayı, bu kireçtaşlarının da, denizel ortamda oluştukları düşünülmektedir.

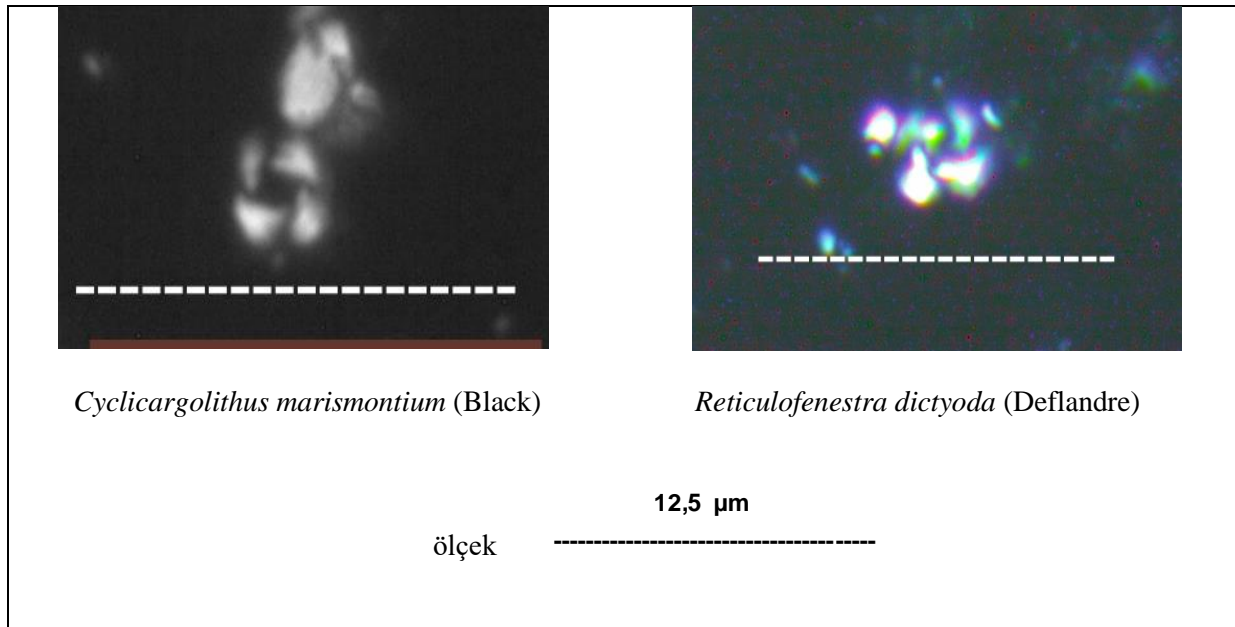
Lalelik Formasyonu (Pgal)

Kumtaşı, silttaşı, kiltası, marn ve çamurtaşından oluşan birim, ilk kez, Atabey vd. (1988) tarafından Ayhan formasyonu içerisinde, Lalelik üyesi olarak ayrırtlanmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında ise Lalelik formasyonu olarak adlandırılmıştır. En iyi, Ayhan Köyü yolu üzerinde görülürler. Ayhan köyü ve civarında ve Beşik Tepe güneyi ile Çallica Tepe civarında yayılım gösterirler (Şekil 2). Genellikle kırmızı, kahve, sarımsı, bej renkli ince taneli kumtaşı, silttaşı, marn ve çamurtaşlarından oluşur (Şekil 12).

Fliş karakterinde istiflenme sunarlar. Birim içerisinde oldukça güzel gelişmiş kıvrımlar mevcuttur. Özellikle Ayhan Köyü yolu üzerinde, asimetrik kıvrımları ve sarı, kırmızı, koyu gri, yeşil renkler gösteren kayaçlar ile tanınması kolay birimdir. Bu birimde de, kılıf kıvrımlar mevcuttur. Birimdeki kumtaşları, kahve, sarımsı kahve ve açık gri arasında renkler sunarlar. Tabaka kalınlıkları 1 cm.'den, 120 cm.'ye kadar değişebilmektedir. Karbonat bağlayıcılıdır. Kumtaşı tabakalarında, tabaka altı yapıları olarak (devrik tabakalarda), biyoturbasyon izleri ve kaval yapıları görülmektedir. Birimde görülen silttaşları ise, sarımsı, boz renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 35-40 cm. kalınlığa kadar değişim gösterirler. Marnlar ise, yeşil-açık yeşil, gri arasında renklerde bulunurlar. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan 10-25 cm. arasında değişim gösterir. yapıda bulunurlar. Birim içerisinde, kırmızı rengeyle kolayca ayırt edilebilen çamurtaşlarının tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 20-25 cm. arasında değişim gösterir. Deformasyonlardan dolayı oldukça parçalanmış ve genel olarak paralel tabakalanma gösterirler. Birimde yapılan ölçülü stratigrafik kesitte, kalınlığı 286 m. olarak ölçülmüştür (Şekil 12).



Şekil 12. Lalelik Formasyonuna ait Ölçülü Stratigrafik Kesit (Ölçeksiz)



Şekil 13. Lalelik Formasyonuna ait Kayaçalardan Elde Edilen Nannofosiller

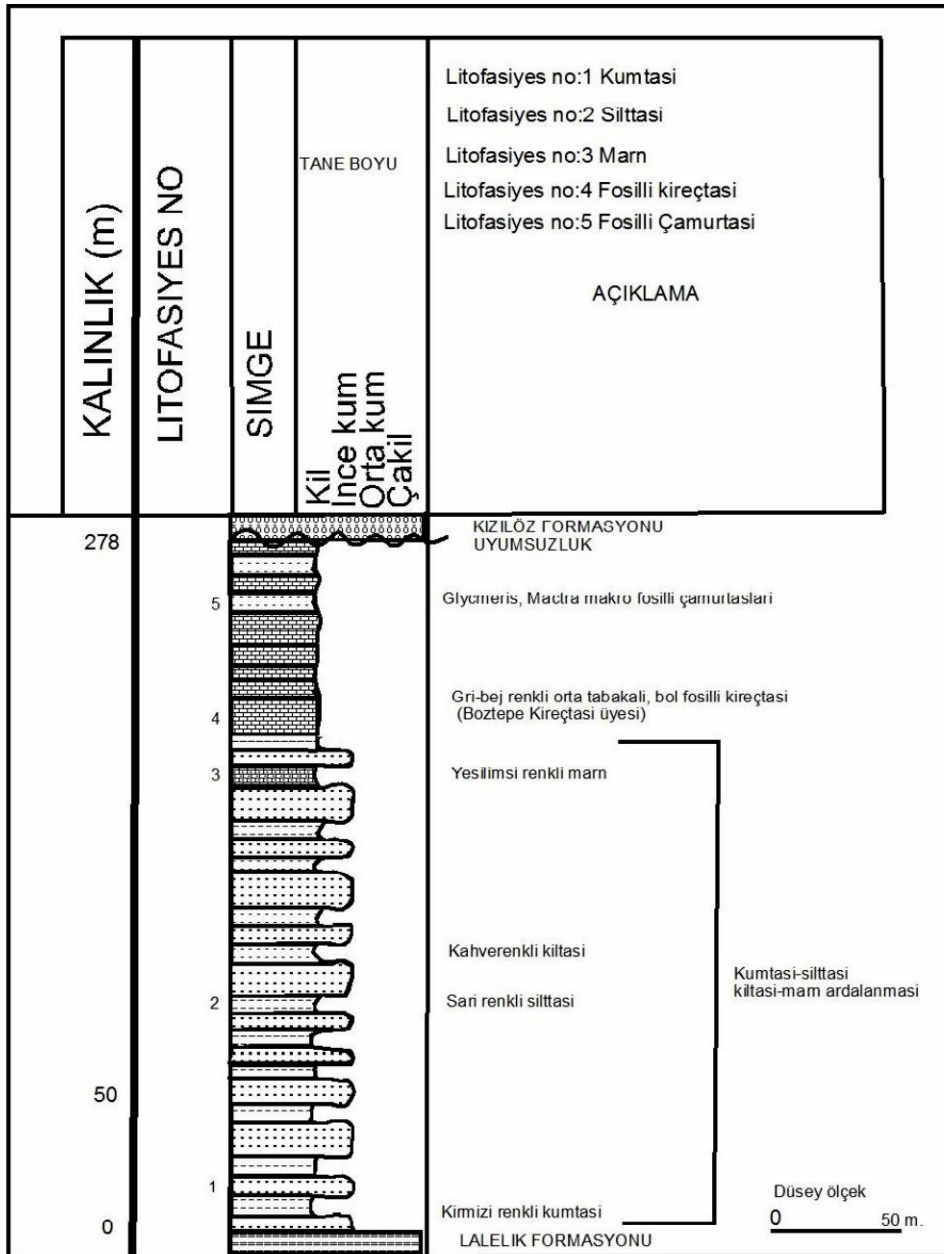
Lalelik formasyonu, altındaki Alçı formasyonunu uyumlu olarak örter. Üzerine gelen Altıpınar formasyonu ile uyumludur. Birimdeki marnlardan, nannofosil belirleme yöntemiyle elde edilen numunelerden tespit edilen nannofosillere (*Cyclicargolithus marismontium*, *Reticulofenestra dictyoda*) göre birimin yaşı, Erken-Orta Eosen olarak verilmiştir (Şekil 13). Altındaki Alçı formasyonu ile yanal-düşey geçişlidir ve uyumlu olarak örter. Altıpınar formasyonu tarafından da uyumlu olarak örtülür.

Fosil içeriği bakımından, açık deniz ortamını temsil eden *Globigerina* sp. Fosillerine de rastlanmış ancak tür seviyesinde ayırım yapılamamıştır. Birimin litolojik özellikleri ve bulunan fosil içeriğine bakıldığında, açık deniz ortamında çökeldiği düşünülmektedir.

Altıpınar Formasyonu (Pgaal)

Çakıltası, kumtaşı, silttaşı, kiltası, marn, kireçtaşı ardalanmasından oluşan birim, ilk olarak Atabey vd. (1988) tarafından Altıpınar formasyonu olarak adlandırılmıştır. Çalışma alanının kuzeyindeki Altıpınar köyüne atfen bu şekilde adlandırmışlardır. Göncüoğlu vd. (1993) çalışmasında ise, Mucur formasyonu olarak adlandırmışlardır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, Altıpınar formasyonu adı altında incelenmiştir. Birim içerisindeki, sık denizel bol fosilli kireçtaşları, çamurtaşları, Atabey vd. (1988) tarafından Boztepe üyesi olarak adlandırılmıştır (Şekil 14).

Bu kireçtaşı ve çamurtaşlarının en iyi görüldüğü yer olan Boz Tepe'ye atfen bu şekilde adlandırmışlardır. Demircioğlu (2014) çalışmasında aynı adlama benimsenmiştir. Ayhan köyü civarında, dar bir alanda yayılım gösterir. Boz Tepe ile Bozdağ Tepe arasında, yaklaşık doğu-batı doğrultulu yayılım gösterirler (Şekil 2). Hakim renkleri, kırmızı-bordo, gri, boz, bejdir. Tabanda kırmızı, kahve renkli, çakıltası ile başlar, üstte, ince taneli, kırmızı, yer yer bej renkli kumtaşları, daha üst seviyelerde silttaşı, kiltası, marn ve en üst seviyede ise kireçtaşları bulunur (Şekil 14).



Şekil 14. Altıpınar Formasyonu'na ait Ölçülü Stratigrafik Kesit

Çakıltaşları, kırmızı-bordo renklerde görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 30 cm. ile 70 cm. arasında değişim gösterir. Kumtaşları ile ardalanmalıdır. Kumtaşları, kırmızı-bordo, yer yer bej renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, 10 cm. ile 1 m. arasında değişim gösterirler. Birimdeki silttaşları ise, sarımsı-boz renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, 1 cm. ile 4-5 cm. arasında değişim gösterir. Kilttaşları ise kahve-koyu kahve renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, 1 cm. ile 7-8 cm. arasında değişir. Marnlar ise, yeşilimsi renklerde görülürler. Çamurtaşları ise, kırmızıdan, boz renkler arasında değişim gösterirler. Diğer birimlerle ardalanmalı olarak bulunurlar. Tabaka kalınlıkları, 20 cm. ile 60 cm. arasında değişim gösterirler. Kireçtaşları ise, bej-gri renklerde görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 20 cm. ile 120 cm. arasında değişim gösterirler.

Bol makro ve mikro ölçekte fosil içerirler. Bu fosillere (*Macra* sp., *Glycmeris* sp., nummulit) göre, sığ denizel ortamda oluştuğu anlaşılmaktadır. Genel olarak, istifin üst seviyelerinde ve çamurtaşları ile ardalanmalıdır. Birim üzerinde yapılan ölçülü stratigrafik kesite göre kalınlığı 278 m. olarak bulunmuştur (Şekil 14).

Fosil içeriği bakımından, özellikle istifin üst seviyeleri zengindir. Çamurtaşı ve kireçtaşlarında bulunan, *Nummulites* sp. *Alveolina* sp. fosillerine göre de, Lütesiyen yaşlıdır. Altıpınar formasyonu, alttaki, Lalelik formasyonu ile yanaldüşey geçişlidir. Bu formasyonu uyumlu olarak örter. Boz Tepe kuzeyinde, Lalelik formasyonu ile bindirmeli olarak bulunur. Üzerine gelen, Oligosen ?- Orta Miyosen yaşlı Kızılöz formasyonuna ait, Arafa üyesi tarafından açılı uyumsuz olarak örtülür. Birimin üst seviyelerini oluşturan Boztepe üyesine ait kayalar, fosil içeriğine bakılarak, sığ denizel ortamda oluşmuşlardır.

Boztepe Üyesi (Pgaalb)

Çamurtaşı, kireçtaşı ardalanmasından oluşan birim, ilk olarak Atabey vd. (1988) tarafından, Altıpınar formasyonu içerisinde, en iyi görüldüğü yer olan, Boz Tepe'ye atfen Boztepe kireçtaşı üyesi olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, bu isimle, Altıpınar formasyonu içerisinde, Boztepe üyesi olarak adlandırmıştır. Çalışma alanında, Bozdağ ile Boztepe arasında, yaklaşık doğu-batı doğrultulu olarak yayılım gösterirler (Şekil 2). Hakim rengi, gri-boz renkli olan birim, kireçtaşı ve çamurtaşlarından oluşur. Çamurtaşları, gri-boz renkli ve orta-kalın tabakalıdır. Tabaka kalınlıkları, 20 cm. ile 60 cm. arasında değişim gösterir. Bol fosil içeriğine sahiptirler. *Glycmeris* sp. ve *Macra* sp. fosilleri oldukça yaygındır. Bol fosilli kireçtaşları ile ardalanmalı olarak bulunurlar. Kireçtaşları, gri-bej renklerde görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 20 cm. ile 120 cm arasında değişim gösterir. Boztepe üyesinin ortalama kalınlığı 98 m. olarak ölçülmüştür. Formasyonun en üst kesimini oluştururlar. Kireçtaşları içerisinde, makro fosil olarak, *Glycmeris* sp. ve *Macra* sp. bol miktarda bulunur. Bu fosillerin yaş aralığı değişkendir. Gözle görülebilecek boyutta *Nummulites* sp., *Assilina* sp. fosilleri de bol miktarda mevcuttur.

Kireçtaşlarından alınan örneklerden yapılan ince kesit çalışmalarında ise, *Alveolina* sp. fosiline rastlanmıştır. Birim içerisinde görülen, makro ve mikrofosil içeriğine göre Orta Eosen (Lütesiyen) yaşlıdır. Bu birimler, Orta Miyosen yaşlı Kızılöz formasyonu (Arafa üyesi) tarafından, açılı uyumsuz olarak örtülür. Fosil içeriklerine göre de, sığ denizel-resifal ortamı yansıtır (Demircioğlu, 2014).

Kızılöz Formasyonu (Pgngk)

Çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşından oluşan birim, ilk olarak Atabey vd. (1988) tarafından, Kızılöz deresine atfen Kızılöz formasyonu olarak adlandırılmıştır. İnce taneli çakıltaşı, kumtaşı, marn ve linyitten oluşan bölümü, kömür işletmelerinin de olduğu Arafa (Gümüşyazı) Köyü'ne atfen, Arafa üyesi olarak ayırtlanmıştır (Atabey vd., 1988). Demircioğlu (2014) çalışmasında, aynı adlama benimsenmiştir. Hacıbektaş ilçesi güneyindeki Kütükçü köyü ile Alemlî, Dadağı köyleri arasında ve Gümüşyazı (Arafa) köyü ile Bozdağ Tepe arasında ise, yaklaşık doğu-batı doğrultulu olarak yayılım gösterirler (Şekil 2).

Kırmızı- şarabi renkli, teknesi çapraz tabakalı, kanal dolgu çökeli, çakıltaşı, kumtaşı ve çamurtaşından oluşmaktadır. Çakıllar tane destekli bağlayıcı ile tutturulmuştur. Bu çakıltaşları, kırmızı-şarabi renkleri ile karakteristiktir. Tabaka kalınlıkları, 30 cm. ile 1.5 m. arasında değişim gösterir. Çakıltaşları içerisinde, Boztepe üyesine ait, Lütesiyen yaşlı fosilleri içeren kireçtaşı çakılları, kumtaşı, silttaşı gibi kırıntılı kayaç çakılları ve gnays, kuvarsit, mermer gibi metamorfik çakılları ve siyenit, granit, andezit gibi magmatik kayalara ait çakıllar bulunur. Kumtaşları ise, kırmızı-bordo renklidir. Tabaka kalınlıkları, 5 cm. ile 30 cm. arasında değişim gösterir. Çamurtaşları ise, kırmızı-koyu kahve renklerde görülmektedir. Tabaka kalınlıkları, 5 cm. ile 10 cm. arasında değişim gösterir. Çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı ardalanmasından oluşan formasyonun ortalama kalınlığı, 800 metre olarak belirlenmiştir (Atabey vd., 1988). Birim, Pasquare (1968) 'nin Yeşilhisar konglomerasına ve Atabey ve Tarhan (1987) 'nin Avcıköy formasyonuna karşılık gelmektedir. İçerisinde Boztepe kireçtaşı üyesine ait, Lütesiyen yaşlı

fosilleri içeren kireçtaşı çakılların da bulunması, birimin Orta Eosen sonrasında oluştuğunu gösterir. Birime, Atabey vd. (1988) tarafından, göreceli olarak Oligo-Miyosen yaşı verilmiştir. Palinolojik (Arafa üyesine ait kömürler üzerinde) çalışmalara göre yapılan, bitki fosilleri ve sporlar üzerinde yapılan yaşlandırma çalışmalarına göre ise Orta Miyosen yaşlıdır (Akgün vd., 1995). Alt-üst sınır ilişkiler göz önüne alındığında, birimin yaşı, Oligosen(?)-Orta Miyosen olarak düşünülebilir. Birim, karasal (alüvyon yelpazesi)- göl, bataklık ortamında oluşmuşlardır.

Arafa Üyesi (Pgngka)

İnce taneli çakıltaşı, kumtaşı, marn, linyitten oluşan birim, ilk olarak, Atabey vd. (1988) tarafından, Arafa Köyü'ne atfen Arafa üyesi olarak ayırtlanmış ve adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında aynı adlama benimsenmiştir. Alemlî ve Dadağı köyleri arasında, yaklaşık, kuzeybatı-güneydoğu doğrultulu olarak yayılım gösterirler. Dadağı ve Gümüşyazı (Arafa) köyleri arasında ise, yaklaşık doğu-batı doğrultulu yayılım gösterirler (Şekil 2). İnce taneli çakıltaşı, orta – kalın tabakalı, sarımsı renkli, orta – ince taneli kuvarslı kumtaşı, silttaşı, marn ve linyit araldanmasından oluşmuştur. Çakıltaşları, genel olarak, koyu gri- bej renklerde görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 5 cm. ile 15 cm. arasında değişim gösterirler. Çakıl boyutları, 2 cm. ile 5-6 cm. arasındadır. Kumtaşları ise, koyu griden açık griye değişen renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları 10 cm. ile 1m. arasında değişir. Yer yer çapraz tabakalanma gösterirler. Silttaşları ise, sarımsı-boz renklerde görünürler. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 5-6 cm. kalınlığa kadar değişim gösterir. Zaman zaman linyitli seviyelerle araldanma gösterirler. Diğer birimlerle araldanmalı olarak bulunur. Marn ise, yeşilimsi renklerde görünürler. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan birkaç cm.'ye kadar değişim gösterirler.

Diğer birimlerle araldanmalı olarak bulunur. Linyitler ise, koyu gri-siyah renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 120 cm.'ye kadar değişebilmektedir. Diğer kayalarla araldanmalı olarak bulunur. Birim, Geç Paleosen-Orta Eosen yaşlı Ayhan grubu birimleri üzerine, açılı uyumsuz olarak gelir. Yaklaşık 350 metre kalınlığındadır (Atabey vd., 1988). Birim içerisindeki palinolojik çalışmalara göre de, yaşı Orta Miyosen olarak belirlenmiştir (Akgün vd., 1995). Birim, taşkın düzlüğü ve sığ göl- bataklık ortamında oluşmuştur.

Yaylacık Grubu

İlk olarak Demircioğlu (2014) çalışmasında adlandırılmıştır. Geç Miyosen yaşlı, Tuzköy ve Yüksekli formasyonlarını kapsar.

Tuzköy Formasyonu (Ngt)

Kumtaşı, silttaşı, kilttaşı, marn, kireçtaşı, halit ve tüffitten oluşan birim, ilk olarak, Kayakıran (1979) tarafından, en iyi görüldüğü yer olan Tuzköy kasabasına atfen Tuzköy formasyonu olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında aynı adlama benimsenmiştir. Atabey vd. (1988) tarafından, ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Gülşehir ilçesi batısındaki Tuzköy Köyü ve Yaylacık Köyü civarı en iyi görüldüğü yerlerdir. Tuzköy, Yüksekli Köyü ve çevresi ile, Yeşilöz Köyünün güneybatısında, Kızılırmak Nehri'nin çevresinde yayılım gösterirler. Evren tepe (Tuzköy) civarında yaygın olarak görülür (Şekil 2).

Sarı-boz, koyu gri renkli, kumtaşı, silttaşı, halit (tuz), yer yer jips kristalleri içeren kilttaşı ve marnlardan oluşur. Birimdeki kumtaşları, gri-boz renklidir. Tabaka kalınlıkları, 2 cm. ile 5 cm. arasında değişim gösterir. İnce-orta taneli kumtaşı özelliği gösterirler. Yer yer, küçük boyutta çapraz tabakalanmalar gözlenir. Silttaşları ise, sarı-boz renkli olarak görülürler. İnce tabakalı ve laminalı olarak görülürler. Kilttaşları ise, açık kahve-boz renklerde görülürler. Tabaka kalınlıkları, lamina boyutundan, 5-6 cm. kalınlığa kadar değişebilmektedir. Marnlar ise, koyu gri, yeşilimsi renklerde görülürler. Kireçtaşı ve kilttaşları içerisinde jips kristalleri görülür. Halitler ise, beyaz-krem renkli, orta-kalın halit tabakaları mevcuttur. Atabey vd. (1988) çalışmasına göre, Tuzköy formasyonu, 200 m. kalınlıktadır. Ancak, çalışma alanında tabanı görülmemektedir. Stratigrafik olarak, üstüne gelen Geç Miyosen yaşlı, Yüksekli formasyonu ile uyumludur. Tuzköy formasyonu, Pasquare (1968) 'deki, çalışma alanının dışında, doğusunda kalan, Bayramhacılı ve Mustafapaşa üyesi ile deneştirilebilir. Marnlardan derlenen örneklerdeki *Cyprideis* sp., *Chara*, *Ilyocyris* cf. *Gibba* sp. fosillerine göre, Atabey vd. (1988) çalışmalarına ve stratigrafik ilişkiye göre Tuzköy formasyonu, Geç Miyosen yaşlıdır. Birime ait kayalar, akarsu ve gölsel ortamda oluşmuşlardır.

Yüksekli Formasyonu (Ngy)

Çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı, jips, tüffitten oluşan birim, ilk kez, Aydın (1984) tarafından, en iyi görüldüğü yer olan Yüksekli Köyü'ne atfen adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında aynı adlama benimsenmiştir. Çalışma alanında çok geniş bir alanda yayılım gösterirler. Masife ait birimlerin hem kuzeyinde hem de güneyinde görülürler. Eski yaylacık ile Gümüşkent Köyleri arasında yayılım gösterirler. Masifin kuzeydoğu kesiminde ise, Yenice Köyü

ile Dadağı köyü arasında yayılım gösterirler (Şekil 2). Beyazımsı–gri renklerde görülürler. Çakıltaşı, kumtaşı, çakıllı, kumlu tüfit, jips, silttaşı, kiltaşından oluşmuştur. Kumtaşları ise, gri-bej renklerde görünürler. Tabaka kalınlıkları, 5 cm. ile 25 cm. arasında değişim gösterir. İnce, orta ve kaba taneli olarak bulunurlar. Yer yer, küçük boyutlu çapraz tabakalanmalar görülür. Tüfitler ise, sarı-boz, gri renklerde görülürler. Çakıl, kum boyutunda sedimanter malzeme ve kül boyutunda volkanik malzemeden oluşur. Tabaka kalınlıkları, 2 cm. ile 35-40 cm. arasında değişim gösterir. Birimdeki jipsler ise, kirli beyaz ve açık kahve renklerde görülürler. Formasyon içerisinde, evaporitik ortamı temsil eden, kalın ve kıvrımlı jips tabakaları mevcuttur. Genel olarak, formasyon içerisinde merccekler şeklinde görülürler. Jips mercceklerinin boyutları birkaç metre ile 8-10 m. arasında değişir. Bu seviyeler deformasyondan etkilenmiş ve kıvrımlanmaya uğramışlardır. Birimin kalınlığı Atabey vd. (1988) tarafından 250 m, Aydın (1984) tarafından 275 m olarak belirlenmiştir. Altındaki Tuzköy formasyonu ile uyumludur. Üstüne gelen Ürgüp formasyonu tarafından uyumsuz olarak örtülür. Başoğlu vd. (2011) çalışmalarında, bölgede yapmış olduğu paleontolojik çalışmalarda, Gülşehir'e bağlı Eskiyaılacık ve Yüksekli köylerinde ve Özkonak kasabası kuzey doğusunda, Geç Miyosen yaşlı memeli fosilleri bulmuşlardır. Bulunan bu memeli, yani, *Giraffe sp.*, *Hipparion sp.* fosillerinin yaşının yaklaşık 8-10 milyon yıl (Tortoniyen) olduğunu tespit etmişlerdir (Başoğlu vd., 2011). Bu fosillerin tespit edildiği yerler, masifin hem kuzeyinde, hem de güneyindeki alanlarda görülür. Birim, içerdikleri kayaçların litolojik ve fosil özelliklerine göre, akarsu, göl ortamı ürünüdür.

Ürgüp Formasyonu (Ngü)

İlk kez, geniş bir alanda yüzeyleyen volkano – sedimanter birimler, Pasquare (1968) tarafından Ürgüp formasyonu olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, aynı adlama benimsenmiştir. Gülşehir-Avanos yolu üzerindeki alanda, Yeşilöz Köyü'nün doğu kesiminde ve Özkonak çevresinde, Kuyulukışla ile Büyükkışla civarındaki alanlarda görülürler (Şekil 2). . Özkonak'ta Ürgüp formasyonuna ait tüfler içerisinde yeraltı şehri de mevcuttur. Bunun yanında, çalışma alanında, kuzey kesimlerde, Yenice Köyü güneyinde de dar bir alanda yayılım gösterirler. Kuyulukışla ve İğdelikışla Köyleri civarında da bazı alanlarda görülürler (Şekil 2). Birim içerisinde, kumtaşı, silttaşı, kiltaş gibi sedimanter kökenli kayaçlar ile, tüf, tüffit gibi kayaçlar birlikte bulunur. Özellikle, beyaz, krem renklerdeki tüfler hakim kayaçlardandır. Genel itibariyle volkano-sedimanter birimdir. Özellikle, volkanik kökenli kül boyutundaki malzeme ile sedimanter kökenli, kum, silt boyutundaki malzemenin beraber çökmesiyle oluşmuşlardır. Çalışma alanındaki yaklaşık kalınlığı 15-45 m. arasında değişim göstermektedir. Yüksekli formasyonunu uyumsuz olarak örterler. Üstüne gelen Kızılırmak formasyonu tarafından da uyumsuz olarak örtülür. Ürgüp formasyonu içerisindeki bazı volkanitler üzerinde, K/Ar yöntemine göre yapılan yaş tayinleri sonucunda 13.7-0.3 ile 6.5-0.2 m.y. zaman aralığı, yani (Ponsiyen) Geç Messiniyen olarak verilmiştir (Batum, 1978). Aydar vd., (2012), çalışmalarına göre ise, bölgedeki tüflerde yapılan çalışmalarda yaş aralığı yaklaşık 9.12 my.'den 2.5 my.' a kadar değişmektedir. Oluşum ortamı, kayaç özellikleri itibariyle, göl ortamıdır.

Avanos Grubu

Avanos grubu, Pliyosen yaşlı Kızılırmak formasyonu ve Pleyistosen yaşlı Güvercinlik çakıltaşı ile Gülşehir bazaltından oluşur.

Kızılırmak Formasyonu (Ngk)

Çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşından oluşan birim, ilk olarak, Oktay (1981) tarafından adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında aynı adlama kullanılmıştır. Ayhan basenin yaklaşık orta kesimlerinde, Ayhan Köyü'nün kuzeyinde ve Kızılırmak havzasında, Kızılırmak nehri çevresinde ve nehre yaklaşık paralel olarak uzanım gösterirler (Şekil 2). Kırmızı, kahve renklerde görülür. Akarsu ortamında, çakıltaşı, kumtaşı, çamurtaşı araldanmasından oluşmuştur. Birim genel olarak, oksidasyona bağlı olarak kırmızımsı, kahverengi renklerde görünüm sunarlar. Birimdeki çakıltaşları, kırmızı-bordo renklerde görünüm sunarlar. Çakıl boyutları, 2 cm. ile 20 cm. arasında değişim gösterir. Birim içerisinde kanal dolgusu yapıları oldukça sık gözlenir. Kumtaşları ise, kırmızı-kahve renklerde görünüm sunarlar. Tabaka kalınlıkları, 5 cm. ile 20 cm. arasında değişim gösterir. Genel olarak kaba taneli kumtaşı özelliğindedirler. Çamurtaşları ise, kırmızı-koyu kahve renktedirler. Tabaka kalınlıkları 5 cm. ile 45 cm. arasında değişim gösterir. Çalışma alanındaki kalınlıkları yer yer değişim gösterir. ortalama kalınlığı 100 m. civarındadır. Birimler içerisindeki taneler gevşek tutturulmuştur. Birim, Ürgüp formasyonunu uyumsuz olarak örter. Üstüne gelen Güvercinlik çakıltaşı ile uyumludur. En Geç Miyosen-Pliyosen veya Pliyokuvaterner yaşlıdır (Akgün vd., 1995). Demircioğlu (2014) çalışmasında, altındaki ve üstüne gelen birimlere göre, Pliyosen yaşı verilmiştir. Tabakalar yaklaşık yatay konumdadır. Birim içerisinde herhangi bir fosil içeriğine rastlanmamıştır. Akarsu ortamı ürünleri olduğu düşünülmektedir. İçerisinde bulunan yapılara göre, akarsu, yer yer de göl ortamını temsil eden seviyelere rastlanır.

Güvercinlik Çakıltası (Qg)

Çakıltası, kumtaşı, çamurtaşından oluşan birim, Atabey vd. (1988) tarafından Kızılırmak çakıltası olarak adlandırılmıştır. Kızılırmak formasyonu ile isim benzerliğinden dolayı Demircioğlu (2014) çalışmasında ise, Güvercinlik çakıltaları olarak adlandırılmıştır. Kızılırmak ve çevresindeki eski nehir yatağı bölgelerinde görülür (Şekil 2). Özellikle, Avanos-Gülşehir yolu üzerinde en iyi görüldüğü yerler, yol kenarındaki yamaçlardır. Çalışma alanında teraslar halinde bulunur.

Çakıltaları, gri-bej renklerde görünüm sunarlar. 2-15 cm. boyutunda çakıl içeren ince – orta kum tane boyutlu gevşek tutturulmuş kumtaşı ile silttaşından oluşmaktadır. Birimler içerisindeki taneler gevşek tutturulmuştur. Aşınmaya çok müsait olduğundan her yerde aynı kalınlıkları göstermezler. Teknesel çapraz tabakalanma sık görülür. Çakıltası karbonat çimentoludur. Bu karbonat çimento, muhtemelen yüzey ve yağmur sularında bulunan çözelti halindeki karbonatlardan kaynaklanmaktadır.

Ortalama kalınlığı 8-10 m.'dir. Üstünde yer alan bazaltlara göre yaşı olasılıkla Pleyistosen'dir. Ayhan köyü güneyinde, Miyosen-Pliyosen yaşlı birimler üzerine, Gülşehir yakınlarında bazı alanlarda, Ürgüp formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmiştir.

Kızılırmak formasyonu üzerine uyumlu olarak gelir. Güncel alüvyonlar tarafından uyumsuz olarak örtülür. Karasal ortam (akarsu) ortamı ürünleridir.

Gülşehir Bazaltı (Qgü)

Bazaltlardan oluşan birim, ilk kez Atabey vd. (1988) tarafından adlandırılmıştır. Gülşehir şehir merkezi civarında görülür (Şekil 2). Makroskopik el örneklerinde, kayaç yüzeyleri oldukça taze ve çok az alterasyonlu görülmektedir. Çatlaklar ise genellikle dolgunuz şekildedir. Olivin bazalt özelliğindedir. Alterasyon özellikleri çok azdır.

Kalınlığı 10-30 m kadardır. Doğan (2011), ise bazaltlar üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapmış ve bunları yaşlarına ve mostra verdikleri yerlere göre, 4 ayrı bazalt olarak incelemiştir. Bunlar üzerinde radyometrik yaş analizleri de yapmıştır. Evren Tepe ve Evren sırtı civarında, ayrıca, Evren Tepenin sırt ve tepe kesiminde yayılım gösteren bu bazaltlar, Pleyistosen yaşlı bazaltlardandır. Doğan (2011) çalışmasında buradaki bazaltların yaşını 1989.4 ± 38.9 (ka) bin yıl olarak belirlemiştir. Karaburna bazaltı, çalışma alanı dışında Karaburna köyü civarında gözlenir. Pleyistosen yaşlıdır. Doğan (2011) çalışmasında göre yaklaşık radyometrik yaşı 1228.2 ± 46.4 (ka) bin yıldır. Tuzköy köyü ve yakın civarında gözlenen bazaltlar ise, diğer bazaltlarla aynı litolojik özellikleri gösterirler. Genç oluşum yaşına sahip bu bazaltlar, Tuzköy fayı ile sınırlanırlar (Doğan 2011). Ar-Ar tekniğiyle yapılan yaş analizlerinde 403.8 ± 9.8 bin yıl (ka) yaş vermiştir (Doğan, 2011). Radyometrik yaş tayini 0.9-0.34 my yaş aralığı vermiştir (Batum, 1978). Doğan (2011) çalışmasında ise Ar-Ar tekniğiyle yapılan yaş analizinde, yaklaşık 96.0 ± 13.0 yıl yaş vermiştir. Gülşehir ilçe merkezindeki bazaltları yine özellikle görülürler. Kızılırmak'ın genç birimlerinin olduğu yerlerde yayılım gösterirler. Çalışma alanındaki en genç bazaltları oluştururlar.

Balkaya Travertenleri (Qb)

Bej, krem renkli travertenlerden oluşan birim, ilk olarak, Atabey vd. (1988) tarafından, en iyi görüldüğü yerlerden olan, Balkaya Tepe'ye atfen, Balkaya travertenleri olarak adlandırılmıştır. Demircioğlu (2014) çalışmasında, aynı adlamayı kullanmıştır.

Çalışma alanında en iyi görüldüğü yerler, Balkaya Tepe ve Gümüşkent Kasabası civarıdır (Şekil 2). Diğer alanlarda görülen travertenler daha küçük ölçekli ve yine fay zonları üzerinde yer alır. Travertenler, Salanda (Gümüşkent) fayının tavan bloğunda yer alır. Travertenler, bej, krem ve bantlı renklerde görünüm sunarlar. Kırılğan-gevrek yapıdadırlar. Gümüşkent kasabası ve civarında oldukça geniş bir alanda yüzlek verirler. Ortalama kalınlıkları, 25 m. civarındadır. Gülşehir bazaltı üzerine uyumsuz olarak gelir.

Yamaç Molozu ve Alüvyon (Qal)

Yamaç molozları, çalışma alanında, yüksek morfolojiye sahip yerlerin yamaçlarında, iri ve ince taneler, bloklar şeklinde gözlenir. Gülşehir Bazaltı ve Güvercinlik çakıltası'nın yayılım gösterdiği alanlarda, boyu 1-2 m.'ye varan bloklar içerirler. Güncel alüvyonlar ise Kızılırmak Nehri ve çalışma alanındaki diğer nehir yataklarında görülen çakıl, kum, silt, ve kilden oluşmaktadır. Kızılırmak vadisi boyunca, taşkın ovası çökelleri de geniş alanları kapsar. Balkaya travertenleri ile birlikte, altındaki formasyonları, uyumsuz olarak örter.

SONUÇLAR

İnceleme alanında yapılan çalışmalar ile, alanın stratigrafisi, önceki çalışmalar da dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmıştır. Alanda, Geç Paleosen- Orta Eosen yaşlı birimler (Ayhan grubu) üzerinde ölçülü stratigrafik kesitler alınmıştır. Yapısal jeolojik olarak önemli seviyeler, yeni formasyon ve üye adlamaları, stratigrafik adlama kurallarına göre yapılmıştır. Ayrıca, yeni üyeler belirlenmiş ve adlandırılmıştır.

Önceki çalışmalarda, aynı birimler farklı isimlerle adlandırılmıştır. Adlandırma kurallarına göre bu birimler yeniden adlandırılmış ve karışıklığın önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, karşılaştırmalı stratigrafik bölümlendirme tablosu hazırlanmıştır.

Alandaki birimler üzerinde, ilk kez nanno fosil çalışmaları yapılmış ve yeni fosil bulguları elde edilmiştir. Özellikle yeni nanno-fosil bulguları (*Cyclicargolithus marismontium*, *Reticulofenestra dictyoda gibi*), önceden görsel olduğu belirtilen birimlerin, denizel kökenli olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bölgenin jeodinamik evrimi yeniden değerlendirilmiştir. Önceki çalışmalarda, Ayhan grubuna ait birimlerin, karasal-görsel bir ortamda oluştuğu belirtilmişken, bu çalışmada elde edilen nanno fosil bulguları ile, bu birimlerin denizel ortam ürünleri oldukları tespit edilmiştir. Bu bulgularla, havzanın jeodinamik evrimi tekrar gözden geçirilmiş ve havzanın yay gerisi havza özelliğinde geliştiği değerlendirilmiştir. Önceki çalışmalarda, transgresif istif özelliği gösterdiği belirtilen birimlerin, regresif ortam ürünleri oldukları belirlenmiştir. Bu bulgularla, bölgenin tektonik özellikleri beraber değerlendirilmiştir.

Ayhan grubuna ait formasyonların, önceki çalışmalarda belirtildiği gibi stratigrafik dokanaklı değil tektonik dokanaklı (bindirmeli) olduğu belirlenmiştir (Şekil 4).

Bu çalışma yazarın, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde açık erişim olarak bulunan doktora tezinden türetilmiştir.

TEŞEKKÜR

Alandan alınan numuneler üzerinde, nanno-fosil çalışmaları yapan ve değerlendiren, paleontolog, Prof. Dr. Ayşegül Güney'e teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Akgün, F., Olgun, E., Kuşçu, İ., Toprak, V., Göncüoğlu, M.C., (1995). Orta Anadolu Kristalen Kompleksinin Oligo-Miyosen'' örtüsünün stratigrafisi, çökeltme ortamı ve gerçek yaşına ilişkin yeni bulgular. T.P.J.D. Bülteni. s:51-68.
- Atabey, E., Tarhan, N., (1987). Ortaköy (Niğde-Tuzköy) Kesikköprü (Nevşehir) Yöresinin Jeolojisi. M.T.A. Rapor No:8156.
- Atabey, E., Tarhan, N., Yusufoglu, H., Canpolat, M., (1988). Hacıbektaş, Gülşehir, Kalaba (Nevşehir) Himmetdede (Kayseri) arasının jeolojisi. M.T.A. Rapor No: 8523.
- Ataman, G., (1972). Ankara'nın güneydoğusundaki granit-granodiyoritik kütlelerden, Cefalık Dağının radyometrik yaşı hakkında ön çalışma. *Hacettepe Üni. Fen ve Müh. Derg.* s:44-49.
- Aydar, E., Schmitt, A., Çubukçu, E., Akın L., Ersoy, O., Şen, E., Duncan, R., Atıcı, G. (2012), Correlation of Ignimbrites in the Central Anatolian Volcanic province Using Zircon and Plagioclase ages and Zircon Composition. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 83-97p.
- Aydın,N., (1984). Orta Anadolu Masifinin Gümüşkent B.(Nevşehir) Dolayında Jeolojik Petrografik İncelemeler. MTA .Jeoloji Etüdüleri Daire Bşk. Saydamer – Gün Kitaplığı Arşiv No:206.
- Bailey, E. B. and McCallien, W. J., (1950) : The Ankara Mélange and the Anatolien Thrust. M.T.A., No: 40, Ankara.
- Başoğlu O., Gökkoyun S. , Sönmez Ç., Şener T., (2011). 2010 Yılı Nevşehir İli Miyosen Dönem Fosil Yatakları Yüze Araştırması, Kültür ve Turizm Bakanlığı, 29. Araştırma Toplantısı sonuçları, Malatya, 369-382.
- Batum, İ., (1978). Nevşehir Güneybatısındaki Göllüdağ ve Acıgöl Volkanitlerinin Jeokimyası ve Petrolojisi, *Yerbilimleri Dergisi*, 4, 70-88.

- Demircioğlu, R., (2014). Gülşehir-Özkonak (Nevşehir) çevresinde Kırşehir Masifi ve Örtü Birimlerinin Jeolojisi ve Yapısal Özellikleri, Doktora Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 232 s.
- Doğan, U., (2011). Climate-controlled river terrace formation in the Kızılırmak Valley, Cappadocia section, Turkey: Inferred from Ar–Ar dating of Quaternary basalts and terraces stratigraphy. *Geomorphology*, 126, 66–8.
- Eldert L. A, Douwe J. J. van Hinsbergen, Nuretdin Kaymakçı, Reinoud L.M., Vissersa & Bart W. H. Hendriks. (2014). Late Cretaceous extension and Palaeogene rotation related contraction in Central Anatolia recorded in the Ayhan-Büyükkişla basin. *International Geology Review*.s:1-25.
- Göncüoğlu, C., Yalınz, K., Kuşçu, I., Köksal, S. and Dirik, K., (1993). Orta Anadolu Masifinin orta bölümünün jeolojisi, Bolum 3: Orta Kızılırmak Tersiyer Baseninin Jeolojik evrimi. T.P.A.O. Rapor No: 3313.
- Göncüoğlu, M.C., (1985). Niğde Masifi Batı Yarisının Jeolojisi. MTA. Derleme Rapor No. 5883.
- Göncüoğlu, M.C., (1986). Orta Anadolu Masifinin güney ucundan jeokronolojik yaş bulguları: MTA Dergisi 105/106, 111-124.
- Güleç, N., (1994). Rb-Sr isotope data from the Ağaçören Granitoid (East of Tuz Gölü): geochronological and genetical implications. *TÜBITAK Turkish Journal of Earth Sciences*, 3, 39-43.
- Kayakıran, S., (1979). Gülşehir Kaya Tuzlası Etüd ve Aramaları Açılanma Evreleri. MTA Rapor No: 6606.
- Ketin, İ., (1963). 1:500 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Kayseri Paftası: MTA Yayınları., Ankara.
- Köksal, S. ve Göncüoğlu, M.C., (1997). İdiş Dağı-Avanos Alanının Jeolojisi (Nevşehir-Orta Anadolu). *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, s: 119, s. 73-89.
- Lebküchner, R.F., (1957). Kayseri ve Avanos-Ürgüp Havalisi ile Boğazlıyan Havalisinin Jeolojisi Hakkında Rapor. M.T.A. Rapor no: 2656.
- Lefebvre C., Barnhoorn A., Hinsbergen D.J.J , Kaymakçı N., Vissers R. L.M. , (2011). Late Cretaceous extensional denudation along a marble detachment fault zone in the Kırşehir masif near Kaman, central Turkey. *Journal of Structural Geology* 33, 1226-1236.
- Oktay, F. Y., (1981). Savcılıbüyükoba (Kaman) çevresinde Orta Anadolu masifi tortul örtüsünün jeolojisi ve sedimentolojisi. Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 175s.
- Oktay, F. Y., (1981). Orta Anadolu Masifi tortul örtüsünün Kaman - Kırşehir yöresinde stratigrafisi ve jeoloji evrimi. Türkiye Jeol. Kur. 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, İç Anadolu'nun Jeolojisi Simpozyumu.
- Pasquare, G., (1968). Geology of the Cenozoic volcanic area of Central Anatolia. *Atti. Accad. Naz. Lincei*, 9,53-204.
- Reul, K., 1954. Kayseri etrafındaki linyit zuhurları. M.T.A. rapor no:2605.
- Seymen, İ., (1981a). Kaman (Kırşehir) dolayında Kırşehir Masifi'nin stratigrafisi ve metamorfizması, Türkiye Jeol. Kur. Bült, 24,101 - 108.
- Seymen, İ., (1981b). Kaman (Kırşehir) dolayında Kırşehir Masifi'nin metamorfizması. Türkiye Jeol. Kur. 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı İç Anadolu'nun Jeolojisi Simpozyumu, s. 12 -15.
- Seymen, İ., (1982). Kaman Dolayında Kırşehir Masifi'nin Jeolojisi, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul, 164 s. (Yayınlanmamış).



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.08.2022
Kabul Tarihi : 08.05.2023

Received Date : 15.08.2022
Accepted Date : 08.05.2023

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN ŞEBEKE ENTEGRASYONUNDA YÜK AKIŞI ANALİZLERİNİN İNCELENMESİ: KAHRAMANMARAŞ ÖRNEĞİ

INVESTIGATION OF LOAD FLOW ANALYSIS OF SOLAR POWER PLANTS IN THE NETWORK INTEGRATION: KAHRAMANMARAŞ CASE

Zehra AYGÜN^{1*} (ORCID: 0000-0002-5421-4093)
Fatma AVLİ FIRIŞ¹ (ORCID: 0000-0003-4879-1932)
Mustafa ŞEKKELİ¹ (ORCID: 0000-0002-1641-3243)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Zehra AYGÜN, zeh.aygun@gmail.com

ÖZET

Dünya nüfusunun hızla artmasıyla enerjiye gereksinim her geçen gün artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamakta kullanılan konvansiyonel enerji kaynakları sınırlı kapasiteye sahip olmaları nedeniyle yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok tercih edilen kaynak ise güneş enerjisidir. Bu çalışmada, güneş enerjisine dayalı üretim santrallerinin teknik açıdan incelenmesi konusuna odaklanılmıştır ve bu minvalde güneş enerji santrallerinin şebekeye entegrasyonu sonrasında farklı koşullara göre değişen yük akışı analizleri gerçek bir elektrik dağıtım şebekesi üzerinde incelenmiştir. Çalışma kapsamında Digsilent Power Factory programı ile reel şebekedeki güneş enerji santrallerinin yoğun olarak bulunduğu bir pilot fider seçilmiş ve yük akışı analizleri gerçekleştirilmiş olup gerilim profilinde olumlu etkiler olacağını göstermiştir. Digsilent Power Factory programından alınan analiz sonuçları, güneş enerji santrallerinden üretilecek gücün lokasyonel bazlı dağıtılmasıyla üretim santrallerinin lokasyonunun tüketilen elektrik enerjisinden gereğinden fazla düzeyde üretim yaptığı takdirde gerilimde seviyesinde yükselme olduğunu, üretim santrallerinin gerçekleştirdiği üretim seviyesinin alandaki tüketilen enerji seviyesine takribi durumunda ise gerilim seviyesindeki yükselmelerin azaldığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Analiz, Güneş enerjisi, Şebeke, Yük akışı.

ABSTRACT

With the rapidly growing the world population, the need for energy is increasing day by day. Conventional energy sources used to meet energy demand are giving way to renewable energy sources due to their limited capacity. Among these renewable energy sources, the most preferred source is solar energy. This study, the focuses on the technical analysis of solar power plants, and in this way, changing load flow under different conditions after the integration of solar power plants into the grid are examined on a real electricity distribution network. Within the scope of the study, a pilot feeder with high-density solar energy plants in the real grid was selected and load flow analyses were carried out using Digsilent Power Factory program. The results show that there are positive effects on the voltage profile. The analysis results from Digsilent Power Factory, indicate that if the power generated by solar energy plants is distributed based on location and the production plants produce more than the level of consumed electrical energy, there is an increase in voltage level. However, when the production level of the production plants is approximately equal to the level of energy consumption in the area, the voltage level increase is reduced.

Keywords: Analysis, Grid, Load flow, Solar energy

GİRİŞ

Teknolojinin her geçen gün gelişmesiyle ve insan popülasyonunun artışıyla sanayileşmede en önemli unsur olan enerjiye, bilhassa elektrik enerjisine olan talep artmaktadır. Doğalgaz, petrol ve kömür gibi sürdürülebilir olmayan yakıtlar tüketim talebini karşılayabilecek miktarda üretim yapamamaktadır ve bu yakıtların yeniden kullanım fırsatı bulunmamaktadır. Bundan dolayı yenilenemeyen enerji yakıtlar yerini; toplam enerji üretiminin %25'ine karşılık gelen yenilenebilir enerji kaynaklarına bırakmaya başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına jeotermal, güneş, biyokütle, rüzgâr, hidrolik ve okyanus kaynakları örnek olarak gösterilebilmektedir (Şekkeli & Keçecioglu, 2011).

Yenilenebilir enerji temelli elektrik üretiminde güneş enerjisi, üretimi kirlilik ve sera gazlarının emisyonuyla sonuçlanmadığı için en gelecek vaadeden yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olarak söylenilebilir (Kim vd., 2017). Ayrıca güneş enerjisi yüksek potansiyeli, çevre dostu özellikleri ve kullanım kolaylığı ile diğer yenilenebilir (rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik vb.) enerji kaynaklarına göre daha hızlı büyüme göstermektedir (Keçecioglu vd., 2015). Türkiye'de takriben 50 MW lisanssız güneş santrali bulunmaktadır (Çanka Kılıç, 2015). Aralık 2022 tarihinde Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından yayımlanan veriler incelendiğinde, Türkiye'de yenilenebilir enerjiye dayalı 11.427 adet santralin bulunduğu, birincil kaynaklara göre var olan santrallerin 9.353 adetinin güneş enerji santrali olduğu gözlemlenmiştir. Güneş enerji santrallerinin Aralık 2022 toplam kurulu gücü 9.425,4 MW, Ocak 2022 toplam kurulu güç 7.881,1 MW, Aralık 2021 toplam kurulu gücü 7.815,6 MW, Kasım 2020 toplam kurulu gücü 6.513,0 MW olduğu görülmektedir (Aylık Elektrik Üretim-Tüketim Kurulu Güç Raporları, y.y.). Kurulu güç raporları yıl bazlı incelendiğinde, güneş enerjisinden faydalanılarak elektrik üretimi artış göstermektedir.

Elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların ortak amacı; kaliteli, kesintisiz ve az maliyetli bir hizmet vererek tüketicilerine talep edilen elektrik enerjisini sunmaktır (Karadayı, 2007). Üretilen elektrik enerjisi son tüketiciye kadar ulaştırılırken tek ve sabit şebeke frekansında, sinüzoidal biçimli dalga şeklinde ve belirli gerilim seviyesinde olması istenilmektedir. Lakin gerçekleştirmek istenilen koşullar pratikte tam olarak sağlanamamaktadır (Tabak & Yalçın, 2004). Dağıtım, iletim ve üretim hatlarında kullanılan iletkenlerin direncinden dolayı enerji kayıpları yaşanmaktadır. Güzergahlara elektrik transferinde enerji kalitesi kayıplar kadar önemli görülmektedir (Akanca & Taşkın, 2013).

Enerji kalitesi kavramı, şebekeden çekilen akımdaki dalga şeklindeki bozukluklarının belirtilmesi ve şebekenin frekansı ve geriliminde meydana gelebilecek değişimleri incelemek gayesiyle kullanılmaktadır (Özdemir, y.y.). Araştırmalar enerji kalitesinin düzeltilmesinin önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir. Enerji kalitesinin bilinen en temel sorunlarının başında gerilim/akım dalga şeklinin ideal sinüs düzeninden uzaklaşması gelmektedir. İşbu uzaklaşmanın majör sebebi, dağıtım sistemlerinde yer alan nonlineer yüklerin mevcudiyetidir (Tekin vd., 2016). Başlıca enerji kalitesi problemlerine bakılırsa; enerji kesintileri, gürültü, frekans sapmaları, gerilimde azalma, gerilimde yükselme, modülasyon, gerilim ve faz dengesizlikleri ve harmonik bozulmaları olarak söylenilebilir (Mumyalmaz vd., 2004). Güç kalitesi, alternatif enerji sistemlerinde çekilmiş olan gerilim ve akımın saf sinüs dalga şekline sahip olmasıdır. Bu kalitenin frekans değeri 50Hz sabit nominalde ve yük üzerindeki gerilimin efektif olarak anma değerinde olması istenilmektedir (E. Gencer, 2018). Güç kalitesinde, şebekeye bağlı gerilimin sürekliliğinin korunması temel hedef olmaktadır (Demir vd., 2017). Güç sisteminde tüketilen güç ile arz edilen güç eşit değilse iletim ve dağıtım sistemlerinde bir ya da birden fazla barada meydana gelebilecek arıza, kesinti veya ani değişimlerle gerilimde dengesizlikler oluşabilir. Sonuç olarak meydana gelen gerilim dengesizlikleri neticesinde yeterli olmayan üretim veya fazla tüketim sisteminin belirli yerlerinde gerilimin yükselmesine ya da gerilimin düşmesine neden olabilmektedir (Yeşilbudak vd., 2016).

Gerilim yükselmesi, 1 dakikadan az 10 ms'den fazla zaman diliminde gerilimin ya da akımın efektif değerindeki artış olarak tanımlanmaktadır. Sinüs sinyalindeki bu değişimin genlik değeri 1.1 p.u. ile 1.8 p.u. arasında değişiklik göstermektedir. Gerilim yükselmesine kapasitörlerin devreye alınması ve yüklerin devre dışı bırakılması örnek olarak verilebilir (Mutlu vd., 2016).

Gerilim düşmesi, 1 dakikalık kısa zaman diliminde anma geriliminin efektif değerinde azalış olarak tanımlanmaktadır. Bu gerilim düşümü işletmelerde oluşan bir sorundan (büyük güce sahip motorların sisteme dahil olması) ve dağıtım/iletim hattındaki arızalardan kaynaklanabilmektedir. Orta ve alçak gerilim seviyesinde iletim, dağıtım ve üretim yapan kuruluşların sisteminde oluşabilecek gerilim düşmelerine karşı çözüm önerileri bulunmaktadır. Bu hatalar, iletim ve dağıtım hattındaki arızalardan kaynaklıysa kısa devre gücü geliştirilebilir ve şebekede arızalar düşürülebilir. İşletmelerde oluşan problemlerden dolayı gerilim düşümü yaşandığı takdirde ise,

kullanılan her büyük motor ayrı güç kaynaklarında veya ayrı hatlarda enerjilendirilmeli ve yumuşak yol verici devresi kullanılarak başlatılmalıdır. Ayrıca çözüm olarak gerilim düşmesine karşı gerilimi dengeleyebilecek ek harici kaynak kullanılabilir (Ö. Ö. Gencer vd., 2005; Şengül vd., 2005).

Güneş enerji santrallerinde ise entegre olduğu elektrik dağıtım hatlarının hâlihazırda radyal biçimde yapılmış olması, yük akışının üretim kaynağından son tüketimin yüküne doğru olması nedeniyle gerilimde değişiklik olacağını ve bu değişikliğin yük tarafında daha düşük bir gerilim olacağını varsaymaktadır. Bu yönergeye göre, transformatör çıkışından elde edilen veriler fider gerilimi nominal 230 Volt olarak kabul edilip transformatör çıkışından son tüketicinin yüküne olan mesafede en fazla %5 gerilim düşümüne göre en düşük 220 Volt olacak şekilde tasarlanmıştır ve bu sayede yük gerilimi, var olan sistemden yükün çekmiş olduğu akım durumuna göre 220 Volt ile 230 Volt arasında değişiklik göstermektedir (İlisu, 2016). Fakat Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) ilgili yönetmelik yayınlamasını devamında kurulması planlanan güneş enerji üretim tesislerinin elektrik dağıtım şebekesine entegrasyonu, şu anda var olan orta gerilim sisteminde incelenmekte olan çift yönlü güç akışı bu kabulün her zaman doğru olmayacağını ortaya çıkartacaktır (Duymaz & Göl, 2018).

Gerçekleştirilen bu çalışma ile güneş enerji santrallerinin elektrik dağıtım şebekesine entegrasyonu ile değişim gösterecek gerilim seviyelerini incelemek hedeflenmiştir. Bu amaçla, gerçek bir elektrik dağıtım şebekesindeki birden fazla güneş enerji santrallerinin bulunduğu pilot bir fider seçilerek Digsilent Power Factory programı vasıtasıyla modelleme ve yük akışı analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve yükün bir arada bulunduğu aktif ve reel bir şebeke üzerinde gerçek zamanlı analizlerin gerçekleştirilmesi yönüyle özgün ve literatüre katkı sağlayacak yapıda olduğunu söylemek mümkündür.

Bu ilk bölümde bir giriş, literatür taraması ve çalışmanın katkısı sunulurken, ikinci bölümde analizlerde kullanılmış olan Digsilent Power Factory hakkında genel bilgiler verilerek ele alınan sistemin bu program üzerinde tanıtımı yapılmıştır. Üçüncü bölümde, farklı üretim ve tüketim koşulları altında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve sonuçları ele alınmış, dördüncü bölümde ise çalışmadan edinilen sonuçlar aktarılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Elektrik güç sistemlerinde güç akışı, yüksek gerilim tarafından alçak gerilim tarafına doğru tüketicilere veya şebekeye doğru enerji verirken, aynı zamanda gerilim düşümüne sebebiyet vermektedir. Eğer yük artarsa, daha fazla gerilim düşümü meydana gelmektedir (Çimen, 2016). Elektrik güç sistemlerinde DigSilent Power Factory programı aracılığıyla oluşturulan yük akış analizlerindeki temel hedef, farklı yük durumlarda oluşabilecek güç akışlarını ve bu güç akışlarının yüklenmelerini gözlemlemektir. Ayrıca yapılan analiz ile iletim şebeke sisteminde bulunan her baranın faz açısı, baraların reaktif/aktif güç değeri ve gerilim genlik değerleri incelenmektedir. Yapılan bu analizler sayesinde oluşabilecek gerilim yükselmeleri, düşümleri, hat ve transformatör yükselmeleri gibi konular raporlanmaktadır (Avli Fırış & Şekkeli, 2021; Akdağ & Yeroğlu, 2019).

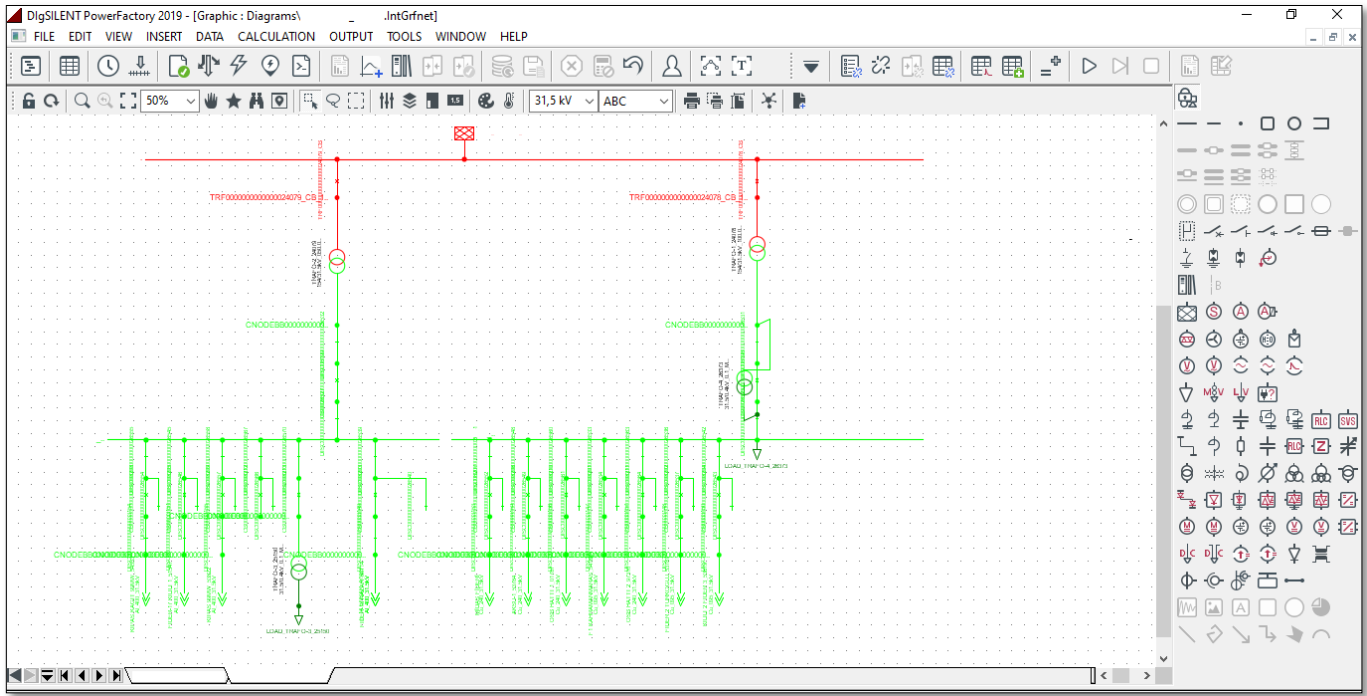
Geleneksel elektrik üretim sistemlerinin ana hedefi elektrik enerjisinin sürekliliğini koruyarak enerjinin en minimum kayıpla son tüketiciye kadar ulaşmasını sağlamaktır. Fakat dağıtık üretim kaynakları ile beraber sistemde bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Ve bu problemler temel hedef olan sürekliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Sonuç olarak enerji verimliliği istenilen değerde tutulamamaktadır.

DigSilent Power Factory programı aracılığıyla yapılan yük akışı analizi, Kahramanmaraş ilinde yer alan ve elektrik dağıtım şebekesine ait olan bir fider üzerinden dağıtım şebekesine bağlı güneş enerjisi üretim santrallerinin şebekedeki gerilim profilindeki değişimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında seçilmiş pilot fiderin ilk olarak modellenmesi yapılmış, oluşturulan bu model üzerinden farklı üretim koşullarında görülebilecek farklı yük akışı durumları incelenmiştir.

Digsilent Power Factory İle Şebeke Analizleri

Power Factory (PF), hem elektrik güç sistem analizi hem de bilgisayar programlama hakkında uzun yıllar tecrübeye sahip nitelikli mühendisler ve programcılar tarafından tasarlanmış ve geliştirilmiştir. DigSilent, "Digital Simulation of Electrical Networks" kelimesinin kısaltılmış şeklidir (Kittiwattanaphon, 2017). DigSilent Power Factory programı, araştırma enstitüleri, iletim ve dağıtım şebekeleri tarafından elektrik güç sistemlerinin uygulamasında ve elektrik sistemlerinin incelenmesinde optimizasyonu sağlamak için tasarlanan yazılım simülasyon aracıdır (Saygılı & Tezcan, 2019). Güç akışı analizi detaylı olarak gözlemlenmek istenilirse yapılan gözlem DigSilent Power Factory

programı kullanılarak gerçekleştirilebilir. DigSilent Power Factory ile gerçekleştirilen güç akışı analizinde, seçilen bir güç sistemindeki başta baralar olmak üzere incelenmek istenen herhangi bir noktadaki gerilim değışim değerleri, iletim hattı ve makine (transformatör, generatör vb.) yüklenmeleri ve iletim hattı öncelikli olmak üzere sistem kayıpları incelenebilir (Çalışır vd., 2018). Şekil 1’de DigSilent Power Factory genel görünümü yer almaktadır.

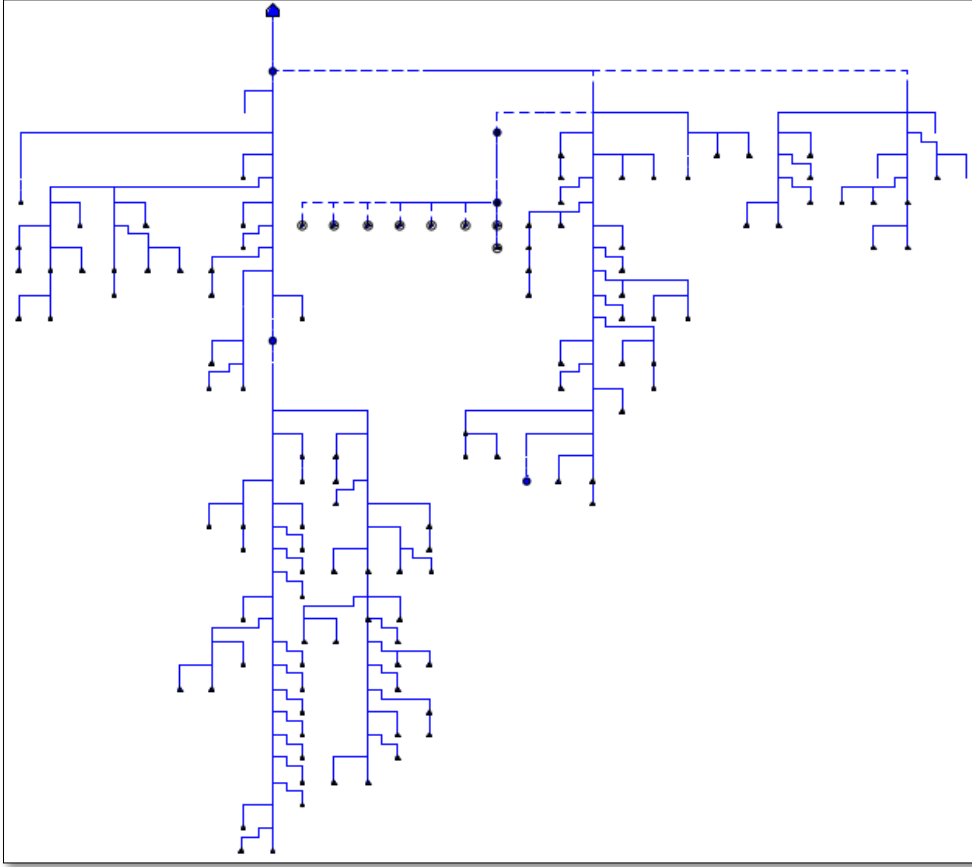


Şekil 1. Digsilent Power Factory Genel Görünümü

Güneş Enerji Santrallerinin Elektrik Dağıtım Sisteminde Modellenmesi

DigSilent Power Factory programı aracılığıyla, Kahramanmaraş ilindeki dağıtım şirketinin sahip olduğu fider üzerinden şebekeye bağlı olan güneş enerjisi santrallerinin şebekedeki gerilim değışimleri yük akışı olarak gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında Kahramanmaraş ilindeki seçilmiş olan pilot fiderin tek hat şemasının modellenmiş olup, modellenen pilot fiderin çeşitli üretim koşullarında oluşacak farklı yük akış durumları ele alınmıştır. Seçilmiş olan fider üzerinden üretim santrallerinin ve alanlarındaki tüketimlerin tam kapasite, üretim santrallerinin ve tüketimlerin yarı kapasite, üretimlerin tam kapasite ve bölgedeki tüketimin yarı kapasite ya da üretimin yarı kapasite ve tüketimin tam kapasite olarak şebekeye bağlı güneş enerji üretim santrallerinin ilgili 4 farklı durumda gözlemlenecek çalışma, yük akışı ve yük profili gösteriminin bulunduğu grafik üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Güneş enerjisi santrallerinin şebekeye etkilerinin incelenmesi kapsamında yapılan çalışmanın sağlıklı yürütülebilmesi için seçilen pilot bir fiderde gerekli analizlerin gerçekleştirilmesi için Digsilent Power Factory programında; Kahramanmaraş iline bağlı bir transformatör merkezinden (TM) çıkan bir fider üzerinde modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Elektrik dağıtım şebekesine ait olan pilot fiderin besleme alanında 7 tanesinin kurulu gücü 1,250 MW olup 1 tanesinin kurulu gücü 0,800 MW olan 8 adet güneş enerji santrali yer almaktadır. Burada toplamda yaklaşık olarak 10 MW’lık kurulu güç bulunmaktadır. Bu güneş enerji santrallerinin Digsilent Power Factory programında oluşturulmuş tek hat şeması Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Modellenen Pilot Fiderin Tek Hat Şeması

BULGULAR VE TARTIŞMA

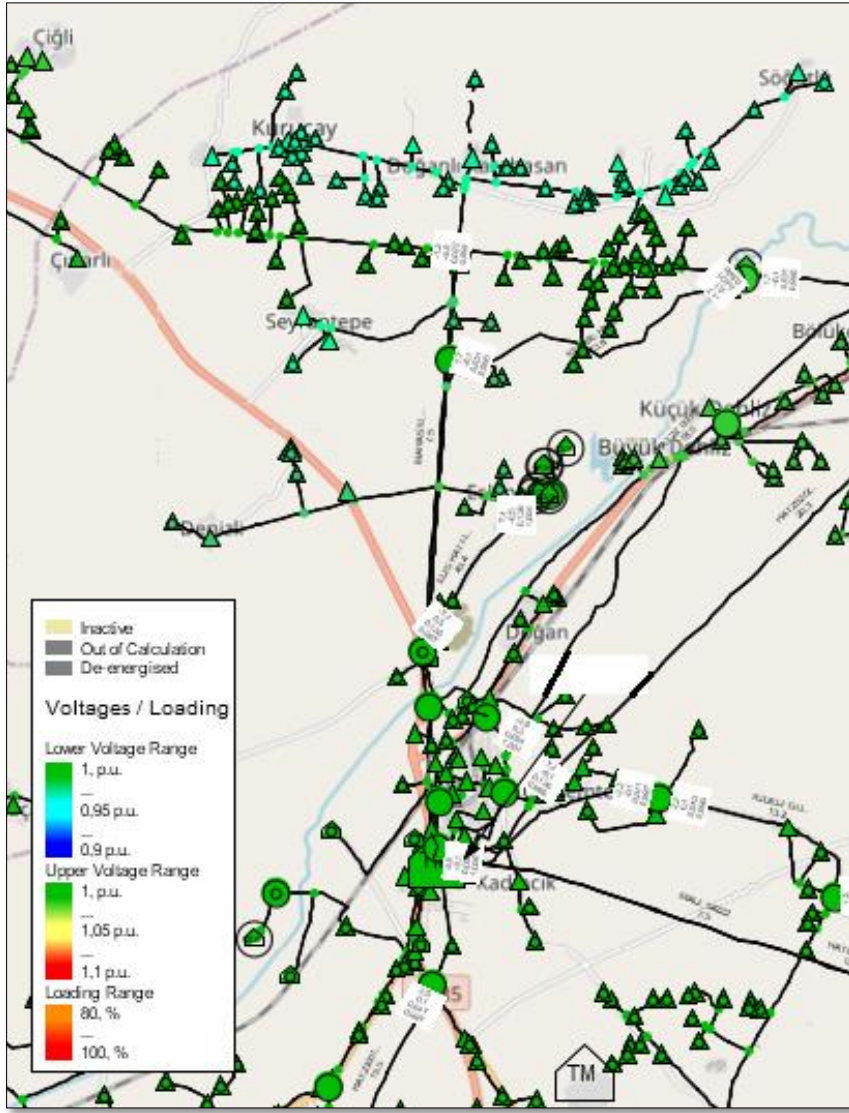
Çalışma kapsamında ele alınan yük akışı analizleri; Elektrik dağıtım şebekesine ait 8 adet yaklaşık 10 MW'lık kurulu güce sahip olan güneş enerji santralinin bulunduğu fider üzerinden incelenmiştir. Yapılan incelemede güneş enerji santrallerinin mevsimsel olarak üretim miktarında farklılık göstermesine ek olarak günün her saatinde üretim miktarında farklılık göstermesinden dolayı yük akış analizleri Digsilent Power Factory programı yardımıyla 4 farklı durumda oluşturulmuş olup bu durumlar;

- Üretimin tam kapasite, tüketimin tam kapasite çalıştığı durumda
- Üretimin yarı kapasite, tüketimin yarı kapasite çalıştığı durumda
- Üretimin tam kapasite, tüketimin yarı kapasite çalıştığı durumda
- Üretimin yarı kapasite, tüketimin tam kapasite çalıştığı durumda

olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

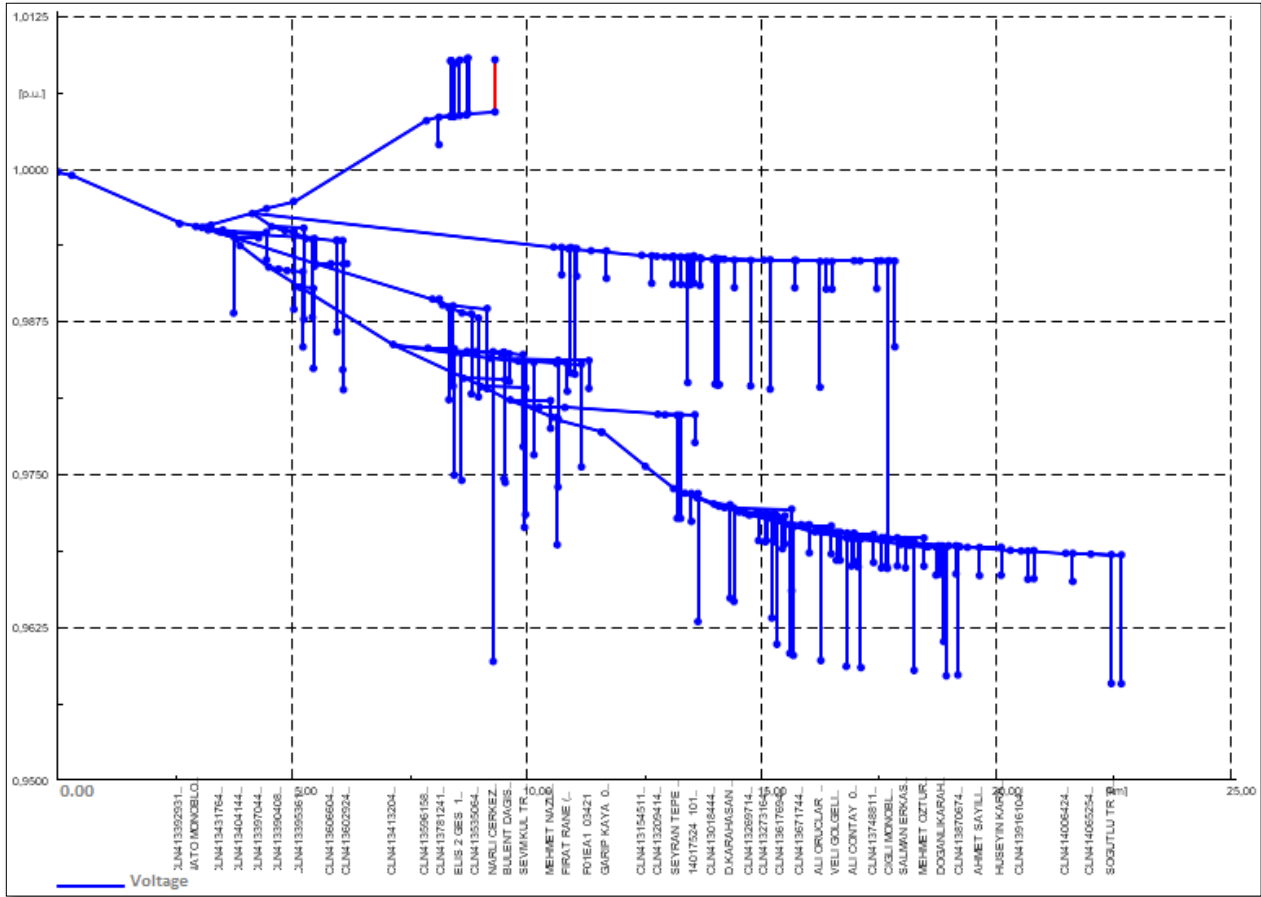
Üretimin ve Tüketimin Tam Kapasite Çalıştığı Durumda Yük Akışı Analizi

Üretimlerin tam kapasite, tüketimlerin var olan trafo kapasitesinin tamamıyla gerçekleştirildiğinin varsayıldığı bu analizde; Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 3'den de görüleceği üzere üretim santrallerinin olduğu bölgede üretime nazaran tüketimlerin fazla olmaması, gerilim yükselmesine sebep olmuştur. Fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda yükselmesi, aynı fider üzerindeki üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 3. Pilot Fider Üzerindeki Yük Akışı

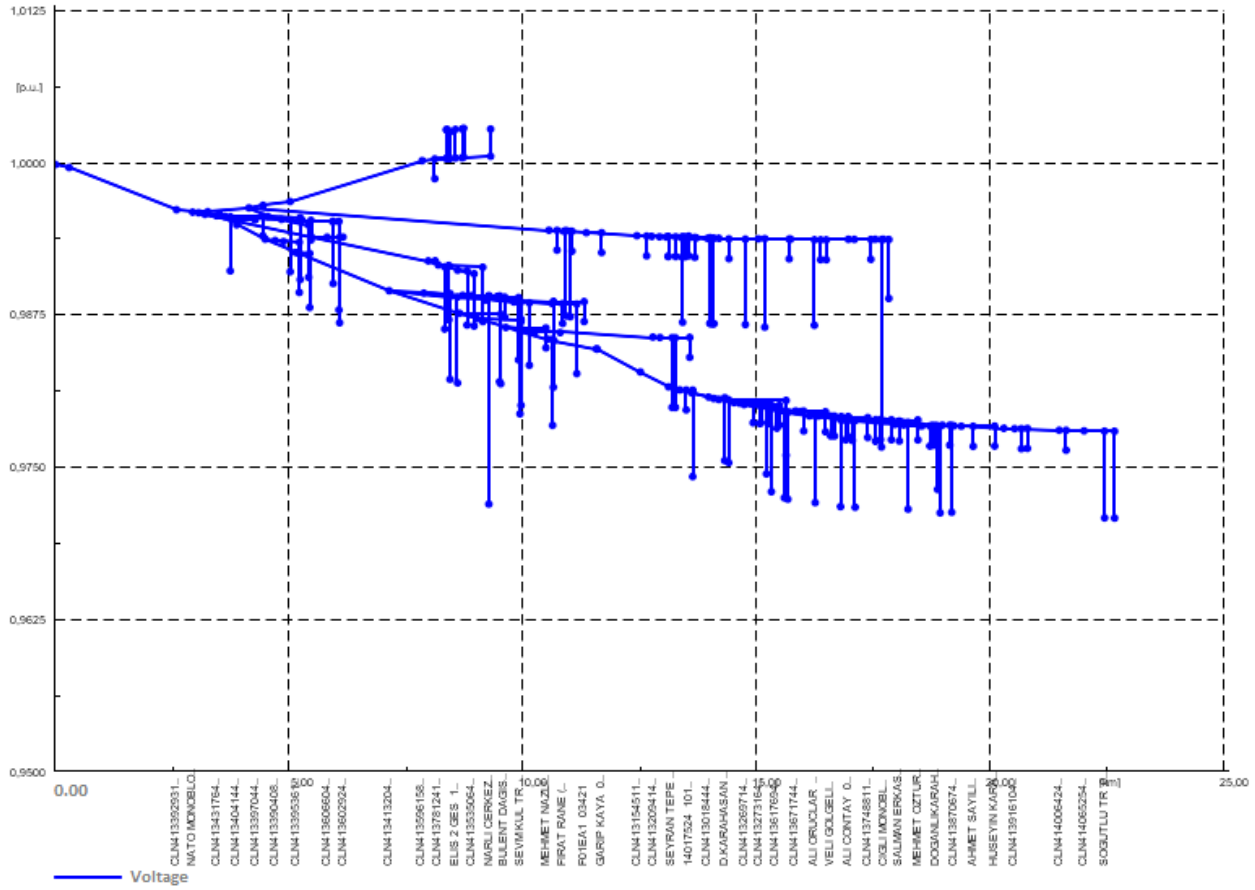
Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 4’ten de görüleceği üzere; fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda gerilim, 1.007 p.u. değerine kadar yükseliş göstererek %1’lik bir değerden daha az bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. Aynı fider üzerindeki, üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim, en fazla 0.965 p.u. değerine kadar inerek yaklaşık %3.5’ lik bir gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 4. Pilot Fider Üzerindeki Yük Profili

Üretimin ve Tüketimin Yarı Kapasite Çalıştığı Durumda Yük Akışı Analizi

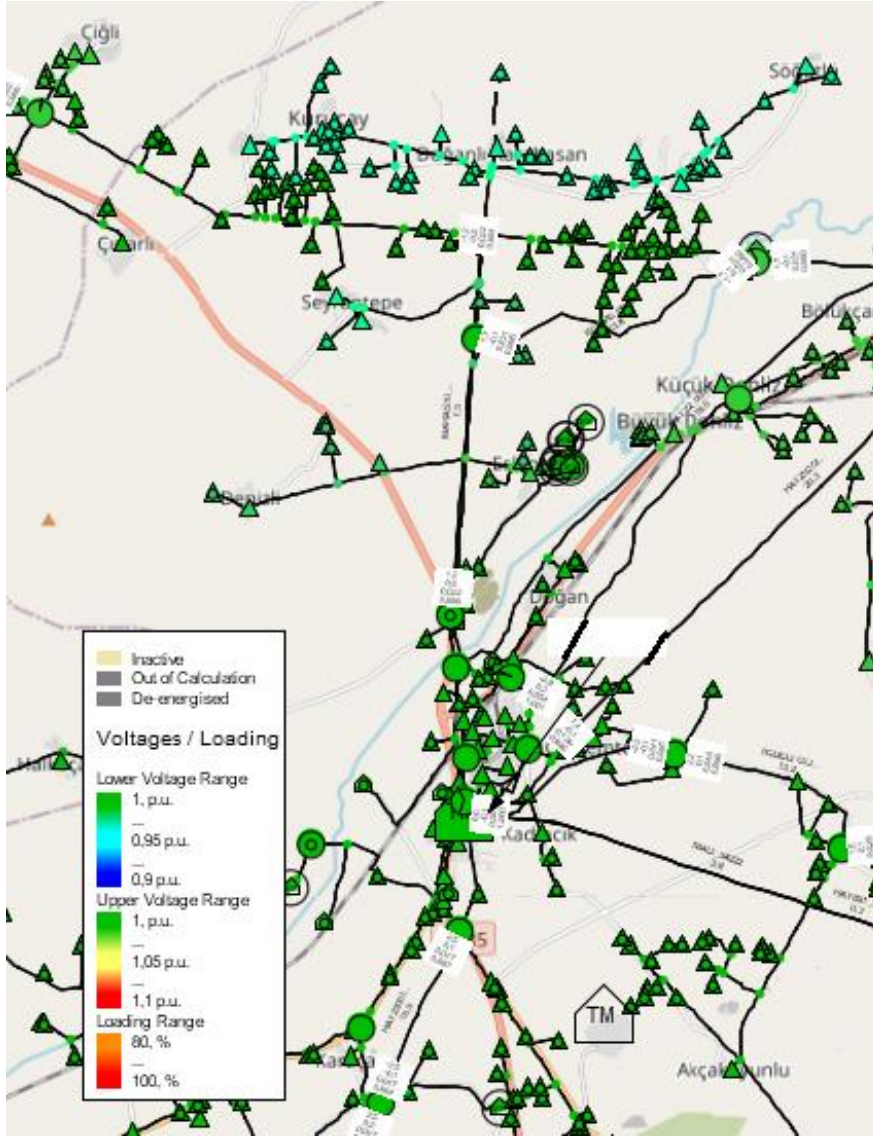
Üretimlerin yarı kapasite, tüketimlerin ise var olan trafo kapasitesinin yarısıyla gerçekleştirildiğinin varsayıldığı bu analizde; Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 5'ten de görüleceği üzere üretim santrallerinin olduğu bölgede üretime nazaran tüketimlerin fazla olmaması, gerilim yükselmesine sebep olmuştur. Ancak üretim santrallerinin yarı kapasiteyle çalışıyor olması, bu gerilim yükselmesini azaltmıştır. Fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda gerilim yükselmesi, aynı fider üzerindeki üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 6. Pilot Fider Üzerindeki Yük Profili

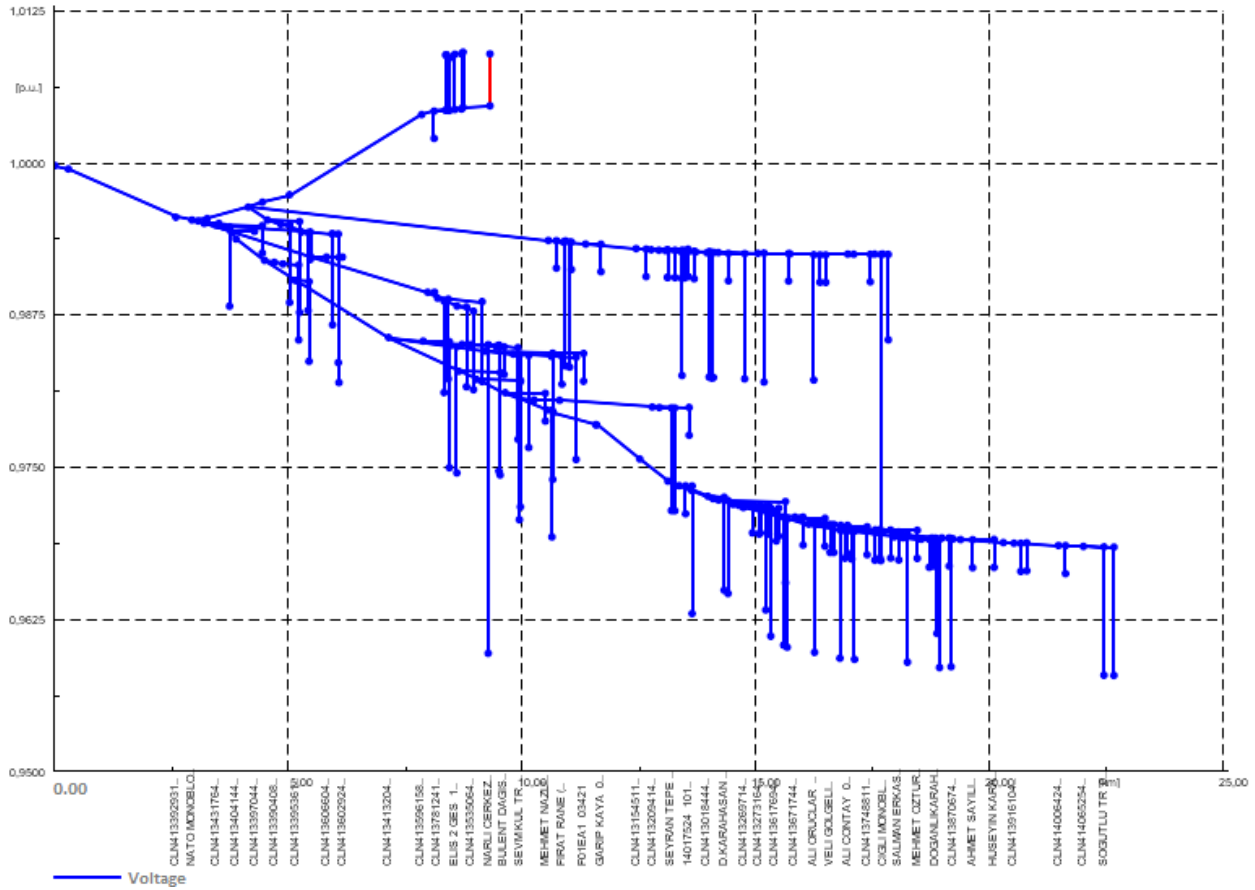
Üretimin Tam Kapasite, Tüketimin Yarı Kapasite Çalıştığı Durumda Yük Akışı Analizi

Üretimlerin tam kapasite, tüketimlerin ise var olan trafo kapasitesinin yarısıyla gerçekleştirildiğinin varsayıldığı bu analizde; Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 7'den de görüleceği üzere üretim santrallerinin olduğu bölgede üretime nazaran tüketimlerin fazla olmaması gerilim yükselmesine sebep olmuş, üretime nazaran az olan tüketimlerin yarıya düşürülmüş olması, bu gerilim yükselmesini daha da artırmıştır. Fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda diğer durumlara nazaran daha yüksek yüzdelik değerlerde gerilim yükselmesi gözlenmiş, aynı fider üzerindeki üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim düşümü neredeyse hiç gözlenmemiştir.



Şekil 7. Pilot Fider Üzerindeki Yük Akışı

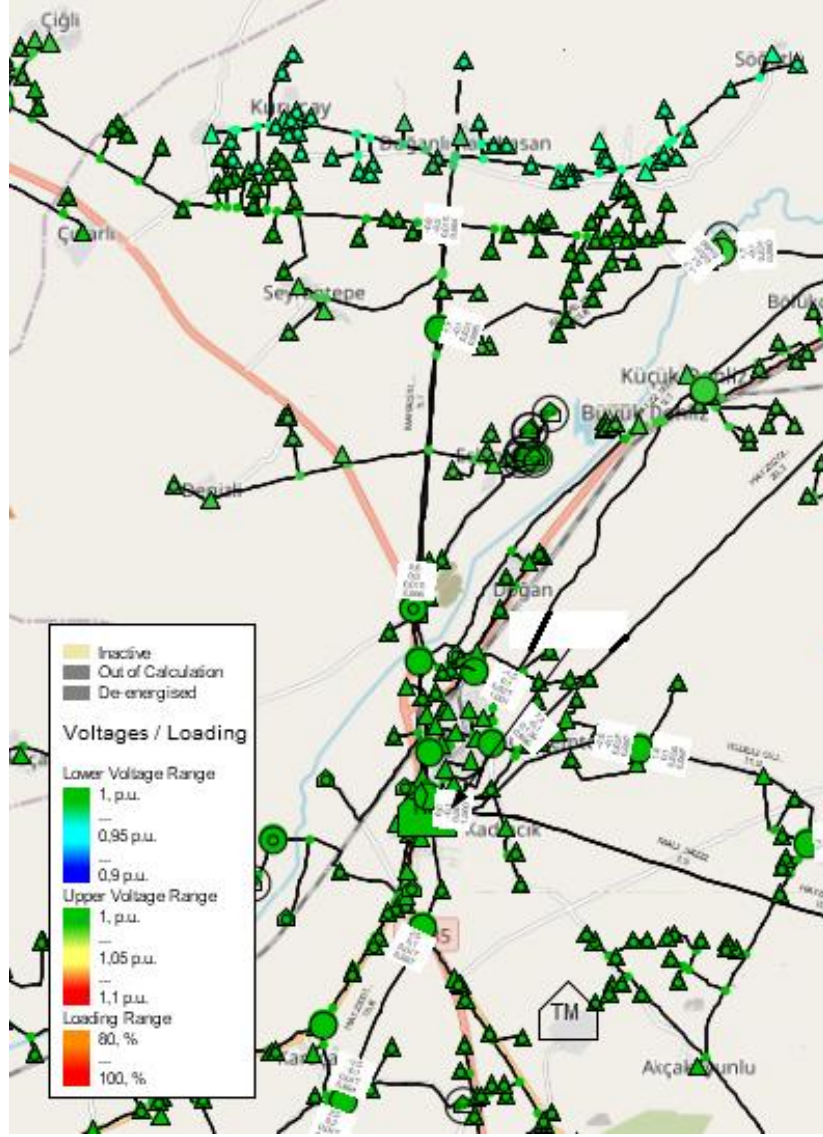
Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 8'den de görüleceği üzere fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda gerilim, 1.007 p.u. değerine kadar yükseliş göstererek %1 'lik bir değerden daha az bir gerilim yükselmesi gözlenmiştir. Aynı fider üzerindeki, üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim, en fazla 0.96 p.u. değerine kadar inerek yaklaşık %4' lük bir gerilim düşümü gözlenmiştir.



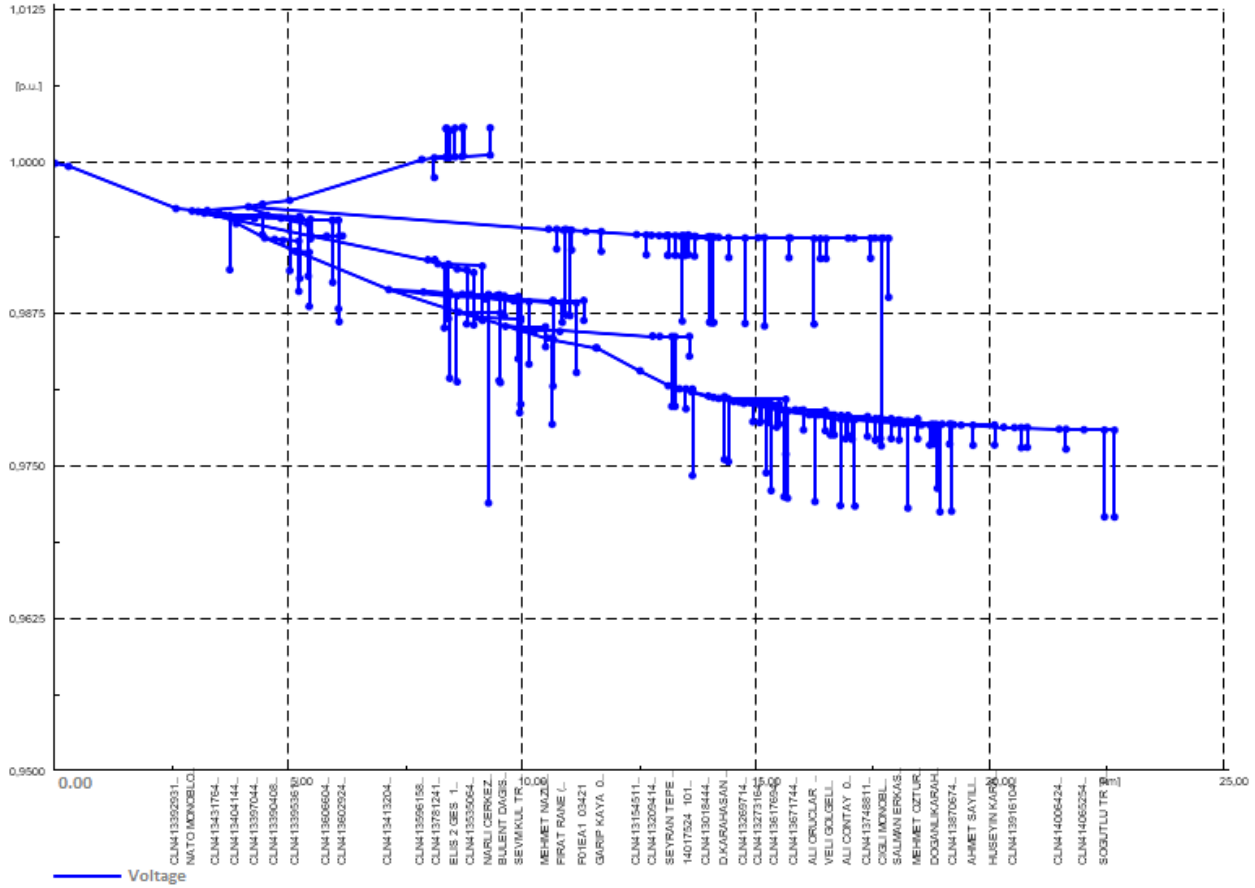
Şekil 8. Pilot Fider Üzerindeki Yük Profili

Üretimin Yarı Kapasite, Tüketimin Tam Kapasite Çalıştığı Durumda Yük Akışı Analizi

Üretimlerin yarı kapasite, tüketimlerin ise var olan trafo kapasitesinin tümüyle gerçekleştirildiğinin varsayıldığı bu analizde; Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 9'dan da görüleceği üzere üretim santrallerinin olduğu bölgede üretime nazaran tüketimlerin fazla olmaması az da olsa gerilim yükselmesine sebep olmuştur. Üretimlerin yarı kapasitede gerçekleşip tüketimlerin tam kapasite devam etmesi gerilim yükselmesinin çok az olmasını sağlamıştır. Fider üzerindeki üretim santrallerinin olduğu kısımda gerilim yükselmesi gözlenmiş, aynı fider üzerindeki üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim düşümü gözlenmiştir.



Digsilent programı ile yük akışı çalıştırıldığında, Şekil 10'dan da görüleceği üzere fider üzerindeki yarı kapasitede çalışan üretim santrallerinin olduğu kısımda gerilim, 1.005 p.u. değerine yükselerek neredeyse hiç gerilim yükselmesi görülmemiştir. Aynı fider üzerindeki, üretim santrallerinden uzakta kalan kısımlarda ise gerilim, 0.973 p.u. değerine inerek yaklaşık olarak %2.5 'luk bir gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 10. Pilot Fider Üzerindeki Yük Profili

SONUÇLAR

Bu çalışmada bir pilot fider üzerinde Digsilent Power Factory programı yardımıyla mevcut durumda oluşabilecek etkiler ele alınmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan yük akışı analizleri; üretimin ve tüketimin tam kapasite çalıştığı durumda, üretimin ve tüketimin yarı kapasite çalıştığı durumda, üretimin tam kapasite tüketimin yarı kapasite çalıştığı durumda, üretimin yarı kapasite tüketimin tam kapasite çalıştığı durumda elektrik dağıtım şebekesine olan etkiler olmak üzere 4 farklı durumda incelenmiştir. Çalışma ile görülmüştür ki güneş enerji üretim santrallerince gerçekleştirilen üretimlerin, yakınında bulunan tüketiciler tarafından tüketimi sağlanmazsa, üretilen enerji tüketilemeden ana baraya yeniden döneceğinden, gerilim yükselmesi kaçınılmaz olmaktadır. Aynı enerjinin tek bir noktadan verilmesi yerine dağıtılarak verilmesi bu sorunların önüne geçilmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu sebepten ötürü, bu üretim santrallerinin entegrasyonlarının gerçekleştirileceği optimum lokasyonun belirlenmesi, kritik önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Akcanca, M. A., & Taşkın, S. (2013). Akıllı Şebeke Uygulanabilirliği Açısından Türkiye Elektrik Enerji Sisteminin İncelenmesi.

Akdağ, O., & Yeroğlu, C. (2019). Malatya Yöresi İçin Örnek Bir Güneş Santrali Modelinin Benzetimi Ve Şebekeye Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 552–560. <https://doi.org/10.21923/jesd.446328>

Avlı Fırış, F., & Şekkeli, M. (2021). Güneş Enerji Santrallerinin Şebeke Gerilimine Etkilerinin İncelenmesi; Kahramanmaraş Örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 53–65. <https://doi.org/10.17780/ksujes.783526>

Aylık Elektrik Üretim-Tüketim Kurulu Güç Raporları. (y.y.). Tarihinde 05 Mayıs 2023, adresinden erişildi <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>

- Çalışır, A., Yılmaz, A., & Bayrak, G. (2018). DFIG Tipli Rüzgâr Türbini Bağlı Mikroşebekelerde Güç Akışı ve Kısa Devre Arıza Analizinin DIgSİlent PowerFactory Programı ile Gerçekleştirilmesi. Güç Sistemleri Konferansı. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1482569>
- Çanka Kılıç, F. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu Ve Üretim Teknolojileri. Mühendis ve Makina, 56(671), 28–40. <https://dergipark.org.tr/en/pub/muhendismakina/issue/54341/736245>
- Çimen, H. (2016). Selçuk Üniversitesi Yerleşkesine kurulacak bir dağıtık üretim tesisinin şebekeye entegrasyonu ve sisteme etkisinin analizi. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği AnaBilim Dalı, Konya 95s.
- Demir, M., Yıldız, A. B., Kavcı, M., & Nil, M. (2017). Şebeke Gerilimindeki Azalmaların Tüketici Elektroniği Ürünlerinin Güvenilirliğine Etkisinin Belirlenmesi. Celal Bayar University Journal of Science, 13(2), 529–536. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.320000>
- Duymaz, E., & Göl, M. (2018). Türkiye Elektrik Şebekesinin Alçak Gerilim Sisteminin Fotovoltaik Sistemlerin Varlığında Değerlendirilmesi. EMO Bilimsel Dergi, 8(1), 27–31. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/39771/393944>
- Gencer, E. (2018). Orta gerilim şebekelerinde gerilim sarkmalarına d-statcom etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya 87s.
- Gencer, Ö. Ö., Öztürk, S., Yeğin, E. M., & Karaarslan, K. (2005). Gerilim Düşümü Kompanze Yöntemleri. 1. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK 2005).
- İlisu, İ. (2016). Gerilim düşümü ve hesapları. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Bülteni, 42–46.
- Karadayı, Ş. (2007). Elektrik Enerji Sistemlerinde Gerilim Düşümlerinin Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği AnaBilim Dalı, Sakarya 149s.
- Keçecioglu, Ö. F., Tekin, M., Gani, A., Açıkgöz, H., Gemci, A., & Şekkeli, M. (2015). Bir Güneş Enerji Santralının Elektrik Şebekesindeki Güç Kalitesi Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(2), 17–24. <https://doi.org/10.17780/ksujes.41414>
- Kim, J. G., Kim, D. H., Yoo, W. S., Lee, J. Y., & Kim, Y. B. (2017). Daily prediction of solar power generation based on weather forecast information in Korea. IET Renewable Power Generation, 11(10), 1268–1273. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0698>
- Kittiwattanaphon, S. (2017). PowerFactory User Manual 2017.
- Mumyakmaz, B., Ünsal, A., & Tunaboşlu, N. S. (2004). Elektrikli Demiryollarında Enerji Kalitesi Problemleri ve Çözüm Önerileri.
- Mutlu, A., Taşkın, S., & Kuyucuoglu, F. (2016). Elektrik Enerji Sistemlerinde Güç Kalitesi Parametrelerine Dayalı Anahtarlama Sistemi ile Otomatik Şebeke Seçimi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(3), 826–836. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/24380/258433?publisher=duzce>
- Özdemir, E. (y.y.). Elektrik Enerji Kalitesi.
- Saygılı, M., & Tezcan, S. S. (2019). Ankara Bölgesi İçin Enerji İletim Hattı Koruma Modellemesi Analizi ve Uygulaması. 7(2), 303–316. <https://doi.org/10.29109/gujsc.498867>
- Şekkeli, M., & Keçecioglu, Ö. (2011). Hidroelektrik Santrallerin Türkiye'deki Gelişimi ve Kahramanmaraş Bölgesi Örnek Çalışması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(2), 19–26. <https://doi.org/10.17780/ksujes.0819>
- Şengül, M., Öztürk, S., Basa Arsoy, A., Gencer, Ö. Ö., İnan, E., & Karaarslan, K. (2005). Gerilim Düşmesi Süresinin Transformatör Mıknatıslanma Akımı Üzerindeki Etkileri. 1. Enerji Kalitesi ve Verimliliği Sempozyumu (EVK 2005).
- Tabak, B., & Yalçın, M. (2004). Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(1).
- Tekin, M., Keçecioglu, Ö. F., Erafşar, Ö., & Şekkeli, M. (2016). Bir Hidroelektrik Santralin (HES) Elektrik Şebekesindeki Harmonik Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2), 70–77. <https://doi.org/10.17780/ksujes.90454>

Yeşilbudak, M., Bayındır, R., & Çetinkaya, Ü. (2016). Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığını Etkileyen Faktörler. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 3(4), 595–602. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/24941/263257>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.08.2022
Kabul Tarihi : 03.05.2023

Received Date : 17.08.2022
Accepted Date : 03.05.2023

GFRP DONATILI BETONARME BİR YAPININ PERFORMANSININ KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

COMPARATIVE INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A GFRP REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Elif TOPLU^{*1} (ORCID: 0000-0001-8019-560X)
Şeymanur ARSLAN² (ORCID: 0000-0001-7012-3338)
Osman KIRTEL³ (ORCID: 0000-0001-6451-0323)
Ferhat AYDIN⁴ (ORCID: 0000-0001-9472-8366)

^{1,2,3,4} Kahramanmaraş Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Elif TOPLU, eliftoplu@subu.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda liflerle güçlendirilmiş polimerler (FRP), inşaat alanında kullanılan yeni nesil yapı malzemelerinden biri olmuştur. FRP malzemelerin kimyasallara ve korozyona karşı dayanıklılığının yüksek olması nedeniyle çelik donatıya alternatif olarak kullanımı özellikle yurt dışında köprülerde, istinat duvarlarında ve korozyonun sorun teşkil ettiği uygulamalarda tercih edilmektedir. FRP malzemelerin yapı elemanlarında donatı olarak kullanımı ACI 440.1R-15 standartlarına göre yapılmaktadır. Ancak Türkiye’de henüz FRP donatılar ile ilgili bir standart geliştirilmemiştir. FRP türleri arasında ekonomik anlamda en çok tercih edilen donatı türü cam liflerle güçlendirilmiş polimer (GFRP) donatılardır. Bu çalışmada GFRP malzemenin bir yapıda donatı olarak kullanımının çelik donatılara göre yapısal performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, zaman tanım alanında analiz ve statik itme analizi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Analizlerde ETABS19 yazılımı kullanılmış ve TBDY2018 performans kriterleri hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, çelik donatılı yapı ile GFRP donatılı yapının zaman tanım alanı analizi sonucunda hasar seviyelerinin benzer olmasına rağmen kesit elemanlarındaki dönme oranlarında ve statik itme analizi sonucunda göçme mekanizmalarında farklılıklar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GFRP, statik itme, zaman tanım alanında analiz, doğrusal olmayan analiz, etkin kesit rijitliği

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymers (FRP) have recently become one of the most widely used building materials in construction. Due to the high resistance of FRP materials to chemicals and corrosion, its use as an alternative to steel reinforcement is preferred especially in bridges, retaining walls and applications where corrosion is a problem. The use of FRP materials as reinforcement in construction elements is built according to ACI 440.1R-15 standards. However, a standard has not yet been developed for FRP reinforcements in Türkiye. Glass fiber reinforced polymer (GFRP) is the most preferred type of reinforcement among FRP types due to its cost. In this study, the structural performance of the use of GFRP bar as reinforcement in a structure compared to steel reinforcement was evaluated comparatively. The study consists of two stages, namely time history analysis and pushover analysis. ETABS19 software was used in the analyzes and was taken into account in TBDY2018 performance measurements. As a result of the study, although the damage levels of the steel-reinforced structure and the GFRP-reinforced structure were similar as a result of the time history analysis, differences were observed in the rotation rates of the section members and in the failure mechanisms as a result of the static thrust analysis.

Keywords:

GFRP, pushover, time history, non-linear analysis, effective stiffness

GİRİŞ

İleri yapı malzemeleri son 20 yılda mühendislik toplulukları tarafından ilgiyle karşılanmıştır (Ashrafi et al., 2016; Shamsheer Bahadur Singh, 2015). İnşaat alanında kullanılan ileri yapı malzemelerinden biri de liflerle güçlendirilmiş polimerlerdir (FRP). FRP malzemelerin inşaat sektöründe kullanılmasının kirişler, duvarlar, kolonlar ve döşemeler gibi betonarme elemanların yapısal performansını iyileştirmek için etkili bir teknik olduğu kanıtlanmıştır (Zhang et al. 2016). FRP donatılar (Şekil 1); hafiflik, yüksek dayanım, korozyon direnci ve elektrik yalıtkanlığı gibi avantajlara sahip olmaları nedeniyle çelik donatılarla ilişkili dayanıklılık sorunlarının ortadan kaldırılması için ideal malzemeler olarak görülmüşlerdir (Aydın and Arslan, 2021; Bazli et al., 2016; Zhang et al., 2016; Garcia-Espinel et al., 2015; Feng et al., 2014; Alves, El-Ragaby and El-Salakawy, 2010; Aiello, Leone et al., 2007; Hao et al., 2006). FRP malzemeler genellikle bir matris elemandan bir de lif türünden meydana gelmekte ve isimleri kullanıldığı liflere göre belirlenmektedir. Günümüzde en çok kullanılan karbon FRP (CFRP), aramid FRP (AFRP), cam FRP (GFRP) ve bazalt FRP (BFRP), inşaat endüstrisinin temel FRP türleri olarak bilinmektedir (Ghomi and El-Salakawy, 2019). FRP malzemeler ihtiyaca göre farklı kalıplarda, farklı üretim yöntemleriyle istenilen özelliklerde üretilmektedir. İnşaat alanında kumaş, profil, donatı ve ankraj yapı elemanları halinde üretilmekte ve kullanılmaktadır. Türkiye’de genellikle kumaş şeklinde onarım ve güçlendirme malzemesi olarak tercih edilmektedir. FRP malzemelerin profil ve donatı halinde kullanılmasıyla ilgili yönetmelik olmamasına karşın Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Bölüm 15.10’da lifli polimerlerin kiriş ve kolonlarda güçlendirme elemanı olarak kullanımına yer verilmiştir (AFAD, 2018). Araştırmacılar FRP donatıların betonarme yapılarda çelik donatı yerine kullanımı konusunda birçok açıdan çalışma yapmışlardır. Özellikle Amerika ve Kanada’da FRP donatıların köprü ve oto yollarda kullanıldığı çok sayıda uygulama ilgili standartlar kullanılarak düzenlenmiştir (ACI, 2015; CAN/CSA-S806-02, 2009).

Türkiye etkin deprem bölgesinde yer alması nedeniyle yapılar sürekli depreme maruz kalmaktadır. Büyük depremler sonucunda yapılarda büyük hasarlar meydana gelmektedir. Bu tehditler karşısında sismik yeterlilikle ilgili araştırmalar ivme kazanmıştır (Zengin and Usta, 2021). Çok sayıda araştırmacı 1960’lardan beri, çeşitli parametrelerin betonarme kiriş-kolonların sismik davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktadır (Le-Trung et al. 2013; Kim and LaFave, 2007; Ehsani and Wight, 1985; Paulay et al., 1978; Hanson and Connor, 1967). GFRP donatıların süneklik sorunu özellikle sismik alanlardaki birçok yapısal uygulamada kullanılmalarını sınırlamaktadır. FRP donatılı betonarme yapılar, çelik donatılı betonarme yapılara göre önemli ölçüde az süneklik ve düşük enerji kapasitesine sahiptir (Youssef et al., 2019). Sismik enerjiyi yeterince sönmüleyemediğinden dolayı, beton yapılarda FRP donatıların kullanımı sınırlıdır (Harris et al., 1998).



Şekil 1. Nervürlü GFRP Donatılar

FRP donatılı betonarme yapı elemanlarının performanslarının araştırıldığı birçok deneysel çalışma bulunmaktadır (Tablo 1). Yapıların dinamik davranışı konusundaki çalışmalar incelendiğinde GFRP’li betonarme yapılara ait yapı bazındaki çalışmalara az sayıda rastlanılmıştır (Wu et al., 2022; Goldston et al., 2016; Harajli and Abouniaj, 2010; Lau and Pam, 2010; Guadagnini et al., 2006). Mojtaba Aliasghar et al., GFRP donatılı yapıların davranışını statik itme analizi ile değerlendirmiştir (Aliasghar-Mamaghani et al., 2018). Çalışma sonucunda GFRP donatılı moment çerçevelerin az katlı yapılarda iyi performans gösterdiğini, çelik donatılı moment çerçevesine göre daha yüksek

mukavemet sağladığı ifade edilmiştir. Aliasghar et al., çalışmalarında zaman tanım alanında analizlere yer vermemiştir. GFRP donatının hafif yapıda olması nedeniyle, yapıya gelecek olan taban kesme kuvvetlerinin azaltılmasında tasarım esasları yerine getirildiği sürece olumlu etki yapacağı belirtilmiştir.

Tablo 1. Eksantrik Olarak Yüklenmiş Dikdörtgen Kolonda Kullanılan GFRP Verileri (Tarawneh and Majdalaweyh, 2020).

Referans	$b \times h$ veya Çap., mm	f'_c , (MPa)	FRP tipi	FRP elastisite modülü, E_f (GPa)	FRP donatı oranı, ρ_f %
Xue et al.(Xue, Peng, and Fang 2018)	300 × 300	39	GFRP	39	1.34
Afifi et al. (Afifi et al. 2013)	300	42.9	GFRP	55.4	1.1–3.2
Elchalakani ve Ma (Elchalakani and Ma 2017)	260 × 160	32.75	GFRP	46.3	1.83
Tobbi et al.(Tobbi, Farghaly, and Benmokrane 2012)	350 × 350	32.6	GFRP	47.6–48.2	1.87-1.95
Guérin (Guérin et al. 2018)	405 × 405	42.3	GFRP	48.2–53.3	1.1

Başka bir çalışmada (Remennikov et al., 2016) statik yükleme altındaki GFRP donatılı betonarme kirişler, GFRP donatı kopması veya beton ezilmesi şeklinde iki farklı göçme mekanizmasına sahip olduğu belirtilmiştir. Kesit tasarımında yetersiz GFRP kullanımı, eğilme çatlaklarının oluşumu ve GFRP donatıların kopması şeklinde davranış göstermektedir. Çekme boyuna donatı oranları %1 ve %2 olan GFRP betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırmada, göçmenin betonun mukavemeti tarafından yönetilmesinden dolayı (beton örtüsünün ezilmesi), beton mukavemetinin daha etkili olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. GFRP Donatılı Kirişin Eğilme Deneyi Sonucunda Oluşan Hasar (Remennikov et al., 2016)

Doğrusal analizin, yapının bir deprem altındaki gerçek tepkisini temsil etmediği belirtilmektedir. Bir deprem altındaki yapının davranışını benzetmek için en doğru yaklaşım, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizidir. Ancak çevrimsel doğrusal olmayan tepki ve deprem yer hareketine ihtiyaç duyduğu için çok karmaşık ve zaman almaktadır (Bhandari et al., 2018; Krawinkler, 2006). Öte yandan, statik itme analizi (pushover analizi), binanın depreme karşı doğrusal olmayan davranışını tahmin edebilen daha basit bir yöntem sağlamaktadır (Suwondo et al., 2021; Salihovic and Ademovic, 2018; Fajfar, 2000). Statik itme analizi; modal itme, ardışık modsal itme, üst sınır itme, kütle orantılı itme ve uyarlanabilir itme gibi farklı stratejiler aracılığıyla uygulanabilmektedir (Poursha et al., 2009; Kim and Kurama, 2008; Jan et al., 2004; Aydınoğlu, 2003; Chopra and Goel, 2002)

TBDY 2018'e göre doğrusal olmayan davranış şekil değiştirmeye göre tasarım ve şekil değiştirmeye göre performans değerlendirilmesi şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Bir yapının doğrusal olmayan davranışı belirlenirken kesit analizleri yapılarak moment eğrilik diyagramları üretilmektedir. Bir kesitin eğriliği birim dönmeye karşılık gelmektedir. Birim dönmeler ise TBDY 2018'e göre göçmenin önlenmesi kontrollü hasar ve sınırlı hasar seviyelerine göre kolon ve kirişlerin aldığı hasar oranlarına göre sınıflandırması yapılmaktadır (Şekil 3). Sınırlı hasar seviyesinde plastik dönmelere izin verilmezken, kontrollü hasar bölgesi sınırı göçmenin önlenmesi performans sınırının %75'i kadardır. Plastik dönme oranları göçme öncesi performans düzeyi için denklem 1 ile hesap edilmektedir.

$$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} [(\phi_u - \phi_y) L_P \left(1 - 0.5 \frac{L_P}{L_S}\right) + 4.5 \phi_u d_b] \quad (1)$$

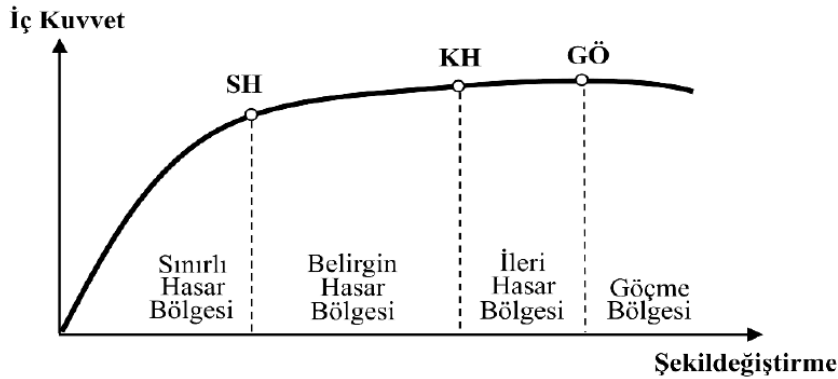
Denklem 1'de $\theta_p^{(GÖ)}$ göçmenin önlenmesi için izin verilen plastik dönme oranını, ϕ_u ve ϕ_y kesitin uzama ve akma eğriliğini, L_P plastik mafsal boyunu, L_S kesme açıklığını ve, d_b boyuna donatı çapını ifade etmektedir.

Doğrusal olmayan analizler sonucunda kesitlerde meydana gelen toplam dönmeler hesap edilmektedir. Bir kesitte meydana gelen toplam dönme ise akma dönmeleri ile plastik dönmelerin toplamı şeklinde ifade edilmektedir (denklem 2). Bu nedenle TBDY 2018'e göre performans değerlendirme yapıldığında toplama dönme oranlarından akma dönme oranının çıkarılarak kontrol yapılması gerekmektedir.

$$\phi_t = \frac{\theta_t - \theta_y}{L_P} + \phi_Y \quad (2)$$

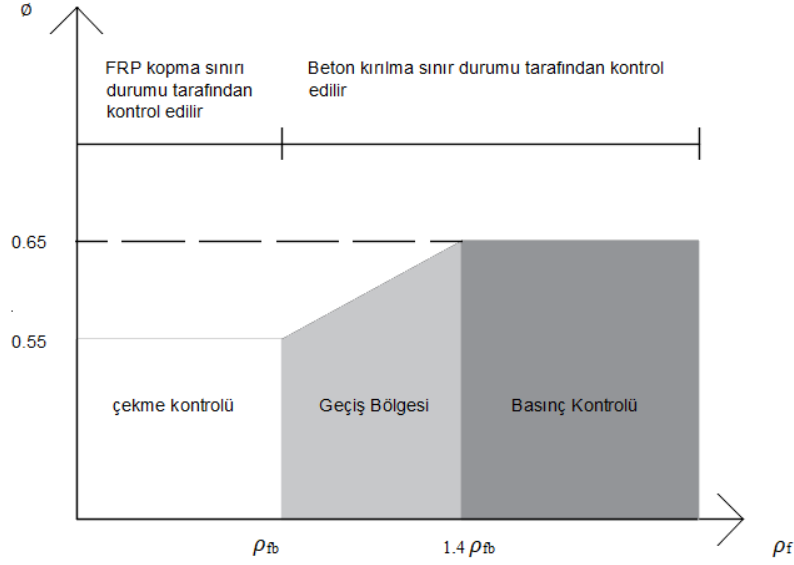
Denklem 2'de ϕ_t toplam eğrilik, ϕ_Y akma eğriliğini, θ_t toplam dönme oranını, θ_y akma dönme oranını ve L_P plastik mafsal boyunu ifade etmektedir.

Bir yapıda kirişlerin hasar durumuna bakıldığında sınırlı hasar durumunda kirişlerin en fazla %25'inin belirgin hasar bölgesine, kontrollü hasar durumunda kirişlerin en fazla %35'inin ileri hasar bölgesine göçmenin önlenmesi hasar durumunda ise kirişlerin en fazla %20'sinin göçme bölgesine geçmesine izin verilmektedir. Kolonlarda ise belirgin hasar, ileri hasar ya da göçme durumlarına göre kolonların kesme kuvveti katkı yüzdelere dayanarak farklı durumlara göre karar verilmektedir (TBDY, 2018).



Şekil 3. Hasar Bölgeleri.

ACI 440.1R-15'e (ACI, 2015) göre, FRP donatılarla güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitesi, betonun kırılması veya FRP kopması ile kontrol edilip edilmediğine bağlıdır. Kontrol sınır durumu, FRP donatı oranı ile dengeli donatı oranı karşılaştırılarak hesaplanır. ACI 440.1R-15'e göre Şekil 4'te donatı oranlarına göre kesit durumu kontrol edilmektedir.



Şekil 4. FRP Donatı Oranlarına Göre Dayanım Azaltma Kat Sayıları

Statik itme analizlerinde yapının her bir elemanı için kesir analizleri gerçekleştirilerek moment eğrilik ilişkileri tanımlanmaktadır. Statik itme analizinde doğrusal olmayan artımsal bir itme gerçekleştirilmektedir. Yapının kapasite eğrisinin tasarım spektrumu ile karşılaştırılarak doğrusal olmayan yer değiştirme talebi hesap edilebilmektedir. Bu çalışmada ise GFRP donatı ile çelik donatı karşılaştırılacağından sadece yapıların kapasite diyagramları karşılaştırmalı ele alınacaktır.

Deprem yüklerinin yapı modellerine etki ettirildiği analizler zaman tanım alanında analiz (Time History Analizi) olarak adlandırılmaktadır. TBDY 2018’de bu analiz yöntemleri doğrusal ya da doğrusal olmayan yöntemler, depremlerin ölçeklendirilmesi, depremin yönü gibi etkilere vb. etkilere göre kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır. Bu çalışmada ise depremin frekans içeriği ve yapı özellikleri dikkate alınarak tek bir deprem etkisi altında kesiti TBDY 2018’e göre tasarlanan çelik donatılı bir yapı ile ACI 440.1R-15 (ACI, 2015) kriterlerine göre tasarlanmış GFRP donatılı boyutları eşdeğer iki yapının performansının karşılaştırmalı değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiş, aynı zamanda yapının kapasitesinin belirlenmesi amacıyla statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Eleman uçlarında oluşan plastik mafsalları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

ÇERÇEVE MODELLEME VE DİZAYN PROSEDÜRÜ

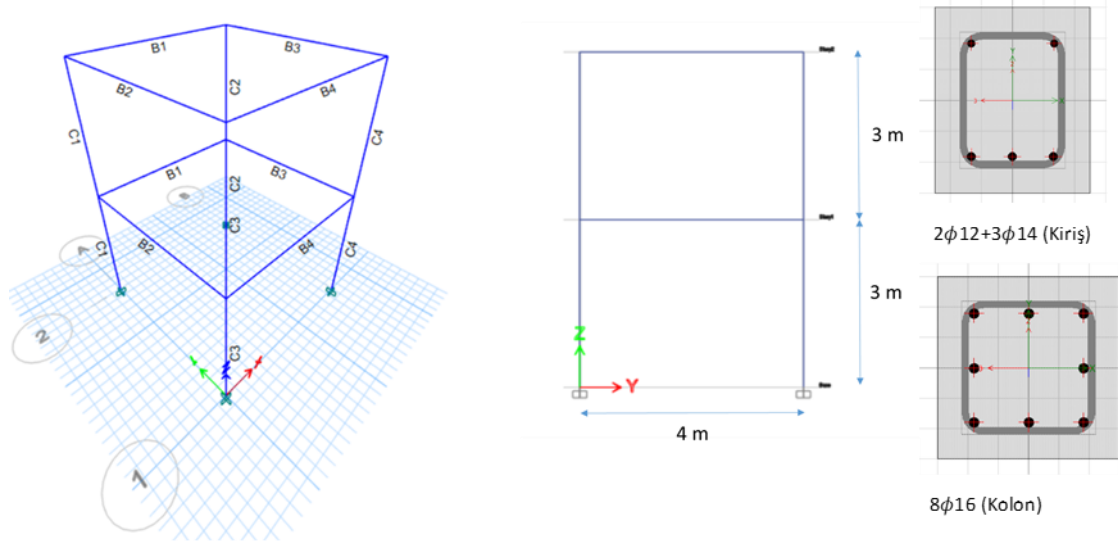
Çerçeve Modelleme

Çalışmada çelik ve GFRP donatılı betonarme yapılar kullanılmıştır. İki katlı ve tek açıklı olarak bir yapı modellemesi yapılmış olup kolon ve kiriş tasarımı Şekil 5’te gösterilmiştir. Beton sınıfı olarak C25 kullanılmıştır. Çelik donatı ve GFRP donatının mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. GFRP donatılar yalnızca matris malzeme ve liflerin birleştirilerek sıcak bir kalıptan çekilmesi yöntemiyle (pultrüzyon yöntemi) üretildiği takdirde taşıyıcı elemanlarda malzeme olarak kullanılabilir. Bu nedenle GFRP donatıların, pultrüzyon yöntemiyle üretildiği kabul edilmiştir.

Tablo 2. Donatının Mekanik Özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	ε (%)
GFRP	-	940	42.5	ε _u =2.1
Çelik	420	550	210	ε _y =10

Çelik donatı sünek bir malzemedir ve akma dayanımına göre tasarım yapılır. Ancak GFRP donatı gevrek bir malzemedir ve akma göstermemektedir. Bu nedenle hesaplamalarda farklı dayanımlar esas alınmaktadır. Türkiye’de çelik donatılı betonarme için hesap ve tasarım standartları bulunmakta ancak FRP donatılarla yapılacak yapılarla ilgili herhangi bir tasarım standardı bulunmamaktadır.

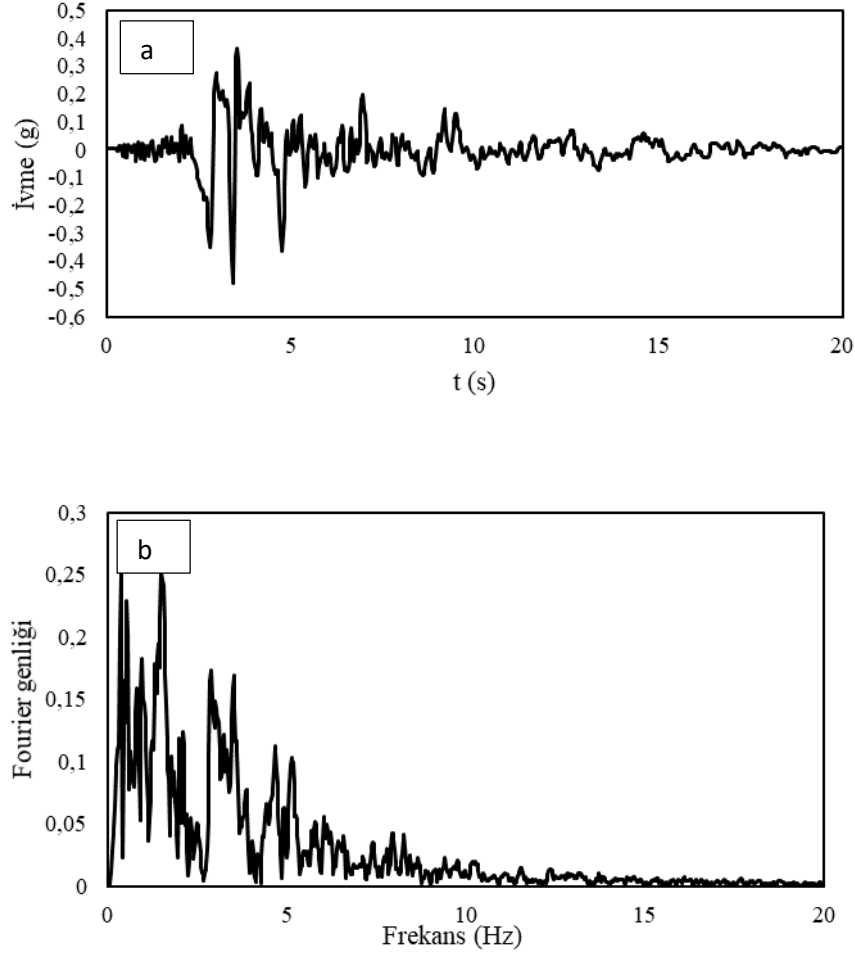


Şekil 5. Yapı ve Yapı Elemanlarının Boyutları ve İsimleri

Modal analiz sonucunda, her iki yapının da serbest titreşim periyodu X ve Y yönünde 0.175 s, burulma modu ise 0.156 s olarak hesap edilmiştir. Yapıların tasarımında, çatlamış kesit rijitliklerinin kullanımı yapının sahadaki gerçek davranışını temsil etmekte olup, yapı periyodunda artışa neden olmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018’de bu kavram ‘Etkin Kesit Rijitlikleri’ olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle GFRP donatılı betonarme yapıda da mevcut durumu gözlemlemek amacıyla etkin kesit rijitlikleri; çerçeve kirişler için 0.35, çerçeve kolonlar için ise 0.70 olarak tanımlanmıştır. Yapılan modal analiz sonucunda çelik donatılı betonarme yapı için yapının hakim serbest titreşim periyodu ve burulma periyodu sırasıyla 0.247 s, 0.198 s; GFRP donatılı betonarme yapı için yapının serbest titreşim periyodu sırasıyla 0.248 s, 0.198 s olarak hesap edilmiştir.

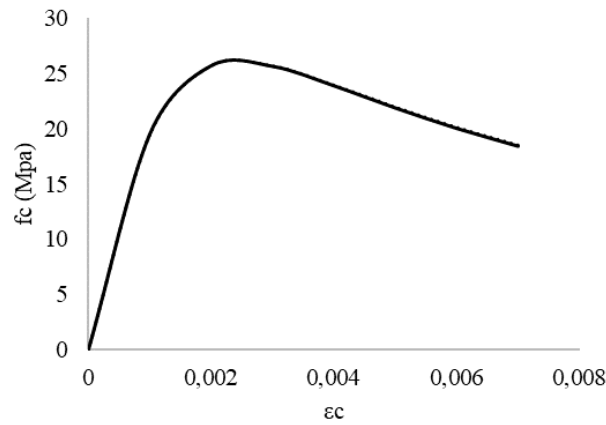
Dizayn Prosedürü

Yapıların dizaynı ETABS 19 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Aynı boyuttaki yapı elemanları tercih edilerek sadece donatı türünün farkının yapılarda meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Kolonların boyutları 300x300 mm², kiriş boyutları 250x300 mm² seçilmiştir. Tasarımda TBDY 2018 kullanılmış ve zaman tanım alanı analizleri için 1992 yılında meydana gelen Erzincan depremi yapılara etki ettirilmiştir. Erzincan depremi, ülkemizde meydana gelen kayda geçmiş yıkıcı depremlerden biri olması ve bu çalışma için de 0-5 Hz (0-0.2 s) aralığında frekans içeriğinin büyük genliğe sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir. 1992 Erzincan depreminin ivme-zaman grafiği ve kaydın frekans içeriği Şekil 6’da verilmiştir.

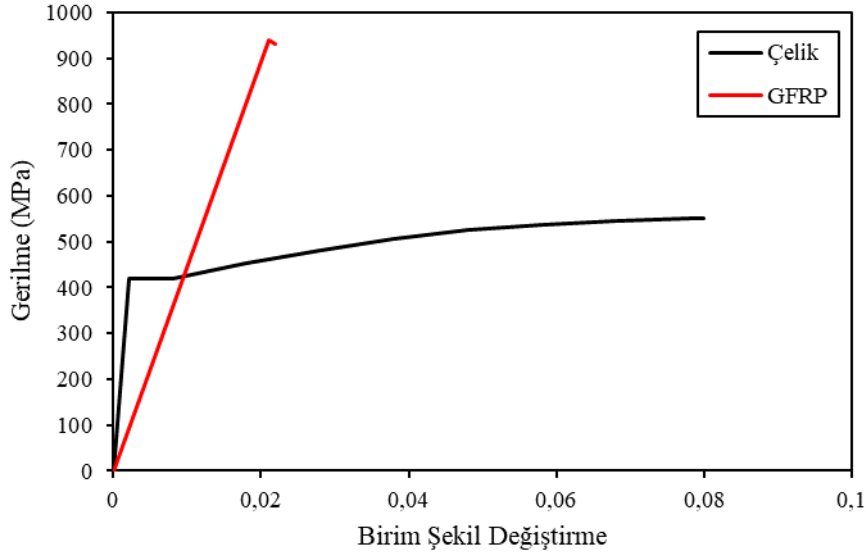


Şekil 6. a. 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Kaydı **b.** 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Kaydı Frekans İçeriği

25 MPa'lık serbest basınç dayanımı için Mander Beton Modeline (Mander et al., 1988) göre sargılı betonun gerilme-deformasyon eğrisi Şekil 7'de, çelik ve GFRP donatının gerilme-deformasyon grafiği Şekil 8'de verilmiştir.

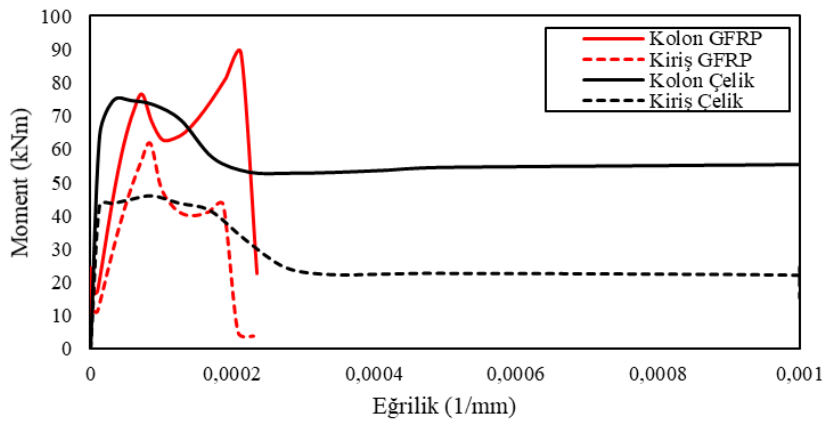


Şekil 7. Sargılı Beton Modeli.

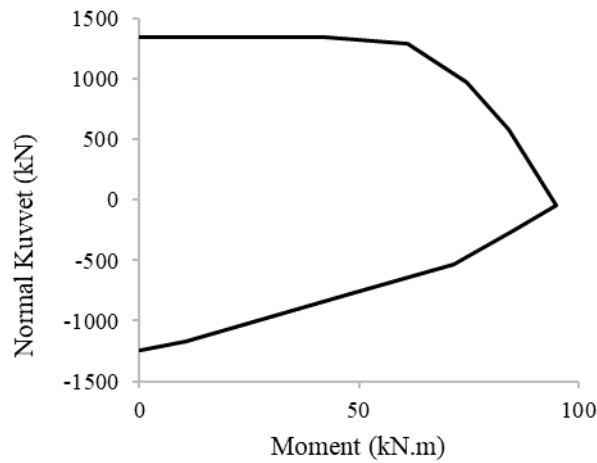


Şekil 8. GFRP Donatı ve Çelik Donatının Gerilme- Deformasyon Grafiği

Kolon ve kiriş kesitinde kullanılan donatı türüne göre moment eğrilik grafiğinde (Şekil 9) görüldüğü üzere çelik donatıya kıyasla GFRP donatılar kolon ve kiriş kesitlerinde hareket kabiliyetini kısıtlamakta ve momentin artmasına neden olmaktadır.



Şekil 9. Kolon ve Kirişlerin Moment-Eğrilik Grafiği

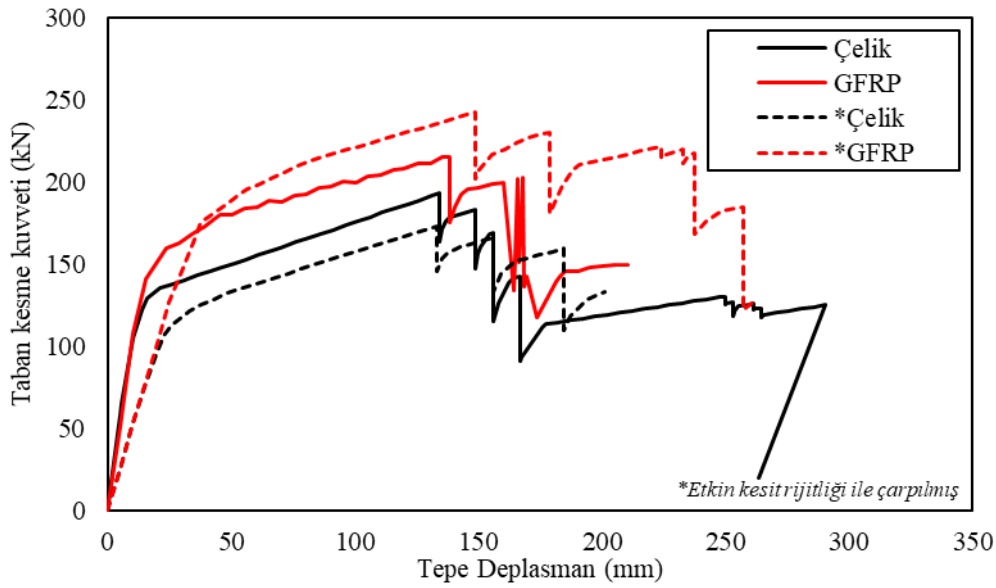


Şekil 10. Normal Kuvvet-Moment Etkileşim Diyagramı

Kiriş kesitleri moment-eğrilik diyagramlarından, kolon kesitleri ise hem moment-eğrilik diyagramları hem de normal kuvvet-moment etkileşim diyagramlarından (Şekil 10) yararlanılarak analiz edilmiştir. Eğrilik, dönme ve plastik mafsallık uzunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Ayrıca plastik mafsallık uzunluğu, kesit yüksekliğinin yarısı olarak kabul edilmiştir (Youssef et al.,2017). ACI 440.1R-15 standardı donatı oranlarına göre kesit durumu kontrol edilmiş olup kesitler çekme kontrolü bölgesine göre hesaplanmıştır.

SAYISAL ÇALIŞMA

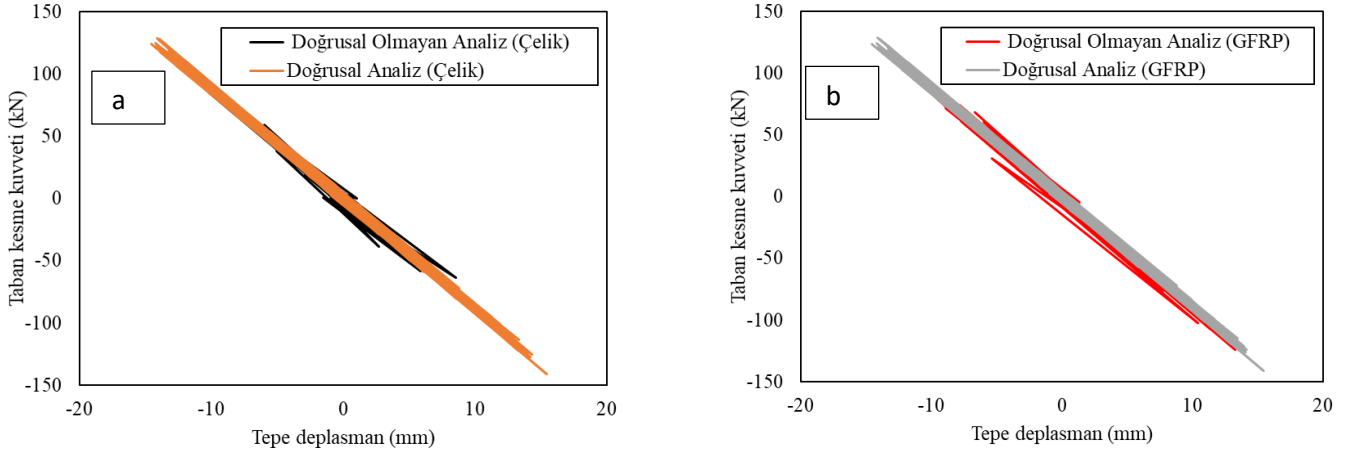
GFRP ve çelik donatılı betonarme elemanlara statik itme analizi uygulanmıştır (Şekil 11). GFRP donatılı betonarme yapının karşıladığı taban kesme kuvveti daha büyük iken gösterdiği deplasman kapasitesi daha azdır. Etkin kesit rijitliği çarpanlarının kullanımı GFRP donatılı betonarme yapıda taban kesme kuvvetlerinin çelik donatılı yapıya oranla daha fazla artmasına neden olmuştur.



Şekil 11. Statik itme Analiz Sonuçları.

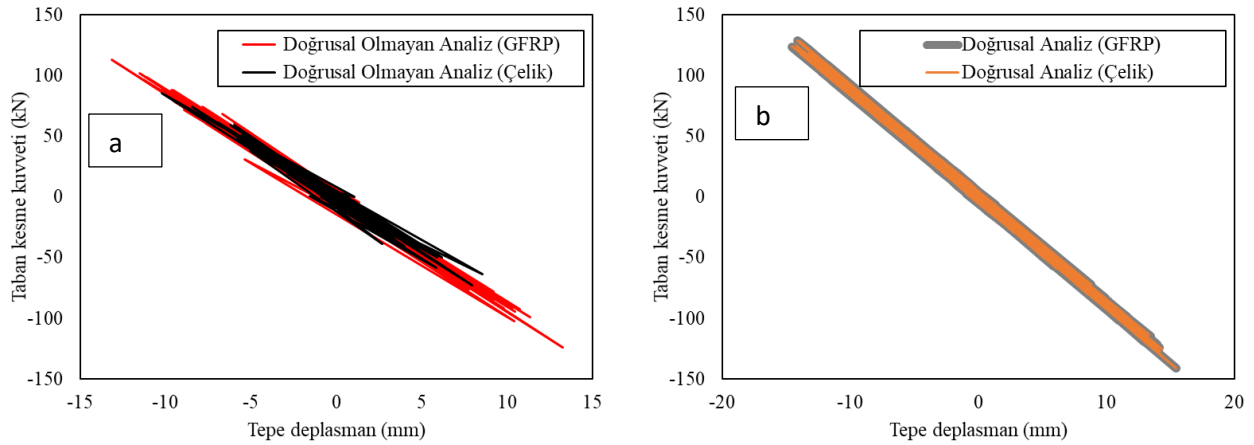
Şekil 12 ve 13’de zaman tanımlı analiz sonuçları doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde verilerle donatı türleri ve analiz türleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında GFRP donatılı betonarme yapılarda doğrusal ve doğrusal olmayan analiz değerleri daha yakın çıkmaktadır. Bunun nedeni GFRP donatıların gevrek bir malzeme olmasından ötürü doğrusal davranış göstermesidir. Çelik donatılı betonarme yapılarda doğrusal analiz ile doğrusal olmayan analiz arasındaki farklılıklar yapıda plastik şekil değiştirmeler olduğunu ifade etmektedir.

Analiz sonuçları karşılaştırıldığında yapı tepe deplasmanındaki farklar ihmal edilecek düzeydedir. Yapıların enerji yutma kapasitesi karşılaştırıldığında GFRP donatılı yapı çelik donatılı yapıya oranla 1.31 kat enerji yutma kapasitesine sahip olduğu hesap edilmiştir. Yapıların süneklikleri karşılaştırıldığında ise çelik donatılı yapıyı GFRP donatılı yapıya oranla 1.66 kat daha sünek olduğu hesap edilmiştir (Şekil 11).



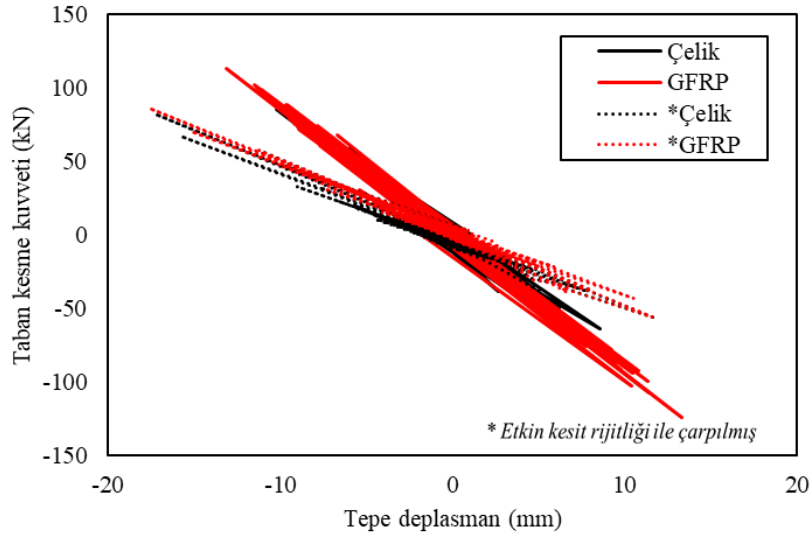
Şekil 12. Zaman Tanım Alanında Analizi Doğrusal Olmayan Analiz /Doğrusal Analiz Karşılaştırması a. Çelik b.

GFRP



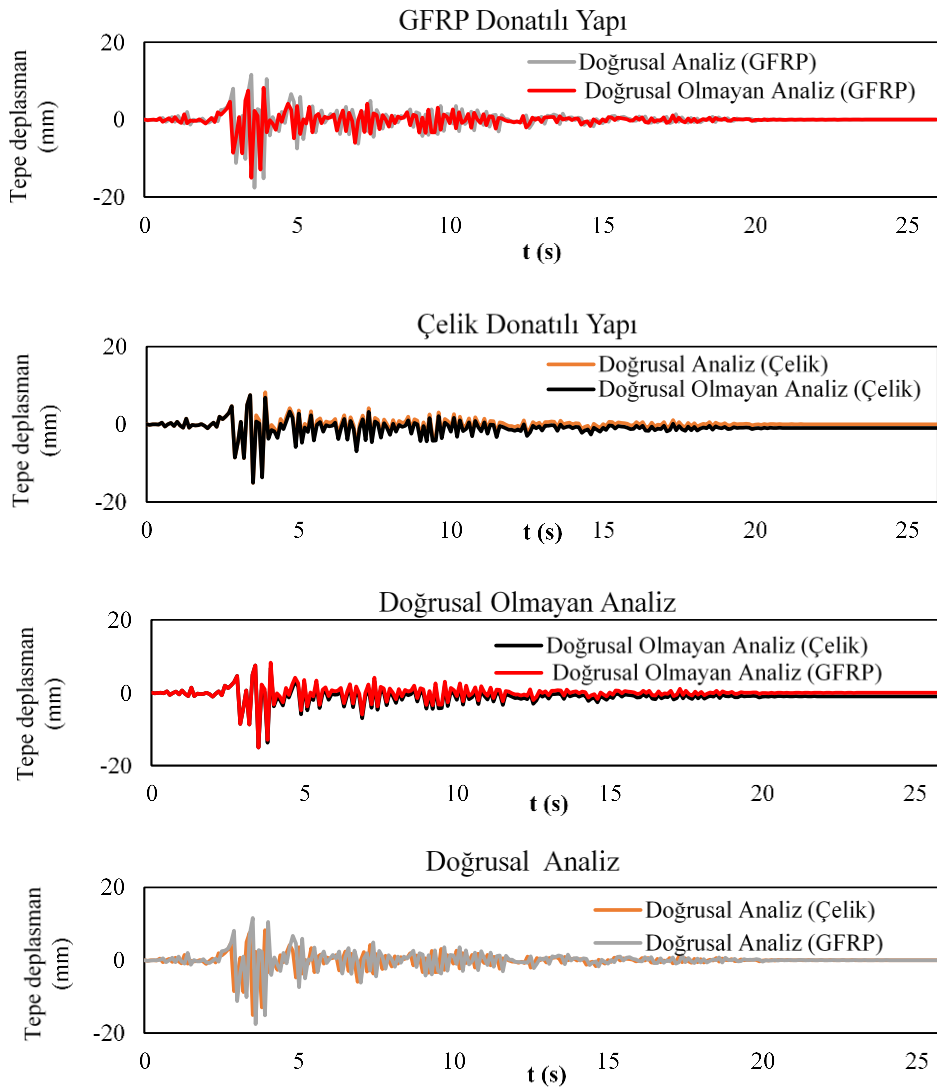
Şekil 13. Zaman Tanım Alanında Analizi Çelik/GFRP Karşılaştırması a. Doğrusal Olmayan Analiz b. Doğrusal Analiz

Etkin kesit rijitliği çarpanı yapıda çatlamış kesit rijitliğini ifade etmekte olup, rijitlik azaltılması sonucu deplasmanın kapasitesinde artışa ve beraberinde taban kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olmaktadır (Şekil 14) . Zaman Tanım Alanında analiz sonucunda ise, deplasman kapasitesinde büyük bir farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 14. Zaman Tanım Alanında Analizi Çelik/GFRP Etkin Kesit Rijitiği ile Çarpılmış Analiz Karşılaştırılması

Zamana bağlı yer değiştirmelerin karşılaştırmalı grafiği Şekil 15'te verilmiştir. İki yapı arasında zamana bağlı yer değiştirmeler arasında büyük bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 15. Zaman Tanım Alanında Analiz Zamana Bağlı Tepe Deplasman

TBDY 2018'e göre performans sınırları dönme oranlarına göre ya da şekil değiştirme oranlarına göre hesap edilmektedir. Bu çalışmada çerçeve elemanlar yığılı plastik mafsallı yöntemle modellenmiştir. Bu nedenle performans sınırları dönme oranlarına göre hesap edilmiştir (Denklem 1). Tablo 3'te kolon ve kirişlerde TBDY 2018'e göre hasar sınırları donatı türüne göre verilmiştir.

Tablo 3. Kolon/Kiriş Performans Düzeyi Sınır Dönme Oranları

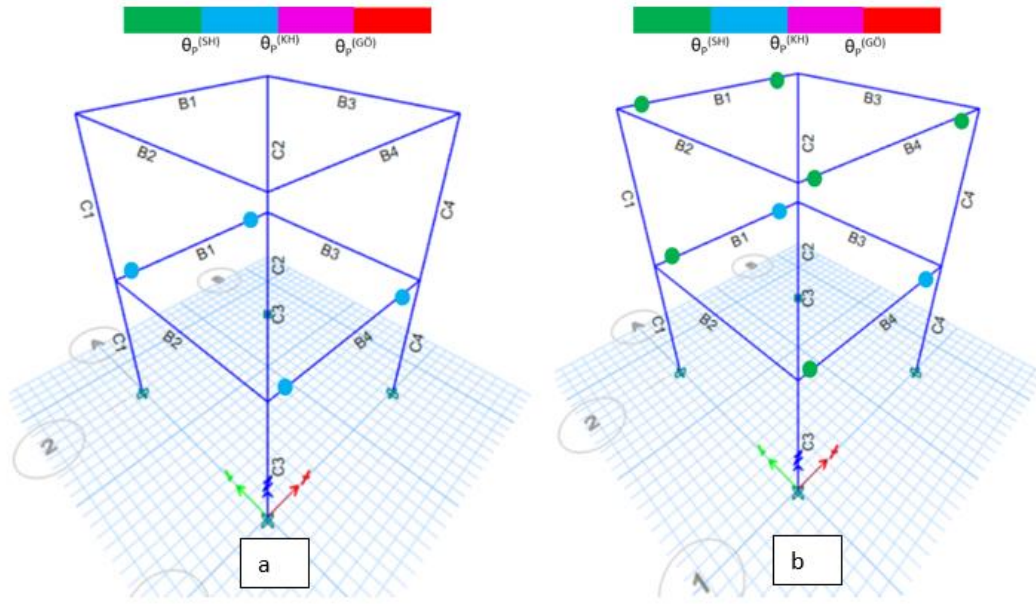
	$\theta_{g\check{c}}$ (rad) Göçme	θ_{kh} (rad) Kalıcı Hasar	θ_{sh} (rad) Sınırlı Hasar
Kolon Çelik	0.04800	0.03600	0
Kiriş Çelik	0.04200	0.03150	0
Kolon GFRP	0.01129	0.00847	0
Kiriş GFRP	0.00988	0.00741	0

Zaman Tanım Alanında analizi sonucunda ETABS yazılımından alınan θ değerleri toplam dönme oranları ifade ettiğinden kesit analizleri sonucunda elde edilen akma dönmesi oranları hesap edilip toplam dönme oranlarından çıkarılarak plastik dönme oranları hesap edilmiştir (Tablo 4-5).

Tablo 4. Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçları

Kat	Mafsallı bölgesi	GFRP Donatılı Yapı		Çelik Donatılı Yapı		
		θ_t (rad)	$\theta_p = \theta_t - \theta_y$ (rad)	θ_t (rad)	$\theta_p = \theta_t - \theta_y$ (rad)	
Kat 2	B1	Sol uç	0	0	0,00053	0
Kat 2	B1	Sağ uç	0	0	0,00054	0
Kat 2	B4	Sol uç	0	0	0,00053	0
Kat 2	B4	Sağ uç	0	0	0,00054	0
Kat 1	B1	Sol uç	0,00151	0.000685	0,00181	0
Kat 1	B1	Sağ uç	0,00134	0.000515	0,00196	8.8E-05
Kat 1	B4	Sol uç	0,00151	0.000685	0,00181	0
Kat 1	B4	Sağ uç	0,00134	0.000515	0,00195	7.8E-05

Hesap edilen plastik dönme oranları Tablo 3'te hesap edilmiş sınır birim dönme oranları ile karşılaştırılarak yapıların performans bölgeleri belirlenmiştir. Zaman tanım alanı sonucunda oluşan plastik dönmeler karşılaştırıldığında GFRP donatılı yapıda kirişlerin %50'sinin çelik donatılı yapıda, kirişlerin ise %25'inin belirgin hasar bölgesinde olduğu gözlenmiştir (Şekil 16). Bu durumda TBDY 2018 kriterlerine göre iki yapıda da ileri hasar bölgesine geçen yapı elemanı olmadığından, iki yapı da kontrollü hasar performans düzeyini sağlamaktadır.



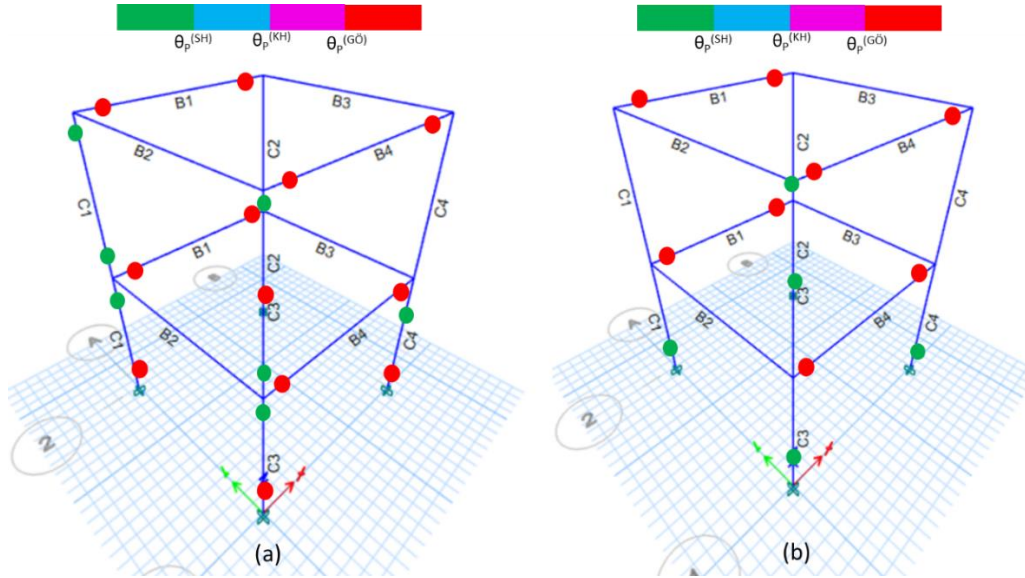
Şekil 16. Zaman Tanım Alanında Analizi Sonucu Meydana Gelen Hasarlar a. GFRP Donatılı Yapı, b. Çelik Donatılı Yapı

Yapıların artımsal yükler altında davranışını karşılaştırmak amacıyla statik itme analizi sonucunda da elde edilen plastik dönme oranları karşılaştırmalı değerlendirilmiştir (Tablo 5). Statik itme analizi yapı göçme duruma gelene kadar devam ettirilmiştir.

Tablo 5. GFRP ve Çelik Donatılı Yapıda Statik İtme Analizi Sonucu Meydana Gelen Dönmeler

Kat	İsim	Mafsalsal bölgesi	GFRP		Çelik	
			θ_{2p} (rad)	θ_{3p} (rad)	θ_{2p} (rad)	θ_{3p} (rad)
Kat 2	B1	Sol uç	0	0.026374	0	0.048128
Kat 2	B1	Sağ uç	0	0.043815	0	0.048288
Kat 2	B4	Sol uç	0	0.024809	0	0.048127
Kat 2	B4	Sağ uç	0	0.043795	0	0.048287
Kat 2	C1	Alt uç	0.00015	0	0	0
Kat 2	C1	Üst uç	0	0.007945	0	0
Kat 2	C3	Alt uç	0.000153	0	0	0
Kat 2	C3	Üst uç	0	0.007965	0	0
Kat 1	B1	Sol uç	0	0.044861	0	0.046172
Kat 1	B1	Sağ uç	0	0.044285	0	0.046588
Kat 1	B4	Sol uç	0	0.04487	0	0.046172
Kat 1	B4	Sağ uç	0	0.044285	0	0.046585
Kat 1	C1	Alt uç	0	0.033286	0	0.029315
Kat 1	C1	Üst uç	0.00049	0	0	0
Kat 1	C2	Alt uç	0	0.033748	0	0.029271
Kat 1	C2	Üst uç	0.00038	0	0	0
Kat 1	C3	Alt uç	0	0.033311	0	0.029314
Kat 1	C3	Üst uç	0.00042	0	0	0
Kat 1	C4	Alt uç	0	0.033767	0	0.02927
Kat 1	C4	Üst uç	0.00056	0	0	0

Şekil 17’de artımsal tek modlu statik itme analizinin son adımında, çelik donatılı yapı için tepe deplasman değeri 210 mm, GFRP donatılı yapı için 264 mm’ye karşılık gelen dönme oranları verilmiştir. Dönme oranları karşılaştırıldığında, GFRP donatılı yapıda birim dönmelerin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum doğrusal bölgede GFRP donatılı betonarme yapının dayanımı arttırdığını ortaya koymaktadır. Ancak performans sınırları dikkate alındığında GFRP donatılı kesitlerin moment eğrilik ilişkisine dayanarak, çelik donatılı kesitlere oranla daha düşük dönme oranlarında göçme sınırına ulaştığı görülmektedir (Tablo 3).



Şekil 17. Statik itme Analizi Sonucu Meydana Gelen Hasarlar a. GFRP Donatılı Yapı b. Çelik Donatılı Yapı

Statik itme analizi sonucunda, çelik donatılı yapı GFRP donatılı yapıya oranla daha önce göçme kapasitesine ulaşmıştır. Ancak GFRP donatılı yapıda göçme bölgesinde olan eleman sayısı çelik yapıya oranla daha fazladır. Bu durumun sebebi çelik donatılı yapının GFRP donatılı yapıya oranla daha sünek olması, GFRP donatılı yapının ise enerji yutma kapasitesinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma sonucunda GFRP donatılı yapı ile çelik donatılı yapılar karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında analiz sonucunda GFRP donatılı yapıda eleman uçlarındaki dönme oranları çelik donatılı yapıya oranla daha düşük olmasına rağmen hasar sınırlarını karşılamamaktadır. Bu durum, GFRP donatılı kesitlerin akma ve uzama eğriliklerinin çelik yapıya oranla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Zaman tanım alanında analiz sonucunda yapı performans düzeylerinin aynı çıkması ve statik itme analizleri sonucunda, GFRP donatılı yapının daha yüksek tepe deplasman değerlerinde göçme mekanizmasına ulaşmış olması, GFRP’nin yapılarda donatı olarak hasar sınırlarını sağladığı sürece gerekli alanlarda kullanılabileceğini göstermektedir. Çelik ve GFRP donatı dayanımları arasında bağıntılar geliştirilmesi buna bağlı olarak donatı çaplarının seçilmesi, böylece donatıların dayanımca eş değerliği sağlanabileceği düşünülmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik ve GFRP donatılar kullanılarak tasarlanan benzer yapı özelliğindeki iki betonarme yapının statik itme analizi ve zaman tanım alanında analizi gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analizi hem doğrusal hem doğrusal olmayan analiz olarak yapılmış birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda;

- Bu çalışma için çelik donatılı ve GFRP donatılı yapı zaman tanım alanında analiz sonucunda kontrollü hasar seviyesinde yer almaktadır. Yapı elemanlarındaki plastik dönmeler incelendiğinde çelik donatılı yapıda bazı bölgelerde meydana gelen dönmeler daha yüksektir. Her ne kadar eleman bazlı çalışmalar GFRP donatının dayanımı arttırdığını gösterse de GFRP donatının şekil değiştirme kapasitesinin düşük olması nedeniyle çelik donatılı yapıya oranla dönme oranları daha düşük hesap edilmiştir. Bununla birlikte TBDY 2018 hasar sınırlarına göre kesit özelliklerine dayanarak hesap edilen göçme öncesi hasar performans seviyeleri daha düşük seviyededir. Bunu nedeni GFRP donatılı kesitlerin dönme sınırlarının kesitlerin eğrilğine göre

belirlenmesidir. Bu çalışma için şekil değiştirmeler beton kırılma sınır durumu tarafından kontrol edildiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle sadece eleman bazlı değerlendirmeler yetersizdir. Kesit davranışının yapısal bazda ele alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

- Etkin kesit rijitliği çarpanının kullanımı, GFRP donatılı yapıda çelik donatılı yapıya oranla daha fazla taban kesme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Bu durum, sahada oluşabilecek beton dayanımının normalden az olması, imalat hataları gibi riskli durumlara karşı önlem alınması amacıyla tasarımda GFRP donatılı kesitlere de etkin kesit rijitliklerinin tanımlanması önerilmektedir.
- GFRP donatılı kesitlerin yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olması nedeniyle alternatif bir malzeme olarak özellikle korozyonun sorun teşkil ettiği yerlerde, ilgili standartlar göz önünde bulundurularak kullanılması önerilmektedir.
- GFRP donatıların hafif olması yapı yükünü de hafifletmektedir. Ayrıca çekme dayanımının yüksek olması da karşıladığı yük miktarını da arttırmaktadır.
- FRP donatılar olarak karbon, bazalt, bor ve aramid lifli donatılarda aynı çalışma içerisinde yapılar birbirleri ile kıyaslanabilir.
- GFRP donatılı betonarme yapıların sünekliliğinin artırılması amacıyla lifli betonlarla birlikte kullanımı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- ACI. (2015). American Concrete Institute). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI.”
- AFAD. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*.
- Afifi, Mohammad Z., ; Hamdy, M. Mohamed, and Brahim Benmokrane. (2013). “Axial Capacity of Circular Concrete Columns Reinforced with GFRP Bars and Spirals.” doi: 10.1061/(ASCE).
- Aiello, Maria Antonietta, Marianovella Leone, and Marisa Pecce. (2007). “Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(3):205–13. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:3(205).
- Aliasghar-Mamaghani, Mojtaba, and Alireza Khaloo. (2018). Seismic Behavior of Concrete Moment Frame Reinforced with GFRP Bars. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.082.
- Alves, Juliana, Amr El-Ragaby, and Ehab El-Salakawy. (2010). Durability of GFRP Bars’ Bond to Concrete under Different Loading and Environmental Conditions. *Journal of Composites for Construction* 15(3):249–62. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000161.
- Ashrafi, Hamed, Milad Bazli, and Asghar Vatani Oskouei. (2016). Enhancement of Bond Characteristics of Ribbed-Surface GFRP Bars with Concrete by Using Carbon Fiber Mat Anchorage. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.083.
- Aydın, Ferhat, and Şeymanur Arslan. (2021). Investigation of the Durability Performance of FRP Bars in Different Environmental Conditions. *Advances in Concrete Construction* 12(4):295–302. doi: doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.295.
- Aydinoğlu, M. N. (2003). An Incremental Response Spectrum Analysis Procedure Based on Inelastic Spectral Deformation for Multi-Mode Seismic Evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering* 1(1):3–36.
- Bazli, Milad, Hamed Ashrafi, and Asghar Vatani Oskouei. (2016). Effect of Harsh Environments on Mechanical Properties of GFRP Pultruded Profiles. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.019.
- Bhandari, M., S. D. Bharti, M. K. Shrimali, and T. K. Datta. (2018). Assessment of Proposed Lateral Load Patterns in Pushover Analysis for Base-Isolated Frames. *Engineering Structures* 175:531–48. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.08.080.
- CAN/CSA-S806-02. (2009). *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*.

- Chopra, A. K., and R. K. Goel. (2002). A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 31(3):561–82.
- Elchalakani, Mohamed, and Guowei Ma. (2017). Tests of Glass Fibre Reinforced Polymer Rectangular Concrete Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading. *Engineering Structures* 151:93–104. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.08.023.
- Fajfar, Peter. (2000). No Structural Analysis in Earthquake Engineering—a Breakthrough of Simplified Non-Linear Methods. Pp. 1–20 in *12th Eur. Conf. Earthq. Eng.*
- Feng, Peng, Jie Wang, Yi Wang, David Loughery, and Ditao Niu. (2014). Effects of Corrosive Environments on Properties of Pultruded GFRP Plates. *Composites Part B: Engineering* 67:427–33. doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2014.08.021.
- Garcia-Espinel, J. D., D. Castro-Fresno, P. Parbole Gayo, and F. Ballester-Muñoz. (2015). Effects of Sea Water Environment on Glass Fiber Reinforced Plastic Materials Used for Marine Civil Engineering Constructions. *Materials & Design (1980-2015)* 66(PA):46–50. doi: 10.1016/J.MATDES.2014.10.032.
- Ghomi, Shervin K., and Ehab El-Salakawy. (2019). Seismic Behavior of GFRP-Reinforced Concrete Interior Beam–Column–Slab Subassemblies. *Journal of Composites for Construction* 23(6):04019047. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000980.
- Goldston, M., A. Remennikov, and M. Neaz Sheikh. (2016). Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars under Static and Impact Loading. *Engineering Structures* 113:220–32. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.01.044.
- Guadagnini, Maurizio, Kypros Pilakoutas, and Peter Waldron. (2006). Shear Resistance of FRP RC Beams: Experimental Study. *Journal of Composites for Construction* 10(6):464–73. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:6(464).
- Guérin, M., H. M. Mohamed, B. Benmokrane, C. K. Shield, and A. Nanni. (2018). Effect of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement Ratio on Axial-Flexural Strength of Reinforced Concrete Columns. *Structural Journal* 115(4):1049–61. doi: 10.14359/51701279.
- Hao, Q. D., B. Wang, and J. P. Ou. (2006). Fiber Reinforced Polymer Rebar’s Application to Civil Engineering. *Concrete* 9(1):38–40.
- Harajli, M., and M. Abouniaj. (2010). Bond Performance of GFRP Bars in Tension: Experimental Evaluation and Assessment of ACI 440 Guidelines. *Journal of Composites for Construction* 14(6):659–68. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000139.
- Harris, Harry G., Win Somboonsong, and Frank K. Ko. (1998). New Ductile Hybrid FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures. *Journal of Composites for Construction* 2(1):28–37. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:1(28).
- Jan, Tysh Shang, Ming Wei Liu, and C. Kao Ying Chieh. (2004). An Upper-Bound Pushover Analysis Procedure for Estimating the Seismic Demands of High-Rise Buildings. *Engineering Structures* 26(1):117–28. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2003.09.003.
- Kim, Sun Pil, and Yahya C. Kurama. (2008). An Alternative Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Displacement Demands. *Engineering Structures* 30(12):3793–3807. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.07.008.
- Krawinkler, Helmut. (2006). Importance of Good Nonlinear Analysis. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 15(5):515–31. doi: 10.1002/TAL.379.
- Lau, Denvid, and Hoat Joen Pam. (2010). Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams. *Engineering Structures* 32(12):3857–65. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2010.08.028.
- Mander, J. B., M. J. Priestley, and R. Park. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering* 114(8):1804–26.
- Poursha, Mehdi, Faramarz Khoshnoudian, and A. S. Moghadam. (2009). A Consecutive Modal Pushover Procedure for Estimating the Seismic Demands of Tall Buildings. *Engineering Structures* 31(2):591–99. doi:

10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.10.009.

Remennikov, Alex, Matthew W. Goldston, and M. Neaz Sheikh.(2016). Impact Resistance of Ultra-High Strength Concrete Beams with FRP Reinforcement. *Proceedings of the 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, CICE 2016* (December):1374–80.

Salihovic, Amir, and Naida Ademovic. (2018). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frame under Lateral Load. *Coupled Systems Mechanics* 7(3):281–95. doi: 10.12989/csm.2018.7.3.281.

Shamsher Bahadur Singh. (2015). Analysis and Design of FRP Reinforced-. McGraw-Hill Education

Suwondo, Riza, Dave Mangindaan, Lee Cunningham, and Sohaib Alama. (2021). Non-Linear Analysis of Seismic Performance of Low-Rise Concrete Buildings in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 794(1):012024. doi: 10.1088/1755-1315/794/1/012024.

Tarawneh, Ahmad, and Sereen Majdalaweyh. (2020). Design and Reliability Analysis of FRP-Reinforced Concrete Columns. *Structures* 28:1580–88. doi: 10.1016/J.ISTRUC.2020.10.009.

Tobbi, Hany, Ahmed Sabry Farghaly, and Brahim Benmokrane. (2012). Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars Seismic Behavior of GFRP-Reinforced Flat Plate Structures under Simulated Quasi-Static Cyclic Lateral Loads View Project Strength and Drift Capacity Desi. *ACI Structural Journal* 109(4).

Wu, Lili, Xiang Xu, Hui Wang, and Jia Qi Yang. (2022). Experimental Study on Bond Properties between GFRP Bars and Self-Compacting Concrete *Construction and Building Materials* 320:126186. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.126186.

Xue, Weichen, Fei Peng, and Zhiqing Fang. (2018). Behavior and Design of Slender Rectangular Concrete Columns Longitudinally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal* 115(2):311–22. doi: 10.14359/51701131.

Youssef, M. A., M. E. Meshaly, and A. A. Elansary. (2019). Ductile Corrosion-Free Self-Centering Concrete Elements. *Engineering Structures* 184:52–60. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.01.086.

Youssef, Maged A., Mohamed E. Meshaly, and Ahmed A. Elansary. (2017). Ductile Corrosion-Free GFRP-Stainless Steel Reinforced Concrete Elements. *Composite Structures* 182:124–31. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.09.037.

Zhang, Dawei, Yuxi Zhao, Tamon Ueda, Xiangmin Li, and Qingfeng Xu. (2016). CFRP Strengthened RC Beams with Pre-Strengthening Non-Uniform Reinforcement Corrosion Subjected to Post-Strengthening Wetting/Drying Cycles. *Engineering Structures* 127:331–43. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.08.051.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.08.2022
Kabul Tarihi : 31.03.2023

Received Date : 27.08.2022
Accepted Date : 31.03.2023

NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN DELİNMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE TAGUCHI İLE OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS IN DRILLING OF NICKEL BASED SUPERALLOYS WITH GRAY RELATIONAL ANALYSIS AND TAGUCHI

Harun YAKA^{1*} (ORCID: 0000-0003-4859-9609)
Ramazan ATILKAN² (ORCID: 0000-0002-4197-3314)

¹ Amasya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye
² Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Harun YAKA, harun.yaka@amasya.edu.tr

ÖZET

Artan maliyetler ve istenen ürünün kalitesi dikkate alındığında talaşlı imalatta verimli işleme yapmanın önemi artmaktadır. Verimli bir işleme yapabilmek için kesme parametreleri uygun seçilmelidir. Bu çalışmada, nikel esaslı süper alaşımlı malzemelerde delme işlemi yapılmıştır. Delme işleminde farklı kesme parametreleri ve seviyeleri kullanılmıştır. Ayrıca delme işleminde kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere iki ayrı matkap ucu seçilmiştir. Taguchi yöntemi ile deney listesi oluşturulmuş ve deneyler sonunda elde edilen yüzeylerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Sonuçlar, Taguchi ve GİA (Gri İlişkisel Analiz) yöntemleri kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyonlar, ortalama yüzey pürüzlülüğünün en küçük değeri istendiği için en küçük en iyi sinyal-gürültü oranı seçilerek yapılmıştır. Deneyler sonunda en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünü elde ettiğimiz kesme parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Optimum parametre seviyelerinin dizilimi A2B3C1D3 çıkmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre belirlenmiş ve çalışmanın güven düzeyi Varyans analizi kullanılarak bulunmuştur. En etkin parametre kesme hızı, çalışmanın güven düzeyi %84,23 olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Süper alaşım, Taguchi, gri ilişkisel analiz, optimizasyon, ortalama yüzey pürüzlülüğü.

ABSTRACT

Considering the increasing costs and the quality of the desired product, the importance of efficient machining in manufacturing is increasing. In order to perform an efficient machining, the cutting parameters should be selected appropriately. In this study, drilling was performed in nickel-based superalloy materials. Different cutting parameters and levels were used in the drilling process. In addition, two different drill bits, coated and uncoated, were selected in the drilling process. The test list was created with the Taguchi method and the surface roughness of the surfaces obtained at the end of the experiments was measured. The results were optimized using Taguchi and GIA (Gray Relational Analysis) methods. Optimizations were made by choosing the smallest best signal-to-noise ratio since the smallest value of the average surface roughness was desired. At the end of the experiments, the cutting parameters and levels at which we obtained the lowest average surface roughness were determined. The sequence of optimum parameter levels was A2B3C1D3. The parameter affecting the average surface roughness the most was determined and the confidence level of the study was found by using analysis of variance. The most effective parameter was the cutting speed, the confidence level of the study was 84,23%.

ToCite: YAKA, H., & ATILKAN, R., (2023). NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN DELİNMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN GRİ İLİŞKİSEL ANALİZ VE TAGUCHI İLE OPTİMİZASYONU. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 363-378.

Keywords: Superalloy, Taguchi, gray relational analysis, optimization, average surface roughness.

GİRİŞ

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, güçlü korozyon direnci, mükemmel termal yorulma özellikleri ve termal stabiliteye sahip olduğu için havacılık sektöründe özellikle motor parçalarının imalatında kullanılmaktadır. Uçak motorlarının kompresör diskleri, türbin diskleri, yatak halkası, kasa, bıçaklar ve çalışan diğer parçalarında yaygın olarak uygulanmaktadır (Zhu vd., 2013).

Son zamanlarda orta ve düşük sıcaklıklarda çalışabilen bazı süper alaşımların geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu özelliklere sahip olarak geliştirilen süper alaşımlardan birisi de Inconel 718 alaşımıdır. Düşük ve orta sıcaklıktaki (-250 ile 700°C) mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda uzay, petrol ve nükleer enerji endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu malzemeler işleme sırasında yüksek sertliğinden dolayı talaş oluşumunda güçlüklerle karşılaşmaktadır (Besterfield vd., 1995). Malzemenin üretim maliyeti yüksek olduğu için işlenmesi esnasındaki hatalar ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır.

Inconel 718 alaşımları düşük ve orta sıcaklıklarda mekanik özellikleri iyi olduğu için son zamanlarda havacılık alanında yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle jet motoru parçalarının üretiminde önemli bir alaşım olarak kullanılmaktadır (Khanfer vd., 2020). Bu alanlarda kullanılan malzemelerin hassas yüzey toleransları gerektirdiği için işleme yöntemleri ve işleme hassasiyeti büyük önem arz etmektedir. Inconel süper alaşımlarının talaşlı imalat neticesinde iş parçası yüzeyinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Jafarian vd., 2016; Ozcelik vd., 2005; Kumar vd., 2017; Akgün ve Demir, 2021). Yapılan çalışmalar incelendiğinde, Inconel 718 süper alaşımı birçok talaşlı imalat yöntemi kullanılarak işlenmiş ve malzemenin işlenebilirliği incelenmiştir. En yaygın olarak da frezeleme ve tornalama işlemleri uygulanmıştır. Delik delme işleminin fazla uygulanmadığı görülmüştür (Besterfield vd., 1995; Montgomery, 2017). Havacılık sanayisinde süper alaşımların delinmesi önemli bir talaşlı imalat uygulaması olarak bilinmektedir. Farid vd. (2009), Inconel 718'in yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini araştırmak için farklı devirlerde, farklı ilerleme hızlarında, farklı matkaplarda ve matkap uç açılarında delme testleri yapmışlardır. Çalışmada, işlenmiş deliklerin kalitesi, geometrik doğruluk ve çapak oluşumu açısından değerlendirilmiştir. Genel olarak, kaplamasız karbür matkap ile Inconel 718 delerken kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varmışlardır (Farid vd., 2009). Khanna vd. (2020), Inconel 718 süper alaşımının delinmesi için sürdürülebilir bir üretim süreci olarak işlemin delmeye etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında, deliğin daireselliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Sonuç olarak, kuru delme ile karşılaştırıldığında kriyojenik delmede delik daireselliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinde azalma olmuştur. Khanna vd. (2020) başka bir çalışmada Inconel 718 alaşımına tornalama işlemi uygulamışlar ve takım aşınması, enerji tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir (Khanna vd., 2020b, 2020a). Sahoo vd. (2022), aynı malzemeyi kriyojenik yöntemle delmişler ve oluşan yüzey pürüzlülüğü ile itme kuvvetlerini incelemişlerdir. Deney tasarımı Taguchi yöntemi ile, kesme parametrelerinin optimizasyonu ise Balina (Whale) optimizasyonunu kullanarak yapmışlardır. Parametrelerin etki oranlarını belirlemek için ANOVA kullanmışlardır. Yüksek ilerleme hızlarında itme kuvveti yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre ise matkap ucu (kriyojenik işlem uygulanan tek temperli ve çift temperli takım) olmuştur (Sahoo vd., 2022). Chen ve Liao (2003), Inconel 718 süper alaşımının delinmesinde TiAlN kaplı karbür takımın aşınma mekanizmaları ve takım ömrü üzerine çalışma yapmışlardır. Düşük sürtünmeli yüzey değiştirici içeren kesme sıvısının kullanımı ile delme deneyleri yapmışlar ve matkabın ömrünün önemli ölçüde uzadığı ve dolayısıyla işleme maliyetinin büyük ölçüde azaltılabileceğini belirtmişlerdir (Chen ve Liao, 2003). Khanfer vd. (2020), jet motorlarında yaygın olarak kullanılan Inconel 718 alaşımının delinmesinde meydana gelen yüzey kalitesini ve matkap ömrünü incelemişlerdir. Delme esnasında sıcaklığı azaltmak ve minimum miktarda soğutma sıvısı kullanmak için MQL yöntemi ile soğutma yapmışlardır. Normal soğutma sıvısı kullanımı ve MQL ile soğutma arasındaki farkları incelemişler ve MQL ile işlemede sürdürülebilirlik açısından umut verici sonuçlara ulaşmışlardır (Khanfer vd., 2020). Lotfi vd. (2022), delme parametrelerinin Inconel 718'in yüzey bütünlüğü üzerindeki etkisini deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemektedir. Deneysel çalışmada mikro sertlik, mikro yapı değişiklikleri ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Aynı kesme parametrelerini sonlu elemanlar analizinde de uygulamışlar ve elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Yüksek devirlerde ortalama tane boyutunun azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca ilerleme hızının artmasıyla yüzey kalitesinin bozulduğunu gözlemlemişlerdir (Lotfi vd., 2022).

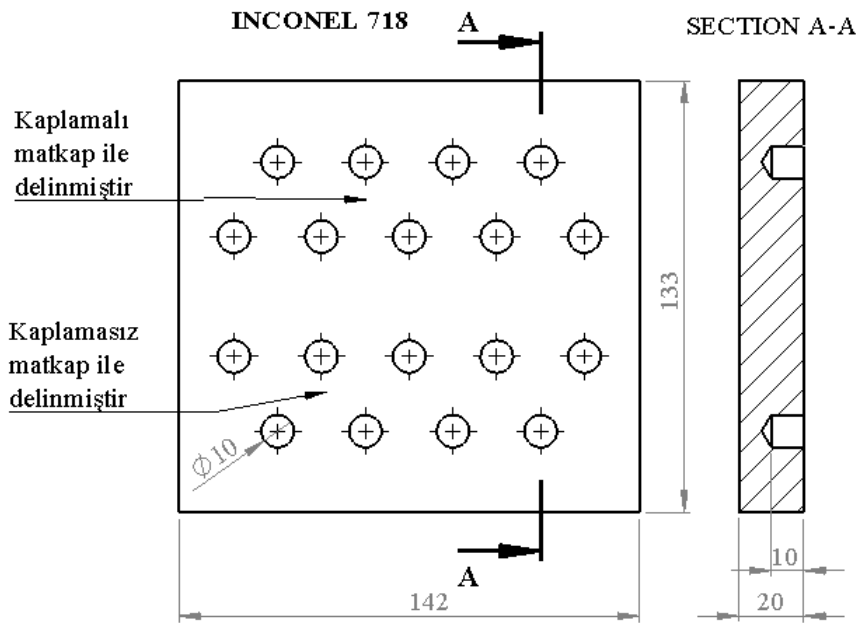
İstatistiksel yöntemler, başta mühendislik alanları olmak üzere farklı çalışmalarda kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir (Benardos ve Vosniakos, 2003). İstatistiksel yöntemlerden olan Taguchi ve gri ilişkisel analiz yöntemi proses parametrelerini optimize etmek ve ürünü geliştirmek için geniş çapta kullanılır (Mohamed ve Lenin, 2020). Bir diğer istatistiksel sonuç değerlendirmede kullanılan ANOVA testi de bağımsız grupların ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın var olup olmadığını ölçer (Akkuş, 2022). Regresyon analizi ise deneysel çalışmalarda kontrol ve deneysel faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda analiz edilecek değişkene göre daha kolay veya daha erken tespit edilebilen değişkenlere dayalı olarak istenilen değişkeni tahmin eden bir modelin oluşturulmasıdır (Shah vd., 2022). Deneysel çalışmaların doğruluğunu daha iyi belirlemek için genellikle birden fazla istatistiksel yöntem kullanılmaktadır. Literatür incelendiğinde, deney sonuçlarının istatistiksel yöntemler arasında karşılaştırılması için aynı çalışma içerisinde birden fazla istatistiksel yöntem kullanıldığı görülmektedir (Alsoruji vd., 2022; Selvan vd., 2022; Sheheryar vd., 2022).

Çalışmalar incelendiğinde, Inconel 718 alaşımın delinmesinde kaplamalı ve kaplamsız matkapların ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin farklı istatistiksel metotlarla incelendiği görülmektedir. Ancak çalışmalarda, üç farklı uç açısının kullanıldığı ve deneysel sonuçların doğruluğunu ve işleme parametrelerin tam olarak optimizasyonu için Taguchi ve gri ilişkisel analiz yönteminin aynı anda kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Inconel 718 nikel esaslı süper alaşım farklı kesme hızı, ilerleme ve üç farklı uç açılarındaki kaplamsız ve Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı matkaplarla delinerek ortalama yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir ve en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Optimum parametrelerin belirlenebilmesi ve deneysel sonuçların doğruluğunun tam olarak ispatı için Taguchi ve gri ilişkisel analiz yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

MATERYAL VE METOT

İş Parçası

Deneylerde, Şekil 1’de boyutları verilen 43 HRc sertliğinde Inconel 718 süper alaşımı kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal bileşim ve fiziksel özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2’de sırayla verilmiştir. Delik delme işleminde deliğin daireselliği üzerine yapılan çalışmalarda delik genellikle boydan boya delinmekte ve civatalı bağlantı veya kılavuz delikleri olarak kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada delikler, işleme sonrası ortalama yüzey pürüzlülükleri inceleneceği için 10 mm derinliğinde kör delik şeklinde delinmiştir.



Şekil 1. Inconel 718 Süper Alaşımının Boyutları

Tablo 1. Inconel 718 Süper Alaşımının Kimyasal Bileşimi

Element	Ni	Cr	Fe	Nb +Ta	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Cu
Ağırlıkça %	53,45	18,55	17,64	5,18	5,17	2,92	0,98	0,56	0,23	0,22



Tablo 2. Inconel 718 Süper Alaşımının Fiziksel Özellikleri

Özellik	Ölçü birimi	Değerler
Yoğunluk	[g/cm ³]	8,20
Young Modülü	[GPa]	204
Özel ısı	[J/kg-K]	435
Lineer ısı genişleme katsayısı	[10 ⁻⁶ /°C]	13,0
Termik iletkenlik	[W/(m·K)]	11,3
Elektrik özdirenç	[Ω*m*10 ⁻⁹]	1250
Bağlı mıknatıs geçirgenliği	-	1,010

Kesici Takım

Deneylerde Karcan Kesici Takımlar firmasından temin edilen 10 mm çapında uç açıları 95°, 118° ve 140° olan Karcan marka K3DF100089 kodlu kaplamasız karbür matkap ile M8DF100142 kodlu Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı karbür matkap kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkapların özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Matkapların Teknik Özellikleri

K3DF100089 matkap		M8DF100142 matkap	
	Helis açısı 30°		Helis açısı 30°
	Kaplama Kaplamasız		Kaplama TiN
	Uç açıları 95°-118°-140°		Uç açıları 95°-118°-140°
			Kaplama kalınlığı 0.25-1.2 Mikron
			Kaplama yöntemi PVD
			Kaplama ergime sıcaklığı 2950°C

Deneylerde Kullanılan Takım Tezgâhı

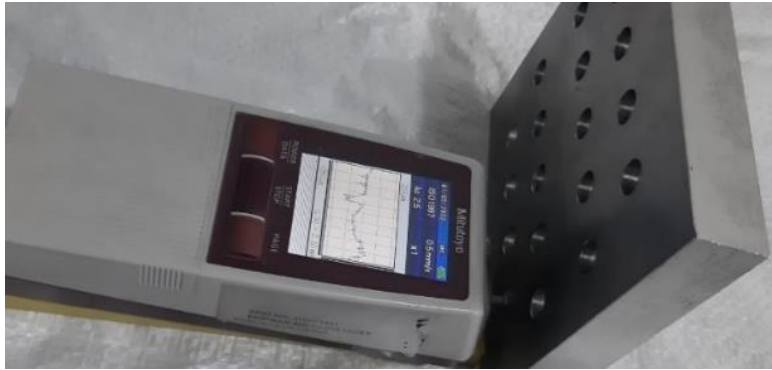
Deneyler, İvedik Organize Sanayi Bölgesi Makrotek Makina firmasında bulunan Hardford F1 1000 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın gücü 11 KW, 12000 devir ve 1000x500x600 ebatlarındadır. Deneyde kullanılan CNC dik işleme tezgâhı Şekil 2'de verilmiştir. Kesme esnasında soğutma sıvısı kullanılmamıştır.



Şekil 2. Hartford CNC Dikey İşleme Merkezi

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Delik delme deneyleri sonucu oluşan yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerlerinin ölçümü için ISO 1997 standartlarında, 8 mm ölçme boyu ve 0.5 mm/sn ölçüm hızında Mitutoyo SJ-310S marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler delik yüzeyin üç ayrı noktasından yapılmış ve bu üç ölçümün ortalamaları girilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve özellikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Mitutoyo SJ-310S Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Kesme Parametreleri ve Deney Listesi

Kesme parametreleri, kesici takım firmasının önerileri doğrultusunda ve yapılan literatür araştırması neticesinde belirlenmiştir. Deneylerde, 3 farklı kesme hızı (15, 20, 25 m/dak.), 3 farklı ilerleme (26,32,38 mm/dak.) değerleri ile iş parçasına 10 mm kesme derinliğinde kör delikler açılmıştır. İş parçasına üç farklı uç açısı (95°-118°-140°) olan kaplamalı matkapla 9 kaplamasız matkapla 9 olmak üzere toplamda 18 delik delme işlemi yapılmıştır. Deneyler aynı şartlar altında 3 farklı plaka üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalamaları alınmış ve deneysel sonuç olarak kabul edilmiştir. Delik delme işleminde kullanılan kesme parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Kesme Parametreleri ve Seviyeleri

Sembol	Kontrol faktörleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kesici takım		Kaplamasız	Kaplamalı	
B	Kesme hızı	m/dk	15	20	25
C	İlerleme	mm/dk	26	32	38
D	Matkap uç açısı	°	95	118	140

Taguchi Yöntemi

Tasarım problemlerini optimize etmek için kolay ve verimli bir yol öneren Taguchi yöntemi, hedef fonksiyon için farklı faktörlerin önem sırasını elde etmede en sık kullanılan istatistiksel yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem, deneysel, sayısal ve ayrıca teorik gibi her türlü çalışma için kullanılır (Bademlioglu vd., 2020)

Analizin başarısı, süreç parametrelerinin seçimine ve bunların amaç fonksiyonu ile olan ilişkilerine bağlıdır. Bu çalışmada detaylı literatür taraması yapılmış ve istatistiksel analiz için parametreler ve seviyeleri Tablo 3'te ki gibi belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Inconel 718 alaşımının delinmesi işleminde minimum yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemi uygulanmıştır. İlk olarak, amaç fonksiyonun (Ra) sonuçları S/N oranına dönüştürülmüştür. S/N oranının hesaplanması için üç tip performans karakteristiği kullanılır. Bunlar: en küçük en iyisi, en büyük en iyisi ve nominal en iyisidir (Jena vd., 2021). Bu çalışmada ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri minimize edilmek istendiğinden, performans karakteristiği en küçük en iyi seçilmiştir. S/N oranları en küçük en iyi durumuna göre Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$SNRs = -10 \log \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

Gri İlişkisel Analiz

Taguchi yöntemi tek bir yanıt karakteristiğini optimize etmek için tasarlanırken, Gri ilişkisel analizde birden çok sonucun optimizasyonuna izin verilir. Bu nedenle Gri İlişkisel Analiz diğer optimizasyon yöntemlerine göre biraz daha karmaşıktır (Gök, 2015). Bir sistemin hayati faktörlerine ve faktörler arasındaki ilişkiye karar vermek için kullanılır. Burada anahtar faktörler giriş ve çıkış sırası tarafından tanınır. Çalışmada ilk olarak, deneysel sonuçlar 0 ile 1 arasında normalleştirilmiştir. Daha sonra normalize edilen deneysel sonuçlardan gri ilişkisel katsayılar elde edilerek gri ilişkisel katsayılardan gri ilişkisel derece elde edilmiştir. Çoklu işlem yanıtları da gri ilişkisel dereceye göre değerlendirilir. Tepki parametreleri "en küçük en iyisidir" kriterine göre optimize edildiğinde orijinal sıralama Denklem 2'ye göre hesaplanır (Yessian ve Varthanan, 2020).

$$x_i(k) = \frac{\max y_i(k) - y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (2)$$

Burada $x_i(k)$, normalizasyon sonrasında i serisindeki ve k satırındaki değeri, $\min y_i(k)$, i serisindeki minimum değeri, $\max y_i(k)$, i serisindeki maksimum değeri ifade eder ve $y_i(k)$ da i serisi ve k satırındaki orijinal değeri ifade eder.

İkinci adımda, normalize edilmiş deneysel verilerden istenen ve ölçülen deneysel veriler arasındaki ilişkiyi ifade eden gri ilişki katsayısı hesaplanır. Gri ilişki katsayısı Denklem 3'e göre hesaplanır (Singh vd., 2004).

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta \min + Y \Delta \max}{\Delta 0_i(k) + Y \Delta \max} \quad (3)$$

$$\Delta 0_i = \|X_0(k) - X_i(k)\| \quad (4)$$

$\Delta 0_i$, $X_0(k)$ ile $X_i(k)$ arasındaki mutlak değer farkıdır. $X_0(k)$, ideal dizi veya referans dizidir., Δmin , $\Delta 0_i$ 'nin en küçük değeri, Δmax ise $\Delta 0_i$ 'nin en büyük değeridir. Burada Y , 0 ile 1 arasında bir ayırıcı katsayıdır ve genellikle 0,5 olarak alınır (Durairaj vd., 2013; Jena vd., 2021).

Daha sonra gri ilişkisel derece y_0 , gri ilişkisel katsayıların ortalaması alınarak hesaplanır. Daha yüksek bir gri ilişkisel katsayı değerinin, verilen $X_i(k)$ dizisi ile ideal $X_0(k)$ dizisi arasında daha güçlü bir ilişki olduğu kabul edilir. İdeal dizi $X_0(k)$ deneysel düzenlemede en iyi tepki olarak kabul edilmektedir (Jena vd., 2021).

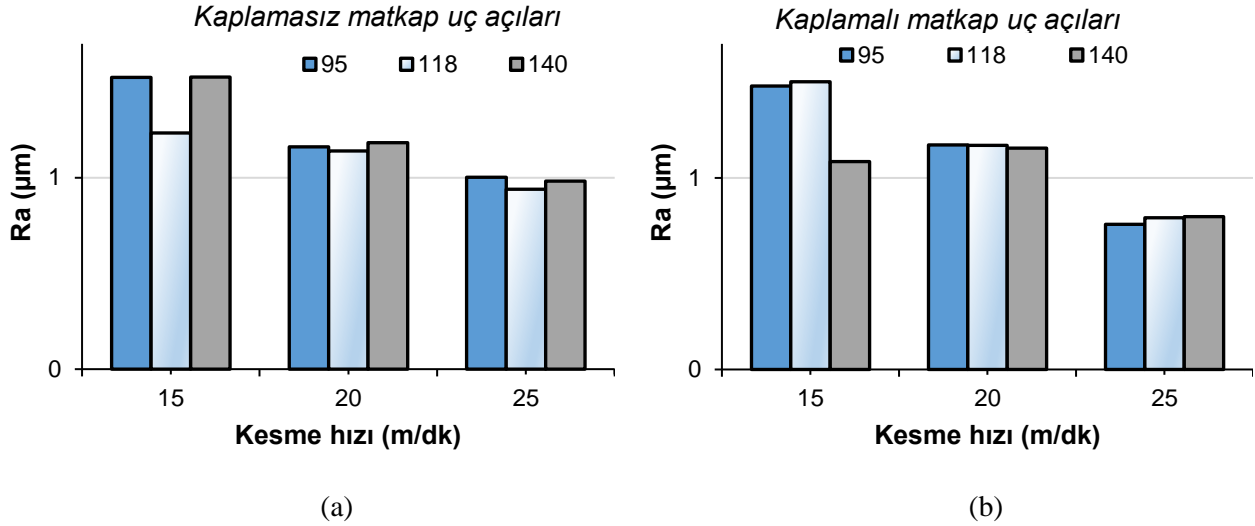
DENEYSEL SONUÇLAR

Derin deliklerde kullanım şartlarına göre sıcaklığın fazla olduğu durumlarda malzeme yüzeyinde oluşan yüksek pürüzlülük değerleri malzeme yüzeyinde kılcal çatlaklar, korozyon ve yüksek aşınma gibi istenmeyen hatalar meydana getirir. Bu hataları minimize etmek için delik yüzeylerinde delme esnasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü kesme parametrelerinin optimizasyonu ile kontrol altına alınabilir (Yaka vd., 2016). Bu amaçla, Taguchi L18 ($2^1 3^3$) ortogonal dizilim ile hazırlanan deney listesine göre yapılan delme işlemleri sonunda yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve Taguchi ile analiz yapılarak S/N (sinyal/gürültü) oranları çıkarılmıştır. Optimum parametreler ve seviyeler elde edilen S/N gürültü oranlarına göre belirlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçları ve S/N oranları Tablo 5'te verilmiştir. Deneyler sonunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.779 μm ile 1.163 μm arasında gerçekleşmiştir. Süper alaşımlı çeliklerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin bu aralıklarda olduğu görülmektedir (Motorcu vd., 2014; Lotfi vd., 2022).

Tablo 5. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü ve S/N Oranları Değerleri

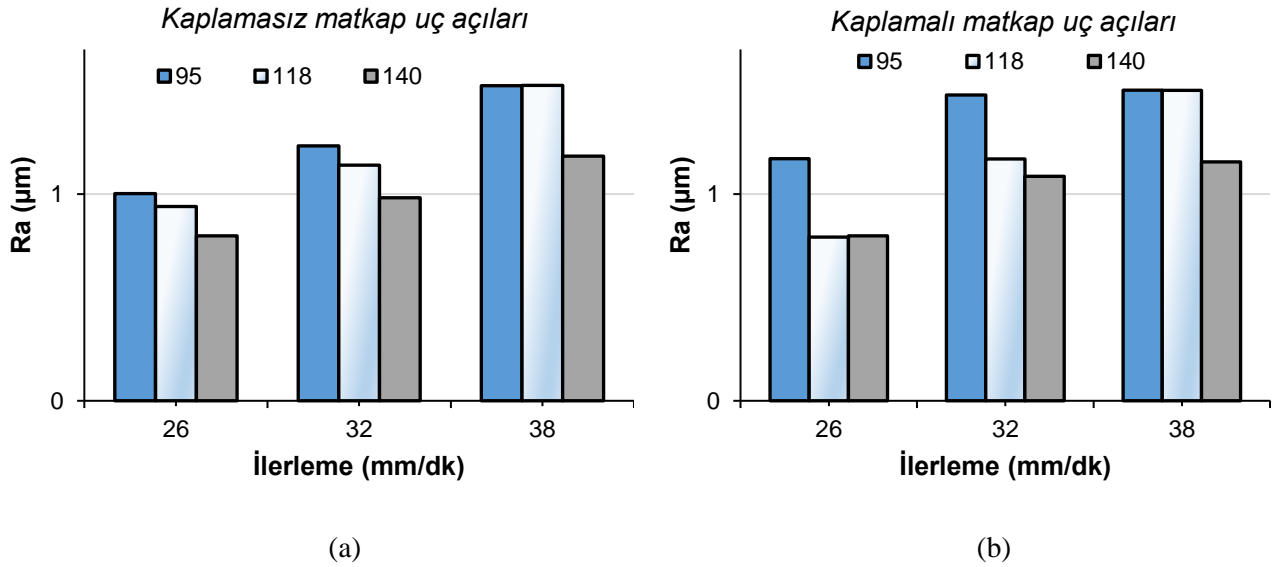
Deney No	A	B	C	D	Ra (μm)	S/N (dB)
1	Kaplamasız	15	26	95	1,162	-1,30412
2	Kaplamasız	15	32	118	1,017	-0,14642
3	Kaplamasız	15	38	140	1,163	-1,31159
4	Kaplamasız	20	26	95	0,981	0,16662
5	Kaplamasız	20	32	118	0,970	0,26457
6	Kaplamasız	20	38	140	0,992	0,06977
7	Kaplamasız	25	26	118	0,870	1,20961
8	Kaplamasız	25	32	140	0,891	1,00245
9	Kaplamasız	25	38	95	0,901	0,90550
10	Kaplamalı	15	26	140	0,943	0,50977
11	Kaplamalı	15	32	95	1,140	-1,13810
12	Kaplamalı	15	38	118	1,151	-1,22151
13	Kaplamalı	20	26	118	0,985	0,13128
14	Kaplamalı	20	32	140	0,978	0,19322
15	Kaplamalı	20	38	95	0,986	0,12246
16	Kaplamalı	25	26	140	0,799	1,94906
17	Kaplamalı	25	32	95	0,779	2,16925
18	Kaplamalı	25	38	118	0,796	1,98174

Deneysel faktörlerin Ra üzerinde etkisi ve faktörlerin birbirleriyle etkileşimi Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Parametreler arası etkileşimi daha iyi analiz edebilmek için kaplamalı ve kaplamasız matkapların uç açılarına göre kesme hızının ve ilerlemenin Ra'ya etkileri bar grafiği ile gösterilmiştir. Şekil 4.a'da kaplamalı matkaplarda kesme hızı arttıkça Ra'nın azaldığı görülmüştür. Şekil 4.b'de kaplamasız matkaplarda da kesme hızı arttıkça Ra'nın azalmıştır. Normal olarak bütün talaşlı imalat işlemlerinde özellikle kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri düşer. Kesme hızlarındaki artış birim zamanda kaldırılan talaş miktarını azalttığı için kesme kuvvetleri de buna bağlı olarak azalır ve kesme işlemi kolaylaşır. Bu da yüzey pürüzlülüğünü olumlu yönde etkiler (Çiftçi ve Gökçe 2019; Gökçe vd., 2020; Yavuz vd., 2020; Yurtkuran vd., 2016). Kaplamasız matkaplarda, kesme hızı seviyelerinde 118° uç açısında Ra daha küçük çıkmıştır. Kaplamalı matkaplarda ise değişkenlik göstermiştir. 15 ve 20 m/dk kesme hızında 140° uç açılı matkap ideal çıkarken 25 m/dk kesme hızında 95° uç açılı matkap ideal çıkmıştır.



Şekil 4. Kesme Hızının Uç Açıklarına Göre Ra Üzerindeki Etkileşimini Gösteren Bar Grafiği

Şekil 5.a'da kaplamasız, Şekil 5.b'de kaplamalı matkaplarda ilerlemenin Ra'ya etkileri verilmiştir. Hem kaplamalı hem de kaplamasız matkaplarda ilerleme hızındaki artış Ra değerlerini de arttırdığı görülmüştür. Artan ilerleme oranlarına bağlı olarak pürüzlülük değerlerinin de artması literatürde de karşılığı olan bir durumdur. İlerleme hızındaki artış birim zamanda kaldırılan talaş hacmini artırır. Bu durum da kesme kuvvetlerini artırarak kesmeyi zorlaştırır ve yüzey pürüzlülüklerini olumsuz etkiler (Özlu vd., 2019; Yaka vd., 2016; Zhu vd., 2018). Kaplamasız matkaplarda, kesme hızı seviyelerinde 118° uç açısında Ra daha küçük çıkmıştır. Kaplamasız matkaplar için üç ilerleme seviyesinde de en uygun matkap uç açısı 140°da olarak çıkmıştır. Kaplamalı matkaplarda da farklı ilerleme oranlarında 140° uç açılı matkapta Ra değerleri daha küçük çıkmıştır. Sadece 26 mm/dk ilerlemede en düşük Ra 118° uç açısında gerçekleşmiştir.

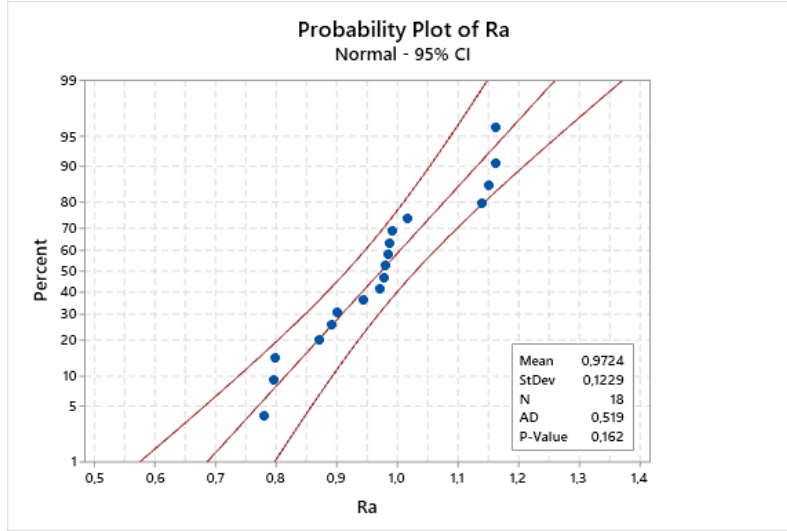


Şekil 5. İlerlemenin Uç Açıklarına Göre Ra Üzerindeki Etkileşimini Gösteren Bar Grafiği

Normallik Analizi

İstatistiksel yöntemlerin çoğu normallik varsayımına dayanmaktadır. Bu nedenle analize başlamadan önce veri setlerinin dağılımının normal olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir. Minitab, normallik testi için Anderson-Darling, Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk'e benzer) ve Kolmogorov-Smirnov seçenekleri sunar. Sunulan bu normallik

testleri arasında Anderson-Darling seçeneğine göre testler gerçekleştirilmiştir. Ra, için elde edilen normallik testi sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Ortalama, StDev (standart sapma), N (numune sayısı), AD (Anderson-Darling) ve p değerlerini şekillerde görebiliriz. Normallik testi sonucunda ideal $P > 0.05$ olmalıdır. P değeri Ra için 0.162 olarak elde edilmiştir. Test sonucunda elde ettiğimiz değer ideal normallik dağılımının biraz üzerinde olduğu ancak kırmızı çizgi ile belirtilen sınırların dışında olmadığı için kabul edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır (Asiltürk ve Akkuş, 2011).



Şekil 6. Ra Sonuçları İçin Normallik Analizi Grafiği

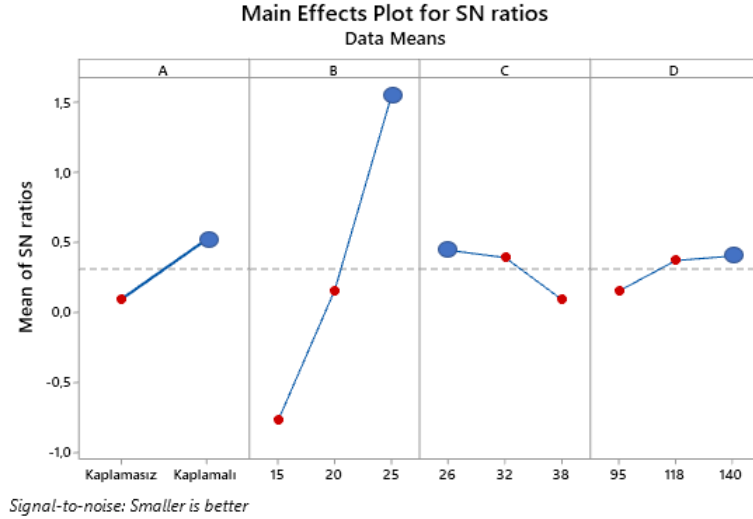
Taguchi Sonuçları

Deneyler sonunda elde edilen ortalama Ra değerleri ve sinyal-gürültü (S/N) oranları Tablo 5'te verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü küçük olması istendiği için S/N oranları en küçük en iyi yöntemi ile oluşturulmuştur. En küçük Ra için S/N oranı en belirgin yani en büyük olur (Erkan ve Yücel, 2018). Tablo 6 incelendiğinde en büyük S/N oranı 17. deneyde çıkmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü de 0.779 μm ile en küçük çıkmıştır.

Tablo 6. En Küçük En İyiye Göre Sinyal Gürültü Oranı Yanıt Tablosu

Seviye	A	B	C	D
1	0,09515	-0,76866	0,44370	0,15360
2	0,52191	0,15799	0,39083	0,36988
3		1,53627	0,09106	0,40211
Delta	0,42676	2,30493	0,35264	0,24851
Sıra	2	1	3	4

Tablo 6, en küçük en iyi sinyal-gürültü oranına göre yanıt tablosudur. Bu tabloda, Taguchi analizlerine göre parametrelerin etkinlik sırası verilmiştir. Sıra satırı, parametrelerin etkinlik sırasını vermektedir. B parametresi yani kesme hızı 1. sırada çıkararak en etkin parametre olmuştur. Daha sonra etkinlik sırası, A (kesici takım kaplamalı-kaplamasız), C (İlerleme) ve D (Matkap uç açısı) şeklinde gerçekleşmiştir.



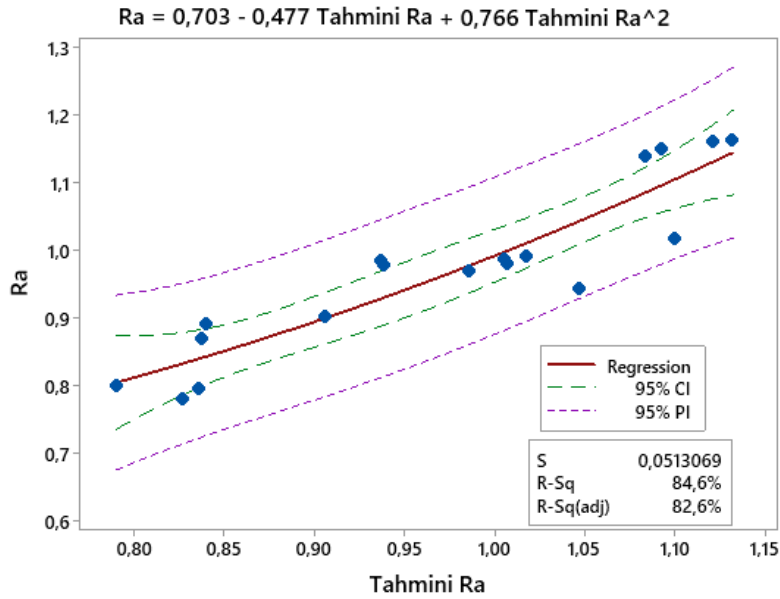
Şekil 7. Kesme Parametrelerinin İdeal Seviyeleri

Şekil 7, parametre seviyelerinin en ideal olanlarını göstermektedir. Taguchi analiz yöntemi ile elde edilen bu grafikte, A parametresinin en ideal seviyesi 2. seviye olan kaplamalı, B parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 25 m/dk., C parametresinin en ideal seviyesi 1. seviye olan 26 mm/dk ve D parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 140° olarak çıkmıştır. Bu sonuçlara göre optimum parametre seviyelerinin dizilimi için A2B3C1D3 dizinini yazabiliriz. Taguchi analizi neticesinde bulunan ideal parametre seviyeleri deney listesi içinde 16. deney (0.799 µm) çıkmıştır. En küçük Ra ölçümleri içinde ise en küçük değer 0.779 µm ile 17. deneyde olmuştur.

Ra için Tahmini Deney Sonuçları

Bu bölümde, deneysel sonuçlar için tahmin edilen değerlerin güven aralığı (CI: Confidence Interval) içinde olup olmadığı belirlenmiştir. Bunu belirlemek için kuadratik regresyon analizi uygulanarak tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 8'de R-Sq değerleri tahmin deneylerinin güven aralığını göstermektedir. Şekillerde bulunan mavi noktalar yapılan deneyleri ifade etmektedir, pembe renkli kesik çizgiler tahmini değerlerin sınırını (PI: Predict Interval) belirtmektedir. Güven aralığı (CI) ise yeşil kesikli çizgilerdir. Kırmızı düz çizgi ise regresyon eğrisidir. Yapılan deneyler (mavi noktalar) regresyon eğrisine ne kadar yakın olursa tahmin deneylerinin güven aralığı (R-Sq) o kadar yüksek çıkar (Gautam vd., 2022)

Taguchi yöntemi ile deneysel sonuçlar ile tahmin edilen değerler arasındaki sonuçlar değerlendirildiğinde, Ra için tahmin edilen değerlerin güven aralığı (CI) limiti %84.6 çıkmıştır. Ra için tahmin edilen değerler ile deney sonuçları güven aralığı limitinin (%95) biraz altında çıkmıştır. Bu değer de kabul edilebilir bir değerdir (Gök, 2015).



Şekil 8. Ra İçin Tahmin Edilen Değerler ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

ANOVA Sonuçları

Bu bölümde Ra için ANOVA sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Varyans analizi %95 güven düzeyi seçilerek gerçekleştirilmiştir. Tabloda bulunan % etki değerleri faktörlerin kesme faktörlerinin yüzde etki derecesini göstermektedir. En etkin faktör %77.29 ile B faktörü (kesme hızı) olmuştur. P değerinin %5'ten küçük olması ise bu model için faktörlerin anlamlı olup olmadığını gösterir. Tabloda sadece B faktörü (kesme hızı) 0.0001 P değeri ile anlamlı çıkmıştır. Diğer faktörler için P değeri %5'ten büyük olduğu için anlamlı çıkmamıştır. Taguchi analizlerinde de en etkin parametre B (kesme hızı) çıkmıştır. ANOVA sonuçları Taguchi sonuçlarını doğrulamaktadır. Elde edilen ANOVA sonuçları parametrelerin katkı oranları ve sıralarına göre literatüre paralel çıkmıştır. Ancak A,C ve D parametrelerinin P değerlerinin yüksek çıkması bu parametrelerin anlamlı olmadığını göstermiştir. A değeri matkabın kaplama özelliği olduğundan ve sayısal olmayan kategorik olarak iki seviyeden (kaplamalı, kaplamasız) oluştuğu için ANOVA sonuçlarında P değeri %5'ten büyük çıkmıştır. Literatürde benzer sonuçların olduğu görülmüştür (Nas, 2021).

Tablo 7. Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	% Etki	Kareler ortalaması	F Değeri	P Değeri
A	1	0,008450	3,29%	0,008450	2,09	0,1791
B	2	0,198455	77,29%	0,099228	24,51	0,0001
C	2	0,006057	2,36%	0,003028	0,75	0,4980
D	2	0,003312	1,29%	0,001656	0,41	0,6749
Hata	10	0,040480	15,77%	0,004048		
Toplam	17	0,256754	100,00%			

Deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçların güvenilir olması gerekmektedir ve bunun ispatı için genellikle varyans analizi uygulanmaktadır. Varyans analizi yapılan çalışmalarda modelin güven düzeyi genellikle %95 olarak alınmaktadır. Deneysel çalışmanın güven düzeyi bu sınırdan veya bu sınıra yakın sonuçlar olması beklenmektedir. Tablo 8, varyans analizinin özetini vermektedir. Tablo 7'de, R² değeri modelin güven düzeyini göstermektedir. Yapılan bu model %84.23 güven düzeyinde çıkmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çıkan bu değerlerin %95 seviyelerine yakın olduğu ve kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

Tablo 8. ANOVA Modelinin Özeti

S	R ²	R ² ortalama	PRESS	R ² ilk	AICc	BIC
0,0636242	84,23%	73,20%	0,131157	48,92%	-18,17	-32,66

Regresyon Analizi

Regresyon analizi, deneysel çalışmalarda kontrol ve deneysel faktörler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda analiz edilecek değişkene göre daha kolay veya daha erken tespit edilebilen değişkenlere dayalı olarak istenilen değişkeni tahmin eden bir modelin oluşturulmasıdır (Akkuş, 2021). Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen matematiksel model Denklem 5 ve Denklem 6'da verilmiştir. Bu model ile farklı parametrelerle yapılacak deneylerde oluşacak yüzey pürüzlülükleri hakkında önceden bilgi sahibi olmamızı sağlayacaktır. Bu da şirketlerde zaman ve enerji kaybını önlemeye yardımcı olacaktır. Yapılan analiz, çok değişkenli regresyon sınıfına girmektedir. Üç nicel değişken arasındaki ilişki ölçülmüştür.

$$\text{Kaplamasız Ra} = 1.477 - 0.02567 * B + 0.00346 * C - 0.000681 * D \quad (5)$$

$$\text{Kaplmalı Ra} = 1.434 - 0.02567 * B + 0.00346 * C - 0.000681 * D \quad (6)$$

Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen kaplamalı ve kaplamasız matkapla yapılan delme işlemine ait matematiksel model Denklem 5 ve 6'da verilmiştir. Bu model ile farklı parametrelerle yapılacak deneylerde oluşacak yüzey pürüzlülükleri hakkında önceden bilgi sahibi olmamızı sağlayacaktır. Denklemler, benzer şartlarda yapılacak çalışmalar için kullanıldığında zaman ve enerji kaybını önlemeye yardımcı olacaktır.

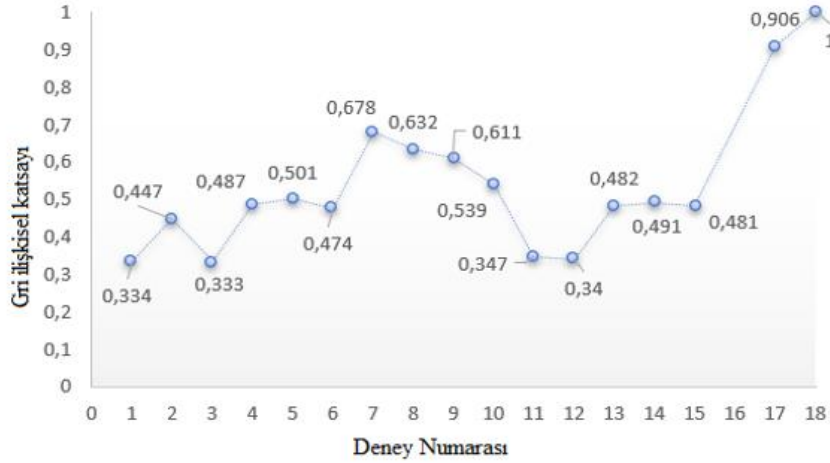
Gri İlişkisel Analiz Sonuçları

Öncelikle "en küçük en iyisidir" yaklaşımına göre normalizasyon yapılmış ve ardından referans serilerinden sapmalar hesaplanmıştır. İkinci olarak, her bir deneyin Gri ilişki katsayıları hesaplanmıştır. Son olarak, Tablo 9'da listelenen sıcaklık için Gri ilişkisel derecenin ortalama değerleri, sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 9. Gri İlişkisel Analiz ve Ölçülen Ra Değerleri

Deney No	A	B	C	D	Ra (µm)	Normalizasyon değeri	Gri ilişkisel katsayı	Gri ilişkisel derece
1	Kaplamasız	15	26	95	1,162	0,002	0,334	17
2	Kaplamasız	15	32	118	1,017	0,380	0,447	14
3	Kaplamasız	15	38	140	1,163	0,000	0,333	18
4	Kaplamasız	20	26	95	0,981	0,474	0,487	10
5	Kaplamasız	20	32	118	0,970	0,502	0,501	8
6	Kaplamasız	20	38	140	0,992	0,445	0,474	13
7	Kaplamasız	25	26	118	0,870	0,763	0,678	4
8	Kaplamasız	25	32	140	0,891	0,708	0,632	5
9	Kaplamasız	25	38	95	0,901	0,682	0,611	6
10	Kaplmalı	15	26	140	0,943	0,572	0,539	7
11	Kaplmalı	15	32	95	1,140	0,059	0,347	15
12	Kaplmalı	15	38	118	1,151	0,031	0,340	16
13	Kaplmalı	20	26	118	0,985	0,463	0,482	11
14	Kaplmalı	20	32	140	0,978	0,481	0,491	9
15	Kaplmalı	20	38	95	0,986	0,460	0,481	12
16	Kaplmalı	25	26	140	0,799	0,947	0,906	3
17	Kaplmalı	25	32	95	0,779	1,000	1,000	1
18	Kaplmalı	25	38	118	0,796	0,955	0,919	2

Gri ilişkisel derecede her zaman en yüksek değere sahip olan istenir. Tablo 8 ve Şekil 6 incelendiğinde, 17. deneyde Gri ilişkisel derece 1 olarak çıkmış ve en yüksek parametre derecesi olduğu bulunmuştur. Böylece, 17. deney, 18 deney arasında eş zamanlı olarak en iyi çoklu performans özelliklerini vermektedir (Tosun, 2006).



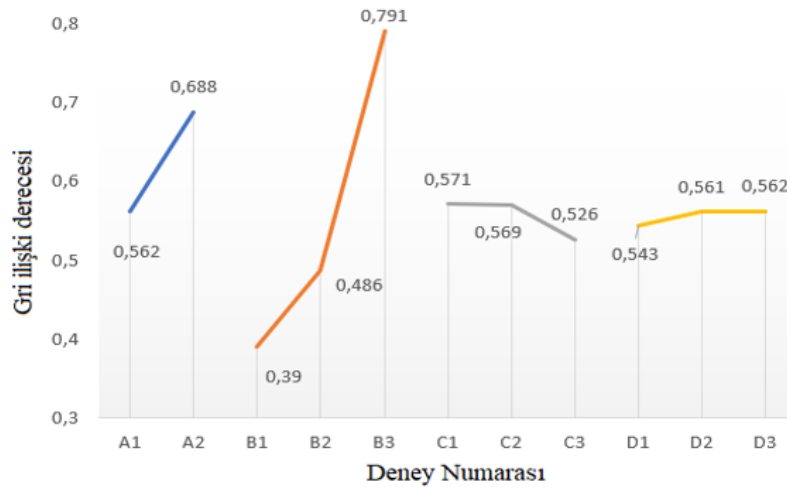
Şekil 6. Deney Numaralarına Göre Gri İlişkisel Katsayıları

Tablo 9'da gösterildiği gibi, her faktör seviyesinin ortalama Gri ilişkisel derecelerini hesaplamak için yanıt tablosu kullanılmıştır. Gri ilişkisel dereceler, referans ve karşılaştırılabilirlik dizileri arasındaki korelasyon seviyesini temsil ettiğinden, daha büyük Gri ilişkisel derece, referans dizisi ile daha güçlü bir korelasyon sergileyen karşılaştırılabilirlik dizisi anlamına gelir (Tosun, 2006).

Tablo 9. Faktör ve Seviyelerinin Gri İlişki Derecesi

Seviyeler	Faktörler			
	A	B	C	D
Seviye 1	0,562	0,390	0,571	0,543
Seviye 2	0,688	0,486	0,569	0,561
Seviye 3		0,791	0,526	0,562

Bu verilere dayanarak, en büyük ortalama yanıtı sağlayan seviyelerin bir kombinasyonu seçilebilir. Tablo 9'da, A2, B3, C1 ve D3 kombinasyonu, sırasıyla A, B, C ve D faktörleri için Gri ilişkisel derecenin en büyük değerini göstermektedir. Bu nedenle, A2B3C1D3 (Şekil 7) şeklinde yazılabilir. A'nın 2. seviyesi, B'nin 3. seviyesi, C'nin 1. seviyesi ve D'nin 3. seviyesi anlamına gelmektedir. Kaplamalı kesici takım, 25 m/dak kesme hızı, 26 mm/dak ilerleme hızı, 140° matkap ucu açısı, delme operasyonlarının en uygun parametre kombinasyonudur. Bu sonuçlar Taguchi analizinde bulunan optimum seviye kombinasyonunu doğrulamaktadır. Aynı zamanda faktör düzeylerinin Ra üzerindeki etkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Gri İlişkisel Analize Göre Faktör Düzeylerinin Ra Üzerindeki Etkisi

SONUÇLAR

Inconel 718 süper alaşımı mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı özellikle havacılık alanında yüksek sıcaklıklar altında çalışan kritik parçalarda kullanılmaktadır. Talaşlı imalat sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan yüksek pürüzlülük değerleri malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar ve korozyona sebep olmaktadır. Bu nedenle işlenmiş yüzeylerde pürüzlülük değerlerinin minimum olması gerekir. Bu çalışmada da Inconel 718 alaşımının delinmesinde oluşan minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü için parametreler optimize edilmiştir. Taguchi L18 deney listesine göre deneyler yapılmış ve Ra sonuçlarına göre Taguchi ve gri ilişkisel analiz ile optimizasyon yapılmıştır. Optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde Taguchi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Taguchi analizinde en küçük ortalama yüzey pürüzlülüğü 0.779 μm ile 17. deneyde çıkmıştır.
- Taguchi analizinde B parametresi yani kesme hızı ortalama yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden parametre olmuştur.
- A parametresinin en ideal seviyesi 2. seviye olan kaplamalı, B parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 25 m/dk., C parametresinin en ideal seviyesi 1. seviye olan 26 mm/dk ve D parametresinin en ideal seviyesi 3. seviye olan 140° olarak çıkmıştır. Bu sonuçlara göre optimum parametre seviyelerinin dizilimi A2B3C1D3 olmuştur.
- Gri İlişkisel analizde de Taguchi' de olduğu gibi en etkin parametre kesme hızı çıkmıştır. Optimum parametre seviyeleri de A2B3C1D3 olarak Taguchi ile aynı çıkmıştır.
- ANOVA'da da en etkin faktör %77.29 ile B faktörü (kesme hızı) olmuştur.
- ANOVA'ya göre yapılan bu model %84.23 güven düzeyinde çıkmıştır.

Tartışma

Yapılan deneylerde Ra 0,779 μm ile 1,163 μm arasında gerçekleşmiştir. Süper alaşımlı çeliklerin delinmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda bu değer aralığının ideal seviyelerde olduğu görülmektedir (Motorcu vd., 2014). En düşük Ra 17. deneyde olurken Taguchi ve gri ilişkisel analizde en ideal deney şartları 16. deneyde gerçekleşmiştir. Her iki deneyin Ra değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır (deney 17: 0,779 μm -deney 16: 0,799 μm).

Ra'ya en etkin parametre kesme hızı olmuştur. Varyans analizinde kesme hızı %77,29 ile en çok katkı sağlayan parametre olmuştur. Kesme hızı arttıkça Ra değeri düşmüştür. Kesme hızları ideal seviyelerin altında veya üstünde olduğu durumlarda ortalama yüzey pürüzlülüğü artmaktadır (Ekmen, 2021). İlerleme değerlerindeki artış ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir. Yüksek ilerleme hızlarında Ra değerleri daha büyük çıkmıştır (Kıvak, 2010; Lotfi vd., 2022).

ANOVA'da Ra değerine en çok katkı yapan parametre %77,29 ile kesme hızı olmuştur. Ayrıca varyans analizinin güven aralığı %84,23 olmuştur. Literatüre göre bu değer kabul edilebilir seviyededir (Nas, 2021).

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi kapsamında yapılmıştır. Deneylerin yapılmasına yardımcı olan Makrotek Makina firmasına ve pürüzlülük ölçümlerinde laboratuvar imkanlarını kullanmamızı sağlayan Amasya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Akgün, M., & Demir, H. (2021). Optimization of cutting parameters affecting surface roughness in turning of inconel 625 superalloy by cryogenically treated tungsten carbide inserts. *SN Applied Sciences*, 3(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04303-2>

Akkuş, H. (2021). AISI 1040 Çeliğinin İşlenebilirliği Sırasında Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Farklı Tahmin Modelleri ile Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 84-92. <https://doi.org/10.17780/ksujes.845344>

- Akkuş, H. (2022). Experimental and statistical investigations of surface roughness, vibration, and energy consumption values of titanium alloy during machining using response surface method and grey relational analysis. *Scientia Iranica B*, 29(1), 109-119. <https://doi.org/10.24200/SCI.2021.57548.5296>
- Alsoruji, G., Muthuramalingam, T., Moustafa, E. B., & Elsheikh, A. (2022). Investigation and TGRA based optimization of laser beam drilling process during machining of Nickel Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 720-730. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.112>
- Asiltürk, I., & Akkuş, H. (2011). Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method. *Measurement*, 44(9), 1697-1704. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.003>
- Bademlioglu, A. H., Canbolat, A. S., & Kaynakli, O. (2020). Multi-objective optimization of parameters affecting Organic Rankine Cycle performance characteristics with Taguchi-Grey Relational Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109483. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109483>
- Benardos, P. G., Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
- Besterfield, D.H., Besterfield, C., Besterfield, G.H., Besterfield, M, (1995). Total quality management. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Chen, Y. C., & Liao, Y. S. (2003). Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 269-273. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00792-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00792-1)
- Çiftçi, İ., Gökçe, H. (2019). Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 22(3), 627-631. <https://doi.org/10.2339/politeknik.450289>
- Durairaj, M., Sudharsun, D., Swamynathan, N. (2013). Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel Using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade. *Procedia Engineering*, 64(0), 868-877. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.163>
- Ekmen, F. H. (2021). Kriyojenik işlem uygulanmış Inconel 718 alaşımlarında delik delme işlemlerinin araştırılması. *Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Erkan, Ö., & Yücel, E. (2018, November). AA 7075 malzeme üzerine delinen delik yüzeylerinin pürüzlülük optimizasyonu ve istatistiki analizi. In *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech)* (pp. 789-795).
- Farid, A. A., Sharif, S., & Namazi, H. (2009). Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity when drilling and hole making in Inconel 718. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1), 564-569. <https://www.jstor.org/stable/26282790>
- Gautam, P. S., Vishnoi, P. K., Gupta, V. K. (2022). A single zone thermodynamic simulation model for predicting the combustion and performance characteristics of a CI engine and its validation using statistical analysis. *Fuel*, 315, 123285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123285>
- Gökçe, H., Yavuz, M., Çiftçi, İ. (2020). An investigation into the performance of HSS drills when drilling commercially pure molybdenum. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(1), 61-70. <https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/65119/1001557>
- Jafarian, F., Umbrello, D., Golpayegani, S., Darake, Z. (2016). Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(13), 1683-1691. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090592>
- Jena, S. P., Mahapatra, S., & Acharya, S. K. (2021). Optimization of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with Karanja biodiesel using Grey-Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 41, 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.579>
- Khanafer, K., Eltaggaz, A., Deiab, I., Agarwal, H., & Abdul-Latif, A. (2020). Toward sustainable micro-drilling of Inconel 718 superalloy using MQL-Nanofluid. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(7), 3459-3469. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05112-4>

- Khanna, N., Agrawal, C., Gupta, M. K., & Song, Q. (2020). Tool wear and hole quality evaluation in cryogenic Drilling of Inconel 718 superalloy. *Tribology International*, 143, 106084. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106084>
- Khanna, N., Agrawal, C., Dogra, M., & Pruncu, C. I. (2020). Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of inconel 718 using sustainable machining technique. *Journal of materials research and technology*, 9(3), 5794-5804. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.104>
- Kıvık, T., Habalı, K., & Şeker, U. (2010). Inconel 718'in delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve talaş oluşumu üzerindeki etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6684/88477>
- Kumar, S., Singh, D., Kalsi, N. S. (2017). Experimental investigations of surface roughness of Inconel 718 under different machining conditions. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1179-1185. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.135>
- Lotfi, M., Farid, A. A., Akbari, J., Sharif, S., & Mohrni, A. S. (2022). Evaluation of surface integrity when drilling Inconel 718 through experimental measurement and finite element analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(7), 4237-4248. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08354-y>
- Mohamed, M. F., Lenin, K. (2020). Optimization of Wire EDM process parameters using Taguchi technique. *Materials Today: Proceedings*, 21, 527-530. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.662>
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. *John wiley & sons*. Inc. Arizona.
- Motorcu, A. R., Kuş, A., & Durgun, I. (2014). The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy. *Measurement*, 58, 394-408. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.012>
- Nas, E., Özbek, O., Bayraktar, F., & Kara, F. (2021). Experimental and statistical investigation of machinability of AISI D2 steel using electroerosion machining method in different machining parameters. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/1241797>
- Ozcelik, B., Oktem, H., Kurtaran, H. (2005). Optimum surface roughness in end milling Inconel 718 by coupling neural network model and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(3), 234-241. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2175-7>
- Özlü, B., Akgün, M., & Demir, H. (2019). AA 6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 151-158. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gmbd/issue/48368/548363>
- Sahoo, A. K., Jeet, S., Bagal, D. K., Barua, A., Pattanaik, A. K., & Behera, N. (2022). Parametric optimization of CNC-drilling of Inconel 718 with cryogenically treated drill-bit using Taguchi-Whale optimization algorithm. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1591-1598. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.121>
- Selvan, T. A., Kotha, M. S., Chinamilli, N. S., Dattatreya, G. G., Rajesh, S., Akshey, P. B., & Madhankumar, S. (2022). Taguchi-based grey relational study for multiple criterion optimization on process variables for micro Electro-chemical Machining of Inconel Super-alloy. *Materials Today: Proceedings*, 62, 882-888. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.060>
- Shah, D. R., Pancholi, N., Gajera, H., Patel, B. (2022). Investigation of cutting temperature, cutting force and surface roughness using multi-objective optimization for turning of Ti-6Al-4 V (ELI). *Materials Today: Proceedings*, 50, 1379-1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.285>
- Sheheryar, M., Khan, M. A., Jaffery, S. H. I., Alruqi, M., Khan, R., Bashir, M. N., & Petru, J. (2022). Multi-Objective Optimization of Process Parameters during Micro-Milling of Nickel-Based Alloy Inconel 718 Using Taguchi-Grey Relation Integrated Approach. *Materials*, 15(23), 8296. <https://doi.org/10.3390/ma15238296>
- Singh, P.N., Raghukandan, K., Pai, B.C. (2004). Optimization by Grey relational analysis of EDM parameters on machining Al-10%SiCP composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156(0), 1658-1661. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.322>

Tosun, N. (2006). Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 450-455. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2386-y>

Yaka, H., Uğur, L., & Akkuş, H. (2016). AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün çoklu regresyon ile incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 770-775. <https://doi.org/10.5578/fmbd.34280>

Yavuz, M., Gökçe, H., Çiftçi, İ., Gökçe, H., Yavaş, Ç., Şeker, U. (2020). Investigation of the effects of drill geometry on drilling performance and hole quality. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 4623–4633. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04843-3>

Yessian, S., & Varthanan, P. A. (2020). Optimization of performance and emission characteristics of catalytic coated ic engine with biodiesel using grey-taguchi method. *Scientific reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57129-9>

Yurtkuran, H., Korkmaz, M.E., Günay, M. (2016). Modelling and optimization of the surface roughness in high speed hard turning with coated and uncoated CBN insert. *Gazi University Journal of Science*, 29(4), 987-995. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gujs/issue/27537/289712>

Zhu, D., Zhang, X., & Ding, H. (2013). Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 64, 60-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001>

Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Zheng, Y., Chen, L. (2018). Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 259(April), 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.044>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.09.2022
Kabul Tarihi : 28.10.2022

Received Date : 06.09.2022
Accepted Date : 28.10.2022

ARAMA ALGORİTMALARININ YOL PLANLAMASI PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

PERFORMANCE ANALYSIS OF SEARCH ALGORITHMS FOR PATH PLANNING

Mehmet GÖK^{1*} (ORCID: 0000-0003-1656-5770)
Öznur Şifa AKÇAM² (ORCID: 0000-0003-1458-3342)
Mehmet TEKEREK³ (ORCID: 0000-0001-6112-3651)

¹ Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Dijital Oyun Tasarımı Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
^{2,3} Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilişim Sistemleri Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet GÖK, gokmehmet@outlook.com

ÖZET

Haritası bilinen ya da bilinmeyen herhangi bir ortamda, otonom mobil robotların başlangıç noktasından hedef noktasına en az maliyetle ve en hızlı ulaşımı yol planlaması ile gerçekleştirilir. Yol planlamasında alternatif yollar arasında optimum yolun seçimi önemlidir. Bu çalışmada, yol planlama görevini yerine getirmek amacıyla farklı arama yaklaşımlarına sahip algoritmaların Robot İşletim Sistemine (ROS) entegrasyonu ve performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla, tasarımı görüntü işleme yazılımı kullanılarak yapılan ve RViz arayüzünde yayınlanan örnek haritalar üzerinde BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT algoritmaları kullanılarak yol planlaması gerçekleştirilmiştir. Yol planlama işleminin değerlendirilmesi için en kısa yol ve en kısa süre ölçütleri dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular, en kısa yolun planlanmasında A*; en kısa sürede planlama işleminin gerçekleştirilmesinde ise DFS algoritmasının ön plana çıktığını göstermektedir. Ayrıca, çalışmada literatüre katkı olarak, ROS ortamında farklı senaryolar için kullanılacak algoritmaların performans ölçümü için bir test ortamı da sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yol planlama, arama algoritmaları, GIMP, ROS, RViz

ABSTRACT

In any environment, whether the map is known or unknown, the fastest and least costly transportation of autonomous mobile robots from the starting point to the target point is realized by path planning. In path planning, it is important to choose the optimum route among alternative paths. In this study, the integration of algorithms with different search approaches into the Robot Operating System (ROS) and their performance were compared in order to fulfill the path planning task. For this purpose, path planning was carried out using BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* and RRT algorithms on sample maps designed using image processing software and published in the RViz interface. The shortest route and shortest time criteria were taken into account for the evaluation of the path planning process. Obtained findings show that A* in planning the shortest route; It shows that the DFS algorithm comes to the forefront in realizing the planning process in the shortest time. In addition, as a contribution to the literature, a test environment for the performance measurement of algorithms that can be used for different scenarios in the ROS environment is presented.

Keywords: Path planning, search algorithm, GIMP, ROS, Rviz

GİRİŞ

Bir nesnenin, insanın ya da aracın; bulunduğu konumdan farklı bir konuma hareket etmesi için iki konum arasındaki güzergâhların belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Güzergâh belirlemede bulunulan konum başlangıç noktasını, gidilmek istenen konum ise hedef noktayı temsil eder. Başlangıç noktasından hedef noktaya gidilebilecek birçok yol bulunabilir. Yollar arasından en kısa mesafe ve en kısa sürede hedef noktaya ulaşmayı sağlayacak olan yol tercih edilmektedir. Bu durum, navigasyon sistemlerinde, mobil robotların hareketinde ve insansız araçların hareket kontrolünün sağlanması gibi alanlarda yol planlama problemi olarak tanımlanmaktadır (Zhang vd., 2018). Yol planlama probleminde amaç; başlangıç noktasından hedef noktaya en kısa yoldan, çarpışmasız (collision free) ve en hızlı şekilde ulaşabilmektir (Koubâa vd., 2018). Bu amacı gerçekleştirebilmek için yollar arasında arama yapılır. Söz konusu yolu arama işlemi ise bir problem çözme yöntemi olduğu için uygulanabilirliğini sınırlayan faktör, verimlilik ile ilgilidir (Korf, 1999). Verimliliği belirleyen unsurlar ise ortam haritasının bilinip bilinmediği, engellerin boyutları ve konumları, iki konum arasındaki en kısa mesafe ile bu mesafeyi gitmek için gereken süre bilgileridir.

Yol planlama probleminde, başlangıç, hedef ve aradaki noktalara ait bilgilerin nasıl saklandığına bağlı olarak bir liste, dizi (array), ağaç (tree) ya da çizge (graph) üzerinde arama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem için arama algoritmaları kullanılır. Arama algoritmaları, bilmeden arama (uninformed search) ve bilerek arama (informed search) olmak üzere iki farklı arama stratejisi kullanılmaktadır (Pathak vd., 2018). Bilmeden arama yaklaşımında kullanılan algoritmalar, problemin tanımı ve çözüm ile ilgili bilgiye sahip değildir. Bu algoritmalarda sadece mevcut durum bilinir ve olası tüm durumlara mevcut durum üzerinden ulaşılacağı varsayılmaktadır. Bilerek arama algoritmalarında ise çözümü verimli hale getirmek için sezgisel (heuristic) bir yaklaşım kullanılmaktadır (Edelkamp & Schrod, 2011; Pathak vd., 2018).

Arama algoritmaları; ihtiyaca göre yol planlama görevini (path planning task), önceden bilinen bir harita üzerinde ya da bilinmeyen bir ortamda gerçekleştirebilir (Dewang vd., 2018). Örneğin bir temizlik robotu, tam kapsama işlemini gerçekleştirebilmek için ortamın harita bilgisine ihtiyaç duyar. Öte yandan bir arama kurtarma robotu, yoğunlukla bilinmeyen bir ortamda çalışır. Bu ayrışma, arama algoritmalarının bilerek ya da bilmeden arama yaklaşımında bulunmasının önem kazanmasına neden olmuş ve araştırmacıları farklı algoritmalar üzerinde çalışma yapmaya yönlendirmiştir (Kaur, 2019).

Literatürde yer alan yol planlama algoritmaları olarak da kullanılan arama algoritmaları klasik, sezgisel (heuristic) ve çizge (graph) algoritmaları olarak sınıflandırılabilir (Patle vd., 2019). Hücre ayrışımı (cell decomposition), potansiyel alan (potential field), örnekleme tabanlı (sampling based) gibi yöntemler klasik yöntemler içerisinde yer alır (Mac vd., 2016; Injarapu & Gawre, 2017). Bu yöntemler, yol planlama probleminin araştırıldığı ilk yıllarda yaygın olarak kullanılmıştır (Campbell vd., 2020; Tan vd., 2021). Fakat klasik yöntemlerin küresel optimizasyon ve zaman karmaşıklığı gibi konulardaki eksikliklerinden dolayı sezgisel yöntemlerin öne çıktığı görülmektedir (Koubâa vd., 2018). Doğadan esinlenilerek geliştirilen genetik (genetic) (Tuncer & Yildirim, 2012; Samadi & Othman, 2013), parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization) (Wang vd., 2018; Zhang vd., 2021), karınca kolonisi optimizasyonu (ant colony optimization) (Dorigo vd. 2006; Akka & Khaber, 2018) gibi algoritmaların yer aldığı; yapay sinir ağı (Shamsfakhr & Bigham, 2017; Sung vd., 2021) ve bulanık mantık (Pradhan vd., 2009; Mohanty vd., 2020) gibi yaklaşımlar ile oluşturulan sezgisel yöntemler klasik yöntemlere göre daha verimli çözüm üretmek için tasarlanmıştır. Ayrıca son yıllarda A*, Dijkstra, Belman-Ford gibi çizge arama algoritmaları da geliştirilmiştir (Siegwart vd., 2011; Koubâa vd., 2018).

Yol planlama algoritmalarının karşılaştırılması ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; He vd., (2021), A* ve RRT algoritmalarını kullanarak 2B labirent üzerinde yol planlaması gerçekleştirmiştir. Deneysel gözlemler Matlab ortamında yapılmıştır. Performans ölçütü olarak yol uzunluğu, zaman ve keşfedilen düğümler incelenmiş ve algoritmaların labirentteki yol planlama performansları karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar çalışmanın sonunda, A*'ın labirenti verimli ve hızlı bir şekilde geçmek için, RRT'nin ise labirenti keşfetmek açısından uygun olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yol planlama problemine çözüm önerisi sunmak için farklı özellikli algoritmaların bir arada kullanıldığı çalışmalar da vardır. Wang vd., (2018) yapmış oldukları çalışmada, RRT, Dijkstra ve A* algoritmaları ile dinamik pencere yaklaşımını (Dynamic Windows Approach-DWA) beraber kullanarak robotun navigasyon görevini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarını Robot İşletim Sisteminin (ROS) sağlamış olduğu Gazebo

simülasyon ortamında ve Rviz (ROS Visualization) görüntüleme aracında test etmişlerdir. Yol uzunluğu ve planlaması, ortalama hız ile çalışma zamanı ölçütlerini performans değerlendirmesi için kullanmışlardır.

Yol planlama sorunu; oyun endüstrisinde de çözülmek istenen problemlerden biridir. Barnouti vd., (2016) tarafından yapılan çalışmada, strateji oyunlarından görüntüler ve labirent (maze) görüntüleri kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından Visual Basic programlama dili ile bir deney ortamı tasarlanmış ve A* algoritmasını kullanarak görüntüler üzerinde iki nokta arasındaki en kısa yolu bulmaya çalışmıştır. Permana vd., (2018) de labirent tabanlı oyunlarda tercih edilebilecek uygun algoritmayı bulmak için Maze Runner oyununda A*, Dijkstra ve enine öncelikli arama (Breadth First Search) algoritmalarının yol planlama performanslarının analizini gerçekleştirmiştir. Labirent oyununda (maze game) en hızlı ve en güvenilir rotayı bulmak için Iloh, (2022), aynı boyutta farklı engelleri bulunan üç labirent ile DFS, BFS ve A* algoritmalarının performanslarını labirentleri çözme süreleri ve yol uzunluğu açısından karşılaştırmıştır.

Oyunlarda yol planlama problemine çözüm sunmak ve mobil robotların en kısa yoldan hedefe ulaşabilmelerini gözlemlemek için labirent yapısı kullanılabilir. Aqel vd., (2017), enine öncelikli arama (Breadth First Search), en iyi en önce arama (Best First Search) ve A* algoritmalarını karşılaştırmış, mobil robotun labirenti çözme süresini azaltan ve en kısa yolu bulabilen bir yöntem önermişlerdir. BFS algoritması ile geliştirdikleri yöntemi ve duvar takip yöntemini gerçek labirentler üzerinde test ederek performanslarını değerlendirmişlerdir.

En kısa yol problemine çözüm bulmak için farklı algoritmaların incelendiği çalışmalar da vardır. Bu çalışmalarda, Chan vd., (2016), Dijkstra, Simetrik Dijkstra, A*, Belman-Ford, Floyd-Warshall ve Genetik algoritmalarının yol planlama performanslarını otobüs güzergahına ait örnek veriler ile zaman ve mesafe açısından karşılaştırmıştır. AbuSalim vd., (2020) ise Dijkstra ve Bellman-Ford algoritmalarını başlangıç ve hedef düğüm arasındaki en kısa yolu bulmak için geçen süre açısından karşılaştırmışlardır. AbuSalim ve ekibinin elde ettiği sonuçlara göre; düğüm sayısı az olduğunda Bellman-Ford algoritmasının en kısa yolu bulma süresi Dijkstra algoritmasına göre daha kısadır. Düğüm sayısı arttıkça Bellman-Ford algoritmasının verimliliği düşerken Dijkstra algoritmasının verimliliği artmakta ve en kısa yolu daha hızlı bulmaktadır.

Yol planlama görevinde; ortamın harita bilgisi, arama uzayının boyutu, ortamda bulunan engellerin hareketli ya da hareketsiz olması arama algoritmalarının performansını etkileyen faktörlerdir. Arama algoritmalarını aynı ortamda test edebilmek için bu faktörlerin etkisini en aza indirerek deney ortamının oluşturulması gerekmektedir. Bu çalışmada ortamın haritasının önceden bilindiği, sabit boyutlu bir harita kullanıldığı ve engellerin hareketsiz olduğu varsayılarak deney ortamını temsil eden ikili labirent (binary maze) tasarlanmıştır. Bu varsayımlar doğrultusunda ikili labirent üzerinde BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT algoritmalarının performans analizlerinin yapılması ve en verimli algoritmanın bulunması hedeflenmiştir. Bu algoritmaların tercih edilmesinin nedeni, ikili labirent veri yapısı için kolaylıkla uyarlanabilir olmalarıdır. İkili labirent veri yapısı ise, ROS ortamında haritalama için kullanılan ızgara haritası (grid map) veri yapısına kolaylıkla dönüştürülebilmektedir. Seçilen algoritmaların performans analizini gerçekleştirmek için planlanan yol uzunluğu (path length) ve planlama süresi ölçütleri karşılaştırılmıştır. Labirentte yol planlama görevi için arama algoritmalarının karşılaştırıldığı çalışmalar vardır ancak belirtilen görev için altı arama algoritmasının karşılaştırılması analizinin yapıldığı çalışmaya rastlanmamıştır.

Araştırma kapsamında; GIMP (GNU Image Manipulation Program) görüntü işleme yazılımı ile boyutları aynı engelleri farklı olan üç farklı ikili labirent haritası hazırlanmıştır (GIMP, 2022). Bu haritalar ve seçilen algoritmaların planladığı yollar Rviz aracı kullanılarak görselleştirilmiştir. Planlanan yol uzunluğu ve algoritmaların planlama süreleri hesaplanmıştır.

YÖNTEM

Bu çalışmada; boyutları aynı, engel yapısı farklı üç harita üzerinde BFS, DFS, Dijkstra, Belman-Ford, A* ve RRT algoritmalarının yol planlama performanslarının analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz için algoritmaların planladıkları yolun uzunlukları ve planlama süreleri değerlendirme ölçütü olarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan algoritmalar aşağıda tanımlanmıştır.

Çalışmada Kullanılan Algoritmalar

Enine Öncelikli Arama (Breadth First Search) Algoritması

BFS algoritması ağaç veya çizge üzerinde dolaşmak için kullanılır (Pathak vd., 2018). Enine yayılım ile en yakındaki düğümler taranarak uzaktaki düğümlere gidilir (Indriyono, 2021). Dolaşılan düğümlere ait bilgiler, ilk giren ilk çıkar (FIFO-First in first out) kuyruk (queue) veri yapısında tutulmaktadır (Paulino vd., 2021).

Derinine Öncelikli Arama (Depth First Search) Algoritması

DFS algoritması ağaç veya çizge üzerinde dolaşmak için kullanılan özyinelemeli (recursive) bir algoritmadır. Arama uzayında sürekli derine inerek arama işlemi gerçekleştirir. Dolaşılan düğümlere ait bilgiler son giren ilk çıkar (LIFO – Last in first out) yığın (stack) veri yapısında tutulmaktadır (Pathak vd., 2018; Paulino vd., 2021).

Dijkstra Algoritması

Dijkstra algoritması; çizge tabanlı ve açgözlü (greedy) (Tan vd., 2021) yaklaşımına dayanan en kısa yolu en az maliyetle hesaplamayı amaçlayan bir algoritmadır. Dijkstra algoritmasında başlangıçta; kaynak düğümün mesafesi 0, diğer düğümlerin mesafesi sonsuz (∞) olarak kabul edilir. Kaynak düğümden erişilebilen komşu düğümlere olan mesafeler hesaplanır. Komşu düğümlerden en kısa mesafeye sahip düğüm seçilir ve diğer düğümlerin mesafesi bu düğüme göre güncellenir. Algoritma, hedef düğümü bulana kadar özyinelemeli olarak çalışır (Chan vd., 2016; Mukhlif & Saif, 2020).

Bellman-Ford Algoritması

Bellman-Ford algoritması; çizge tabanlı ve tek kaynaklı yol planlama problemini çözmek için kullanılan bir algoritmadır (AbuSalim vd., 2020). Çalışma yapısı olarak Dijkstra algoritmasına benzemektedir. Kaynak düğümden başlayarak diğer düğümlere gidilebilecek en kısa yol maliyetini hesaplamayı hedefler. Algoritmanın başlangıcında; kaynak düğümün maliyeti (mesafe) 0, diğer düğümlerin maliyeti sonsuz (∞) olarak kabul edilir. Komşu düğümlere erişim oldukça diğer düğümlere olan uzaklık değerleri güncellenir (Chan vd., 2016).

A* Algoritması

A* algoritması; sezgisel (heuristic) arama yaklaşımına dayanır (Debnath vd.,2019). İki konum arasındaki en kısa yolu bulmayı hedefler. A* algoritması iki konum arasındaki maliyeti hesaplar; başlangıç düğümünün komşu düğümlere olan gerçek uzaklık değerini ($g(n)$) ve komşu düğümlerin hedef noktaya olan sezgisel yani tahmini uzaklık değerini ($h(n)$) dikkate alır (Mukhlif & Saif, 2020). Eşitlik 1’de görüldüğü gibi gerçek uzaklık değeri ile sezgisel uzaklık değerinin toplamı ($f(n)$); başlangıç noktasından hedef noktaya bulunan yolun maliyetinin en iyi tahminini verir.

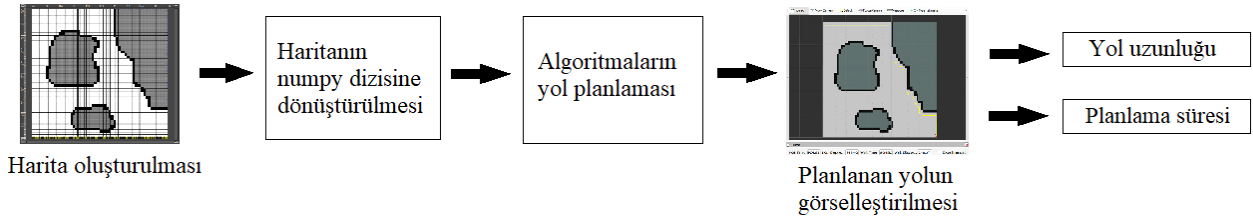
$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

Hızlı Rastgele Keşfeden Ağaçlar (Random Rapidly Exploring Trees) Algoritması

RRT algoritması; örnekleme tabanlı (sample based) bir algoritmadır (Tan vd., 2021). Rastgele (stokastik) değerler üreterek olasılıksal bir yaklaşımla arama işlemini gerçekleştirir (Niu vd., 2021). RRT algoritmasında başlangıç noktası kök düğüm olarak belirlenir. Arama uzayında rastgele bir alan belirlenir. Rastgele değerlerin üretilmesi ile kök düğüme en yakın yaprak düğümler ağaca eklenir ve rastgele genişletilmiş bir ağaç oluşturulur. Hedef noktaya ulaşıncaya kadar ağaç genişletilmeye devam edilir. Bu şekilde başlangıç düğümünden hedef düğüme doğru bir yol oluşur (Elbanhawi & Simic, 2014). RRT algoritması arama kurtarma çalışmaları gibi arama uzayının bilinmediği durumlarda etkin çözümler sunabilir. Ancak rastgele değerler üreterek keşfedilmemiş bölgeleri aramaya yöneldiği için hem en az maliyetli ve en kısa yolu bulması hem de her defasında başlangıç ve hedef nokta arasında aynı yolu bulması mümkün olmamaktadır (He vd., 2021).

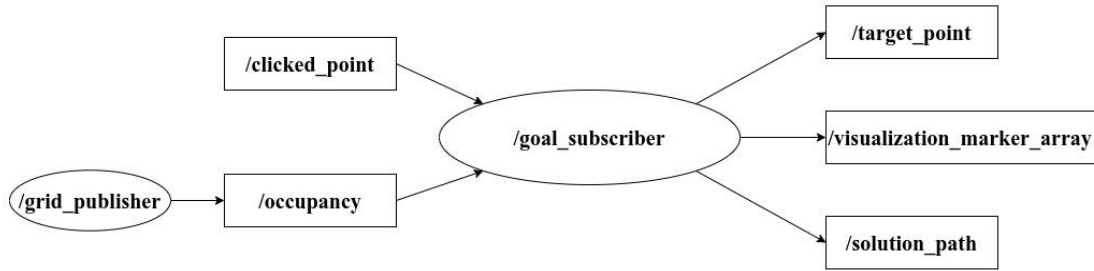
Deney Ortamının Kurulması

Algoritmaların test edileceği deney ortamı, algoritmaların uygulanacağı haritanın oluşturulması, haritanın iki boyutlu *numpy* dizisine dönüştürülmesi, arama algoritmalarının yol planlama görevini gerçekleştirmesi ve RViz görüntüleme aracında planlanan yolun görselleştirilmesi süreçlerini içermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Deney Ortamının Oluşturulması

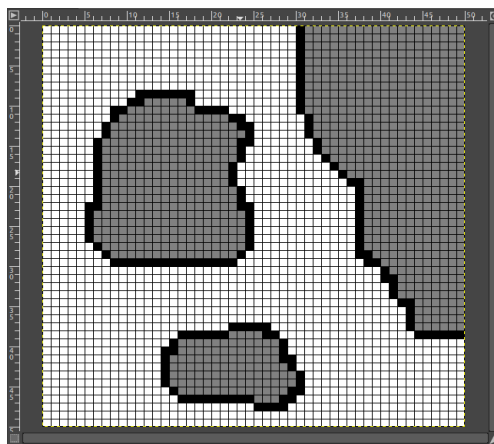
ROS düğümlerinde (ROS Nodes) seçilen algoritmalar kullanılarak hem planlanan yolun harita üzerindeki görüntüsünün elde edilmesinde hem de yol uzunluğu ve planlama sürelerinin hesaplanmasında Python programlama dili ve *rospy* kütüphanesi kullanılmıştır. ROS düğümlerinin hesaplama grafiğini, düğümleri, abone olunan ve yayınlanan ROS başlıkları (ROS topics) ile veri akışını gösteren (ROS computation graph) diyagram Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. ROS Düğümleri Hesaplama Grafiği

Şekil 2’de verilen diyagramda, ROS düğümleri oval, başlıklar ise dörtgen şekillerde verilmiştir. *clicked_point* başlığı ile tıklanan noktaya yol planlaması, RViz arayüzünde harita üstünde tıklanan noktanın koordinatlarının yayınlanması sağlanır. *target_point* başlığı ise tıklanan hedef noktada X işaretinin RViz arayüzünde görüntülenmesi için kullanılır. *solution_path* başlığı ile planlanan yolun noktalar halinde görüntülenmesi sağlanır. *visualization_marker_array* başlığı ile noktalar arasında çizgisel işaretleme yapılır.

Haritanın oluşturulması için GIMP görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3). Görüntü dosyası PGM (Portable Gray Map) formatında olup ROS’un gmapping haritalama paketi tarafından kullanılan formattır. Görüntü dosyası bir Python script ile arama algoritmalarının üzerinde hareket edebileceği iki boyutlu bir *numpy* dizi (array) biçimine dönüştürülmektedir. Algoritmalar aracılığıyla dizi üzerindeki noktalarda engel olup olmadığını kontrol ederek başlangıç noktasından hedef noktaya nasıl gidileceğine dair yol planlanır.



Şekil 3. GIMP Ortamında *Occupancy Grid* Oluşturulması

ROS ortamındaki haritalar, robotun bulunduğu ortamın fiziksel olarak dolu olması durumunu ifade eden *occupancy grid* adı verilen iki boyutlu bir dizi biçiminde saklanmaktadır. *Occupancy grid* için üç bölge tanımlanmıştır: serbest alan, bilinmeyen alan ve engeli teşkil eden alan. Bu alanların görüntü dosyasındaki piksel renk değerleri Tablo 1’de

verilmiştir. Görüntü işleme yazılımı ile oluşturulan harita 50 piksel x 50 piksel boyutunda olup; harita çözünürlük oranı 0,1 olarak seçilmiştir. Buna göre 10 piksel, 1 metrelik uzunluğa karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Harita Alan Değerleri

	Occupancy Değeri	Piksel Renk Değeri
Bilinmeyen Alan (Unknown)	-1	128 (Gri)
Serbest Alan (Free)	0	255 (Beyaz)
Engelli Alan (Occupied space)	100	0 (Siyah)

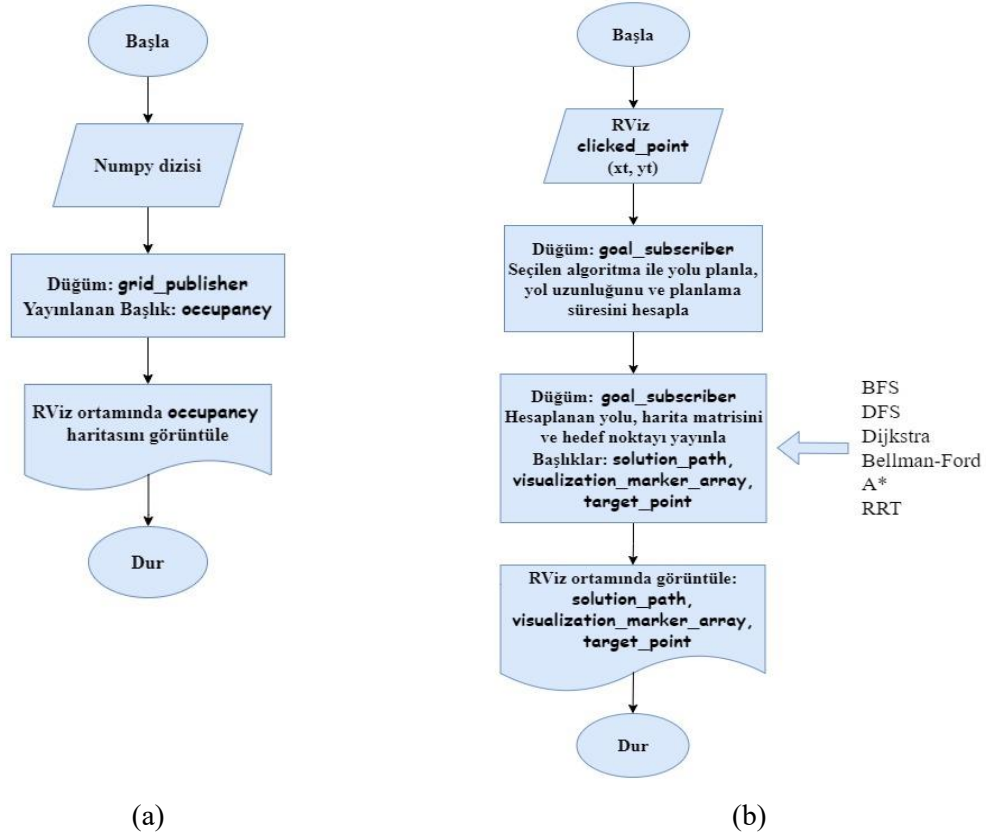
Görüntüden *numpy* dizisine dönüştürülen harita, *grid_publisher* adlı bir düğüm tarafından occupancy başlığı altında yayınlanmakta ve RViz aracı ile görüntülenmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. GIMP Ortamında Oluşturulan Haritanın RViz Aracında Görüntülenmesi

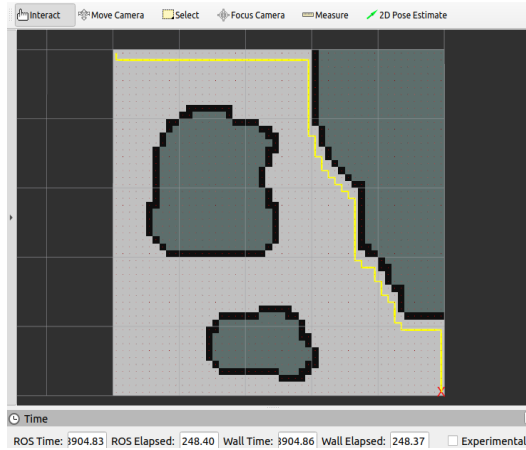
grid_publisher düğümü, harita dizisini işlerken, piksel renk değerlerini occupancy değerlerine dönüştürmektedir. Yayınlanan harita bilgisi, aboneler tarafından ikili labirent (binary maze) olarak işlenebilmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, harita üzerindeki serbest alanlar açık gri ile, engeller ise siyah ile gösterilmektedir. Koyu gri ile gösterilen alan ise bilinmeyen ya da keşfedilmemiş bölgeyi (unexplored area) ifade etmektedir.

RViz aracında görüntülenen harita üzerinde tıklanan herhangi bir noktaya $(0, 0)$ noktasından yol planlaması yapılmaktadır. Yol planlaması yapan *goal_subscriber* adlı düğüm, labirent matrisini, seçilen arama algoritması ile çözüp hesaplanan yolu (planned path) ve hedef noktayı yayınlayıp RViz üzerinde görüntülenmesini sağlar. Şekil 5 (a) ve Şekil 5 (b)' de sırasıyla RViz ortamında yayınlanan haritaya ve planlama algoritmalarının çalışmasına ilişkin akış diyagramlarına yer verilmektedir.



Şekil 5. a. Harita Yayını Akış Diyagramı, b. Yol Planlama Algoritmaları Çalıştırılması Akış Diyagramı

goal_subscriber düğümü RViz tarafından yayınlanan clicked_point adlı başlığa abone olarak, tıklanan hedef nokta koordinatlarını alır ve seçilen algoritmaya göre yol planlamasını yapar. Şekil 6'da örnek olarak planlanmış yol ve tıklanmış hedef koordinat kırmızı renkli X işareti ile gösterilmektedir.



Şekil 6. Planlanan Yolun RViz Ortamında Görüntülenmesi

Bu çalışmada kullanılan arama algoritmaları, normalde düğüm ve kenarlar üzerinde çalışan sürümlerinden binary maze formatındaki iki boyutlu dizi üzerinde çalışan sürümlerine dönüştürülmüştür. Planlama yapan goal_subscriber düğümü, seçilen algoritmayı bu dizi üzerinde çalıştırmaktadır. Planlama işlemi tamamlandıktan sonra hesaplanan yol için uzunluk ve hesaplama süresi de terminal penceresi üzerinde yazılarak, kullanıcıya bilgi verilmesi sağlanmıştır.

Deney

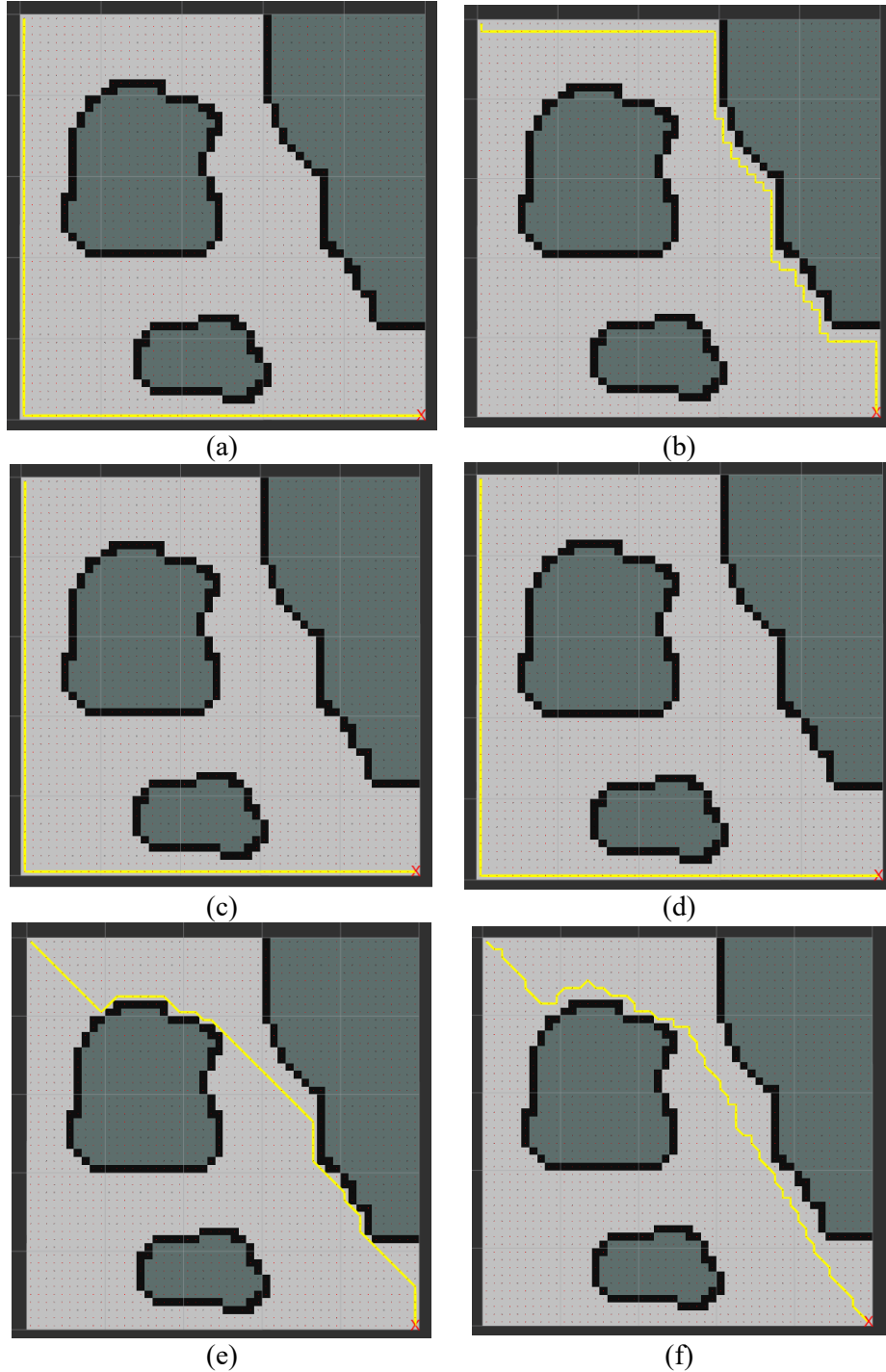
Araştırma sürecinde planlanan testler, Intel Core i7 4510U işlemci, 8 GB DDR3 RAM, Nvidia GT840M ekran kartı özelliklerine sahip, Ubuntu 20.04 işletim sistemi kurulu bilgisayarda üç farklı harita üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her

bir harita için ayrı ayrı seçilen 6 farklı algoritmanın yol planlamasını yapması ve planlama zamanı karşılaştırılarak hangi durumda hangi algoritmanın başarılı olduğu yönünde bir karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Birinci Harita Yol Planlaması ve Süreleri

Görüntü işleme yazılımı ile oluşturulan harita 50 piksel x 50 piksel boyutunda olduğu ve harita çözünürlük değeri 0,1 olarak seçildiği için tasarlanan harita 5 metre x 5 metre boyutundadır. Birinci harita için; (0, 0) başlangıç noktasından (49, 49) hedef noktasına BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT algoritmaları kullanılarak yapılan yol planlaması görülmektedir (Şekil 7).



Şekil 7. Birinci Harita için (0, 0) Başlangıç Noktasından (49, 49) Hedef Noktasına a. BFS, b. DFS, c. Dijkstra, d. Bellman-Ford, e. A* ve f. RRT Algoritmaları ile Yol Planlamasının Gerçekleştirilmesi

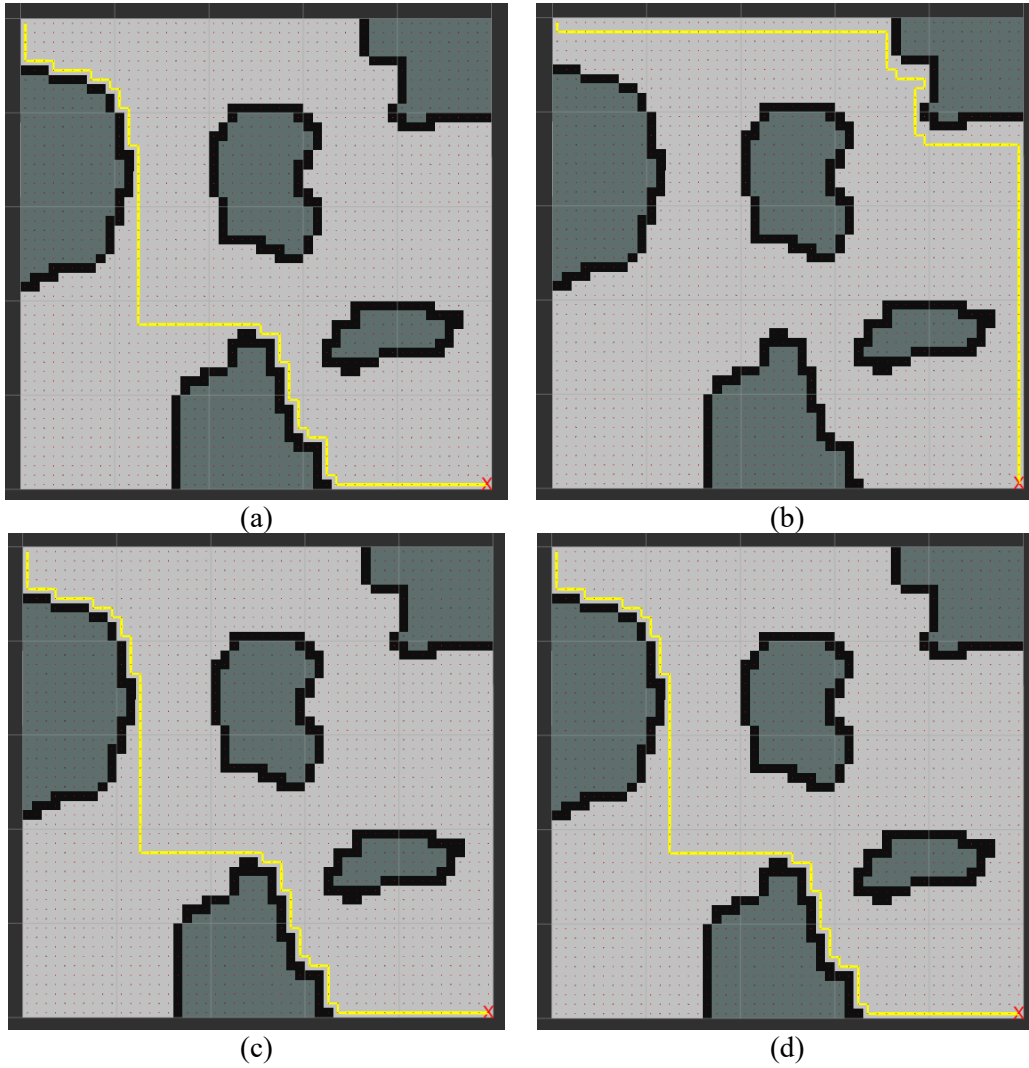
Şekil 7’de gösterilen hesaplanan yol uzunluklarının 0,1 ile çarpılması sonucunda metre cinsinden mesafeler bulunur. Birinci harita için test edilen algoritmaların yol uzunluklarına göre yol planlama görevini gerçekleştirme süreleri Tablo 2’de verilmiştir.

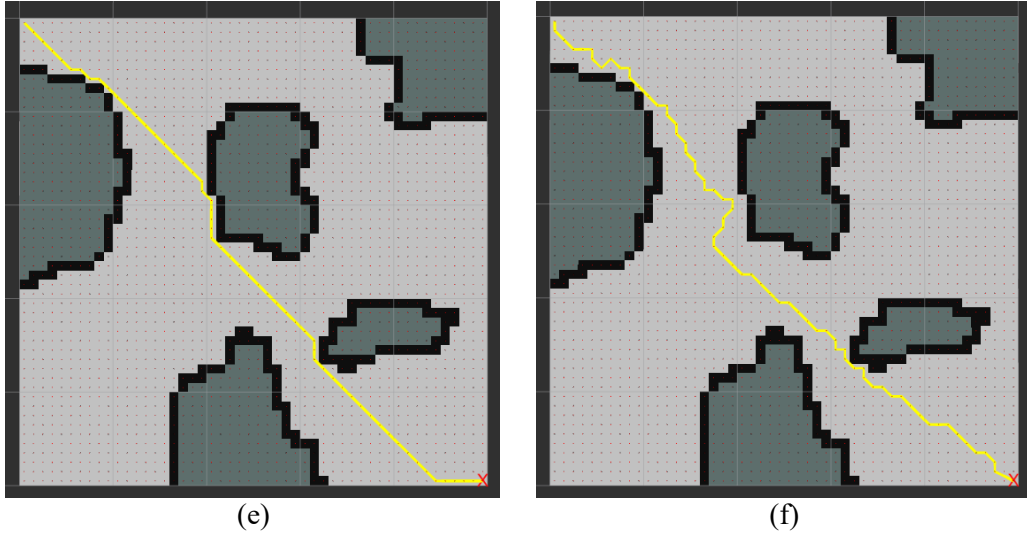
Tablo 2. Birinci Harita için Yol Planlama Görevini Gerçekleştiren Algoritmalara Ait Yol Uzunluğu ve Planlama Süreleri

Algoritma	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)
BFS	9,80	0,004491
DFS	9,80	0,000802
Dijkstra	9,80	0,059042
Bellman-Ford	9,80	0,062946
A*	7,856	0,028852
RRT	8,525	0,067119

İkinci Harita Yol Planlaması ve Süreleri

İkinci harita için; $(0, 0)$ başlangıç noktasından $(49, 49)$ hedef noktasına BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT algoritmaları kullanılarak yapılan yol planlaması görülmektedir (Şekil 8).





Şekil 8. İkinci Harita için (0, 0) Başlangıç Noktasından (49, 49) Hedef Noktasına **a.** BFS, **b.** DFS, **c.** Dijkstra, **d.** Bellman-Ford, **e.** A* ve **f.** RRT Algoritmaları ile Yol Planlamasının Gerçekleştirilmesi

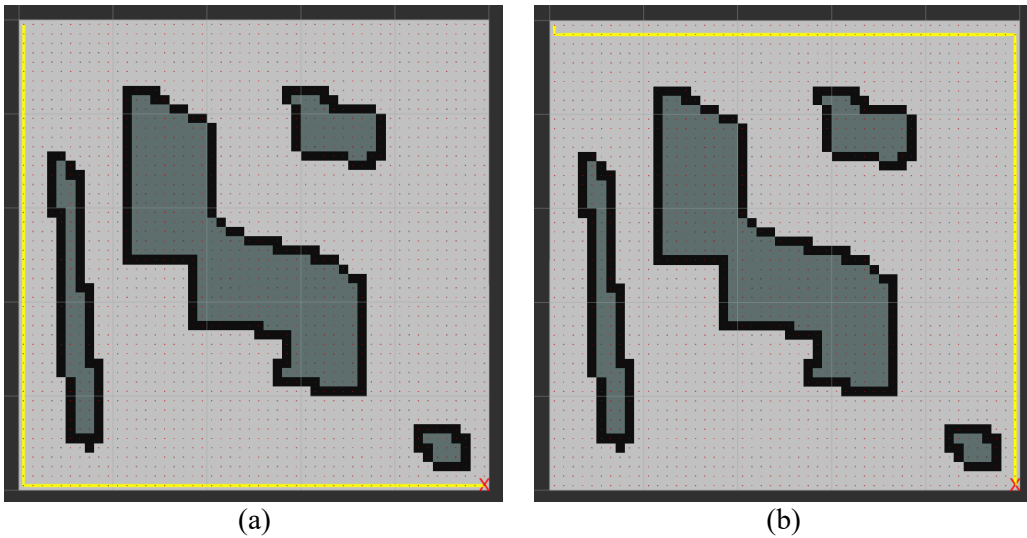
İkinci harita için test edilen algoritmaların yol uzunluklarına göre yol planlama görevini gerçekleştirme süreleri Tablo 3'te verilmiştir.

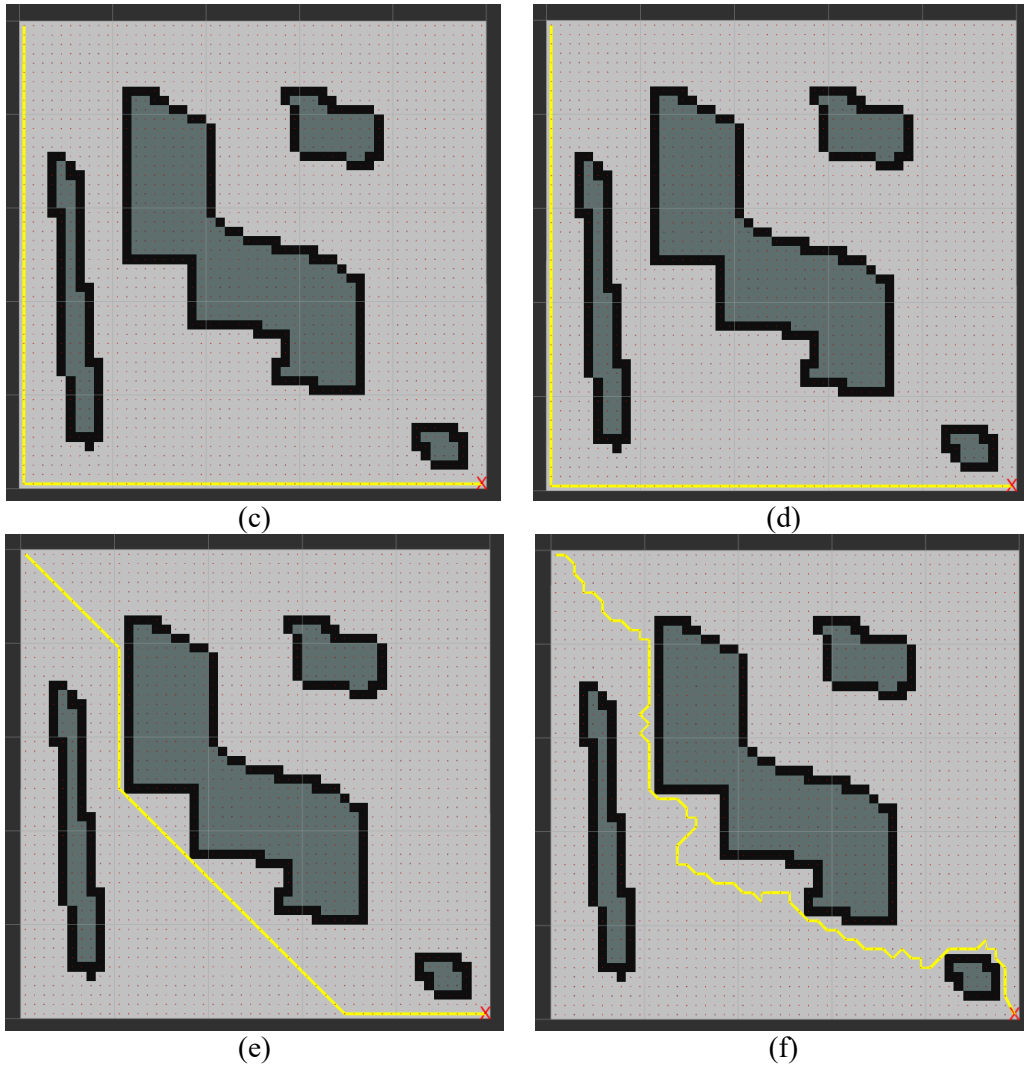
Tablo 3. İkinci Harita için Yol Planlama Görevini Gerçekleştiren Algoritmalara Ait Yol Uzunluğu ve Planlama Süreleri

Algoritma	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)
BFS	9,80	0,010481
DFS	10,00	0,001173
Dijkstra	9,80	0,054577
Bellman-Ford	9,80	0,061564
A*	7,339	0,024165
RRT	8,273	0,066652

Üçüncü Harita Yol Planlaması ve Süreleri

Üçüncü harita için; (0, 0) başlangıç noktasından (49, 49) hedef noktasına BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT algoritmaları kullanılarak yapılan yol planlaması görülmektedir (Şekil 9).





Şekil 9. Üçüncü Harita için (0, 0) Başlangıç Noktasından (49, 49) Hedef Noktasına a. BFS, b. DFS, c. Dijkstra, d. Bellman-Ford, e. A* ve f. RRT Algoritmaları ile Yol Planlamasının Gerçekleştirilmesi

Üçüncü harita için test edilen algoritmaların yol uzunluklarına göre yol planlama görevini gerçekleştirme süreleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Üçüncü Harita için Yol Planlama Görevini Gerçekleştiren Algoritmalara Ait Yol Uzunluğu ve Planlama Süreleri

Algoritma	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)
BFS	9,80	0,009923
DFS	9,80	0,001157
Dijkstra	9,80	0,091006
Bellman-Ford	9,80	0,114769
A*	7,808	0,032760
RRT	9,824	0,643496

Seçilen algoritmaların yol planlama süreleri ve planlanan yol uzunluklarına ait veriler (Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4) incelenmiştir. Tablolardan elde edilen verilere göre en kısa planlama süresini 0,000802 sn ile 1. haritadaki DFS algoritmasının, en kısa yol uzunluğunun ise 7,339 m ile 2. haritadaki A* algoritmasının hesapladığı görülmektedir.

Karşılaştırma için minimum planlama süresi ve minimum yol uzunluğu değerleri kullanılmıştır. Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'teki planlama süreleri, minimum planlama süresi (0,000802 sn) değerine bölünmesiyle Tablo 5 elde edilmiştir. Tablo 5'de üç harita da minimum yol planlama süresi açısından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Haritaların Minimum Yol Planlama Süresi Açısından Değerlendirilmesi

Harita	Birinci Harita		İkinci Harita		Üçüncü Harita	
	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)
BFS	9,8	5,5998	9,8	13,0686	9,8	12,3728
DFS	9,8	1,0000	10	1,4626	9,8	1,4426
Dijkstra	9,8	73,6185	9,8	68,0511	9,8	113,4738
Bellman-Ford	9,8	78,4863	9,8	76,7631	9,8	143,1035
A*	7,856	35,9751	7,339	30,1309	7,808	40,8479
RRT	8,525	83,6895	8,273	83,1072	9,824	802,3641

Tablo 5 incelendiğinde en kısa sürede yol planlamasının haritaya göre değişkenlik göstermekle birlikte DFS algoritması ile gerçekleştiği ve RRT algoritmasının ise yine haritaya göre değişkenlik göstererek yol planlama süresinin en fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca RRT algoritmasında hesaplanan yol uzunluğunun artmasının yol planlaması için harcanan hesaplama süresini artırdığı söylenebilir. Yine BFS, Dijkstra, Bellman-Ford ve A* algoritmalarının yol planlama sürelerinin ise haritaya göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'teki yol uzunluklarının minimum yol uzunluğu (7,339 m) değerine bölünmesiyle Tablo 6 elde edilmiştir. Tablo 6'da üç harita da minimum yol uzunluğu açısından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 6. Haritaların Minimum Yol Uzunluğu Açısından Değerlendirilmesi

Harita	Birinci Harita		İkinci Harita		Üçüncü Harita	
	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)	Yol uzunluğu (m)	Planlama süresi (sn.)
BFS	1,3353	0,0045	1,3353	0,0105	1,3353	0,0099
DFS	1,3353	0,0008	1,3626	0,0012	1,3353	0,0012
Dijkstra	1,3353	0,0590	1,3353	0,0546	1,3353	0,0910
Bellman-Ford	1,3353	0,0629	1,3353	0,0616	1,3353	0,1148
A*	1,0704	0,0289	1,0000	0,0242	1,0639	0,0328
RRT	1,1616	0,0671	1,1273	0,0667	1,3386	0,6435

Tablo 6 incelendiğinde en kısa yol planlamasının haritaya göre değişkenlik göstermekle birlikte A* algoritması ile gerçekleştiği görülmüştür. Haritaya göre değişkenlik göstermekle birlikte DFS algoritması tarafından planlanan yol uzunluğu 2. haritada en fazla olurken 3. haritada RRT algoritması ile planlanan yol uzunluğunun en fazla olduğu görülmüştür. BFS, Dijkstra ve Bellman-Ford algoritmalarının yol uzunlukları değerleri ise üç haritada da aynıdır.

Tablo 5 ve Tablo 6'da minimum yol ve minimum süre açısından arama algoritmalarının yol planlama performansları karşılaştırıldığında planlanan yollar arasındaki farkın fazla olmadığı ancak hesaplama süreleri arasındaki farkların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplama süresi açısından en iyi sonucu DFS algoritması, yol uzunluğu açısından en iyi sonucu A* algoritması vermektedir.

Tablo 7'de bu çalışmada önerilen yöntemin literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde her çalışmada elde edilen sonuçların değişkenlik gösterdiği ve kullanılan algoritmaların ele alınan parametreler doğrultusunda farklı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 7. Önerilen Yöntemin Benzer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Yazar ve Yıl	Kullanılan Algoritmalar	Deney Ortamı	Elde Edilen Sonuçlar
He vd. (2021)	A* RRT	2 Boyutlu labirent (Matlab)	Yol uzunluğu, Çalışma süresi, Keşfedilen düğüm sayısı
Wang vd. (2018)	RRT-DWA Dijkstra-DWA A*-DWA	Gazebo ve RViz (ROS)	Yol uzunluğu, Planlama süresi, Ortalama hız, Çalışma süresi
Barnouti vd. (2016)	A*	Strateji oyunlarından elde edilen görüntüler ve labirent görüntüleri (Visual Basic)	Planlanan en kısa yol
Permana vd. (2018)	A* Dijkstra BFS	Maze Runner oyunu	Yol uzunluğu, Çalışma süresi, Blok sayısı
Iloh (2022)	BFS DFS A*	2 Boyutlu labirent (Tkinter-Python)	Yol uzunluğu, Çalışma süresi
Chan vd. (2016)	Dijkstra Simetrik Dijkstra A* Bellman-Ford Floyd-Warshall Genetik	Otobüs güzergâhına ait veriler çizge olarak temsil edilmiş, farklı bir ortam tasarlanmamıştır.	Çalışma süresi, Toplam mesafe
AbuSalim vd. (2020)	Dijkstra Bellman-Ford	Farklı düğüm sayısına sahip çizgeler üzerinde test edilmiş, ayrıca bir ortam tasarlanmamıştır.	Düğüm sayısı, Çalışma süresi
Önerilen yöntem	BFS DFS Dijkstra Bellman-Ford A* RRT	İkili labirent (GIMP-Python)	Yol uzunluğu, Planlama süresi

Tablo 7’de verilen çalışmalardan Chan vd. (2016) ile AbuSalim vd. (2020) kullandıkları algoritmaları çizge yapısı üzerinde test etmişler ancak farklı bir deney ortamı tasarlayarak gözlemlememişlerdir. Diğer çalışmalarda ise farklı platformlar kullanılarak farklı harita veya labirentler üzerinde seçilen algoritmalar test edilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemde tasarlanan ikili labirent haritaları literatürde yer alan farklı bir çalışmada daha önce kullanılmamış olup benzer çalışmalardaki haritalar örnek alınarak bu çalışma için tasarlanmıştır. Çalışmanın ayrılan yönleri şu şekilde sıralanabilir;

- Algoritmalar düğüm yapısında değil ikili labirent yapısında çalıştırılmaktadır,
- Algoritmaların testine yönelik deney ortamına ait haritalar çalışmaya özgü olarak tasarlanmıştır,
- Seçilen algoritmalar dışında yol planlama problemine çözüm sunabilen diğer algoritmalar da tasarlanan deney ortamında test edilebilir.

SONUÇ

Bu çalışmada boyutları aynı engelleri farklı üç adet ikili labirent haritası ile deney ortamı oluşturulmuştur. Haritalar 5m x 5m boyutlarındadır. Haritaların oluşturulması için GIMP görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır. BFS, DFS, Dijkstra, Bellman-Ford, A* ve RRT arama algoritmaları ile ikili labirent haritaları üzerinde yol planlama görevi gerçekleştirilmiştir. Planlanan yol uzunlukları ve planlama süreleri hesaplanmıştır. Planlanan yollar RViz aracı ile görüntülenmiştir. Seçilen algoritmaların yol planlama performansları planlanan yol uzunluğu ve planlama süresi ölçütleri açısından analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre; A* algoritması optimum yolu bulmakta, DFS algoritması ise en kısa sürede hedefe ulaşmaktadır. Bulgular ışığında sürenin önemli olduğu durumlarda DFS algoritması, en kısa yol istendiğinde A* algoritması, keşif amaçlı çalışmalarda ise RRT algoritmasının tercih edilebileceği söylenebilir. Çalışmada sunulan

yöntem hem planlanan yolun mesafesinin hem de planlama sürelerinin kolaylıkla hesaplanabilmesi yönüyle bu tür araştırmalar için uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Harita içinde etkin bir yolun planlanması kadar; yolu oluşturan noktaların yol formasyonunu bozmayacak şekilde takip edilmesi de büyük önem arz etmektedir. İleriki çalışmalarda, takip algoritmalarının robotun sürüşünde gereken hız değerinin hesaplanması üzerine yoğunlaşılabilir.

KAYNAKLAR

- AbuSalim, S. W., Ibrahim, R., Saringat, M. Z., Jamel, S., & Wahab, J. A. (2020, September). Comparative analysis between dijkstra and bellman-ford algorithms in shortest path optimization. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 917(1), 012077. doi: 10.1088/1757-899X/917/1/012077
- Akka, K., & Khaber, F. (2018). Mobile robot path planning using an improved ant colony optimization. International Journal of Advanced Robotic Systems, 15(3), 1729881418774673. doi: 10.1177/1729881418774673
- Aqel, M. O., Issa, A., Khdair, M., ElHabbash, M., AbuBaker, M., & Massoud, M. (2017, October). Intelligent maze solving robot based on image processing and graph theory algorithms. In 2017 International Conference on Promising Electronic Technologies (ICPET) (pp. 48-53). IEEE. doi: 10.1109/ICPET.2017.15
- Barnouti, N. H., Al-Dabbagh, S. S. M., & Naser, M. A. S. (2016). Pathfinding in strategy games and maze solving using A* search algorithm. Journal of Computer and Communications, 4(11), 15. doi: 10.4236/jcc.2016.411002
- Campbell, S., O'Mahony, N., Carvalho, A., Krpalkova, L., Riordan, D., & Walsh, J. (2020, February). Path planning techniques for mobile robots a review. In 2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE) (pp. 12-16). IEEE. doi: 10.1109/ICMRE49073.2020.9065187.
- Chan, S. Y. M., Adnan, N. A., Sukri, S. S., & Wan Zainon, W. M. N. (2016). An experiment on the performance of shortest path algorithm. Knowledge Management International Conference (KMICe) (pp. 7-12). Chiang Mai, Thailand. Erişim adresi: <https://repo.uum.edu.my/id/eprint/20010/>
- Debnath, S. K., Omar, R., Latip, N. B. A., Shelyna, S., Nadira, E., Melor, C. K. N. C. K., & Natarajan, E. (2019). A review on graph search algorithms for optimal energy efficient path planning for an unmanned air vehicle. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 15(2), 743-749. doi: 10.11591/ijeecs.v15.i2.pp743-749
- Dewang, H. S., Mohanty, P. K., & Kundu, S. (2018). A robust path planning for mobile robot using smart particle swarm optimization. Procedia computer science, 133, 290-297. doi: 10.1016/j.procs.2018.07.036
- Dorigo, M., Birattari, M., & Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. IEEE computational intelligence magazine, 1(4), 28-39. doi: 10.1109/MCI.2006.329691.
- Edelkamp, S., & SchrodL, S. (2011). Basic Search Algorithms. In R. Roumeliotis, & D. Bevens (Eds.), Heuristic search: theory and applications, (pp. 47-86). Waltham, USA: Elsevier.
- Elbanhawi, M., & Simic, M. (2014). Sampling-based robot motion planning: a review. IEEE Access, 2, 56-77. doi: 10.1109/ACCESS.2014.2302442
- GIMP, www.gimp.org, Erişim tarihi: 25.06.2022.
- He, Y., Wang, P., & Zhang, J. (2021, September). A Comparison Between A* & RRT in maze solving problem. In 2021 3rd International Symposium on Robotics & Intelligent Manufacturing Technology (ISRIMT) (pp. 333-338). IEEE. doi: 10.1109/ISRIMT53730.2021.9596830
- Iloh, P. C. (2022). A Comprehensive and comparative study of DFS, BFS, and A* search algorithms in a solving the maze transversal problem. International Journal of Social Sciences and Scientific Studies, 2(2), 482-490. Erişim adresi: <https://www.ijssass.com/index.php/ijssass/article/view/54>
- Indriyono, B. V. (2021). Optimization of breadth-first search algorithm for path solutions in mazyin games. International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR), 3(2), 58-66. doi: 10.25139/ijair.v3i2.4256
- Injarapu, A. S. H. H. V., & Gawre, S. K. (2017, October). A survey of autonomous mobile robot path planning approaches. In 2017 International conference on recent innovations in signal processing and embedded systems (RISE) (pp. 624-628). IEEE. doi: 10.1109/RISE.2017.8378228.

- Kaur, N. K. S. (2019). A review of various maze solving algorithms based on graph theory. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, 6(12), 431-434. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/331481380>
- Korf, R. E. (1996). Artificial intelligence search algorithms. In M. J. Atallah, & M. Blanton (Eds.), *Algorithms and theory of computation handbook: special topics and techniques* (pp. 582-604). Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC.
- Koubâa, A., Bennaceur, H., Chaari, I., Trigui, S., Ammar, A., Sriti, M. F., & Javed, Y. (2018). *Robot path planning and cooperation* (1st ed.). Cham, Swiss: Springer International Publishing, (Chapter 1-2).
- Mac, T. T., Copot, C., Tran, D. T., & De Keyser, R. (2016). Heuristic approaches in robot path planning: a survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 86, 13-28. doi: 10.1016/j.robot.2016.08.001
- Mohanty, P. K., Kundu, S., Srivastava, S., & Dash, R. N. (2020, December). A new TS model based fuzzy logic approach for mobile robots path planning. In *2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)* (pp. 476-480). IEEE. doi: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397986
- Mukhlif, F., & Saif, A. (2020, February). Comparative study on Bellman-Ford and Dijkstra algorithms, *International Conference on Communication, Electrical and Computer Networks (ICCECN)*. Kuala Lumpur, Malaysia. Erişim adresi: <https://www.researchgate.net/publication/340790429>
- Niu, C., Li, A., Huang, X., & Xu, C. (2021, October). Research on intelligent vehicle path planning method based on improved RRT algorithm. In *2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing)* (pp. 1-7). IEEE. doi: 10.1109/PHM-Nanjing52125.2021.9613000.
- Pathak, M. J., Patel, R. L., & Rami, S. P. (2018). Comparative analysis of search algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 179(50), 40-43. doi: 10.5120/IJCA2018917358
- Patle, B. K., Pandey, A., Parhi, D. R. K., & Jagadeesh, A. (2019). A review: On path planning strategies for navigation of mobile robot. *Defence Technology*, 15(4), 582-606. doi: 10.1016/j.dt.2019.04.011
- Paulino, L., Hannum, C., Varde, A. S., & Conti, C. J. (2021, September). Search methods in motion planning for mobile robots. In K. Arai (Eds.), *Intelligent Systems and Applications. Proceedings of the 2021 Intelligent Systems Conference*, (pp. 802-822). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-82199-9_54
- Permana, S. H., Bintoro, K. Y., Arifitama, B., & Syahputra, A. (2018). Comparative analysis of pathfinding algorithms A*, Dijkstra, and BFS on maze runner game. *International Journal Of Information System & Technology*, 1(2), 1-8. doi: 10.30645/IJISTECH.V1I2.7
- Pradhan, S. K., Parhi, D. R., & Panda, A. K. (2009). Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots. *Applied soft computing*, 9(1), 290-304. doi: 10.1016/j.asoc.2008.04.008
- Samadi, M., & Othman, M. F. (2013, December). Global path planning for autonomous mobile robot using genetic algorithm. In *2013 International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems* (pp. 726-730). IEEE. doi: 10.1109/SITIS.2013.118.
- Shamsfakhr, F., & Bigham, B. S. (2017). A neural network approach to navigation of a mobile robot and obstacle avoidance in dynamic and unknown environments. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(3), 1629-1642. doi: 1629-1642. 10.3906/elk-1603-75
- Siegiwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). Planning and Navigation. In R. C. Arkin (Eds.), *Introduction to autonomous mobile robots*, (pp. 369-423). London, England: The MIT Press.
- Sung, I., Choi, B., & Nielsen, P. (2021). On the training of a neural network for online path planning with offline path planning algorithms. *International Journal of Information Management*, 57, 102142. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2020.102142
- Tan, C. S., Mohd-Mokhtar, R., & Arshad, M. R. (2021). A comprehensive review of coverage path planning in robotics using classical and heuristic algorithms. *IEEE Access*, 9, 119310-119342. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3108177
- Tuncer, A., & Yildirim, M. (2012). Dynamic path planning of mobile robots with improved genetic algorithm. *Computers & Electrical Engineering*, 38(6), 1564-1572. doi: 10.1016/j.compeleceng.2012.06.016

Wang, D., Tan, D., & Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft computing*, 22(2), 387-408. doi:10.1007/s00500-016-2474-6

Wang, J., Wu, S., Li, H., & Zou, J. (2018, May). Path planning combining improved rapidly-exploring random trees with dynamic window approach in ROS. In *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (pp. 1296-1301). IEEE. doi: 10.1109/ICIEA.2018.8397909

Zhang, H. Y., Lin, W. M., & Chen, A. X. (2018). Path planning for the mobile robot: a review. *Symmetry*, 10 (10), 450. doi:10.3390/sym10100450

Zhang, L., Zhang, Y., & Li, Y. (2020). Mobile robot path planning based on improved localized particle swarm optimization. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6962-6972. doi: 10.1109/JSEN.2020.3039275



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.09.2022
Kabul Tarihi : 19.12.2022

Received Date : 07.09.2022
Accepted Date : 19.12.2022

MİNİ İĞNE KANATÇIKLI BİR ISI ALICISININ ISIL PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL PERFORMANCE OF A MINI PIN FIN HEAT SINK

Bahadır GEMİCİOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0001-8403-1848)
*Ahmet PEKCAN*² (ORCID: 0000-0002-8438-507X)
*Tolga DEMİRCAN*³ (ORCID: 0000-0003-4805-6428)

^{1,2,3} Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bahadır GEMİCİOĞLU, bahadirgemicioğlu@kku.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada bir kanal içerisinde bulunan mini pim kanatçıklı bir ısı alıcısının soğutulması sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda kare, beşgen ve altıgen kanatçık geometrileri için, Reynolds sayısının 500-1800, hava giriş sıcaklığının 298-304 K, ısı akısının 5000-30000 W/m² ve kanatçık yüksekliğinin ise 2-8 mm aralıklarında farklı analizler yapılmıştır. Bu sayede kanatçık geometrisi, Reynolds sayısı, ısı akısı, akışkan giriş sıcaklığı, kanatçık yüksekliği, kanatçık dizilimi gibi birçok farklı parametrenin değişiminin ısı transferi üzerindeki etkileri birlikte incelenmiştir. Sonuç olarak altıgen kanatçığa sahip geometrinin incelenen diğer geometrilere oranla daha yüksek ısı performans gösterdiği tespit edilmiştir. Reynolds sayısının ve kanatçık yüksekliğinin artışının ısı transfer katsayısını artırdığı tespit edilmiştir. Hava giriş sıcaklığının artırılmasının ise ısı transferini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Kanatçıklar arası mesafenin değişiminin ısı transferini etkilediği, bu mesafenin 2 mm olduğu durumda ise optimum ısı performans sağlandığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı alıcısı, soğutma, kanatçık, ısı transferi, sayısal çözüm

ABSTRACT

In this study, the cooling of a mini pin finned heat sink in a channel is numerically investigated. In this context, different analyzes were made for square, pentagonal and hexagonal fin geometries, Reynolds number 500-1800, air inlet temperature 298-304 K, heat flux 5000-30000 W/m² and fin height 2-8 mm. In this way, the effects of changes in many different parameters such as fin geometry, Reynolds number, heat flux, fluid inlet temperature, fin height, fin arrangement on heat transfer were investigated together. As a result, it has been determined that the geometry with hexagonal fins has better thermal performance than the other geometries examined. It was observed that the increase in Reynolds number and fin height increased the heat transfer coefficient. It was determined that increasing the air inlet temperature negatively affected the heat transfer. It has been observed that the change in the distance between the fins affects the heat transfer, and when this distance is 2 mm, optimum thermal performance is achieved.

Keywords: Heat sink, cooling, fin, heat transfer, numerical solution

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle beraber kullanmış olduğumuz elektronik cihazlar her geçen gün daha yüksek kapasitelere ulaşmakta, boyutları ise küçülmektedir. Tüm bu gelişmeler elektronik cihazların etkin bir şekilde soğutulması problemini ortaya çıkarmaktadır. Özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişim mikroçip gibi çok küçük boyuttaki elemanların daha yüksek kapasitelere ve aşırı yüksek sıcaklıklara ulaşmasına sebep olmaktadır. Mikroçip gibi elemanların kullanıldığı yerler birçok farklı alanda karşımıza çıkmaktadır. Otomobillerden radar sistemlerine, ev tipi elektrikli cihazlardan endüstride kullanılan elektronik sistemlere, hususi bilgisayarlardan endüstriyel amaçla kullanılan yüksek donanımlı bilgisayarlara kadar, gelişen teknolojiyle beraber hemen hemen her sektörde mikroçipler yoğun olarak kullanılmaktadır.

Çok küçük boyutlara sahip olmalarına rağmen yüksek sıcaklıklara ulaşan bu elemanların soğutulması ve güvenli çalışma sıcaklıklarında tutulması problemi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Literatür incelendiğinde araştırmacıların bu konuda bazı sayısal, analitik ve deneysel çalışmalar yaptıkları görülmüştür. Sayısal olarak çalışan araştırmacılar Comsol, Fluent, CFX vb. ticari paket programları kullanarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımı ile sayısal analizlerini yapmışlardır. Analitik çalışmalarda, araştırmacıların geleneksel ısı transfer ve akışkanlar mekaniği denklemlerini kullandıkları görülmüştür. Deneysel çalışmalarda ise, ilgili problemin değişen bir ısı akısı uygulanan bir elemanın soğutulmasını içeren geleneksel bir problem gibi kabul edildiği görülmüştür. Ancak kullanılan soğutma debisinin, soğutulan cihazın boyutlarının ve mikro kanalların çok küçük olması sebebiyle daha hassas ölçüm cihazlarının kullanımının ve daha hassas bir deney düzeneği tasarımının gerekliliği belirtilmiştir. Literatür araştırması sırasında incelenen bazı önemli çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Güder (2021) bir işlemcinin soğutulması için, ısı kaynağının üzerine yerleştirilen kare, üçgen ve daire kanatçıkların ısı transfer performansını $500 \leq Re \leq 10000$ aralığında sayısal olarak incelemiştir. Isı kaynağının alt yüzeyine sabit 2000 W/m^2 ısı akısı uygulamıştır. Sistem girişindeki hava sıcaklığını 300 K , çıkış basıncını ise atmosfer basıncı olarak kabul etmiştir. Farklı kanatçık geometrileri ve farklı Reynolds sayıları için gerçekleştirmiş olduğu analizler sonucunda, sıcaklık dağılımları, basınç düşüşleri, Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve termal performans faktörü değerlerinin değişimini incelemiştir. En iyi çalışma aralığının $Re=5000$ ila $Re=6500$ aralığında olduğunu gözlemlemiştir. Sonuç olarak $Re=5000$ değerinde daire kanatçıklı modelin en iyi termal performans faktörü (PEC) sağladığını belirtmiştir. Yeşildal (2017) çalışmasında dikdörtgen ve altıgen kanatçıklı ısı alıcılar için deneyler gerçekleştirmiştir. Isı transferi ve sürtünme karakteristikleri üzerine en etkili parametrenin kanat yüksekliği olduğunu belirtmiş ve farklı kanat yükseklikleri için deneyler gerçekleştirmiştir. İkinci etkili parametrenin ise akış hızı olduğunu belirterek, beş farklı akış hızı için deneyler gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonucunda, artan akış hızına bağlı olarak Reynolds ve Nusselt sayılarının arttığını, sürtünme katsayısının ise azaldığı gözlemlemiştir. Kutlu (2019) dikdörtgen bir kanal içinde bulunan silindirik, spiral ve kare kanatçıkların zorlanmış taşınım ile gerçekleşen ısı transfer performansını, değişik parametreler için üç boyutlu ve sayısal olarak incelemiştir. Kanatçık malzemesinin alüminyum olduğu, geometri üzerinde ise 20 adet kanatçık bulunduğunu kabul etmiştir. Isı akısını 2000 W/m^2 , hava giriş sıcaklığını $25 \text{ }^\circ\text{C}$, çıkış basıncını atmosferik basınç olarak belirlemiş, Reynolds sayısı $250-2000$ aralığı için analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmasının sonucunda, yüzey alanının değişiminin ısı transferi üzerinde önemli bir parametre olduğunu gözlemlemiştir. Naphon ve Khonseur (2009) mikro kanallı ısı alıcıların laminer akış şartlarında hava ile soğutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında Reynolds sayısını $200-1000$ aralığında, ısı akısını ise $1,80-5,40 \text{ kW/m}^2$ aralığında değiştirerek, 2 farklı kanatçık yüksekliği ve 2 farklı kanatçık genişliği için parametrik incelemelerde bulunmuşlardır. Sonuç olarak kanatçık yüksekliği ve genişliğinin gerçekleşen ısı transferi üzerinde oldukça etkili parametreler olduğunu gözlemlemiştir.

Khonsue (2018) üç farklı geometri için mini pim kanatçıklarının ısı transferini inceleyen deneysel bir çalışma yapmıştır. Deneylerini $9,132-13,698 \text{ kW/m}^2$ ısı akısı ve $332-1982$ Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirmiştir. Alüminyum malzemedan yapılmış, 5 mm yüksekliğinde 63 adet kanatçığa sahip silindirik, spiral ve kare kanatçık geometrilerini kullanmıştır. Spiral kanatçıkların ısı transfer yüzey alanlarının diğer geometrilere göre daha fazla olması sebebiyle, ısı transfer performansının da diğer geometrilere oranla daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Akışkan hızındaki artışın her kanatçık geometrisi için ısı transferini arttırdığını belirlemiştir. Moradikazerouni vd. (2019) CPU soğutulması için kullanılan düz plakalı bir ısı alıcısının termal performansını üç boyutlu bir analitik model yardımıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında Reynolds sayısı, kanatçık yüksekliği ve sayısı, hava akım hızı gibi farklı parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Kanatçık yüksekliği ve sayısının ısı transfer oranını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemiştir. Zhao vd. (2015) kare şeklindeki mikro kanatçıklar için, kanatçık sayısının ve kanatçık

açısının ısı transfer performansı üzerindeki etkilerini sayısal olarak ele almışlardır. Çalışmalarının sonucunda en ideal kanatçık sayısı oranını 0,75 ve kanatçıkların en ideal eksenel açısının 30° olduğunu belirlemişlerdir. Kanatçık sayısının kanatçık açısına oranla ısı transfer performansı üzerinde daha fazla etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kotcioğlu vd. (2011) mikro kanatçıklı ısı alıcılarının soğutulması için kullanılan dairesel, dikdörtgen ve hegzagonal şekilde kanatçıklara sahip 3 farklı geometri için, ısı transferi ve basınç düşüşü performanslarını inceleyen deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu kapsamda kanatçıklar arası enine mesafeyi $ST/D=2$ olarak sabit tutmuşlar, akış yönündeki kanatçıklar arası mesafeyi ise $SL/D=2,2,8-3,5$ olarak değiştirmişlerdir. En yüksek ısı transfer performansının hegzagonal kanatçıklı geometride, en düşük performansın ise dairesel kanatçıklı geometride gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Kanatçıklar arası mesafe azaldıkça Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün arttığını tespit etmişlerdir. Chin vd. (2013) bir kanal içinde bulunan ısı kaynağının üst yüzeyine çapraz olarak dizilmiş delikli kanatçıkların ısı transfer performansını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Delikli kanatçıklarda elde edilen Nusselt sayısının daha yüksek olduğunu, basınç düşüşünün ise daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Foong vd. (2009) içten uzunlamasına kanatçıklı bir mikro kanalda laminer akış durumunda taşınım ile olan ısı transferi üzerinde çalışmada bulunmuşlardır. Hidrodinamik olarak gelişmiş, termal olarak gelişen bir laminer akış varlığında değişken kanat yükseklikleri için üç boyutlu sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Kare mikrokanaalın dış duvarlarında sabit ısı akısı sınır koşulları varsayımı yapmışlardır. Kanal uzunluğu boyunca ortalama yerel Nusselt sayısı dağılımını kanat yükseklik oranının bir fonksiyonu olarak elde etmişlerdir. Analizleri farklı kanat yükseklikleri ve akış parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları nümerik çalışmaya göre iç mikro kanaldaki kanatçıkların, ısı transferini büyütme potansiyeline sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Cao vd. (2022) mozaik kanatlı mini kanallı ısı alıcısında ısı transfer artırımını deneysel ve nümerik olarak incelenmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında eğik kanal genişliği ve ikincil kanalların eğim açısının farklı düzenlemeleri ile mozaik kanatlı yeni bir mini kanallı ısı alıcı önermişlerdir. Bu kapsamda, mini kanallı ısı alıcının ısı soğutma kapasitesini Reynolds sayısının 573 ila 2295 aralığında olduğu durumlarda sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Simülasyon sonuçlarında hacimsel debinin artmasıyla, mozaik kanatlı modelin alt plakasının sıcaklık farkının ve basınç düşüşünün belirgin bir şekilde azaldığını gözlemlemişlerdir. Eğik kanal eğim açısı 70° ve eğimli akış kanalı genişliği 1,8 mm olduğu durumda ısı transfer etkisini elde etmişlerdir. Optimize edilmiş modelin güçlü bir termal performansı ve tek tip alt tabaka sıcaklığını desteklediğini bulmuşlardır. $Q_v=30$ ml/s'de basınç düşüşünün %73'e kadar azaltılabileceğini, ortalama Nusselt sayısının %17'ye kadar yükseltilebileceğini ve minimum sıcaklık farkının 17 K değerinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ghani vd. (2017) kanat ve ikincil kanalların hibrit tekniğini kullanılarak mikro kanallı ısı emicide ısı transferinin geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Reynolds 100 ila 500 arasında değişen değerler için sayısal olarak incelemelerde bulunmuşlardır. İkincil kanalların ve nervürlerin Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dikdörtgen kanatlı mikrokanaal ve ikincil eğik kanallı mikrokanaal geometrileri karşılaştırmalı analizler yapmışlardır. Sonuçlardan kanat ve ikincil kanal kullanımının, sadece kanat ve sadece ikincil kanal kullanımına göre üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Pan vd. (2022) iğne kanatlı manifold mikro kanallı ısı emicinin akış ve ısı transfer özellikleri üzerine çalışmışlardır. Soğutucunun (mikrokanaal ısı alıcı) akış ve ısı transfer özelliklerini sayısal (nümerik) olarak incelemişlerdir. İğne kanatlı manifold mikro kanalın ısı transfer performansının, aynı kütledebide dikdörtgen manifold mikrokanaalından daha iyi olduğunu, ancak iğne kanatlı manifold mikro kanalının basınç düşüşünün daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca iğne kanatlı manifold mikro kanalının ısı transfer performansının, aynı basınç düşüşünde dikdörtgen manifold mikro kanaldan daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Literatür incelemesinden de görüldüğü üzere araştırmacılar genel olarak Reynolds sayısı, hacimsel debi, ısı akısı, kanatçık geometrisi vb. parametrelerin değişimlerinin ısı transferi üzerindeki etkilerine yoğunlaşmışlardır. Kanatçık geometrisi olarak kare, üçgen, dikdörtgen vb. farklı geometrileri, kanatçık yüksekliği, kanatçık dizilim düzeni ve kanatçıklar arası mesafe gibi farklı parametrelerin değişimlerini incelemişlerdir. Yapılan bu değişimler sonucunda araştırmacıların çıktıkları elde etmek istedikleri değerler ise, akışkan çıkış sıcaklığı, ısı taşınım katsayısı (h), Nusselt sayısı, basınç kaybı (ΔP) ve pompalama enerjisi gibi değerler olduğu görülmüştür.

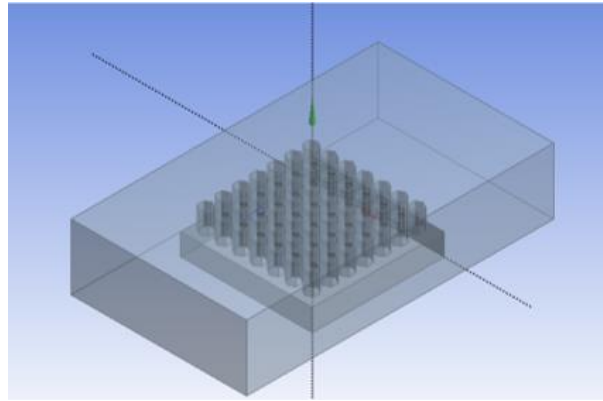
Bu çalışmada literatürde ayrı ayrı incelenen parametreler bir bütün olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, ısı alıcılarının soğutulmasında önem arz eden birçok farklı parametrenin etkileri birlikte irdelenmiştir. Bu sayede ilgili parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, öncelikle literatürde bulunan

Khonsue'nin (2018) yapmış olduğu çalışmanın verileri kullanılarak, bu çalışmanın sayısal yöntemi ve elde edilen sonuçların güvenilirliği tespit edilmiştir. Daha sonra farklı kanatçık geometrileri, farklı Reynolds sayıları, farklı ısı akıları, farklı giriş sıcaklıkları, farklı kanatçık yükseklikleri, farklı kanatçıklar arası mesafeler ve farklı kanatçık dizilimleri gibi parametrelerin değişimlerinin ısı transfer performansına olan etkileri incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Problemin Tanımı

Bu çalışma kapsamında dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilen kare taban üzerinde mini pim kanatçıklar bulunan bir ısı alıcısı ele alınmıştır. Bu ısı alıcısında bulunan kanatçıkların geometrisi kare, beşgen ve altıgen olarak değiştirilerek, farklı geometrik modeller oluşturulmuştur. Isı alıcısının alüminyum malzemeden imal edildiği düşünülmüştür. Beşgen ve altıgen kanatçıkların kenar uzunlukları 1,5 mm, kare geometrili kanatçığın kenar uzunlukları ise 2 mm olarak belirlenmiştir. Kanatçık yüksekleri ise 2-8 mm aralığında olacak şekilde belirlenerek model geometrileri oluşturulmuştur. Kanal giriş kesitinin yüksekliği 15 mm, genişliği 40 mm, kanalın uzunluğu ise 70 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Örnek olarak altıgen kanatçıklara sahip modelin geometrisi Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Altıgen Kanatçıklı Model Geometrisi

Çalışma kapsamında öncelikle, değişen Reynolds sayısı ve sabit ısı akısı altında tüm geometriler için analizler yapılmış ve konveksiyonla olan ısı transferi incelenmiştir. Bu kapsamda, kare, beşgen ve altıgen kanatçık geometrileri için, ısı akısı 10000 W/m^2 ve hava giriş sıcaklığı 298 K olacak şekilde sabit tutulmuş ve Reynolds sayısı 900-1800 aralığında değiştirilerek sayısal analizler yapılmıştır. Bu analizlerin sonucunda altıgen ve kare kanatçık kesitlerine sahip modellerin ısı transfer performansının beşgen kanatçık tipine oranla daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında irdelenen diğer parametrelerin grafiklerinin oluşturulması ve sonuçların irdelenmesi aşamasında, grafiklerin daha sade ve anlaşılabilir olması amacıyla genellikle altıgen ve kare kanatçık geometrileri tercih edilmiştir.

Isı transfer akışkanı olarak kullanılan havanın termofiziksel özellikleri, değişen giriş sıcaklıklarının etkisiyle değişmektedir. Havanın farklı sıcaklık değerleri için kullanılan termofiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Havanın Termofiziksel Özelliklerinin Sıcaklık ile Değişimi, Çengel (2004).

Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg/m^3)	Özgül Isı (kJ/kgK)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Dinamik Viskozite (kg/ms)	Pr
298	1,1686	1,0069	0,0260487	$18,4 \times 10^{-6}$	0,714
300	1,1613	1,0070	0,0261946	$18,5 \times 10^{-6}$	0,713
302	1,1541	1,0071	0,0263402	$18,6 \times 10^{-6}$	0,713
304	1,1469	1,0072	0,0264858	$18,7 \times 10^{-6}$	0,713

Bu çalışma kapsamında, kanatçık geometrisinin, Reynolds sayısının, ısı akısının, akışkan giriş sıcaklığının, kanat yüksekliğinin, kanatçık diziliminin ısı transferi üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Ayrıca bu parametrelerin değişiminin basınç kaybı ve tüketilen güç değerine olan etkileri üzerinde durulmuştur.

Çözüm Yöntemi

Diferansiyel Denklemler

Çalışma kapsamında incelenen problemin temel diferansiyel denklemlerinin genel hali aşağıda verilmiştir (Foong, 2009).

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Momentum Denklemi (x-yönlü)

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (2)$$

Momentum Denklemi (y-yönlü)

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (3)$$

Momentum Denklemi (z-yönlü)

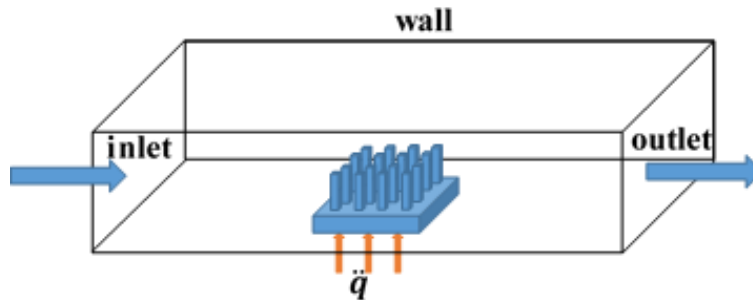
$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (4)$$

Enerji Denklemi

$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = k_r \nabla^2 T + 2((\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2) \quad (5)$$

Sınır Şartları

Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde Reynolds sayısı 500-1800 aralığında değiştirilmiştir. Havanın kanala giriş hızı bu Reynolds sayıları kullanılarak belirlenmiştir. Havanın giriş sıcaklığı ise 298-304 K aralığında alınmıştır. Bu hız ve sıcaklık değerleri kanal girişinde “inlet” sınır şartı olarak kullanılmıştır. Kanal çıkışında ise havanın, 1 atm basınçta ve 300 K sıcaklıktaki atmosfer ortamına yayıldığı kabul edilmiş ve bu değerler ise “outlet” sınır şartı olarak kullanılmıştır. Kanal dış duvarlarında “wall” sınır şartı belirlenmiş ve kaymasızlık sınır şartının sağlandığı kabul edilmiştir. Ayrıca tüm kanal duvarların yalıtılmış olduğu varsayılmıştır. Isı alıcısının alt yüzeyinde ise 5000-30000 W/m² olacak şekilde ısı akısı uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan sınır şartlarının şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Sınır Şartlarının Şematik Gösterimi

Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmadan elde edilen verilerin irdelenebilmesi amacıyla aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır.

Akışın Reynolds sayısı, kinematik viskozite değeri ve hidrolik çapı aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenmektedir (Çengel, 2004).

$$Re_f = \frac{\rho_f U_f D_h}{\mu_f} \quad (6)$$

$$v_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (7)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (8)$$

Laminer akışta sürtünme faktörü, basınç farkı ve güç hesabı ise aşağıdaki eşitlikler yardımıyla elde edilebilmektedir (Çengel, 2004).

$$f = 64/Re \quad (9)$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \rho_f \frac{U^2}{2} \quad (10)$$

$$P = \Delta P \dot{V} \quad (11)$$

Isı geçişi, kütleli debi ve hacimsel debi ise aşağıda verilen eşitlikler vasıtasıyla belirlenmektedir (Incropera vd., 2007).

$$\dot{Q} = \dot{m}_f c_{p,f} (T_\varphi - T_g) \quad (12)$$

$$\dot{Q} = \rho_f \dot{V} c_{p,f} (T_\varphi - T_g) \quad (13)$$

$$\dot{m} = \rho VA \quad (14)$$

$$\dot{V} = VA \quad (15)$$

ΔT_{lm} ise logaritmik ortalama sıcaklık farkıdır ve Eşitlik 16 yardımıyla belirlenir. Bu değer havanın giriş-çıkış sıcaklıkları ve yüzey sıcaklığı vasıtasıyla hesaplanabilmektedir (Çengel & Cimbala, 2006).

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{yüzey} - T_{hava,g}) - (T_{yüzey} - T_{hava,\varphi})}{\ln\left(\frac{T_{yüzey} - T_{hava,g}}{T_{yüzey} - T_{hava,\varphi}}\right)} \quad (16)$$

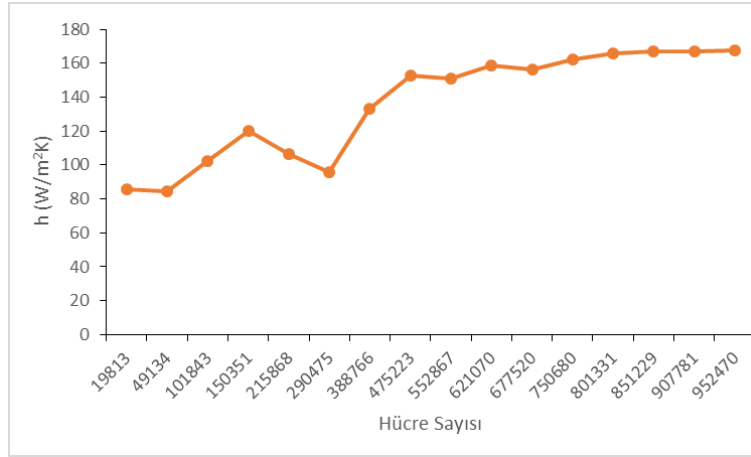
Isı alıcısını soğutmak için kullanılan havanın ortalama ısı taşınım katsayısı ise Eşitlik 17 vasıtasıyla belirlenmektedir (Incropera vd., 2007).

$$h = \frac{\dot{Q}}{A_m \Delta T_{LMTD}} \quad (17)$$

Sayısal Yöntem

Çalışma kapsamında değişen parametre koşulları için farklı model geometrileri belirlenmiştir. Bu model geometriler sonlu hacimlere bölünerek ağ yapıları oluşturulmuştur. Problemin temel diferansiyel denklemleri oluşturulan ağ yapısı ve belirlenen sınır koşulları kullanılarak, Fluent ticari paket programı vasıtasıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Bu kapsamda, üç boyutlu, laminar ve sürekli rejim koşulu için diferansiyel denklemler ayrıştırılmış ve SIMPLE algoritması kullanılarak çözülmüştür. Yapılan iterasyonlarda süreklilik, enerji, x-momentum, y-momentum ve z-momentum denklemleri için yakınsama kriteri 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Modellerin ağ yapıları, kanatçık yüzeylerine yakın bölgelerde daha sık, diğer bölgelerde gevşek bir yapıda olacak şekilde belirlenmiştir. Her geometrik model için, farklı hücre sayılarına sahip ağ yapılarında analizler yapılarak optimum ağ yapıları elde edilmiştir.

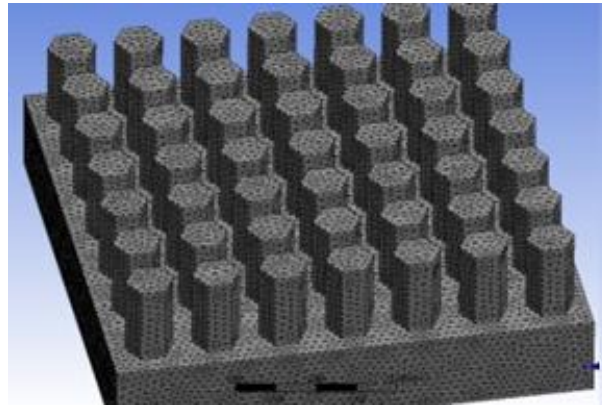
Ağ yapısı oluşturulurken hücre sayısından bağımsızlaştırma işleminin yapılması, hatalı sonuçlar elde edilmemesi için önem arz etmektedir. Bu nedenle güvenilir sonuçlar elde edebilmesi için optimum hücre sayısının belirlenmesi önemlidir. Örnek olması açısından, altıgen kanatçığa sahip modelin optimum ağ yapısının belirlenmesi için kullanılan grafik Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Isı Taşınım Katsayısının Hücre Sayısı ile Değişimi

Şekil 3’de, altıgen kanatçıklı geometri için $\dot{q} = 10000 \text{ W/m}^2$, $Re=1000$ ve $T_g=298 \text{ K}$ olduğu durumda, farklı hücre sayılarına sahip 16 farklı ağ yapısı için elde edilen sonuçlar birlikte görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 750680 hücre sayısından sonra, ısı taşınım katsayısının değeri fazla değişmemektedir. Bu nedenle bu geometri için 750680 hücre kullanılan ağ yapısı optimum ağ yapısı olarak kabul edilmiştir. Diğer geometriler için de benzer prosedür uygulanarak optimum ağ yapıları belirlenmiştir.

Altıgen kanatçığa sahip model için oluşturulan ağ yapısının izometrik görünüşü ise Şekil 4’te verilmektedir. Tüm model geometriler için oluşturulan ağ yapılarının kalitesi ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Bu kapsamda tüm ağ yapıları oluşturulurken skewness değerinin 0,94 değerini geçmemesine, orthogonal quality değerinin 0,15 değerinin üzerinde olmasına, aspect ratio değeri için ise 20 değerinin geçilmemesine özellikle dikkat edilmiştir.

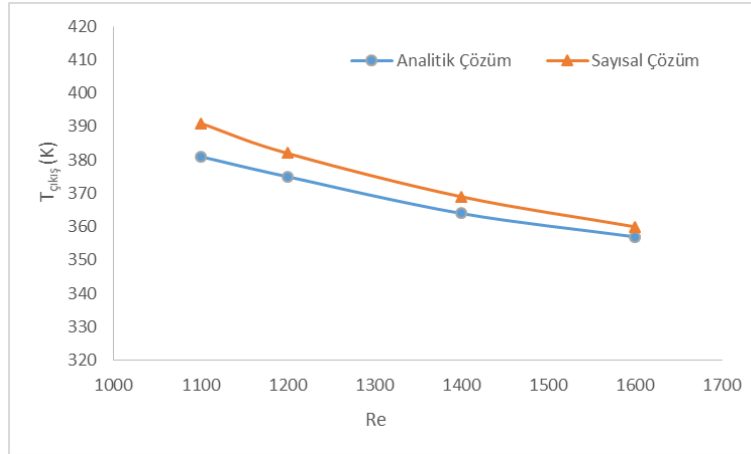


Şekil 4. Altıgen Kanatçıklı Geometri için Ağ Yapısı

Literatür Karşılaştırması

Bu çalışmada kullanılan sayısal metodun güvenilirliğinin kontrol edilmesi amacıyla, literatürde bulunan Khonsue’nin (2018) deneysel çalışması referans çalışma olarak seçilmiştir. İlgili çalışmanın geometrisi ve sınır şartları aynen kullanılarak, sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda iki farklı karşılaştırma çalışması yapılmıştır.

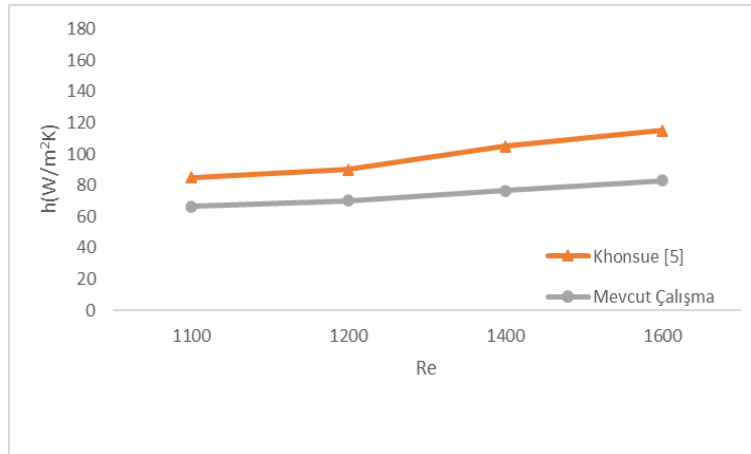
İlk karşılaştırma olarak, teorik ısı transfer denklemleri el hesabı ile çözülmüş ve analitik sonuçlar elde edilmiştir. Bu analitik sonuçlar, yapılan sayısal analizden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, çıkış sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimini gösteren karşılaştırma Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Analitik ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 5 incelendiğinde, sayısal analizlerden elde edilen ve teorik el hesabı ile matematiksel denklemlerin çözümünden elde edilen $T_{\text{çıkış}}$ (havanın çıkış sıcaklığı) değerinin Reynolds sayısı ile değişimi birlikte görülmektedir. Her iki çözüm metodunun kullanılması durumunda da Reynolds sayısının artışı ile $T_{\text{çıkış}}$ sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, her iki yöntem için çizilen eğriler birbirine benzer bir profil oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçların ortalaması alındığında, analitik sonuçlar ile sayısal sonuçlar arasında yaklaşık % 1,5 kadar farklılık görülmektedir. Bu fark değerinin kabul edilebilir bir seviyede olduğu ve çizilen eğrilerin birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu söylenebilir.

İkinci bir karşılaştırma olarak, yine Khonsue'nin (2018) geometri ve sınır koşulları birebir uygulanarak yapılan sayısal analizden elde edilen sonuçlar ile Khonsue'nin (2018) elde ettiği sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırma için çizilen eğriler ise Şekil 6'da verilmektedir. İki çalışma karşılaştırıldığında, birbirlerine benzer olarak her iki çalışmada da Reynolds sayısının artışıyla h değerinin arttığı görülmektedir. İki çalışmadan elde edilen sonuçları için çizilen eğriler birbirleri ile uyumludur.



Şekil 6. Bu Çalışmanın Sonuçları ile Khonsue (2018) Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmadan elde edilen sayısal sonuçların ve kullanılan sayısal yöntemin güvenilir seviyelerde olduğu söylenebilir.

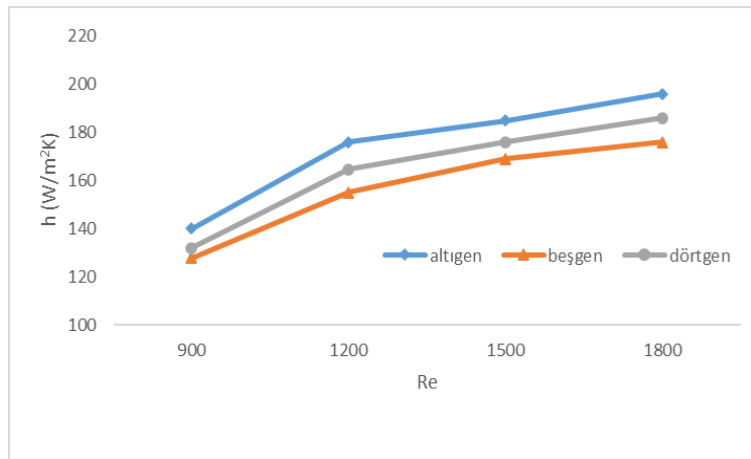
BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında dikdörtgen kesitli bir kanal içerisine yerleştirilen kare taban üzerinde mini pim kanatçıklar bulunan bir ısı alıcısı sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda kare, beşgen ve altıgen kanatçık geometrileri için, Reynolds sayısının 500-1800, hava giriş sıcaklığının 298-304 K, ısı akısının 5000-30000 W/m², kanatçık yükseklerinin ise 2-8 mm aralığındaki farklı değerleri için farklı analizler yapılmıştır. Dolayısıyla kanatçık

geometrisi, Reynolds sayısı, ısı akısı, akışkan giriş sıcaklığı, kanat yüksekliği, kanatçık dizilimi gibi birçok farklı parametrenin değişiminin ısı transferi üzerindeki etkileri birlikte irdelenmiştir.

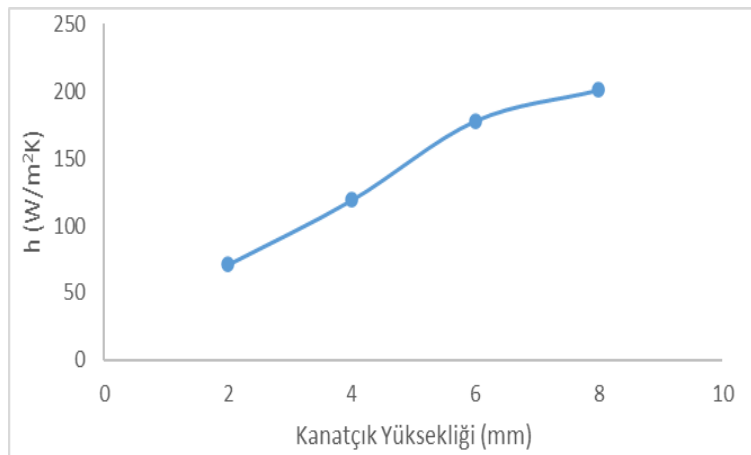
Ele alınan parametre sayısının fazla olması nedeni ile analiz aşamasında bazı parametreler sabit tutulmuş ve incelenen parametrenin değişiminin ısı transferi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda her bir parametrenin ısı transferine olan etkisinin incelenmesi ayrı ayrı yapılmıştır. Bu aşamada bazı parametrelerin değeri sabit tutularak sadece incelenen parametreye özel ayrı bir analiz matrisi oluşturulmuş ve yapılması gereken analiz sayısı kısmen azaltılmıştır.

İlk olarak kanatçık geometrisinin ısı transfer üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda ısı akısı 10000 W/m^2 ve hava giriş sıcaklığı 298 K olduğu durumda, üç farklı kanatçık geometrisi için ısı taşınım katsayısının Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, her üç kanatçık tipi için çizilen eğrilerin benzer profilde olduğu ve Reynolds sayısının artışı ile ısı taşınım katsayısının değerinin arttığı belirlenmiştir. Ancak altıgen geometrili kanatçığın ısı taşınım katsayısı değerinin, beşgen ve dörtgen kanatçıklara oranla daha yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin altıgen kanatçıkta, ısı transfer yüzey alanının diğer kanatçık geometrilerine oranla daha fazla olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



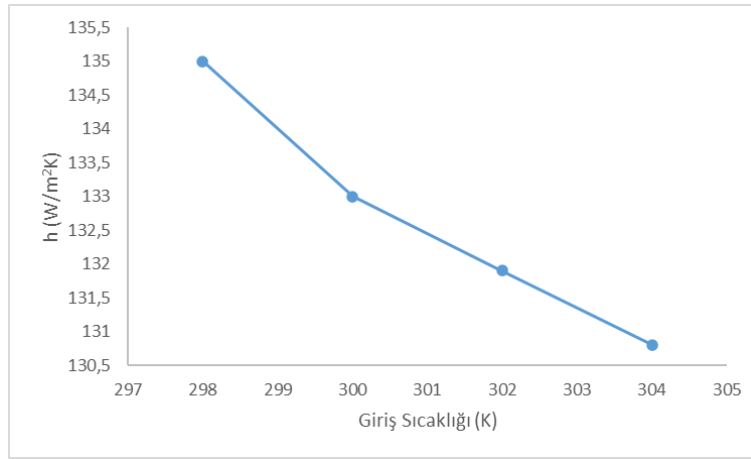
Şekil 7. Farklı Kanatçık Geometrileri için Isı Taşınım Katsayısının Reynolds Sayısı ile Değişimi

Şekil 8’de ise, kanatçık yüksekliğinin değişiminin ısı transferine olan etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla altıgen kanatçık geometrisi için Reynolds sayısı 1000 , ısı akısı 5000 W/m^2 ve hava giriş sıcaklığı 298 K olduğu durumda, ısı taşınım katsayısının kanat uzunluğu ile değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kanatçık yüksekliğindeki artışla beraber ısı transfer katsayısı artış göstermiştir. Bu durumun sebebinin kanat uzunluğunun artması sonucu, ısı transfer yüzey alanındaki artışın gerçekleşen ısı transferini artırması olduğu düşünülmektedir. İncelenen parametreler için, kanat yüksekliğinin 2 mm ’den 8 mm ’ye artırılması ile ısı taşınım katsayısının değeri yaklaşık %183 kadar artış göstermiştir.



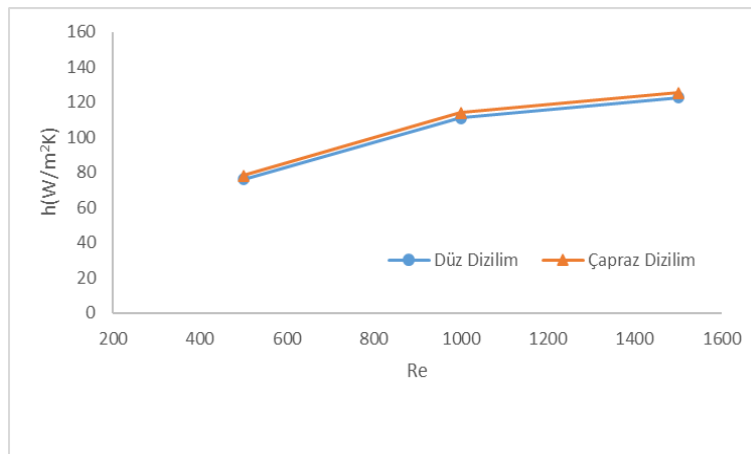
Şekil 8. Kanatçık Yüksekliğinin Değişiminin Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi

Altıgen kanatçıklı plakayı soğutmak için gönderilen havanın giriş sıcaklığının ısı transfer katsayısı üzerindeki değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'da Reynolds sayısı 1000 ve ısı akısı 5000 W/m^2 için, ısı taşınım katsayısının hava giriş sıcaklığı ile değişimi verilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, hava giriş sıcaklığı arttıkça ısı taşınım katsayısı azalmaktadır. İncelenen parametreler için, hava giriş sıcaklığının 298 K 'den 304 K 'e yükseltilmesi ile ısı taşınım katsayısının değerinin yaklaşık %3,11 kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Elektronik kartlarda soğutma için kullanılan akışkan genellikle ortam havasıdır. Mevsim şartlarına göre ortam hava sıcaklığı değişmektedir. Havanın sıcaklığının artması yoğunluğunun azalmasına sebep olmaktadır. Yoğunlukta ki azalış ise, soğutma havasının kütleli debisinin azalmasına dolayısıyla transfer olan ısı miktarının da azalmasına sebep olabilmektedir. Şekil 9'da görülen, hava giriş sıcaklığının artması ile ısı taşınım katsayısında ki azalmanın bu nedenle gerçekleştiği öngörülmektedir. Genel bir çıkarımla, yaz aylarında ortam havasını kullanan bir elektronik kartın soğutulmasının bir miktar daha zorlaştığı yorumu yapılabilir.



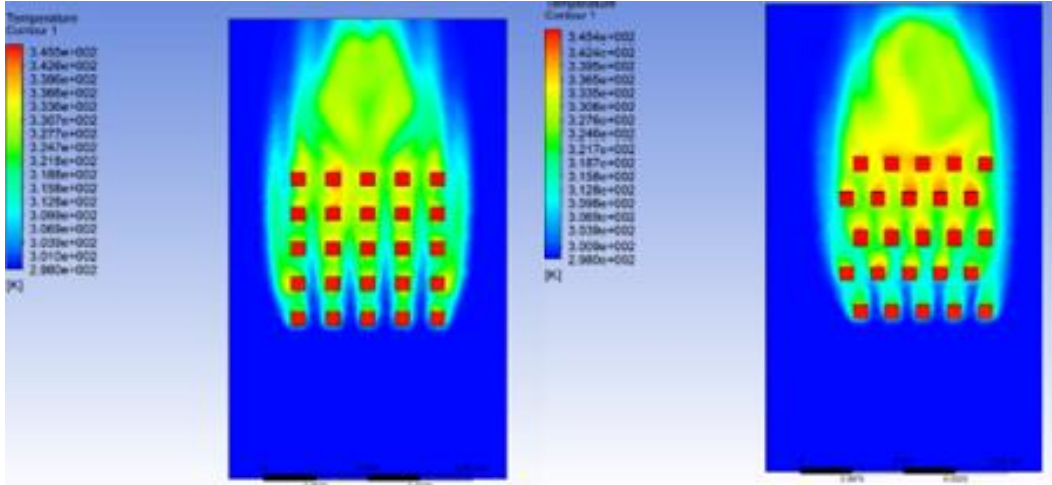
Şekil 9. Hava Giriş Sıcaklığının Değişiminin Isı Taşınım Katsayısına Olan Etkisi

Kare kanatçıklara sahip bir ısı alıcısında, kanatçıkların düz ve çapraz dizilimin ısı transfer katsayısı üzerindeki değişimi ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu kapsamda hava giriş sıcaklığı 298 K ve ısı akısı 5000 W/m^2 olduğu durumda, farklı Reynolds sayıları için elde edilen sonuçlar birlikte görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde her iki dizilim için elde edilen sonuçların yakınlık gösterdiği ve artan Reynolds sayısı ile ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Ancak çapraz diziliminin düz dizilime oranla ısı transferini yaklaşık %2,5 artırdığı belirlenmiştir.



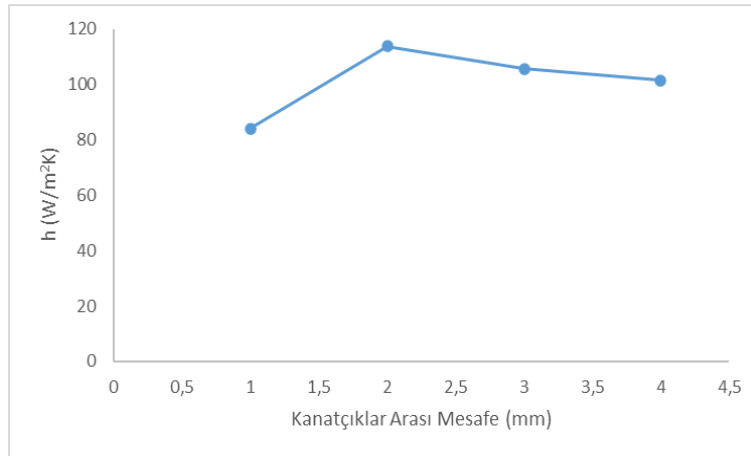
Şekil 10. Kanatçık Diziliminin Değişiminin Isı Transfer Katsayısına Olan Etkisi

Şekil 11'de ise kare kanatçıklara sahip bir ısı alıcısında, Reynolds sayısı 1000, hava giriş sıcaklığı 298 K ve ısı akısı 5000 W/m^2 olduğu durumda, kanatçıkların düz ve çapraz dizilime sahip olduğu geometriler için elde edilen sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil incelendiğinde çapraz dizilim durumunda düz dizilim durumuna oranla, elde edilen sıcaklık dağılımlarının daha düzensiz olduğu gözlemlenmiştir. Çapraz dizilime sahip geometride düz dizilime oranla, kanatçıkların arkasında kalan bölgede daha yüksek hava sıcaklıkları gözlemlenmiştir.



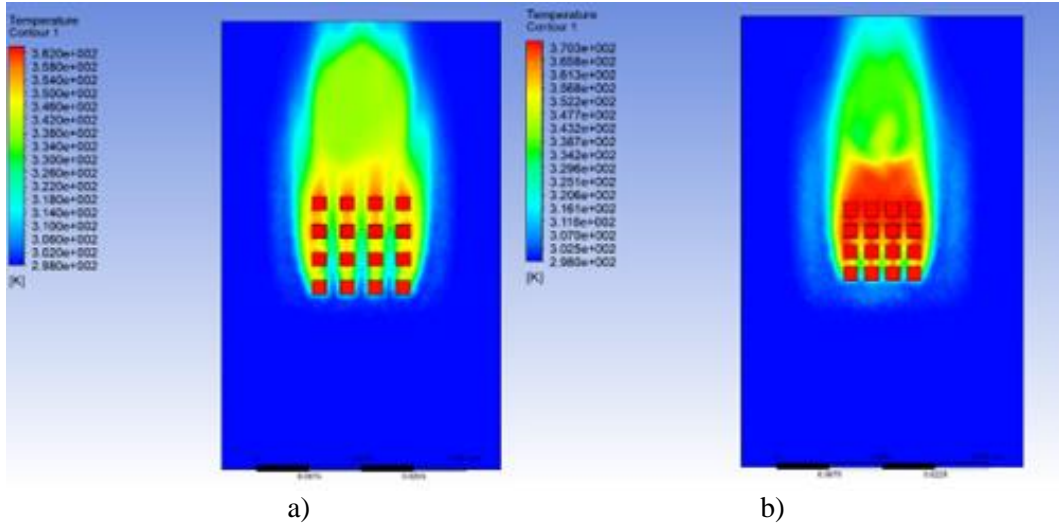
Şekil 11. Sıcaklık Dağılımları, a)Düz Dizilim b)Çapraz Dizilim

Şekil 12’de ise Reynolds sayısı 1000, hava giriş sıcaklığı 298 K ve ısı akısı 5000 W/m^2 olduğu durumda, farklı kanatçık arası mesafeler için elde edilen ısı taşınım katsayısı sonuçları görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kanatçık arası mesafe 1 mm’den 2 mm’ye artırıldığında ısı taşınım katsayısının değeri yaklaşık olarak %35 oranında artmıştır. Ancak kanatçıklar arası mesafe artırılmaya devam edildikçe, ısı taşınım katsayısının değeri azalış eğilimine girmiştir. Dolayısıyla en yüksek ısı taşınım katsayısı değeri, kanatçıklar arası mesafe 2 mm olduğu durumda gözlemlenmiştir.



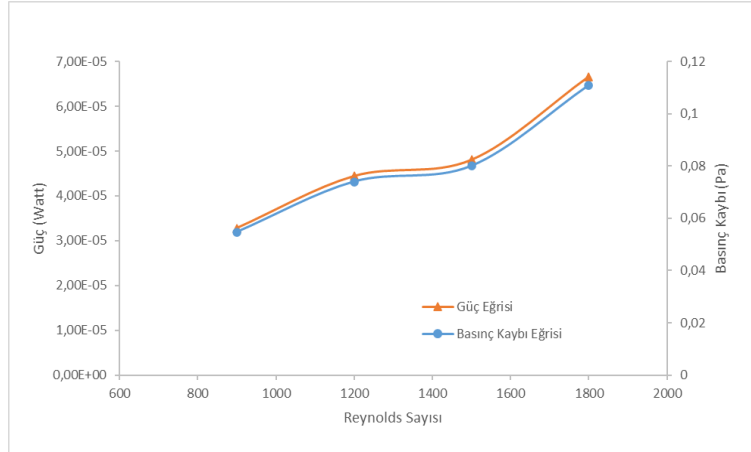
Şekil 12. Kanatçıklar Arasındaki Mesafenin Değişiminin Isı Transferin Katsayısına Olan Etkisi

Şekil 13’de ise Reynolds sayısı 1000, hava giriş sıcaklığı 298 K ve ısı akısı 5000 W/m^2 olduğu durumda, kanatçıklar arası mesafenin 1 mm ve 2 mm olduğu geometriler için elde edilen sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil incelendiğinde kanatçıklar arası mesafe 1 mm olan geometri için elde edilen sıcaklık dağılımlarının, 2 mm olan geometriye oranla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kanatçıklar arası mesafenin daha dar olması nedeniyle, yeterli konveksiyonun gerçekleşemediğini ve soğutmanın yetersiz kaldığını göstermektedir.



Şekil 13. Sıcaklık Dağılımları, a)Kanatçıklar Arası Mesafe 2 mm b)Kanatçıklar Arası Mesafe 1 mm

Şekil 14’te gerçekleşen basınç kaybının ve gücün Reynolds sayısı ile değişimi birlikte verilmiştir. Soğutma havasının ısı alıcısına bir fan vasıtasıyla gönderildiği düşünülmüştür. Bu durumda, farklı Reynolds sayıları için gerçekleşen basınç kaybı ve güç değerleri Eşitlik 9, 10 ve 11 aracılığı ile hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü üzere Reynolds sayısındaki artış ile basınç kaybı ve güç değerleri artış göstermiştir. Reynolds sayısının 900’dan 1800’e artırılması ile, güç değerinin yaklaşık %103,04 basınç kaybının ise yaklaşık %103,12 kadar arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 14. Basınç Kaybı ve Güç Değerinin Reynolds Sayısı ile Değişimi

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında bir kanal içerisinde bulunan mini pim kanatçıklı bir ısı alıcısının soğutulması ele alınmıştır. Kare, beşgen ve altıgen kanatçık geometrilerine sahip üç farklı model geometrisi oluşturulmuştur. Bu model geometriler için, Reynolds sayısı, ısı akısı, akışkan giriş sıcaklığı, kanat yüksekliği, kanatçık dizilimi gibi parametrelerin farklı değerleri için hesaplamalı akışkanlar dinamiği aracılığı ile sayısal analizler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, altıgen kanatçığa sahip modelin incelenen diğer modellere oranla daha iyi ısı performans sağladığı görülmüştür. Reynolds sayısının ve kanat yüksekliğinin artışının ısı transfer katsayısını artırdığı gözlemlenmiştir. Kanat yüksekliğinin 2 mm’den 8 mm’ye artırılması ile ısı taşınım katsayısının değerinde yaklaşık % 183 kadar artış tespit edilmiştir. Kanatçıklar arası mesafenin değişiminin ısı transferini etkilediği, bu mesafenin 2 mm olduğu durumda ise optimum ısı performans sağlandığı gözlemlenmiştir. Hava giriş sıcaklığının artırılmasının ise ısı transferini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Hava giriş sıcaklığının 298 K’den 304 K’ye yükseltilmesi ile ısı taşınım katsayısının değeri yaklaşık %3,11 kadar azalmıştır. Sonuç olarak Reynolds sayısı, kanat yüksekliği, kanatlar arasındaki mesafe, kanat dizilimi ve hava giriş sıcaklığı gibi parametrelerin, ısı alıcısının soğutulması sırasında oldukça önem arz ettiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Cao, X., Liu, H., Shao, X., & Shi, H. (2022). Experimental and numerical investigation on the heat transfer enhancement for mini-channel heat sinks with tessellated fins. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118353. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118353>
- Chin, S., Foo, J., Lai, Y., & Yong, T. (2013). Forced convective heat transfer enhancement with perforated pin fins. *Heat and Mass Transfer*, 49, 1447–1458. <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1186-z>
- Çengel, Y. A. (2004). Heat transfer a practical approach. (2nd ed.). New York:McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2006). Fluid mechanics fundamentals and applications. (3rd ed.). New York :McGraw-Hill.
- Foong, A. J. L., Ramesh, N., & Chandratilleke, T. T. (2009). Laminar Convective Heat Transfer in a Microchannel with Internal Longitudinal Fins. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 1908–1913. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.02.015>
- Ghani, I. A., Sidik, N. A. C., Mamat, R., Najafi, G., Ken, T. L., Asako, Y., & Japar, W. M. A. A. (2017). Heat transfer enhancement in microchannel heat sink using hybrid technique of ribs and secondary channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 640–655. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.103>
- Güder, T.B. (2021). Farklı geometrilerdeki mikro kanatçık ısı emicili anakart işlemci modelinin soğutulmasının sayısal analizi. Yüksek Lisans Tezi. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas 91s.
- Incropera, P.F., Dewitt, P. D., Bergman, L. T., & Lavine, S. A. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer. (6th ed.). NJ: John Wiley & Sons, Hoboken.
- Khonsue, O. (2018). Enhancement of the forced convective heat transfer on mini pin fin heat sinks with micro spiral fins. *Heat Mass Transfer*, 54, 563-570. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2159-4>
- Kotcioglu, I., Caliskan, S., & Baskaya, S. (2011). Experimental study on the heat transfer and pressure drop of a cross-flow heat exchanger with different pin–fin arrays. *Heat Mass Transfer*, 47, 1133-1142. <https://doi.org/10.1007/s00231-011-0779-7>
- Kutlu, Y. (2019). Bir kanal içindeki mini pim kanatçıklı ısı kaynağından olan zorlanmış taşınım ile ısı transferinin nümerik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara 141s.
- Moradikazerouni, A., Afrand, M., Alsarraf, J., Wongwises, S., Asadi, A., & Nguyen, K. (2019). Investigation of a computer cpu heat sink under laminar forced convection using a structural stability method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, 1218-1226. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.029>
- Naphon, P., & Khonseur, O. (2009). Study on the convective heat transfer and pressure drop in the micro-channel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, s. 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.09.001>
- Pan, Y., Zhao, R., Nian, Y., & Cheng, W. (2022). Study on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Pin-Fin Manifold Microchannel Heat Sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 183, 122052. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122052>
- Yeşildal, F. (2017). Dikdörtgen ve altıgen kanatçıklı ısı alıcılarla ısı ve akış karakteristiklerinin deneysel ve teorik analizi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum 156s.
- Zhao, J., Huang, S., Gong, L., & Huang, Z. (2015). Numerical study and optimizing on micro square pin-fin heat sink for electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 93, 1347-1359. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.105>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.09.2022
Kabul Tarihi : 13.12.2022

Received Date : 26.09.2022
Accepted Date : 13.12.2022

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A DIFFERENT TRAPEZOIDAL INCLINATION ANGLE IN A REVERSE TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION FLOW CHANNEL ON THE PERFORMANCE OF THE PEM FUEL CELL WITH THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) METHOD

TERS TRAPEZ KESİTLİ BİR AKIŞ KANALINDA FARKLI BİR TRAPEZ EĞİM AÇISININ PEM YAKIT PİLİNİN PERFORMANSINA ETKİSİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Yunus SAYAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-0871-6842)

¹ Bitlis Eren University, Department of Mechanical Engineering, Bitlis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yunus SAYAN, ysayan@beu.edu.tr

ABSTRACT

In this work, a reverse trapezoidal cross-section channel shape for a single flow channel PEM fuel cell was examined with computational fluid dynamic (CFD) method. ANSYS Fluent was applied to solve electrochemical reactions, potential fields, mass, species, and energy transport equations. Species mass ratio, temperature distribution and relative humidity were obtained for the cell as well as the i-V and power density plots. The results were compared to two reference geometries with the commonly used square section shape for the channel. One reference geometry has the same channel width and height with the reverse trapezoidal cross-section channel while the other has the same cross-section area. The results indicate that the cell with reverse trapezoidal cross sectional flow channel shape has more than 32% higher power density than the cell with square cross-sectional flow channel shapes, but poor water management.

Keywords: PEM fuel cell, channel geometry, modelling, reverse trapezoidal cross-section.

ÖZET

Bu çalışmada, PEM yakıt pilleri için ters yamuk kesitli kanal şekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiştir. ANSYS Fluent, elektrokimyasal reaksiyonlar, kütle, türler, enerji transferi ve potansiyel alan denklemlerini çözmek için uygulandı. Pillerdeki türlerin kütle oranı, bağıl nem ve sıcaklık dağılımı grafikleri ile polarizasyon ve güç yoğunluğu eğrileri elde edildi. Sonuçlar, PEM yakıt pilleri kanalı için yaygın olarak kullanılan kare kesit şekline sahip iki referans geometri ile karşılaştırıldı. Referans geometrilerinden biri ters yamuk kesitli kanal ile aynı kanal genişliği ve yüksekliğine sahipken, diğeri aynı kesit alanına sahiptir. Analiz sonuçları, ters yamuk kesitli akış kanalı şekline sahip pilin, kare kesitli akış kanalı şekline sahip pilden %32'den daha fazla güç yoğunluğuna sahip olduğunu, ancak su yönetiminin zayıf olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: PEM yakıt pili, kesit şekli, modelleme, ters yamuk kesit

ToCite: SAYAN, Y., (2023). INVESTIGATION of THE EFFECT of a DIFFERENT TRAPEZOIDAL INCLINATION ANGLE in a REVERSE TRAPEZOIDAL CROSS-SECTION FLOW CHANNEL on the PERFORMANCE of the PEM FUEL CELL WITH THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) METHOD. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 408-423.

1. INTRODUCTION

Many cities in the world have been suffering from high CO₂ emission and air pollution due to the harmful effect of the fossil fuels. Dependency of fossil fuels has increased in recent years owing to the growing population and industrialization. As a prospective alternative energy solution, fuel cells mitigate internal combustion engine dependency due to high efficient energy generation (Ibrahimoglu, Yilmazoglu, & Celenk, 2017). Among fuel cell variants, proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are the primary candidates for transportation and portable applications in particular, but also gaining prominence in the stationary/power generation domain, such as in reversible fuel cells (FCs) and electrolyzer systems. (Y. Li, Zhou, Liu, & Wu, 2019).

A fuel cell (FC) is an electrochemical system that efficiently converts chemical potential (from fuel) into electric power (Kerkoub, Benzaoui, Haddad, & Ziari, 2018; Wilberforce et al., 2017). These fuel cells (FCs) can be used for several commercial sources such as laptops, mobile phones, transportation and so on (Awan, Saleem, & Basit, 2018; Kerkoub et al., 2018; Y. Wang, Ruiz Diaz, Chen, Wang, & Adroher, 2020; Zhao & Li, 2019). PEMFCs can replace conventional fossil fuel-powered devices due to their higher conversion efficiency, relative simplicity, convenient operating temperature, rapid power-up, dynamic load following, silent operation and low emissions (Ibrahimoglu et al., 2017; Kerkoub et al., 2018; Wilberforce et al., 2019). The PEMFC comprises primarily the bipolar plate and the membrane electrode assembly (MEA) as repeating units. The MEA contains a proton exchange membrane (PEM) electrolyte located between two catalysts (electrodes). Each electrodes comprises of a layer of gas diffusion (GDL) and catalyst (Carcadea et al., 2020; Paulino et al., 2017; Wilberforce et al., 2019). The bipolar plate provides reactant gases to reach the MEA for electrochemical reactions as well as removal of products from the MEA. It also provides mechanical support to the cell and works as current collector. The bipolar plates typically consist of different patterns of flow channel grooves in order to deliver reactant gases to both cathode and anode catalyst through the GDLs. It also discharges the produced water carried by diffusion to the channels. Therefore, it is important to design efficient bipolar plate for sufficient reactants' supply and products' removal. Efficient bipolar design also results in an overall improved fuel cell performance alongside power density generation. It would accrue further benefits in terms of homogenous reactant and product transport, such as a more uniform electrochemical active area (lower prospect of starvation or flooding), optimal thermal distribution (mitigation of thermal runaway, hotspots) and potentially improved durability and ruggedness (Paulino et al., 2017).

There have been many studies performed regarding to the investigation of the channel designs on the PEMFC's performance comprising serpentine channels (single as well as multiple), parallel channels and interdigitated channels (Kerkoub et al., 2018). Channel dimensions (depth, width) and flow field patterns are important design parameters for the PEMFC's operation owing to their high influence on the durability and performance. Better heat and water management, a sufficient distribution of reacting species on catalysts and minimization of the pressure loss are a few critical problems that should be handled by the optimization of flow field (Carcadea et al., 2021). Four distinct channel geometries (serpentine zig-zag, straight zig-zag, serpentine parallel and straight parallel) were studied by Saco et al. (Arun Saco, Thundil Karuppa Raj, & Karthikeyan, 2016) with a rectangular configuration. According to their result, the better current and power densities were obtained from the straight zig-zag flow channels. Yi et al. (Yi & Van Nguyen, 1999) studied the influence of different flow channel geometries on the PEM fuel cell efficiency, reporting better cell performance with an interdigitated configuration. Lim et al. devised an altered parallel flow field in order to overturn an uneven dispersal of reactants and product in the parallel channels feature (Lim, Majlan, Daud, Rosli, & Husaini, 2020). They report that the cell efficiency enhanced as a result of improved transport of reacting gases to corresponding active sites and discharge of excessive water. The design of step-wise depth for the parallel flow channel was investigated by Ferng et al. (Ferng & Su, 2007). They found that this design improved substantially the PEMFC's performance. The channels' cross sectional areas including width of ribs, height and width of the channels have been of interest to many other researchers (Kerkoub et al., 2018). They examined these parameters for different designs so as to obtain better cell performance and flow management. Manso et al. reported that the aspect ratio of the channel cross-section has considerable influence on the power output behavior of the PEMFC at low polarization (Manso, Marzo, Mujika, Barranco, & Lorenzo, 2011). Different shapes of cathode channel were examined by Wang et al. (X. D. Wang, Lu, Duan, & Lee, 2012). According to their result, the cell with triangular cross-sectional channel showed superior characteristics to the cell with rectangular cross-sectional channel at low operating voltage. In addition, there are several studies that have examined the effect of flow channel cross-sectional profiles on PEMFC operating behavior (triangular, rectangular, trapezoidal and curved) (Carcadea et al., 2021). Li et al studied different flow channel cross-sectional profiles on the PEMFC's performance (C. Li, Xu, Hu, Mei, & Yang, 2021). They reported that the cell possessing a triangular cross-sectional flow channel has greater

current density (for the same operating voltage) compared to the cell using trapezoidal cross-section flow channels. Paulino et al (Paulino et al., 2017) also studied different cross-sections of the flow channel on the PEMFC's performance. According to their result, the cell with rectangular cross-sectional channel generated better current density in comparison to the cell with trapezoidal cross-sectional channel.

Despite many research works carried out and published on the devise of the flow field geometry, the full unlocking of the effects of various flow channel cross section shapes on the PEM fuel cell is still a work-in-progress. This problem is uncertain about which flow field geometry are more promising and appropriate for the future development of the PEMFCs.

In this paper, a reverse trapezoidal cross-section channel shape for PEM fuel cells was investigated. In order to examine holistically the influence of the cross-sectional shape on the performance of the cell, the authors constructed and applied a three dimensional computational fluid dynamic (CFD) model by utilizing ANSYS Fluent Fuel Cells Module. Initially, two single channel cells with square cross-section flow channel (having different cross-sectional area) were analyzed as references. Later, a single channel cell with a reverse trapezoidal cross-section flow channel was simulated under the same operating conditions. Their results were compared with each other in terms of species consumption, water formation, relative humidity, temperature distribution and performance.

PEM FC MODELING

Numerical Modeling

PEM fuel cells are multiphysics systems, thus many processes occur that describe their operation, encompassing: (i) mass transport of gaseous and liquid molecules/species (O_2 , N_2 and H_2O vapor/liquid on the cathode; H_2 gas and H_2O vapor/liquid on the anode) associated with fluid flow (ii) electrochemical reactions and (iii) heat transfer. To model these processes numerically, differential equations defining mass, momentum, electric charges, and energy conservation are needed.

Here, ANSYS Fluent was used to model and simulate a 3-D single-channel PEMFC possessing different cross-sectional profiles. The following conditions were assumed for the model: flow is incompressible and laminar; the model is computed for a steady state condition of the system; gravitational effects are ignored; the catalyst layers (CLs), gas diffusion layers (GDLs) and electrolyte are homogeneous and isotropic; gases are ideal; water phase change is not considered; there is no gas diffusion throughout electrolyte.

The governing equations describing the model are used to simulate and analyze multiphase flow, temperature and current density in the PEMFC. They are given as follows:

- *Conservation of mass equation*

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho v) = S_m \quad (1)$$

$$S_m = -\frac{M_{H_2}}{2F} J_a - \frac{M_{H_2O}}{F} J_a \quad \text{for hydrogen} \quad (2)$$

$$S_m = -\frac{M_{O_2}}{4F} J_c - \frac{M_{H_2O}}{2F} J_c \quad \text{for oxygen} \quad (3)$$

Where ρ , t , v , S_m , M_{H_2} , M_{O_2} , M_{H_2O} and F are the density ($kg\ m^{-3}$), time (s), velocity ($m\ s^{-1}$), mass source term ($kg\ m^{-3}\ s^{-1}$), molar mass of hydrogen ($kg\ mol^{-1}$), molar mass of oxygen ($kg\ mol^{-1}$), molar mass of water ($kg\ mol^{-1}$), and Faraday's constant ($C\ kg^{-1}\ mol^{-1}$), respectively. In addition, J_c and J_a are the exchange current densities ($A\ m^{-2}$) at the cathode and anode, respectively.

- **Butler-Volmer equation**

$$J_a = (A_a i_a^{ref}) \left(\frac{C_{H_2}}{C_{H_2}^{ref}} \right)^{\gamma_a} \left[e^{\frac{\alpha_a F \eta_a}{RT}} - e^{-\frac{\alpha_c F \eta_a}{RT}} \right] \quad (4)$$

$$\eta_a = \varphi_{solid} - \varphi_{membrane} \quad (5)$$

$$J_c = (A_c i_c^{ref}) \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2}^{ref}} \right)^{\gamma_c} \left[-e^{\frac{\alpha_a F \eta_c}{RT}} + e^{-\frac{\alpha_c F \eta_c}{RT}} \right] \quad (6)$$

$$\eta_c = \varphi_{solid} - \varphi_{membrane} - V_o \quad (7)$$

Where a and c subscripts denote the anode and cathode, respectively. Furthermore, A , i , γ , α , R , T , η , φ , V_o , C and C^{ref} are the specific active surface area (m^{-1}), reference current density (Am^{-2}), concentration dependence, charge transfer coefficient, universal gas constant ($J K^{-1} mol^{-1}$), temperature (K), activation losses (V), potential (V), open circuit voltage, local species concentration and reference value ($kg mol m^{-3}$), respectively.

- **Conservation of momentum equation**

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) + \varepsilon \nabla P - \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + \frac{\mu \varepsilon^2 \vec{u}}{K} = 0 \quad (8)$$

Where u , ε , P , μ and K are the velocity vector ($m s^{-1}$), porosity, pressure (Pa), dynamic viscosity ($kg m^{-1} s^{-1}$) and permeability (m^2), respectively.

- **Gas reactant equation**

$$\nabla(\rho_i \vec{u}_i Y_i) = \nabla(\rho_i D_i^{ef} \nabla Y_i) + S_i \quad (9)$$

Where i represents H_2 , O_2 , N_2 and H_2O , Y denotes mass fraction, S denotes the source term and D^{ef} is the effective mass diffusivity ($m^2 s^{-1}$)

- **Liquid water equation**

$$\nabla(\rho_l \vec{u}_l f) = \nabla(\rho_l D_l \nabla Y \varphi_l) + S_l \quad (10)$$

Where l represents the liquid, f is the interfacial drag coefficient, D is the mass diffusivity ($m^2 s^{-1}$) and φ is the potential (V).

- **Water equation in membrane**

$$\frac{\rho_{mem}}{ZW} \nabla(D_d^{ef} \nabla \lambda_d) + S_d = 0 \quad (11)$$

Where ZW is the gram equivalent of electrolyte ($kg kmol^{-1}$), d describes dissolved water and λ is the water content in lame constant or ionomer.

- **Conservation of energy**

$$\nabla \cdot (\rho v H_T) = k_{ef} \nabla \cdot (\nabla T) + S_T \quad (12)$$

$$S_T = I^2 R_{ohm} + h_{react} + \eta_{act} R_{a/c} \quad (13)$$

Where H_T , k_{ef} , S_T , I , R , h and η are the total enthalpy (J mol^{-1}), effective thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), source term of energy (W m^{-3}), current (A), resistivity of conducting media (ohm), net enthalpy change (J mol^{-1}) and activation over potential (V), respectively.

- **Ohmic's law for electron and protonic transport**

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) + R = 0 \tag{14}$$

Where σ , Φ and R are the electrical conductivity ($1/\text{ohm m}$), electrical potential (volts) and volumetric transfer current (A m^{-3}), respectively.

Geometrical Modeling

In the present paper, two different flow channel geometries were considered for the PEMFC performance investigation. From top to bottom, the components are: bipolar plate; anode gas flow channel (GFC); anode gas diffusion layer (GDL); membrane electrode assembly (MEA) (anode catalyst, electrolyte and cathode catalyst); cathode gas diffusion layer; cathode gas flow channel; bipolar plate. One flow channel geometry has a square cross-section with two different dimension (cell 1 and cell 2). Other flow channel geometry has a reverse trapezoidal cross-section (cell 3). These cells are identical, and they only differ from each other by the cross-section of their flow channel. The cross-section shapes of cell 1 and cell 2 are the same but they have the different cross-sectional area. Moreover, the cross sectional shape of cell 3 is different than that of cell 2 and cell 1. However, the cross-sectional area of cell 2 and cell 3 is the same. Cells were constructed as single-channel PEMFCs with 40 mm length. A representation view of the constructed models is displayed in Figure 1 with detailed channel cross-sections. The geometric details of the PEMFC can be seen in Table 1 and Figure 1.

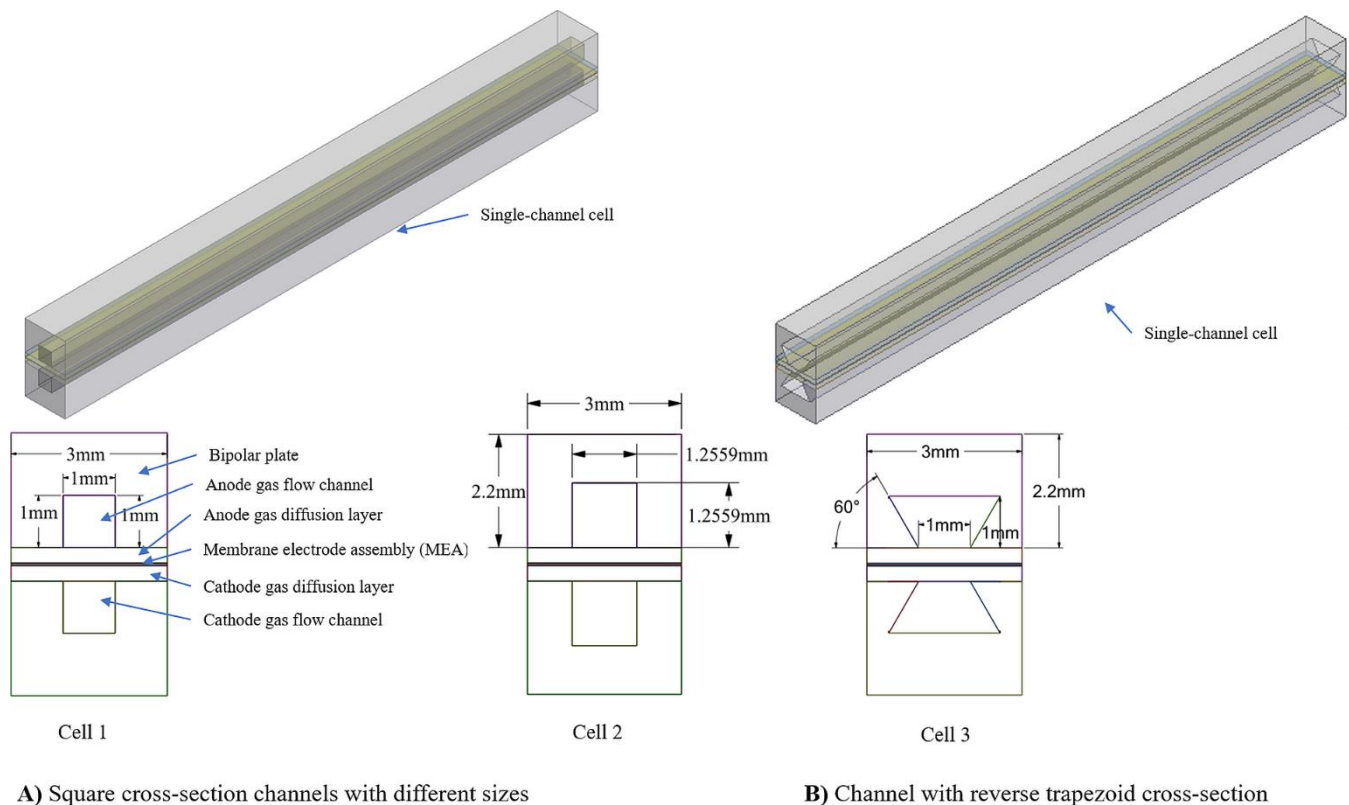


Figure 1. A Representation View of the Constructed Models with Detailed Channel Cross-Sections

In order to gauge the impact of gas channel geometries on PEMFC, two flow channels with a square cross-section and a flow channel with an inverted-trapezoidal cross-section were designed for a single channel cell. The square or rectangular cross-section channels are extensively used for PEMFCs. Therefore, they are being considered as reference compared to other geometries. Cell 1 and cell 3 possess the same flow channel height and bottom edge width but different top edge width (different cross-section shape). Therefore, their flow channel has different cross-

section area. As is well known, changing the cross-sectional area will affect the velocity of the flow through that section for a given mass flow rate. To properly analyze and quantify the effect of the flow channel geometry independently, a model (cell 2) with the same flow channel cross-section area of cell 3 was designed. Thus, cell 2 and cell 3 have the same cross-sectional area of their flow channels but different shapes. Lastly, cell 1 and cell 2s' flow channels possess the same cross-section shape but different size.

In this work, the purpose of using reverse trapezoidal cross section for fuel cell gas channel is to promote the cell's overall performance characteristics deriving from better velocity management of species due to a unique shape.

Table 1. Geometric Properties of the PEMFC Model Employed in the Study

Quantity	Value
Thickness of the bipolar (mm)	2.2
Width of the channel (mm)	1
Height of channel (mm)	1
Length of the channel (mm)	40
Thickness of the anode gas diffusion (gdl)(mm)	0.3
Thickness of the anode catalyst (cl)(mm)	0.01
Thickness of the membrane (mm)	0.03
Thickness of the cathode catalyst (cl)(mm)	0.01
Thickness of the cathode gas diffusion (gdl)(mm)	0.3
Total reaction area (mm ²)	120

Operating Parameters

In this study, three single channel cells which have a total reaction area of 120 mm² were analyzed under the same operating settings. The operating temperature and pressure were set to be 80 °C and 101325 Pa, respectively. The operating conditions and input parameters set in this research are provided in Table 2.

Table 2. Operating Conditions and Some of the Input Parameters Used in the Numerical Simulations.

Parameter	Value
Operating pressure (Pa)	101325
Operating temperature (K)	353.15
Osmotic drag source	1
Open circuit voltage (V)	1.22
Anode reference current density ($A m^{-2}$)	10000
Cathode reference current density ($A m^{-2}$)	10
Anode gas diffusion layer porosity	0.6
Gas diffusion layer permeability of the anode (m^2)	3e-12
Anode catalyst layer porosity	0.2
Anode catalyst layer permeability (m^2)	2e-13
Catalyst layer surface volume ratio of the anode (1/m)	200000
Electrolyte equivalent weight ($kg kmol^{-1}$)	1100
Electrolyte protonic conduction coefficient	1
Electrolyte protonic conduction exponent	1
Electrolyte water diffusivity coefficient	1
Cathode gas diffusion layer porosity	0.6
Cathode gas diffusion layer permeability (m^2)	3e-12
Cathode catalyst layer porosity	0.2
Cathode catalyst layer permeability (m^2)	2e-13
Catalyst layer surface volume ratio of the cathode (1/m)	200000
Cathode ionomer resistance ($s m^{-1}$)	100
Anode porous jump resistivity ($ohm m^{-2}$)	2e-6
Cathode porous jump resistivity ($ohm m^{-2}$)	2e-6
Inlet mass flow rate of the anode ($kg s^{-1}$)	4e-7
Inlet and outlet temperature of the anode (K)	353.13
Inlet H_2 mass fraction of the anode	0.6
Inlet H_2O mass fraction of the anode	0.4
Inlet mass flow rate of the cathode ($kg s^{-1}$)	3e-6
Inlet and outlet temperature of the cathode (K)	353.13
Inlet O_2 mass fraction of the cathode	0.21
Inlet H_2O mass fraction of the cathode	0.15
Anode terminal electric potential (V)	0
Cathode terminal electric potential (V)	0.9, 0.85, 0.80, 0.75, ...0.2
Electrolyte (Nafion) (density $kg m^{-3}$)	1980
Electrolyte (Nafion) thermal conductivity ($W m^{-1}K^{-1}$)	2
Electrolyte (Nafion) electrical conductivity ($S m^{-1}$)	1e-16
Electrolyte (Nafion) specific heat ($J kg^{-1} K^{-1}$)	2000
Bipolar plate (aluminum) density ($kg m^{-3}$)	2719
Bipolar plate (aluminum) specific heat ($J kg^{-1}K^{-1}$)	871
Bipolar plate (aluminum) thermal conductivity ($W m^{-1}K^{-1}$)	100
Bipolar plate (aluminum) electrical conductivity ($S m^{-1}$)	1000000
Anode and cathode catalyst (Graphite+Pt) density ($kg m^{-3}$)	2719
Anode and cathode catalyst (Graphite+Pt) specific heat ($J kg^{-1}K^{-1}$)	871
Anode and cathode catalyst (Graphite+Pt) thermal conductivity ($W m^{-1}K^{-1}$)	10
Anode and cathode catalyst (Graphite+Pt) electrical conductivity ($S m^{-1}$)	5000
Anode and cathode gas diffusion layer (Graphite) density ($kg m^{-3}$)	2719
Anode and cathode gas diffusion layer (Graphite) specific heat ($J kg^{-1} K^{-1}$)	871
Anode and cathode gas diffusion layer (Graphite) thermal conductivity ($W m^{-1} K^{-1}$)	10
Anode and cathode gas diffusion layer (Graphite) electrical conductivity ($S m^{-1}$)	5000

Mesh Validation

Mesh generation directly influences the time for simulation and its results. In order to gain confidence in the validity of the simulation, it is standard practice in the CFD workflow to prepare the model meshing which must first establish grid independence i.e. a set of results invariant or independent of mesh size. Therefore, current densities of the cell 2 were calculated by ANSYS Workbench at five different number of elements at a constant operating voltage of 0.5 V. The mesh density was increased from 657200 to 2959479 elements as shown in Table 3. The results display that increasing the number of elements has little effects on current density of cell 2 (see Table 3 and Figure 2). The cell current density decreased by %0.5 when the number of element increased from 657200 to 2959479. This margin of

error can be tolerated, as the increase in the number of elements will significantly increase the analysis time. Therefore, the number of elements were chosen to be around 657200 for the all other analyses in this study.

Table 3. Current Density Changes of Cell 2 at Different Number of Elements at A Constant Operating Voltage of 0.5 V

Order	Elements' number	Voltage (V)	Current density (W cm ⁻²)	Current density change %
1	657200	0.5	1.295	
2	860472	0.5	1.2919	0.239956653
3	1270300	0.5	1.2934	0.115973403
4	1792369	0.5	1.2854	0.622374358
5	2959479	0.5	1.2887	0.256072011

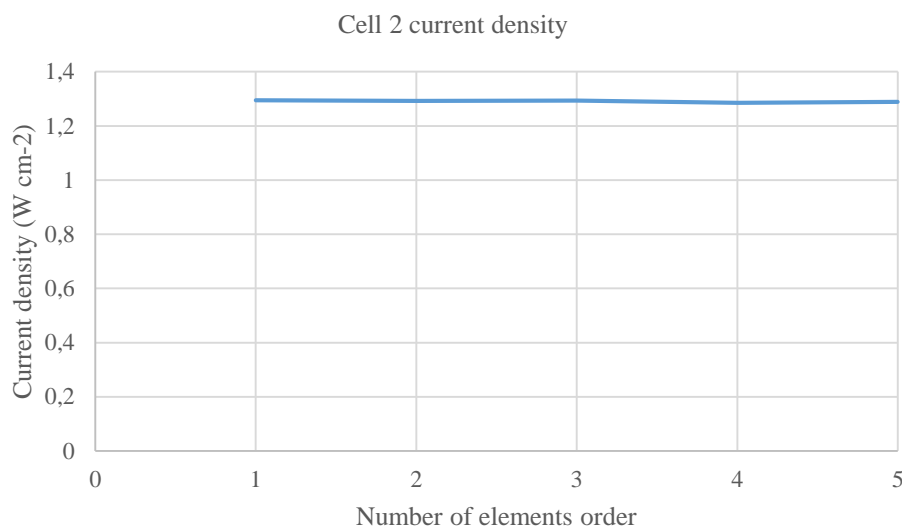


Figure 2. Current Density Changes of the Cell 2 at Different Number of Elements at A Constant Operating Voltage of 0.5 V

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 depicts cross sectional view of the velocity distribution of the single channel cell 1, cell 2 and cell 3 at the middle of the cells in the flow direction and in the transverse direction. The maximum flow rate occurs along the mid-axis length of the channels for all cells. In addition, the flow velocity of the gases starts at low speeds at the anode and cathode channels' inlets and increases towards outlets of electrodes' channels. When the maximum gas flow rates occurring in the cells are compared with each other, the maximum flow rate occurs in the gas flow channels of the cell 1 (cross-sectional area of 1 mm²) as 7.16 m s⁻¹. This is an expected phenomenon, since for the same mass flow rate, the normal flow velocity is higher in the channel with a smaller cross-sectional area. This can be explained by the law of conservation of mass. However, for the same flow channel cross-sectional area (cell 2 and cell 3 with a cross-section area of 1.577 mm²) and mass flow rate, maximum gas velocity occurs within channels of cell 2 as 4.61 m s⁻¹. The reduced velocity (2.39 m s⁻¹) in flow channels of cell 3 can be explained by the inverse trapezoidal cross-sectional shape.

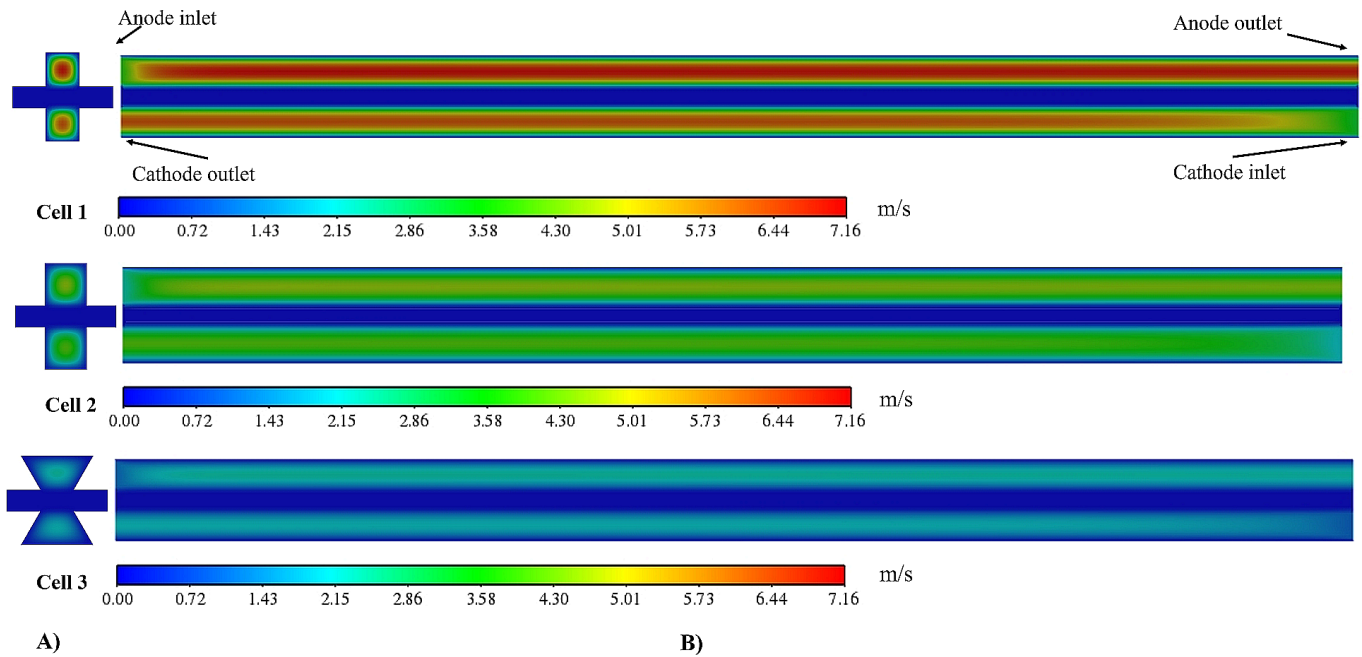


Figure 3. Cross Sectional View of the Velocity Distribution of the Cells at the Middle of the Cells Operating at 0.55 V **A.** in the Flow Direction and **B.** in the Transverse Direction

Cross sectional view of H_2 mass fraction distribution of the single channel cell 1, cell 2 and cell 3 at the center of the cells in the transverse direction at cell voltage of 0.55 V is shown in Figure 4. H_2 mass fraction decreases from anode flow channel inlet to outlet for all the cells as expected. Maximum mass fraction of H_2 is around 0.48 for cell 1 and cell 2, while it is around 0.42 for cell 3 at the outlet of the anode gas flow channel. Figure 5 illustrates the O_2 mass fraction at the same cross-sectional view. As can be seen, the mass fraction of O_2 diminishes from cathode flow channel inlet to outlet for cell 1, cell 2 and cell 3. Oxygen gas depletion becomes more dominant in the cathode gas flow channel outlet of the cell 3 in comparison to cell 1 and cell 2 (bigger green area at the cathode outlet of cell 3 in Figure 5). The reason why the hydrogen gas ratio at the anode channel outlet and the oxygen gas ratio at the cathode channel outlet in cell 3 is less than that of cell 1 and cell 2 can be explained as follows: A better electrochemical reaction might have occurred in cell 3 compared to cell 1 and cell 2. This might be because species with a lower flow rate have enough time to undergo an electrochemical reaction on the catalysts. Following the improved electrochemical activity, the amount of reactant through flow channel decreases. This also improves the fuel efficiency. It is also expected to increase fuel cell performance.

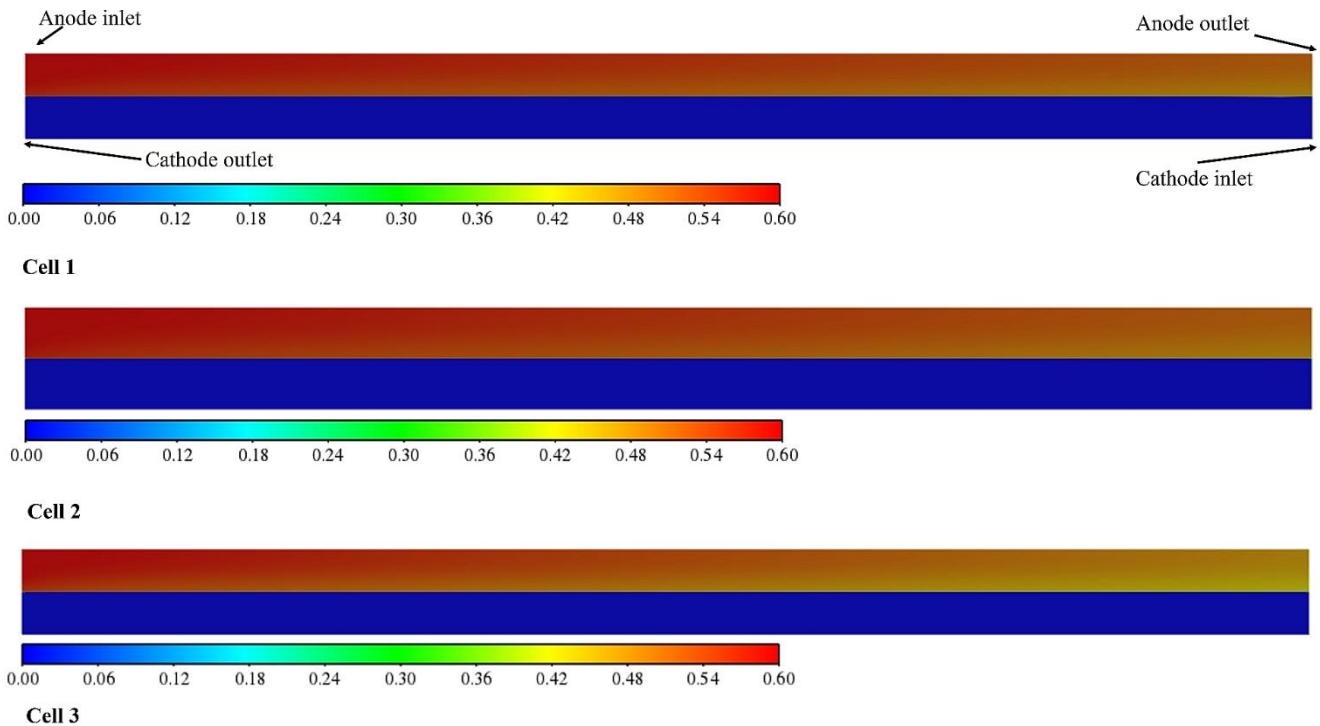


Figure 4. Cross Sectional View of the H₂ Mass Fraction Distribution of the Cells at the Center of the Cells Shown in the Transverse Direction at an Operating Voltage of 0.55 V.

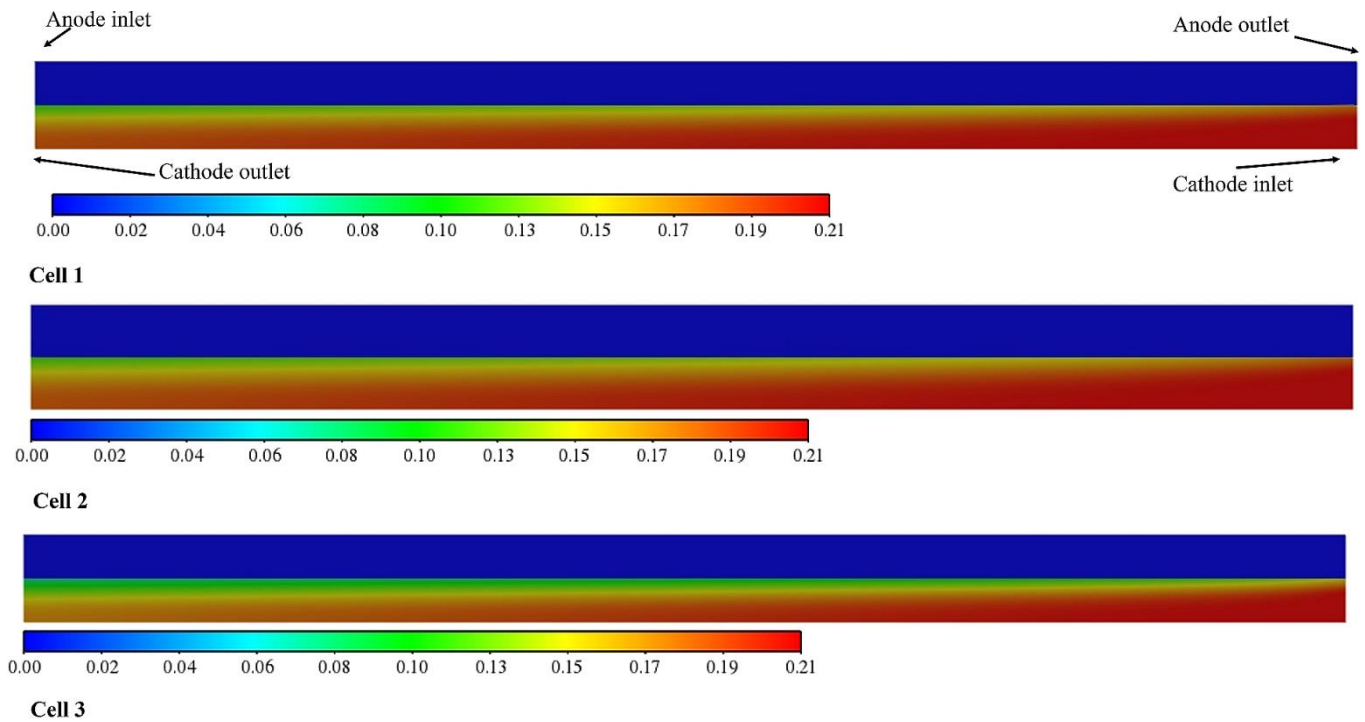


Figure 5. Cross Sectional View of O₂ Mass Fraction Distribution of the Cell 1, Cell 2 And Cell 3 at the Middle of the Cells Shown in the Transverse Direction at an Operating Voltage of 0.55 V.

In PEMFCs, a water balance is required to obtain the optimal performance (Jourdani & Mounir, 2015). The protons (H⁺) generated at the anode electrode need water molecules to flow from anode to cathode through electrolyte by the electro-osmotic drag. Thus, the membrane electrolyte needs water so as to have good protonic conductivity (Carcadea et al., 2021). Lack of humidity in the gas channels brings about the condition whereby the membrane interface lose water. This causes a decrease in the effective protonic conductivity of the membrane (increased ohmic electrolyte resistance).(Jourdani & Mounir, 2015). However, if water content is too high, flooding results (Wilberforce et al.,

2017). Excessive water in the cell blocks gas diffusion layer and catalyst pores, impeding the diffusion of species and therefore the polarization related to mass transport and concentration gradients increases. In addition, excessive water in catalyst covers the active surface areas where electrochemical reactions occur and thus leads to cell's performance drop (Penga, Tolj, & Barbir, 2016; (Arif, Cheung, & Andrews, 2022). The membrane optimal relative humidity is required to be between 80% to 100% (Jourdani & Mounir, 2015). The water generation rate in cells depends on current generation rate. With increased current loads (i.e. large current densities), the production of water in cell is higher (Arif et al., 2022).

It is important to have a good flow channel design for effective flow control and hence better cell performance. Figure 6 shows cross sectional view of H₂O molar concentration distribution of the single channel cells across the central plane of the cells in the transverse direction at an operating voltage of 0.55 V. In addition, Figure 7 illustrates relative humidity in all cells at the same cross-sectional view. It is clear that maximum H₂O concentration and relative humidity in all cells occur at the cathode outlets as expected. Maximum molar concentration of H₂O, was obtained in cell 1 and cell 2 as 0.012 kmol m⁻³ and 0.0119 kmol m⁻³, respectively. They are almost the same. However, the maximum molar concentration of H₂O in cell 3 was obtained as 0.0249 kmol m⁻³. In addition, maximum relative humidity was around %73 in cell 1 and cell 2 while it is around %150 in cell 3 at an operating voltage of 0.55 V. These results show that, cell 3 generates more current density than cell 1 and cell 2 as can be seen in Figure 9. However, relative humidity in cell 3 is quite high (%150), which could block pores and catalyst active surface areas.

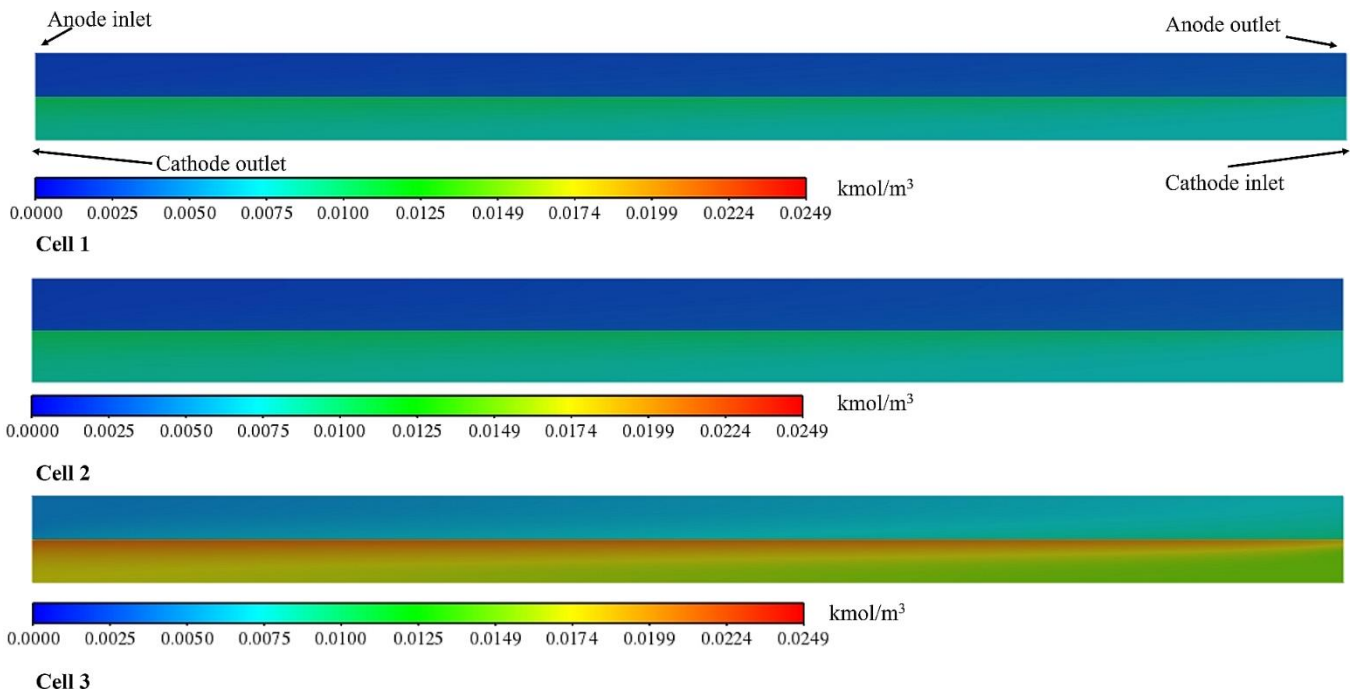


Figure 6. Cross Sectional View of H₂O Molar Concentration Distribution of the Cell 1, Cell 2 And Cell 3 at the Middle of the Cells Shown in the Transverse Direction at an Operating Voltage of 0.55 V.

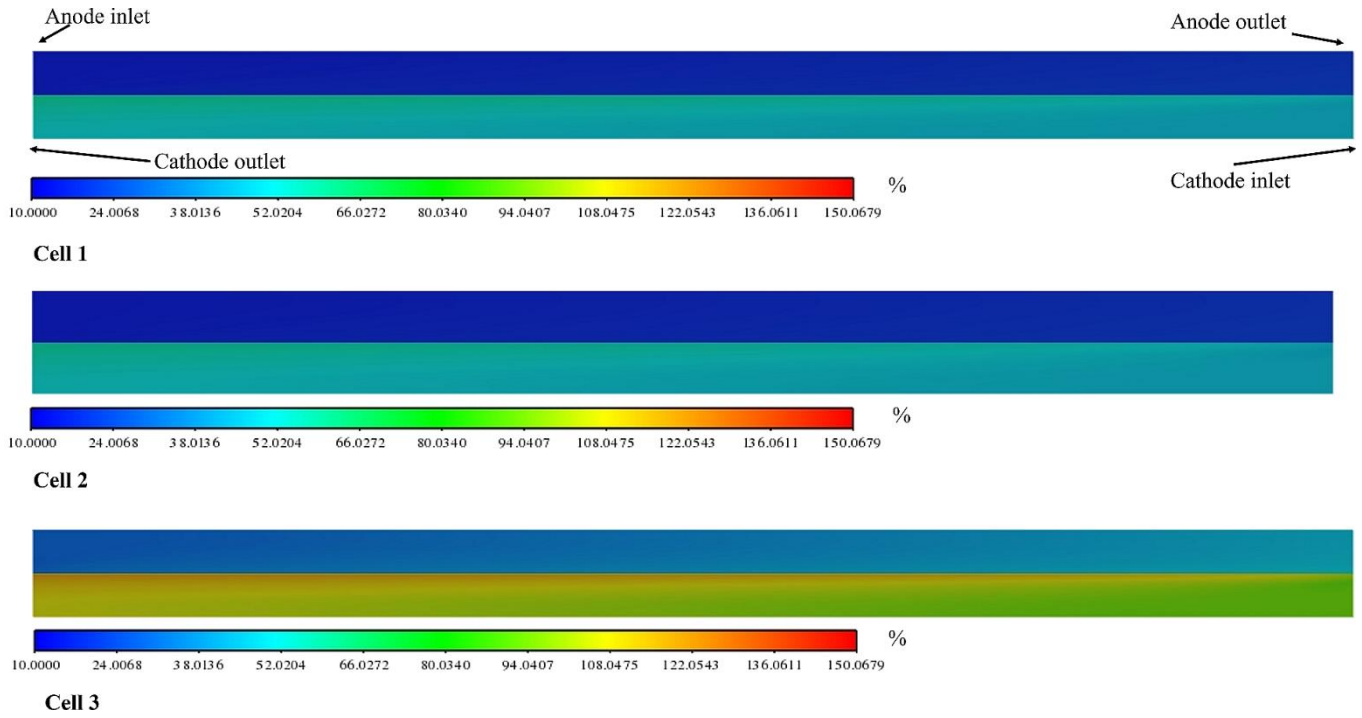


Figure 7. Cross Sectional View of Relative Humidity Distribution of the Cell 1, Cell 2 and Cell 3 at the Middle of the Cells Shown in the Transverse Direction at an Operating Voltage of 0.55 V.

Figure 8 shows temperature distribution of the single channel cells at the same cross sectional view mentioned above paragraphs. The working temperature and condition of these cell were set to be 80°C and isothermal, respectively. However, temperature of the all cells increased a couple of degree. The temperature distribution of cell 1 and cell 2 is almost uniform, but that of cell 3 is not uniform. The maximum temperature was obtained in cell 3 as about 84 °C while the maximum temperature in cell 1 was obtained as around 82°C. According to this figure, there is a small temperature gradient in all cells. The maximum temperature gradient among these cells occurred as 4°C in cell 3. It must be taken into account since this temperature difference could cause thermal stresses in the cell.

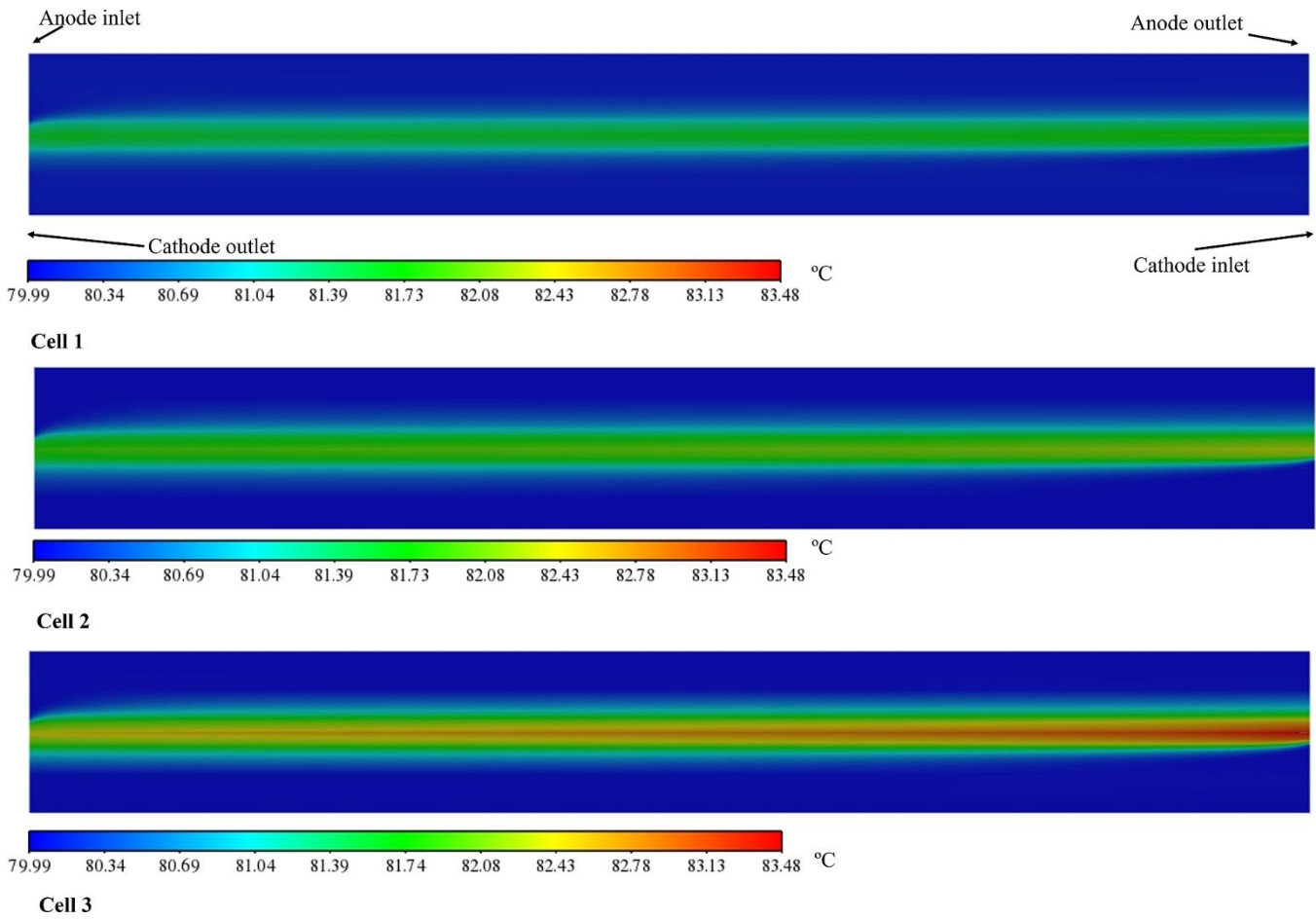


Figure 8. Cross Sectional View of Temperature Distribution of the Cell 1, Cell 2 And Cell 3 at the Center of the Cells Shown in the Transverse Direction at an Operating Voltage of 0.55 V.

In order to obtain polarization curves of these cells, all cells were simulated at different operating voltages ranging 0.9 V as the initial maximum, to 0.2 V by 0.05 V decrements. The obtained results are plotted in Figure 9. Maximum power density was achieved from cell 3 as $0.944185 \text{ W cm}^{-2}$ at an operating voltage of 0.55 V. At the same operating voltage and working conditions, the power density of cell 1 and cell 2 were acquired as $0.68178 \text{ W cm}^{-2}$ and $0.71225 \text{ W cm}^{-2}$, respectively. It is apparent that the reverse trapezoidal cross-section of the cell 3's flow channel led to a substantial augmentation in the power density of the cell in comparison to cell 1 and cell 2. The power density of the cell 3 is around 38% greater than that of the cell 1. In order to eliminate the effect of the cross-sectional area, cell 2 was constructed and analyzed. Though cell 2 and cell 3 have the same cross-sectional area of their flow channels, the power density of cell 3 was 32.6% greater than that of cell 2. In a study done by Paulino et al. (Paulino et al., 2017) a cell with the trapezoidal cross-sectional flow area resulted in low power density but better water management in comparison to the cell with square cross-sectional flow channel. It was concluded the reverse trapezoidal shape of the flow channel of the cell has pronounced impact on the cell's performance. It is reasoned that this might be due to the fact that the reverse trapezoidal shape brought about low gas flow rate in the cell's channels (see Figure 1 and Figure 3) and consequently allowed species to spend enough time for electrochemical reactions on the catalysts.

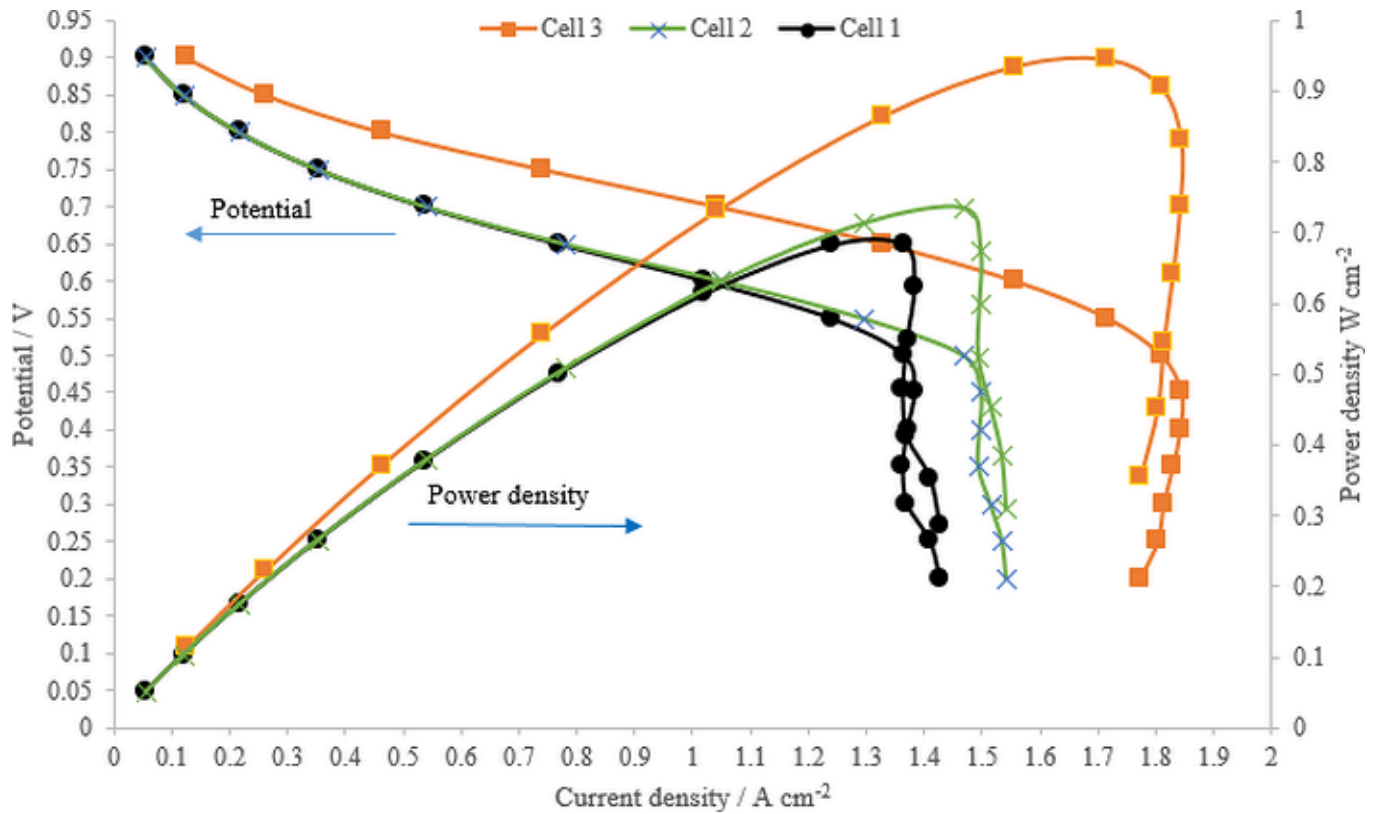


Figure 9. Polarization Curve of Cell 1, Cell 2 And Cell 3

CONCLUSION

In this work, a reverse trapezoidal cross-sectional shape for the bipolar plate of PEM fuel cells is investigated. This geometry increased cell performance by approximately 36 percent compared to a square cross-sectioned flow channel having channel width and height similar to the reverse trapezoid. Furthermore, for the same cross-sectional area, the single channel cell with reverse trapezoidal cross-sectional flow channel (cell 3) generated more than 32% power density compared to the cell with square cross-sectional flow channel (cell 2). However, the relative humidity obtained for this geometry turned out to be undesirably high. Therefore, this new geometry requires optimization with regards to its dimensions so as to obtain not only better cell performance but also effective water management concurrently.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest in this study.

REFERENCES

- Arif, M., Cheung, S. C. P., & Andrews, J. (2022). Numerical investigation of effects of different flow channel configurations on the 100 cm² PEM fuel cell performance under different operating conditions. *Catalysis Today*, 397–399(June), 449–462. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.07.016>
- Arun Saco, S., Thundil Karuppa Raj, R., & Karthikeyan, P. (2016). A study on scaled up proton exchange membrane fuel cell with various flow channels for optimizing power output by effective water management using numerical technique. *Energy*, 113, 558–573. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.079>
- Awan, A., Saleem, M., & Basit, A. (2018). Simulation of proton exchange membrane fuel cell by using ANSYS Fluent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 414(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012045>

- Carcadea, E., Ismail, M. S., Ingham, D. Bin, Patularu, L., Schitea, D., Marinoiu, A., ... Varlam, M. (2021). Effects of geometrical dimensions of flow channels of a large-active-area PEM fuel cell: A CFD study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(25), 13572–13582. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.150>
- Carcadea, E., Varlam, M., Ismail, M., Ingham, D. B., Marinoiu, A., Raceanu, M., ... Ion-Ebrasu, D. (2020). PEM fuel cell performance improvement through numerical optimization of the parameters of the porous layers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(14), 7968–7980. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.219>
- Ferng, Y. M., & Su, A. (2007). A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), 4466–4476. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.05.012>
- Ibrahimoglu, B., Yilmazoglu, M. Z., & Celenk, S. (2017). Investigation of spiral flow-field design on the performance of a PEM Fuel Cell. *Fuel Cells*, 17(6), 786–793. <https://doi.org/10.1002/fuce.201700076>
- Jourdani, M., & Mounir, H. (2015). Temperature Distribution Effect on the Performance of PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Ansys Fluent. *3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE) DOI: 10.1109/IRSEC.2015.7455082*.
- Kerkoub, Y., Benzaoui, A., Haddad, F., & Ziari, Y. K. (2018). Channel to rib width ratio influence with various flow field designs on performance of PEM fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 174(May), 260–275. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.041>
- Li, C., Xu, X., Hu, H., Mei, N., & Yang, Y. (2021). Numerical investigation into the effect of serpentine flow channel with a variable cross-section on the performance of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 45(5), 7719–7731. <https://doi.org/10.1002/er.6352>
- Li, Y., Zhou, Z., Liu, X., & Wu, W. T. (2019). Modeling of PEM fuel cell with thin MEA under low humidity operating condition. *Applied Energy*, 242(November 2018), 1513–1527. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.189>
- Lim, B. H., Majlan, E. H., Daud, W. R. W., Rosli, M. I., & Husaini, T. (2020). Numerical investigation of the effect of three-dimensional modified parallel flow field designs on proton exchange membrane fuel cell performance. *Chemical Engineering Science*, 217, 115499. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115499>
- Manso, A. P., Marzo, F. F., Mujika, M. G., Barranco, J., & Lorenzo, A. (2011). Numerical analysis of the influence of the channel cross-section aspect ratio on the performance of a PEM fuel cell with serpentine flow field design. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6795–6808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.099>
- Paulino, A. L. R., Cunha, E. F., Robalinho, E., Linardi, M., Korkischko, I., & Santiago, E. I. (2017). CFD Analysis of PEMFC flow channel cross sections. *Fuel Cells*, 17(1), 27–36. <https://doi.org/10.1002/fuce.201600141>
- Penga, Ž., Tolj, I., & Barbir, F. (2016). Computational fluid dynamics study of PEM fuel cell performance for isothermal and non-uniform temperature boundary conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(39), 17585–17594. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.092>
- Wang, X. D., Lu, G., Duan, Y. Y., & Lee, D. J. (2012). Numerical analysis on performances of polymer electrolyte membrane fuel cells with various cathode flow channel geometries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(20), 15778–15786. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.028>
- Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z., & Adroher, X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today*, 32(February), 178–203. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>
- Wilberforce, T., El-Hassan, Z., Khatib, F. N., Al Makky, A., Mooney, J., Barouaji, A., ... Olabi, A. G. (2017).

Development of Bi-polar plate design of PEM fuel cell using CFD techniques. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), 25663–25685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.093>

Wilberforce, T., Ijaodola, O., Khatib, F. N., Ogungbemi, E. O., El Hassan, Z., Thompson, J., & Olabi, A. G. (2019). Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Science of the Total Environment*, 688, 1016–1035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.397>

Yi, J. S., & Van Nguyen, T. (1999). Multicomponent Transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated gas distributors. *Journal of The Electrochemical Society*, 146(1), 38–45. <https://doi.org/10.1149/1.1391561>

Zhao, J., & Li, X. (2019). A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques. *Energy Conversion and Management*, 199(September 2019), 112022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112022>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.11.2022
Kabul Tarihi : 09.03.2023

Received Date : 07.11.2022
Accepted Date : 09.03.2023

SÜRÜ ZEKÂSI TABANLI ALGORİTMALAR İLE TÜRKİYE’NİN UZUN VADELİ ENERJİ TÜKETİM TAHMİNİ

LONG-TERM ENERGY CONSUMPTION FORECAST OF TURKEY WITH SWARM INTELLIGENCE-BASED ALGORITHMS

Merve BABAOĞLU^{1*} (ORCID: 0000- 0003-3030-8690)

Bülent HAZNEDAR² (ORCID: 0000- 0003-0692-9921)

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Mardin, Türkiye

² Gaziantep Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Merve BABAOĞLU, mervebabaoglu@artuklu.edu.tr

ÖZET

Enerji, ülkelerin en önemli uygarlık araçlarından biridir. Dünya genelinde artan nüfus, refah seviyesi ve gelişen teknoloji enerji tüketimini ciddi manada arttıran faktörlerdendir. Sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde enerji üretiminin ve tüketiminin gerçekleştirilmesi günümüzün hiç şüphesiz en önemli hedeflerinden birisidir. Tercih edilen enerji türünün tükenebilir enerji kaynağı olması, bu enerji kaynaklarında dışa bağımlı olması ve çevresel durumlardan dolayı Türkiye’de gelecek yıllarda ne kadarlık enerjiye ihtiyaç duyulabileceğinin tahmin edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu önemli öngörüü elde edebilmek için çalışmada, sürü zekâsı tabanlı meta-sezgisel algoritmalar Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) ve Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK) tercih edilmiştir. Enerji tüketimini en çok etkileyen nüfus, gayri safi yurtiçi hâsıla (GSYH), ithalat ve ihracat gibi bağımsız değişkenlerin 1990-2009 yılları arasındaki veriler eğitim, 2009-2019 yılları arasındaki veriler ise test için kullanılmıştır. Elde edilen en iyi model sonuçlarına göre ise muhtemel dört senaryoda 2040 yılına kadar Türkiye’nin ihtiyaç duyabileceği enerji miktarı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu hesaplamalara göre YAK modelinin test verileri için %86 R^2 ve %8,74 MAPE (Ortalama Mutlak Yüzdese Hata) değerleri ile BOA modeline göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji tüketimi, balina optimizasyon algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, meta-sezgisel algoritmalar

ABSTRACT

Energy is one of the most important tools of civilization countries. Growing population, level of prosperity and developing technology all over the world are among the factors that seriously increase energy consumption. Realization of energy production and consumption within framework of sustainable development has been one of the most important goals of our time. It is very important to make predict how much energy will be needed in Turkey coming years because of the energy used is exhaustible, these sources are foreign-dependent and due to environmental conditions. For obtain such an important prediction in study, swarm intelligence-based meta-heuristic algorithms Whale Optimization Algorithm (WOA) and Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) was preferred. Data of variables are gross domestic product (GDP), population, import and export, between 1990-2009 were used for education and data between 2009-2019 were used for test. According to results of best model obtained, it was tried to determine amount of energy that Turkey may need by 2040 in four possible scenarios. According to the results, it can be observed that ABC model was given as better results from the WOA model by R^2 values as 86% meanwhile MAPE (Mean Absolute Percentage Error) values as 8,74% for the test data.

Keywords: Energy consumption, whale optimization algorithm, artificial bee colony algorithm, meta-heuristic algorithms

ToCite: BABAOĞLU, M., & HAZNEDAR, B., (2023). SÜRÜ ZEKÂSI TABANLI ALGORİTMALAR İLE TÜRKİYE’NİN UZUN VADELİ ENERJİ TÜKETİM TAHMİNİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 424-441.

GİRİŞ

Teknoloji çağının yaşandığı Dünya’da, enerjiye olan bağımlılık her geçen gün artmaktadır. Sanayi alanlarında kullanılan makineler, fabrikalar için geliştirilen sistemler ve insanların yaşam kalitesini yükseltmek için üretilen cihazlar enerjinin daha fazla tüketilmesine sebep olmaktadır.

Enerji kaynaklarının kullanımının doğal yaşam üzerindeki etkileri, dünya üzerinde son zamanlarda çok konuşulan ve endişe uyandıran konu durumundadır. Bu endişenin en büyük sebebi doğal afetler, küresel ısınma gibi durumlarda artışların gözlenmesidir. Özellikle fosil yakıtların tükenebilir olması, bu yakıtların düzensiz kullanımı ve sonrasında oluşan çevre kirliliği, ülkeleri kendi içlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yatırım yapmaya ve teşvik sağlamaya yönlendirmektedir. Enerjiyi kullanırken çevresel zarar oluşturmadan, doğanın dengesini bozmadan, gelecek nesillere temiz bir gelecek bırakabilmek en büyük amaç olmalıdır. Bunun içinde temiz enerji kullanımını arttırmak ve bunu tüm toplumların ortak anlayışı haline getirmek gerekmektedir.

Her geçen gün artan enerji ihtiyacı düşünüldüğünde bunun her ülke için ciddi bir planlama, çalışma zorunluluğu olduğu ve bu konuya her ülkenin ağırlık vermesi gerektiği görülebilmektedir. Enerjide dış kaynaklara bağımlılık ne kadar az olursa, bu kaynaklardan dolayı gelecek herhangi bir riskin önüne geçilebilmek o kadar kolay olmaktadır. Böyle bir riski almak yerine ülkelerin kendi yerel ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaları her türlü enerji temini tehlikesinden uzaklaşmak anlamına gelecektir.

Tarihin ilk zamanlarında enerji kaynağı olarak kendi gücünü kullanan insan, zaman içerisinde doğadaki elementleri kullanmaya başlamış, çevredeki hayvanların enerjilerinden ve gücünden yararlanabileceği metotlar geliştirmiştir. Önce ateş keşfedilmiş, odun ve kömür ile birlikte ateş enerjisini kullanmaya başlamış, daha sonra bulduğu buhar gücü ile insan yaşamını kolaylaştırmak için buhar enerjisini de kendi enerji kaynakları arasına eklemiştir (Güven, 2017).

Doğada enerji mekanik, kimyasal, nükleer, hidrolik, güneş enerjisi gibi formlarda bulunabilir ve bu enerji kaynakları farklı enerji kaynaklarına dönüşebilmektedir. Enerjiyi çoğunlukla elektrik enerjisi olarak kullanmaktayız. (Uğurlu, 2006).

Tablo 1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması

Enerji Kaynakları		
Birincil Enerji Kaynakları		İkincil Enerji Kaynakları
Yenilenebilir Kaynaklar	Yenilenemez Kaynaklar	
Güneş Rüzgâr Dalga Jeotermal Hidrolik Biokütle	FOSİL	Kömür Petrol Doğalgaz
	NÜKLEER	Uranyum Toryum
Elektirik, Kok, Mazot, Benzin, Petrokök, Sıvılaştırılmış Petrol Gazı, Hava Gazı		
NOT: Birincil enerji kaynaklarının dönüştürülmesi ile ikincil enerji kaynakları elde edilmektedir.		

Enerji kaynakları dönüşebilme özelliklerine göre iki ana grupta toplanabilirler. Kaynağın dönüşüme uğramamış ham haline birincil enerji, birincil enerjinin dönüştürülmesi ile elde edilen enerjiye ise ikincil enerji denilmektedir (Tablo 1).

Petrol, doğalgaz, kömür, güneş, rüzgâr, uranyum vb. örneklerini arttırabileceğimiz fosil, doğal ve çekirdekli (nükleer) enerji kaynaklarının dönüşüme uğramamış haline **birincil enerji kaynağı** denilmektedir. Günümüzde kullanılan enerjinin büyük bir bölümü birincil enerji kaynaklarından sağlanmaktadır.

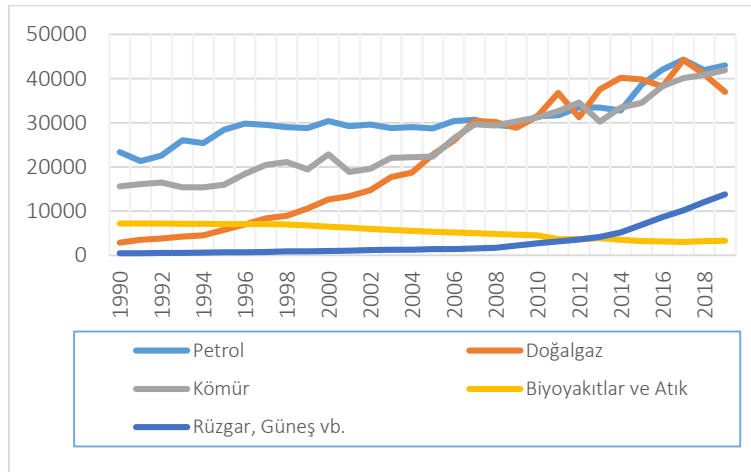
Birincil enerjinin fiziki olarak değiştirilip dönüştürülmesi ile ikincil enerji ortaya çıkar. Birincil enerji, ikincil enerjinin oluşması için gereklidir (Gülay, 2008). Enerjinin ne denli hayati önem taşıdığını hiç şüphesiz ona ulaşamadığımız zaman çok daha iyi anlayacağız. Ancak o aşamaya gelmeden tedbirleri almak, ihtiyaçları önceden belirleyip bir yol haritası çizmek, ülkelerin vakit kaybetmeden gerçekleştirmeleri gereken adımdır.

Enerji kaynaklarının karşılaştırılabilmesi için TOE (Tonne Of Oil Equivalent) veya TEP (Ton Eşdeğer Petrol) gibi ölçü birimleri kullanılmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Ton Eşdeğer Petrol Karşılıkları

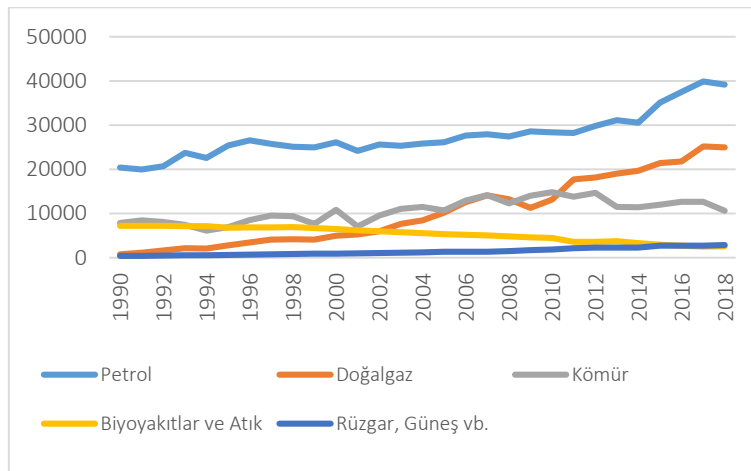
TOE (Ton Eşdeğer Petrol- Tonne of Oil Equivalent)	
KTEP (KTOE)	1.000 Ton Eşdeğer Petrol
MTEP (MTOE)	1.000.000 Ton Eşdeğer Petrol
GTEP (GTOE)	1.000.000.000 Ton Eşdeğer Petrol

TEP olarak adlandırılan enerji birimi 1 ton ham petrol yakıldığında açığa çıkan enerjiyi ifade eder. Türkçe kaynaklarda TEP olarak ifade edilse de ulusal kaynaklar da TOE olarak gösterilmektedir. Türkiye’de yıllar içerisindeki birincil enerji kaynakları arz miktarları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Türkiye’de Yıllara Göre Birincil Enerji Kaynaklarının Arz Miktarları (IEA, 2020)

Birincil enerji kaynaklarının ülkemizdeki tüketim miktarları ise Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Grafiklerdeki değerler KTOE cinsindedir.



Şekil 2. Türkiye’de Yıllara Göre Birincil Enerji Kaynaklarının Tüketim Miktarları (IEA, 2020)

Çalışmada iki farklı sürü tabanlı meta-sezgisel algoritmanın performans karşılaştırılması yapılarak literatüre katkıda bulunulmak istenmiştir. Ayrıca enerji tüketim tahmini çalışmalarında BOA algoritması ilk kez kullanılmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, enerji tüketim tahminini gerçekleştirmeye yönelik hazırlanmış bazı çalışmalara atıflarda bulunarak literatür taraması yapılmıştır. Literatür taramasında Dünya’da ve Türkiye’de enerji tüketim-talep tahmini yaparken hangi yöntemlerin kullanıldığı ve bağımsız değişken olarak hangi verilerin tercih edildiği gibi bilgilerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, Balina Optimizasyon Algoritması ve Yapay Arı Kolonisi Algoritması hakkında genel bazı anlatımlar yapılmıştır. Algoritmaların akış şemasına, esin kaynaklarının neler olduğuna ve

matematiksel modellerinin nasıl oluşturulduğuna dair açıklamalarda bulunulmuştur. Dördüncü bölümde, tüketim tahmini yapmak adına tercih edilen bağımsız değişkenlerin neler olduğundan, kullanılan yöntemlerin verdikleri sonuçların neler olduğundan ve iki ayrı meta-sezgisel algoritmanın verdikleri sonuçların R^2 ve MAPE hata ölçütlerinden karşılaştırılma sonuçlarından bahsedilecektir. Son bölümde ise algoritmaların vermiş olduğu tüketim değerlerine göre Türkiye'nin enerji konusunda bazı yorum ve önerilerde bulunulmuştur.

LİTERATÜR ÖZETİ

Gelişmekte olan ülkeler arasında bulunan Türkiye'de gelecek dönem içerisinde ihtiyaç duyulabilecek enerjiyi tahmin edebilmek için birçok araştırma yapılmıştır. Bu amaçla, geçmiş dönemde matematiksel veya istatistiksel tahmin yöntemleri çokça kullanılırken, günümüzde güvenilirliği her geçen gün artan yapay zekâ yöntemleri (YSA) ön plandadır. Bu alanda Türkiye'de ve Dünya'da yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibidir:

Tablo 3. Türkiye'de ve Dünya'da Enerji Tahmini Adına Yapılmış Çalışmalar

Yazar (Yıl)	Yöntem	Bağımsız Değişkenler	Tahmin Edilen
Bayramoğlu vd. (2017)	ANFİS	GSYH, nüfus ve enerji fiyatları	Birincil enerji talep
Uzlu (2019)	Gri kurt algoritması	GSYH, nüfus, ithalat, ihracat	Enerji tüketim
Durğun (2018)	YSA	GSYH, nüfus ve meteorolojik veriler	2018-2023 Enerji talep
Binici (2019)	Matematiksel modelleme	GSYH, nüfus	2017-2028 Enerji tüketim
Ekinci (2019)	YSA ve ANFİS	Geçmiş yılların elektrik enerjisi verileri, nüfus bilgileri	1970-2015 Enerji tüketim
Es vd. (2014)	YSA	GSYH, taşıt sayısı ihracat, bina yüz ölçümü, nüfus ve ithalat	Enerji talep
Geem ve Roper (2009)	ANN	GSYH, ithalat nüfus ve ihracat	Güney Kore enerji talep
Behrang vd. (2010)	Arı algoritması	GSYH, nüfus, ithalat ve ihracat	İran enerji talep
Yu vd. (2012)	PSO-GA	GSYH, nüfus, ekonomik yapı, kentleşme oranı ve enerji tüketimi yapısı	Çin enerji talep

Toksarı (2007), karınca optimizasyon algoritmasını kullanarak Türkiye'nin enerji talep tahminini nüfus, ihracat, gayri safi yurtiçi hasıla (GSYİH) ve ithalat verilerini kullanarak geliştirmiştir. Üç senaryoya göre 2025 yılına kadarki elektrik enerjisi üretimi ve talebi tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Uzlu (2019), Türkiye'nin enerji tüketimini gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritması kullanarak tahmin etmiştir. Bu modelin performansını görebilmek için ise geri yayımlı (GY) algoritma ve yapay arı kolonisi (YAK) algoritması ile eğitilmiş YSA modelleri kullanılmış. Sonuç olarak YSA-GY ve YSA-YAK modellerine göre YSA-GKO modeli daha iyi performans göstermiştir.

Koç vd. (2018), ekonomik göstergelere dayanarak enerji talep tahmininde bulunmuşlardır. Bunun için yabani ot algoritması (IWO) ve yer çekimi arama algoritması (GSA) kullanılmıştır. 3 farklı senaryo kullanarak 2012'den 2030 yılına kadarki Türkiye'nin enerji talebi tahmin edilmiştir.

Rodriguez vd. (2019), İspanya ve Fransa'nın enerji tahminini gerçekleştirebilmek için parçacık sürü algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmada her bir ülkenin ayrı ayrı yıllık verileri kullanılmıştır.

Azadeh vd. (2007), İran tarım sektöründe ihtiyaç duyulacak elektrik tüketim verilerini genetik algoritma ve yapay sinir ağı kullanarak tahmin etmişlerdir. Çalışmada ayrıca 1981-2005 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır.

Ekonomou (2010), Yunanistan için enerji tüketim tahmini yapabilmek adına yapay sinir ağlarını (YSA) kullanmıştır. Geliştirilen model ile, 2005-2008, 2010, 2012 ve 2015 enerji tüketiminin tahmini için kullanılmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Meta-Sezgisel Algoritmalar

Sezgisel algoritmalar, bilgisayar biliminde çevredeki fenomenlerden ilham alarak problemleri çözmek için yakınsak sonuç verebilen tekniklerdir. Kesin ve kanıtlanabilir sonucu verme gibi bir taahhütte bulunmazlar ancak en karmaşık problemleri kabul edilebilir bir sürede çözüme kavuşturma ve iyiye en yakın düzeyde sonuç verme garantisi sunarlar.

Sezgisel algoritmaların önemi aşağıdaki gibidir (Karaboğa ve Akay, 2011):

- Optimizasyon problemi, kesin bir çözüme varılmayan bir yapıya sahip olabilmektedir.
- Anlaşılabilirlik açısından basittir.
- Kesin sonuca ulaşmada bir araç olarak kullanılabilir.
- Matematiksel fonksiyonlarla yapılan modellemelerde bazen gerçek dünyanın zor tarafları ihmal edilebilir. Ancak burada parametreleri belirlerken elde edilen verinin hatalı olması, alt uygunluk uygulamalarında daha büyük hatalara sebep olacaktır.

Bu çalışmada, Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin tahmini için balina optimizasyon algoritması ve yapay arı kolonisi algoritması tercih edildi. Bu nedenle bir sonraki adımda bu 2 algoritmaya yer verilmiştir.

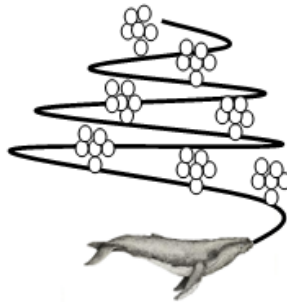
Balina Optimizasyon Algoritması

BOA; balinaların kambur diye adlandırılan türünün avlanma yönteminden esinlenilerek düzenlenmiş sürü zekâsı tabanlı sezgisel algoritmalarından biridir. Kambur balinaların, kendilerine özgü avlanma yöntemleri vardır. Hava kabarcığı da denilen bu yöntemde avın yerini tespit edip yüksek ses çıkararak avın korkmasını daha sonra suyun altında nefes vererek çıkardıkları kabarcıklarla da avının kafasının karışmasını ve yönünü bulamayarak kaçmasını engelleyip elde etme şeklindedir. Ava ulaşırken ise yukarı yönlü daralan dairesel hareketler çizmektedirler.

Sürü temelli algoritmalarından olan BOA, çok yeni bir algoritma olmasına rağmen, birçok araştırmada tercih edilmiş ve verdiği sonuçlarda da başarı sağladığı görülmüştür.

Balina Esinlenmesi

Balina sürüsü algoritması, Mirjalili ve Lewis tarafından 2016 yılında oluşturulmuş bir algoritmadır. Avlanırken balinalar hava kabarcığı yöntemiyle balık sürüsünü yönlendirmeye çalışmakta ve avlama olayını kolaylaştırmaktadırlar. Bu davranış yöntemi Şekil 3'teki gibidir (Mirjalili ve Lewis, 2016).



Şekil 3. Kambur Balinanın Avlanma Yöntemi

BOA Matematiksel Modeli

BOA matematiksel modeli, kambur balinaların avlanma yönteminde sergilediği hareketlere göre oluşturulmuştur. Bu davranışlar 3 ayrı şekilde ele alınmıştır. Bunlar avın etrafını çevrelemeye, ava ilerleme ve avı arama davranışlarıdır.

Avın Çevresini Sarma

Kambur balinalar avlarının buldukları yeri kendi sezgileriyle bilebilmektedirler. Elde edilecek av algoritmada optimum nokta şeklinde kabul edilmektedir. Optimizasyon problemlerinde en doğru çözümün ne olduğu kesin olarak bilinmediği için, yerel veya global arama uzaylarından biri tercih edilerek en iyi sonuç elde edilmeye çalışılır. Beklenen kriterlere ulaşıncaya kadar bu işlem devam eder. En iyi çözüm belirlenip, diğer çözümlerin konumları her

defasında güncellenir. Denklem 1 ve Denklem 2’de bu davranışın matematiksel modeli gösterilmiştir (Mirjalili ve Lewis, 2016).

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t + 1) = |\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| \quad (2)$$

Denklemlerdeki terimler sırasıyla; t , iterasyon sayısını, \vec{A} ve \vec{C} , yakınsama vektörlerini, \vec{X}^* , elde edilmiş en iyi çözüm vektörünü, ".", matris çarpımını ifade etmektedir.

Yakınsama vektörü olan \vec{A} ve \vec{C} değerleri aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Denklem 3 ve Denklem 4).

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (3)$$

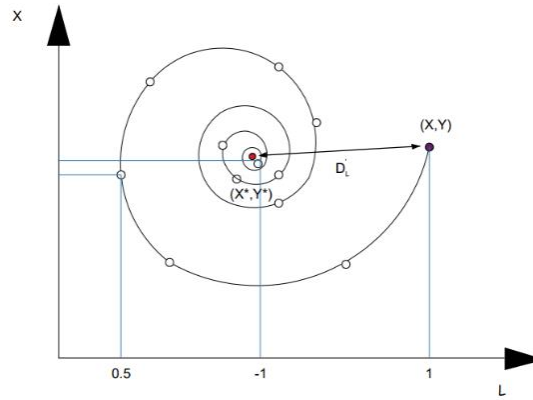
$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4)$$

r , rastgele bir vektörü, a ise 2’den başlayıp 0’a doğru eksilen vektörü ifade etmektedir (Mirjalili ve Lewis, 2016).

Ava Doğru İlerleme

Bu adımda balina avına ulaşmaya çalışırken spiral hareket oluşturur ve küçülen bir daire şeklinde aşağıdan deniz yüzeyine doğru çıkar.

Avın etrafında bulunan halkanın daralması Denklem 3’teki \vec{a} değerini azaltmakla gerçekleştirilmektedir. Şekil 4’te en iyi arama ajanın yeri ve yapmış olduğu spiral hareketi gösterilmiştir. Buradan yola çıkılarak en doğru arama ajanı ile diğer arama ajanı arasındaki bağıntı Denklem 5 ile formülize edilmiştir.



Şekil 4. Spiral Hareket (Mirjalili ve Lewis, 2016)

$$\vec{X}(t + 1) = \vec{D}^l \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (5)$$

Burada $\vec{D}^l = \vec{X}^* - \vec{X}(t)$ 'dir. Bu ifade arama ajanı ile bilinen en uygun nokta arasındaki uzaklığı vermektedir. Denklem 5’teki terimler; b logaritmik spiral sabiti, l ise $[-1,1]$ arasındaki sayılardan rastgele seçilir (Tanyıldızı ve Cigal, 2017).

BOA’da 2 tür hareket bulunmaktadır. Bu hareketler spiral ve doğrusal harekettir. Hangi hareketin yapılacağı Denklem 6’daki gibi %50 olasılıkla belirlenir. Denklemdaki p değeri ise $[0,1]$ değerleri arasında rastgele belirlenen bir sayıdır.

$$\vec{X}(t + 1) = \begin{cases} |\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}| & , p < 0.5 \\ \vec{D}^l \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & , p \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

Avı Arama

Kambur balinalar kabarcık metodu dışında, avlarını rastgele olarak avlayabilirler. Rastgele av aramada referans balinadan uzaklaşabilmek için \vec{A} vektörünün 1'den daha büyük ya da -1'den daha küçük random aldığı değerlerinden faydalanılır. Kabarcık düzeneğinden farklı olarak ajanın konumu güncellendiğinde bulunan en uygun arama ajanı yerine rastgele bir arama ajanı belirlenir ve kullanılır. $|\vec{A}| > 1$ olması ve rastgele bir arama ajanının tercih edilmesi Balina Optimizasyon Algoritmasının global arama yapmasını sağlar (Doğan, 2019).

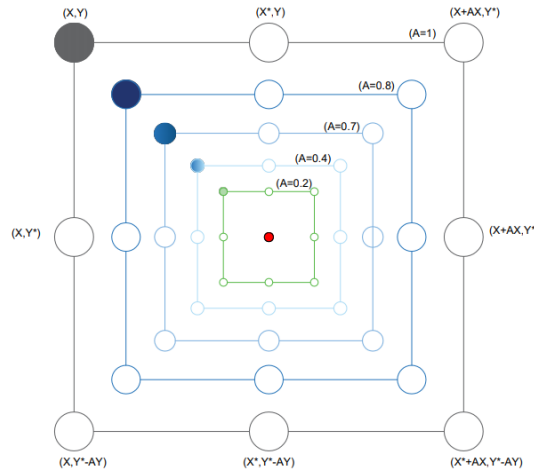
Bu durumda kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand} - \vec{X}| \quad (7)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (8)$$

Denklemlerdeki \vec{X}_{rand} rastgele seçilen bir arama ajanını göstermektedir.

BOA'nın matematiksel modelinde, kambur balinanın avın etrafını sarması durumu Şekil 5'teki gibi vektörlerle ifade etmiştir.



Şekil 5. BOA'nın Global Arama Davranışı (Mirjalili ve Lewis, 2016)

BOA Sözde Algoritması

Kambur balinaların avlanma yöntemlerinin nasıl olduğu ve avlanırken nasıl bir yol izledikleriyle alakalı genel bilgiler yukarıda verildiği gibidir.

Balina algoritmasının sözde kodu ise Şekil 6'da gösterildiği gibidir.

Yapay Arı Kolonisi Algoritması

YAK algoritması Derviş Karaboğa tarafından 2005 yılında, doğadaki arıların yiyecek arama davranışlarından esinlenilerek oluşturulmuştur.

Bal arıları, doğadaki en dikkat çekici sürülerden biri ve sahip oldukları zekâlarıyla kendi işlerini dinamik olarak dağıtabilen nadir sürülerdendirler. Kendi yuvalarını seçerken dahi grup şeklinde karar vermektedirler (Yiğitbaşı, 2014).

Arılar, en iyi besin kaynağının belirlenmesinden, kendilerine has iletişim becerileriyle bu besin kaynağının yerini birbirlerine haber vermelerinden, bu kaynaktan gereken nektarı gerektiği kadar getirmelerinden, bunun işlenmesini, bozulmadan muhafaza edilmesini ve sonuç olarak en iyi balı üretmeyi başardıkları bu döngüyü şaşırtan derecede kendilerine has ve kusursuz bir biçimde gerçekleştirmiş olduklarından en çok dikkat çeken topluluklarından olmuşlardır. Arıların bu döngüyü tam olarak nasıl bu kadar kusursuz gerçekleştirdikleri ve kendi içlerinde bu denli düzene sahip oldukları hala araştırılmaktadır. Bu nedenle arılardan her gün yeni bir bilgi edinilebilmektedir.

YAK algoritması birçok araştırma için tercih edilmiş ve sağladığı kolaylık, esneklik ve sonuca en yakın çıktıları vermesi açısından rağbet görmeye devam edecektir.

```
Başlangıç popülasyonu ayarla  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Her bir arama ajanının uygunluk değerini hesapla
 $X^*$  = Bilinen en iyi arama ajanı
while ( $t <$  maksimum iterasyon sayısı)
for (her bir arama ajanı için)
    Güncelle  $a, A, C, l$  ve  $p$ 
if ( $p < 0.5$ )
    if ( $|A| < 1$ )
        Denklem 1 ile arama ajanı konumu güncelle
    else if ( $|A| < 1$ )
        Rastgele bir arama ajanı seç ( $X_{rand}$ )
        Denklem 8 ile arama ajanını güncelle
    end if
    else if ( $p \geq 0.5$ )
        Denklem 5 ile arama ajanı konumu güncelle
    end if
end for
Kısıt dışına çıkan bireylere sınır değerini ver
Amaç fonksiyon değerlerini hesapla
Daha iyi çözüm bulunmuşsa en iyi ajanı güncelle
 $t = t + 1$ 
end while
Sonuç  $X^*$ 
```

Şekil 6. BOA Sözde Algoritması (Tanyıldızı ve Cigal, 2017)

YAK algoritmasının bazı temel özellikleri aşağıdaki gibidir (Karaboğa, 2014):

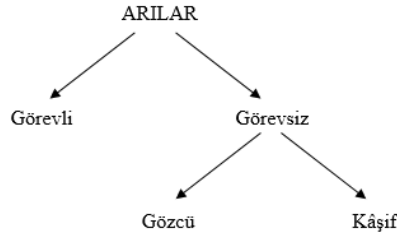
- Sürü zekâsına dayalıdır.
- Basittir.
- Kontrol parametre sayıları azdır.
- Gerçek yiyecek arayıcı arıların davranışlarından esinlenir.
- Kâşif arılar aracılığıyla gerçekleştirilen küresel; diğer arılar tarafından oluşturulan ise bölgesel araştırma kabiliyetine sahiptirler.

YAK Temel Adımları

Yapay arı kolonisi algoritması üç çeşit arıdan oluşur: kâşif arı, işçi arı ve gözcü arı. Her bir işçi arı bir besin kaynağından sorumludur. İşçi arılar ve gözcü arıların sayıları birbirlerine eşittir. Kaynaklar tükendiği zaman işçi arılar kâşif arılara dönüşüyor ve kâşif arılar farklı besin kaynakları aramaya başlamaktadır. (Karaboğa ve Baştürk, 2007).

İşçi arılar görevli arılar olarak, kâşif ve gözcü arılar ise görevsiz işçi arılar olarak adlandırılmaktadırlar (Şekil 7).

Besin kaynağını aramaya çıkan arılar kovan etrafında rastgele gezinirler. İyi bir nektar bulduklarında ise bunu kendi kovanlarında bekleyen arılara arı dansı ile iletirler. Bu dans ile bulunan kaynağın uzaklığı, kalitesi ve yönü ile ilgili veriler aktarılmış olur. Gözcü arı verilen bilgiler doğrultusunda kaynak seçimi yapmaktadır. Kaç tane kaynak varsa o kadar görevli arı bulunur (Karaboğa, 2005).



Şekil 7. YAK Elemanları

Görevli işçi arılar, daha önce bulunmuş kaynaklardan nektar getirilmesi görevini gerçekleştirmektedirler. Bu işçi arılar ulaştıkları kaynağın kalitesi ve navigasyonu ilgili bilgileri diğer arılara iletmektedirler. Bu paylaşımı “arı dansı” denen bir bilgi verme yöntemi ile yaparlar. Sergilenen dans, gözcü arılara yiyecek kaynağının bulunulan kovana olan uzaklığı ve güneşe göre konumu hakkında bilgi vermektedir (Barth, 1982).

Dansın süresi burada önem arz etmektedir. Bu süre kaynağın kalitesiyle doğru orantılıdır. (Özdemir, 2012).

YAK algoritmasının adımlarının özeti aşağıdaki gibidir (Akay, 2009):

1. Besin arama süreci kâşif arıların rastgele dağılmasıyla başlar.
2. Besin kaynağı bulunduktan sonra kâşif arılar görevli arıya dönüşürler. Daha sonra kaynaklarından kendi kovanlarına besin taşırlar. Besin boşaltımı yaptıktan sonra kaynakla ilgili bilgiyi gözcü arılara dans ederek iletirler. Bulunulan kaynaktaki nektar biterse eğer görevli arılar kâşif arıya dönüşür. Sonrasında arama uzayında yeni kaynakları rastgele bir şekilde arama sürecine girerler.
3. Sergilenen dansı izleyen gözcü arılar dansların frekansına göre bir kaynak seçerler.

Başlangıç İçin Kaynak Yerlerinin Üretilmesi

Arı sürüsünün kovan çevresi, arama uzayı olarak belirlenir. İlk adım olarak rastgele değerler üreterek arama uzayında besin aramaya çıkılmasıyla başlar. Rastgele üretilen yer süreci tüm parametrelerin en alt ve en üst sınırları arasında rastgele değerler üreterek yapılmaktadır (Karaboğa, 2014).

Kaynakların pozisyon değerleri Denklem 9 yardımıyla belirlenir.

$$x_{ij} = x_{minj} + rand(0,1) * (x_{maxj} - x_{minj}) \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, SN \quad (10)$$

Buradaki terimler sırasıyla;

SN : Yiyecek Kaynak Sayısı

$j = 1, \dots, D$

D : Optimize edilecek parametre sayısı,

x_{ij} : Kaynağın pozisyon değerleri,

$x_{j max}$: j .ninci parametrenin üst sınırı,

$x_{j min}$: j .ninci parametrenin alt sınırı olarak tanımlanır.

Görevli Arıların Kaynak Bölgelerine Gönderilmesi

İşçi arı kendi kaynak besinine her gittiğinde o kaynağın etrafında daha iyi bir besin kaynağı var mı yok mu kontrol etmek ister. Daha iyi nektara sahip bir kaynak bulursa onu hafızasına kaydeder. Görevli arı kaynağının komşuluğundaki yeni kaynak arayışını Denklem 11' e göre yapar.

$$v_{ij} = x_{ij} + \Phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (11)$$

v_{ij} , x_{ij} 'nin komşuluğundaki yeni bir kaynağı temsil etmektedir. Φ , [-1,1] aralığında rastgele seçilir ve yer değiştirmeyi rastgele hale getirmektedir.

v_{ij} değeri, önceden belirlenen maksimum ve minimum değerleri geçmemelidir. Bunun kontrolünü yapabilmek için ise Denklem 12 kullanılmaktadır.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min} & , v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij} & , x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max} & , v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (12)$$

Denklem 12 kullanılarak olası sınır ihlalleri ortadan kaldırılır ve sınırlar dahilinde v_i kaynağı elde edilir. Elde edilen v_i kaynağının kalitesine göre bir uygunluk değeri (fitness) Denklem 13'e göre hesaplanır (Akay, 2009).

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{(1+f_i)} & , f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i) & , f_i \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Denklem 13'te gösterilen f_i , bir kaynağın maliyet değeri ve abs mutlak değer fonksiyonudur. En iyi kaynağı seçmek adına bu işlem yapılmaktadır. Daha iyi bir kaynak bulunduğu ise görevli arı önceki kaynağı unuttur ve yeni kaynağa yönelir.

Gözcü Arılar

İşçi arılar, ulaştıkları farklı kaynaklardan edindikleri bilgileri kovanda bekleyen gözcü arılarla paylaşırlar. Bu bilgileri alan gözcü arılar onlara iletilen nektar ve konum bilgilerine dayanarak bir olasılıklı hesaplama yöntemi ile en doğru besin kaynağını seçerler. Bu uyum seçimi için ise rulet tekerleği seçim yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum Denklem 14'de verilmiştir.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{SN} fitness_i} \quad (14)$$

Burada $fitness_i$, i . kaynağın kalitesini, SN görevli arı sayısını göstermektedir. Denkleme göre gözcü arı sayısı, kaynağın uygunluk miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu durum algoritmanın pozitif geri besleme özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Kâşif Arılar

Kâşif arıların aramaya başlamak için belirtilen değerini aşılıp aşılmadığını kontrol eder. Eğer belirlenen sınır aşılmışsa yeni bir popülasyon oluşturulur. Önceden de yapıldığı gibi uygunluk değeri hesaplanır ve bir döngü için aramalar tamamlanmış olur.

YAK Akış Şeması

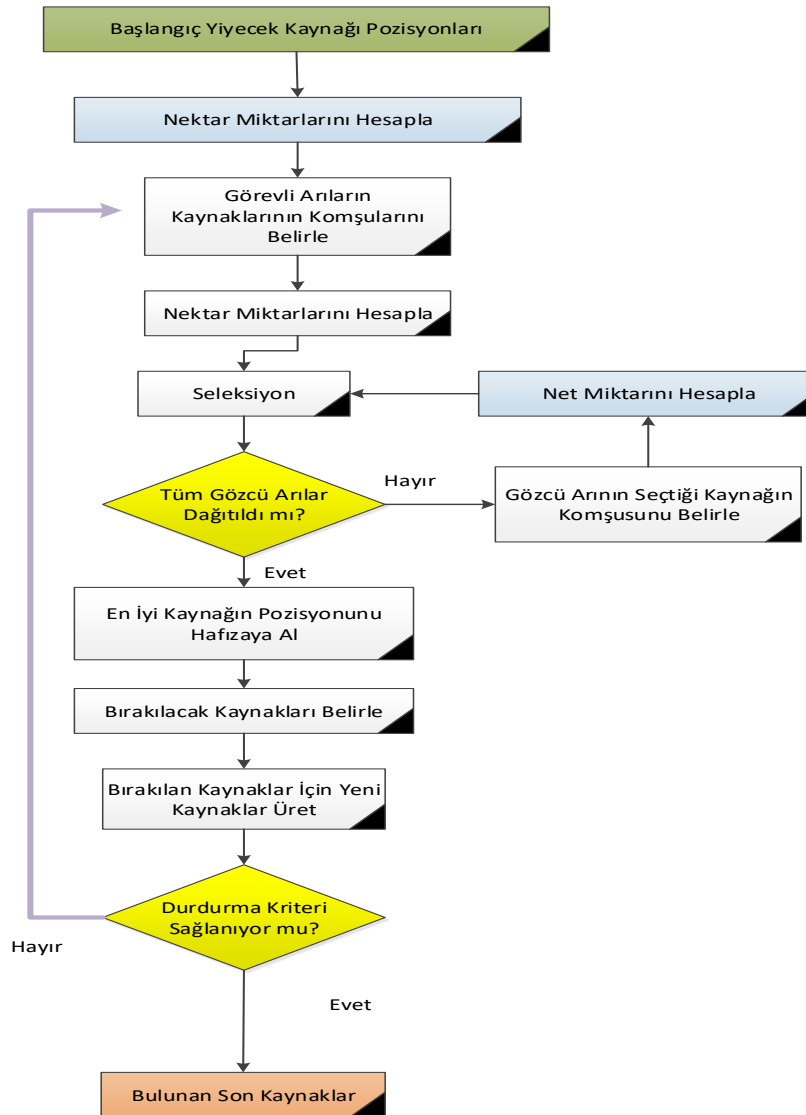
YAK akış şeması Şekil 8'de gösterildiği gibidir.

Veri Seti

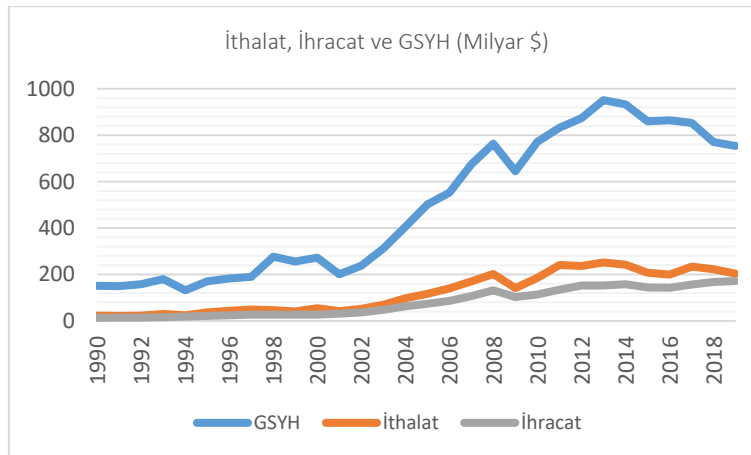
Türkiye'nin enerji tüketimi için öngörülebilir bulunabilmek için, 1990-2019 yılları arasındaki nüfus, ithalat, ihracat ve GSYH verileri bağımsız değişken olarak kullanıldı. Dünya Bankası, TUIK ve BP enerji tahmin raporlarından alınan veriler Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterildiği gibidir.

Şekil 11'de gösterilen verilerde ise 1990'da 47.7 MTOE olan enerji tüketimi, 2019'da 155.2 MTOE'ye kadar yükselmiştir. Önümüzdeki dönemde de artması öngörülen GSYH, nüfus ve sanayiye bağlı olarak gelişecek ithalat ve ihracat oranlarının paralel doğrultuda Türkiye'nin enerji tüketimini arttırması beklenmektedir. Son birkaç yıldır bu

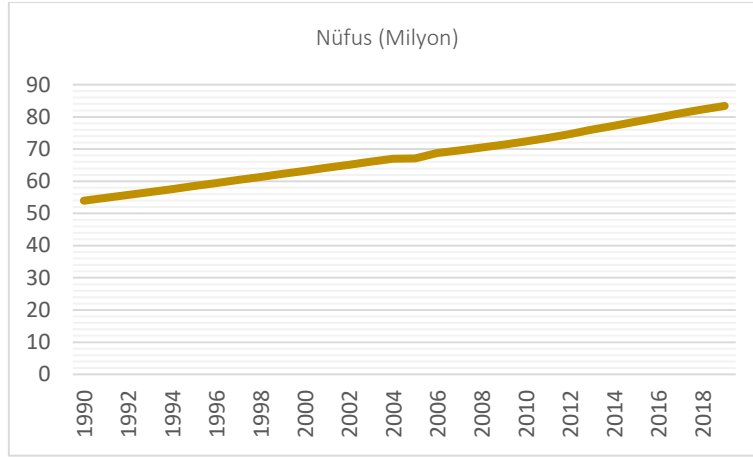
artış azalan bir orantıda olsada, doyuma ulaşana kadar bu artış bir süre daha sürecektir. Tüm bu nedenlerden dolayı Türkiye sürdürülebilir büyüme ve kalkınma politikası uygulamak ve en doğru verilerden hareket ederek geleceğine yön vermek zorundadır. Özellikle yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım konusuna ağırlık verilmesi ve teşvik çalışmalarının artırılması zorunlu hale gelmiştir.



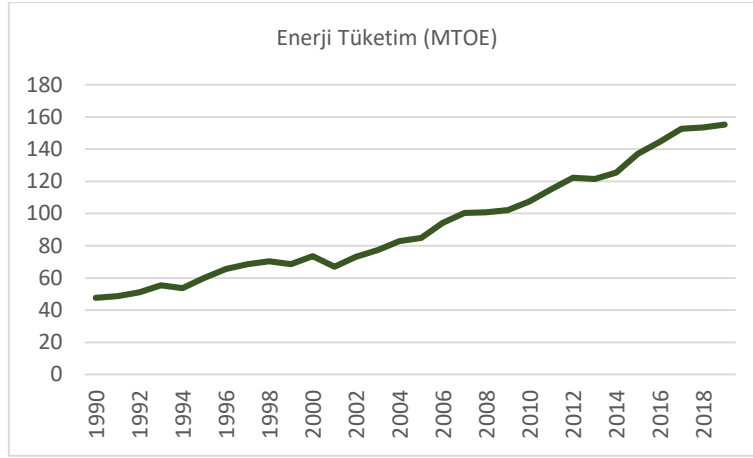
Şekil 8. YAK Akış Şeması



Şekil 9. Türkiye'nin 1990-2019 İthalat, İhracat ve GSYH Değerleri



Şekil 10. Türkiye'nin 1990-2019 Yıllarındaki Nüfusu



Şekil 11. Türkiye'nin 1990-2019 Enerji Tüketim Değerleri

Algoritmaların modelleme çalışmaları, Matlab 2019 programı üzerinde yapılmıştır. Bağımlı değişkenimiz enerji tüketim miktarı, bağımsız değişkenlerimiz ise ülkemizin önceki yıllardaki nüfus, ihracat, ithalat ve GSYH değerleri olmuştur. Bu parametreler literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Toksarı, 2009; Ünler, 2008).

Çalışmanın genel özeti Tablo 4.'te gösterildiği gibidir.

Tablo 4. Çalışmanın Genel Özeti

BAĞIMSIZ DEĞİŞKENLER:	NÜFUS, İTHALAT, GSYH VE İHRACAT
BAĞIMLI DEĞİŞKEN:	Enerji Talebi
EĞİTİM VERİLERİ:	1990-2009 (20 yıl)
TEST VERİLERİ:	2010-2019 (10 yıl)
KULLANILAN ALGORİTMALAR:	BOA ve YAK Algoritması
TAHMİN YILLARI	2020-2040 yılları

Türkiye'nin gelecek yıllar için ne kadarlık enerjiye ihtiyaç duyacağını tahminini gerçekleştirebilmek adına, tercih ettiğimiz bağımsız değişkenlerin ileriki yıllarda gerçekleşebilecek değerlerinin öngörülebilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı ilerleyen süreçte şartların ne olacağını öngörülebilmesi ve bazı senaryoların türetilerek bu senaryolar üzerinden tahmin çalışması yapmak önem arz etmektedir.

Enerji tüketim miktarını etkilediği bilinen GSYH, nüfus, ithalat ve ihracat değerlerinin önümüzdeki yıllarda ne ölçüde bir değişim içerisinde olacağını öngören birtakım senaryo çalışmaları yapılmıştır. Dört farklı senaryoya göre tahmin çalışması yapılmıştır. Makalede, enerji tüketim öngörüsünde bulunabilmek için kullanılan ilk 3 senaryo Ünler

(2008) ve Kıran vd. (2012) tarafından yapılan çalışmalarla analiz edilmiştir. Kullanılan senaryolar Tablo 5'deki gibidir:

Tablo 5. Bağımsız değişkenlerin öngörülen senaryoları (Ünler, 2008; Kıran vd., 2012)

Senaryo	GSYH	Nüfus	İthalat	İhracat
1.Senaryo	3,5%	0,1%	7%	5%
2.Senaryo	7%	0,12%	3,5%	2,5%
3.Senaryo	5%	0,8%	3,5%	4%

Dördüncü senaryo ise geçmiş 30 yılın GSYH, ithalat, ihracat ve nüfus verilerine, veri analizi uygulanarak gelecek değerlerin tahmin edilmesi ile gerçekleştirilecektir.

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Tercih ettiğimiz bağımsız değişken verilerine bağlı olarak yaptığımız enerji tüketim tahmini, Tablo 5'deki öngörüler doğrultusunda doğrusal denklem (Denklem 15) kullanılarak modellenmiştir.

$$E_{dogrusal} = w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + w_3 \cdot x_3 + w_4 \cdot x_4 + w_5 \quad (15)$$

Denklem 15'te gösterilen $w_1, w_2, w_3, \dots, w_i$ BOA ve YAK algoritmaları tarafından uygun bulunan tasarım katsayılarını, x_1 GSYH, x_2 nüfus, x_3 ithalat, x_4 ise ihracat miktarını göstermektedir.

Enerji tüketim öngörüsünde bulunabilmek için amaç, belirli kriterler altında en uygun fonksiyonu ve belirlenen matematiksel fonksiyona en uygun tasarım katsayılarını (w_i) bulmaktır. Bu fonksiyon sayesinde hataların kareleri alınır ve toplamı minimize edilir. Bu amacı gerçekleştirecek olan uygunluk fonksiyonu Denklem 16'da gösterilmiştir.

$$\min f(v) = \sum_{i=1}^m [E_i^{gözlemlenen} - E_i^{tahminEdilen}]^2 \quad (16)$$

Burada m gözlem sayısı, $E_i^{gözlemlenen}$, 1990-2009 yılları arasında tüketilen enerji miktarı eğitim için, 2010-2019 yılları arasındaki veriler ise test etmek için kullanılmıştır. $E_i^{tahminEdilen}$, algoritmaların verdiği katsayılar ile elde edilen tahmin değeridir.

Metasezgisel algoritmalar bir problemin çözümünde en uygun ya da en uyguna yakın ve etkin çözümlerin elde edilebilmesi için kullanılmaktadırlar. Doğru değere en yakın sonucu veren model doğru model olarak kabul edilir ve sonraki işlemler bu model üzerinden gerçekleştirilir. Çalışmada algoritmalar için seçilen parametrelerdeki değerler en uygun çözümü verecek şekilde seçilmiş ve modeller bu şekilde oluşturulmuştur. Kullanılan BOA ve YAK algoritmaları için tercih edilen arama ajanı ve iterasyon sayılarının en iyi performansı sağladığı ve seçilen parametrelerin bu sınırların üzerine çıkarıldığında dahi aynı sonuçlar elde edildiğinden değerler bu şekilde kabul edilmiştir. Ancak en uygun çözüme ulaşmada YAK algoritmasında daha az koşma gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca algoritmaların verdiği değerlere göre oluşturulan modellerin performanslarını test etmek amacıyla kararlılık katsayısı (R^2), ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) ölçeklerinden de faydalanılmıştır. Bu hata ölçekleri Denklem 17 ve Denklem 18'de gösterilmiştir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (E_i - E'_i)}{\sum_{i=1}^T (E_i - E_i^{ort})} \quad (17)$$

$$MAPE = 1/T \left(\frac{\sum |E_t - E'_t|}{E_t} * 100 \right) \quad (18)$$

E_t : gerçek gözlem değerleri

E'_t : tahmin edilen değerleri,

E_i^{ort} : gerçek gözlem değerinin ortalaması,
T: tahmin sayısını göstermektedir.

BOA Modelleme

Balina optimizasyon algoritması ile öngöründe bulunabilmek adına en uygun sonuç verilmesini sağlayan kontrol parametreleri:

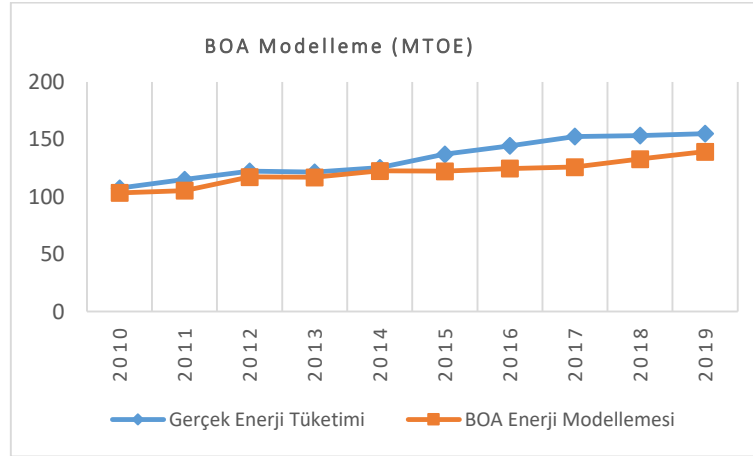
- Arama Ajanı: 30
- Maksimum İterasyon:10000

Yukarıdaki seçimler ile, Denklem 15 ve Denklem 16 birlikte işleme konduğunda en yüksek benzerlik oranına aşağıdaki değerler ile ulaşıldı.

$$Y_{BOA} = 0.023486.X1 + 0.963683.X2 - 0.202479.X3 + 0503145.X4 - 3.965685$$
$$R_{BOA(egitim)}^2 \cong 0.94$$

$$R_{BOAI(test)}^2 \cong 0.85$$

2010-2019 yılları arasındaki gerçek enerji tüketimi ile BOA enerji tüketim modellemesi Şekil 12’de gösterildiği gibidir.



Şekil 12. 2010-2019 Yılları BOA Modellemesi Enerji Tüketim Değerleri

BOA Tahmin

Doğruya en yakın sonucu veren BOA modellenmesinin gerçekleştirilmesi sonrası 2040 yılına kadar 4 farklı senaryoya göre enerji tüketim öngörüsünde bulunulmuştur. Bu senaryoların 2040 yılı için tahmini enerji tüketim miktarları ise Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. 2040 Yılında BOA Enerji Tüketim Tahmini Değerleri

Senaryo	2040 Yılı BOA Enerji Tüketim Tahminleri
1. Senaryo	185.11 MTOE
2. Senaryo	212.24 MTOE
3. Senaryo	252.56 MTOE
4. Senaryo	198.40 MTOE

YAK Modelleme

Yapay arı kolonisi algoritması ile öngöründe bulunabilmek adına en uygun sonuç verilmesini sağlayan kontrol parametreleri:

- ✓ Popülasyon Büyüklüğü: 100
- ✓ Maksimum İterasyon Sayısı: 500
- ✓ Limit Değeri: 300

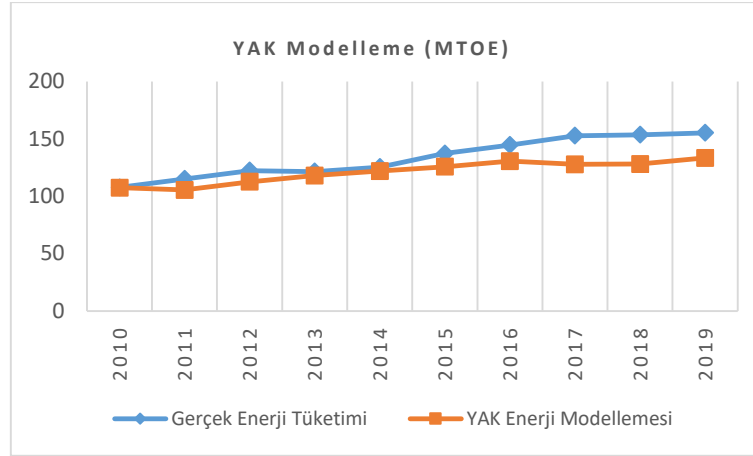
Yukarıdaki seçimler ile, Denklem 15 ve Denklem 16 birlikte işleme konduğunda en yüksek benzerlik oranına aşağıdaki değerler ile ulaşıldı.

$$Y_{doğrusal} = 0.062127.X1 + 2.429814.X2 - 0.172961.X3 + 0.053521.X4 - 90.371141$$

$$R^2_{YAK(egitim)} \cong 0.97$$

$$R^2_{YAK(test)} \cong 0.86$$

2010-2019 yılları arasındaki gerçek enerji tüketimi ile YAK enerji tüketim modellemesi Şekil 13'de gösterildiği gibidir.



Şekil 13. 2010-2019 Yılları YAK Modellemesi Enerji Tüketim Değerleri

YAK Tahmin

Doğruya en yakın sonucu veren YAK modellenmesinin gerçekleştirilmesi sonrası 2040 yılına kadar 4 farklı senaryoya göre enerji tüketim öngörüsünde bulunulmuştur. Bu senaryoların 2040 yılı için tahmini enerji tüketim miktarları ise Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. 2040 Yılında YAK Enerji Tüketim Tahmini Değerleri

Senaryo	2040 Yılı YAK Enerji Tüketim Tahminleri
1. Senaryo	93.53 MTOE
2. Senaryo	254.70 MTOE
3. Senaryo	228.50 MTOE
4. Senaryo	201.07 MTOE

Sonuçların Doğruluk Değer Ölçütlerinin Bulunması

BOA ve YAK modellerinin karşılaştırılmasında kullanılan, kararlılık katsayısı (R^2) ve ortalama mutlak yüzdesel hata (MAPE) kriterlerinin eğitim (1990-2009) ve test (2009-2019) alanlarındaki ayrı ayrı değerleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. BOA ve YAK Algoritmalarının Doğruluk Ölçüt Değerleri

ALGORİTMA	AŞAMA	R^2	MAPE
BOA	Eğitim	%93	5,26
	Test	%84	8,76
YAK	Eğitim	%96	3,47
	Test	%86	8,74

Lewis, %10'un altında MAPE değerine sahip modelleri "çok iyi", %10 ve %20 arasında olan modelleri "iyi", %20 ile %50 değerleri arasındakileri "kabul edilebilir" ve %50'nin üzerindeki "yanlış ve hatalı" diye nitelendirip gruplandırmıştır (Yakut vd., 2014). Bu açıdan bakıldığında algoritmaların modellemelerinin MAPE değerleri

Lewis'e göre çok iyi sonuç vermiş ve enerji tüketim tahmini problemlerinde kullanılabilceği görülmüştür. Ancak en iyi test sonucu %86'lık R^2 ve %8.74'ük MAPE değeri ile YAK algoritmasının verdiği gözlenmiştir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan modelleme analizlerinde enerji tüketim miktarını etkileyen değişkenlerin geçmiş verilerini işleme almak, uygunluk fonksiyonları içerisinde matematiksel fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi ve sonuçların karşılaştırılmasında çeşitli kararlılık ölçeklerinin kullanılması yıllık enerji tüketim modellenmesi bazında etkin sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlara göre;

- GSYH, nüfus, ithalat ve ihracattaki değişimde öngörülen 4 senaryodan elde edilen toplam 8 ayrı modelleme sonuçlarına göre, 2040 yılı verilerinden sadece 1 modelleme, enerji tüketiminin azalacağını, diğer 7 modelin tamamı bugünden daha fazla enerjiye ihtiyaç duyacağımızı öngörmektedir.
- Bu çalışmada seçilen bağımsız değişkenler ve oluşturulan modellerin gösterdiği yüksek performans Türkiye ve Dünya'da geleceğe dair enerji planlama çalışmalarının yapılması ve yeni stratejilerin belirlenmesinde fayda sağlayacağı düşünülmektedir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin olan Türkiye'nin, çevresine zararlı ve tükenbilir olan fosil yakıtları kullanmak yerine sahip olduğu zenginlikten yararlanması, gerekli teşvikin sağlanması ve arz-talep dengesini iyi kurması gerekmektedir.

Çalışmada iki farklı sürü tabanlı BOA ve YAK algoritmalarının enerji tüketim konusunda göstermiş oldukları performansların karşılaştırılması yapılmıştır. Performans ölçütü olarak R^2 ve MAPE değerleri baz alınmıştır. Eğitim ve test verileri göz önüne alındığında performans ölçütlerinde genel olarak YAK algoritması en iyi sonuçları vermiştir. Ayrıca en iyi sonuç veren modeller farklı senaryo verilerine uyarlandığında çok büyük bir olasılıkla gelecekte Türkiye'de enerji tüketiminin artacağı öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akay, B. (2009). Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi algoritmasının performans analizi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri 325s.
- Azadeh, A., Ghaderi, S.F., Tarverdian, S., Saberi, M. (2007). Integration of artificial neural networks and genetic algorithm to predict electrical energy consumption. *Applied Mathematics and Computation*, 186 (2) ,1731–1741. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.08.093>
- Barth, F. G. (1982). *Insects and Flowers: The biology of a partnership*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Bayramoğlu, T., Pabucçu, H., Boz, F. (2017). Türkiye için anfis modeli ile birincil enerji talep tahmini. *Ege Akademik Bakış*, 17 (3), 431-446. <https://doi.org/10.21121/eab.2017328408>
- Behrang, M.A., Assareh, E., Assari, M.R., Ghanbarzadeh, A. (2010). Application of PSO (particle swarm optimization) and GA (genetic algorithm) techniques on demand estimation of oil in Iran. *Energy*, 35(12), 5223-5229. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.043>
- Binici, M. (2019). Matematiksel modelleme kullanılarak Türkiye'nin enerji tüketim tahmini. Yüksek Lisans Tezi. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sivas 59s.
- Doğan, C. (2019). Balina optimizasyon algoritması ve gri kurt optimizasyonu algoritmaları kullanılarak yeni hibrit optimizasyon algoritmalarının geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri 69s.
- Durğun, S. (2018). Türkiye'nin enerji talebinin yapay zekâ teknikleriyle uzun dönem tahmini. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya 62s.
- Ekinci, F. (2019). YSA ve ANFIS tekniklerine dayalı enerji tüketim tahmin yöntemlerinin karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1029 – 1044. <https://doi.org/10.29130/dubited.485822>
- Ekonomou, L. (2010). Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks. *Energy*, 35(2), 512-517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.018>
- Es, H., Kalender, Y., Hamzaçebi, C. (2014). Yapay sinir ağları ile net enerji talep tahmini. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3), 495-504. <https://doi.org/10.17341/gummfd.41725>

- Geem, Z.W., & Roper, W.I. (2009). Energy demand estimation of South Korea using artificial neural network. *Energy Policy*, 37(10), 4049-4054. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.049>
- Gülay, AN. (2008). Yenilenebilir enerji kaynakları açısından Türkiye'nin geleceği ve Avrupa Birliği ile karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İzmir 353s.
- Günen, O. (2017). Türkiye'nin enerji kaynakları ve nükleer enerji politikaları: Gazi Üniversitesi öğrencilerinin nükleer enerji algısı. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Ana Bilim Dalı, Ankara 128s.
- International Energy Agency: IEA. (2020). Data and statistics. <https://www.iea.org/data-and-statistics>. 8.12.2020.
- Karaboğa, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Retrieved from, Technical Report, 2005.
- Karaboğa, D. (2014). Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları. 4. Basım. Nobel Ankara: Akademik Yayıncılık.
- Karaboğa, D., & Akay, B. (2011). A modified artificial bee colony (ABC) algorithm for constrained optimization problems. *Applied Soft Computing*, 11(3), 3021-3031. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.12.001>
- Karaboğa, D., & Baştürk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
- Kıran, M. S., Özceylan, E., Gündüz, M., Paksoy, T. (2012). Swarm intelligence approaches to estimate electricity energy demand in Turkey. *Knowledge-Based Systems*, 36, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.06.009>
- Koç, İ., Nureddin, R., Kahramanlı, H. (2018). Türkiye'de enerji talebini tahmin etmek için doğrusal form kullanarak GSA ve IWO tekniklerinin uygulanması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 529-543. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2018.150>
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Özdemir, R. (2012). Yapay arı kolonisi algoritması için yeni seçme ve arama mekanizmalarının geliştirilmesi. Yüksek lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri 69s.
- Rodríguez, D.M., Colmenar, J.M., Hidalgo, J.I., Micó V, Salcedo-Sanz. S. (2019). Particle swarm grammatical evolution for energy demand estimation. *Energy Science & Engineering*, 8(4), 1068-1079. <https://doi.org/10.1002/ese3.568>
- Tanyıldızı, E., & Cigal, T. (2017). Kaotik haritalı balina optimizasyon algoritmaları. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 29(1), 307-317, 2017. <https://doi.org/10.35234/fumbd.314671>
- Toksarı, M. D. (2007). Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey. *Energy Policy*, 35(8), 3984-3990. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.028>
- Toksarı, M. D. (2009). Estimating the net electricity energy generation and demand using the ant colony optimization approach: case of Turkey. *Energy Policy*, 37(3), 1181-1187. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.017>
- Uğurlu, Ö. (2006). Türkiye'de çevresel güvenlik bağlamında sürdürülebilir enerji politikaları. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Ankara, 385s.
- Uzlu, E. (2019). Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 245-262. <https://doi.org/10.29109/gujsc.519553>
- Uzlu, E. (2019). Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 245-262. <https://doi.org/10.29109/gujsc.519553>
- Ünler, A. (2008). Improvement of energy demand forecasts using swarm intelligence: The case of Turkey with projections to 2025. *Energy Policy*, 36(6), 1937-1944. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.018>
- Yakut, E., Elmas, B., Yavuz, S. (2014). Yapay sinir ağları ve destek vektör makineleri yöntemleriyle borsa endeksi tahmini. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi*, 19(1),139-157.

Yiğitbaşı, ED. (2014). Yapay arı kolonisi optimizasyonu ile kenar bulma. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya 96s.

Yu, S., Wei, Y., Wang, K. (2012). PSO-GA optimal model to estimate primary energy demand of China. *Energy Policy*, 42, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.090>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.11.2022
Kabul Tarihi : 30.03.2023

Received Date : 27.11.2022
Accepted Date : 30.03.2023

KONVANSİYONEL VE MİKRODALGA İLE KURUTULMUŞ VIŞNE POSASI YAĞININ FİZİKOKİMYASAL VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF PHYSICO-CHEMICAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF CONVENTIONAL AND MICROWAVE-DRIED SOUR CHERRY POMACE OIL

Duygu BAŞKAYA SEZER* (ORCID: 0000-0003-2724-1923)

Amasya Üniversitesi, Amasya Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otel Lokanta ve İkram Hizmetleri Bölümü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Duygu BAŞKAYA SEZER, duygu.baskaya@amasya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, vişne nektarı üretimi atıklarının büyük kısmını oluşturan ve konvansiyonel ya da mikrodalga destekli kurutulan vişne posasının fizikokimyasal ve fonksiyonel özelliklerini belirleyerek yağ kalitesini karşılaştırmaktır. Vişne posasından ekstrakte edilen yağın yağ asidi kompozisyonu, iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asitlik, renk değeri ve toplam fenolik içeriği ile antioksidan kapasitesi belirlenmiştir. Buna göre vişne posası yağının tekli doymamış yağ asitleri yağın %52,88'ini oluşturmaktadır. Bu oranın neredeyse tamamını (%98) oleik asit oluşturmaktadır. Vişne posası yağının çoklu doymamış yağ asidi içeriği ise toplam yağ asidi kompozisyonunun %31,02'sini oluşturmaktadır. Bu oran içinde en yüksek yüzde linoleik aside aittir (%20,85). Esansiyel yağ asitlerinden ve omega-3 yağ asitlerinden olan alfa-linolenik asit (ALA) %7,14 oranında bulunmuş. Bu yağ asidinin bir türevi olan kalp dostu eikosapentenoik asit (EPA) ise %3,03 oranında tespit edilmiştir. Ayrıca peroksit değeri 6,68 mEq peroksit kg^{-1} , asitlik değeri 9,73 mg KOH g^{-1} , sabunlaşma değeri 175,19 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 44,17 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Mikrodalga destekli kurutma ise yağ asidi kompozisyonunda anlamlı farklılık meydana getirmezken iyot, peroksit, sabunlaşma ile a^* , b^* ve ΔE^* değerlerinin daha düşük, fonksiyonel özellik olarak da toplam fenolik madde ve antioksidan kapasitenin daha yüksek olmasını desteklemiştir.

Anahtar Kelimeler: Vişne, posa, yağ, omega, mikrodalga

ABSTRACT

The aim of this study is to compare the oil quality by determining the physicochemical and functional properties of conventional or microwave-assisted dried sour cherry pomace, which constitutes the majority of sour cherry nectar production wastes. Fatty acid composition, iodine number, peroxide, saponification, acidity, color value and total phenolic content and antioxidant capacity of the oil extracted from sour cherry pomace were determined. Accordingly, monounsaturated fatty acids of sour cherry pomace oil constitute 52.88% of the oil. Almost all of this ratio (98%) is composed of oleic acid. The polyunsaturated fatty acid content of sour cherry pomace oil constitutes 31.02% of the total fatty acid composition. The highest percentage in this ratio belongs to linoleic acid (20.85%). Alpha-linolenic acid (ALA), one of the essential fatty acids and omega-3 fatty acids, was found at a rate of 7.14%. Heart-friendly eicosapentenoic acid (EPA), a derivative of this fatty acid, was found to be 3.03%. In addition, peroxide value was 6.68 mEq peroxide kg^{-1} , acidity value was 9.73 mg KOH g^{-1} , saponification value was 175.19 mg KOH g^{-1} and iodine number was 44.17 g iodine 100 g^{-1} . Microwave-assisted drying did not cause a significant difference in fatty acid composition, but iodine, peroxide, saponification and a^* , b^* and ΔE^* values were lower, while the total phenolic substance and antioxidant capacity were higher as functional properties.

Keywords: Sour cherry, pulp, oil, omega, microwave

ToCite: BAŞKAYA SEZER, D., (2023). KONVANSİYONEL VE MİKRODALGA İLE KURUTULMUŞ VIŞNE POSASI YAĞININ FİZİKOKİMYASAL VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 442-450.

GİRİŞ

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda sağlığa yararlı ve koruyucu etkilere sahip bileşenlerin insan beslenmesinde yer almasına yönelik araştırmalar öne çıkmaktadır. Çoğunluğu bitkisel kaynaklı olan bu bileşenlerden bazıları; omega doymamış yağ asitleri (Baker vd., 2016), antioksidanlar (Ozturk, Parkinson & Gonzalez-Miquel, 2018), fenolik bileşikler (Rodsamran & Sothornvit, 2019), mineraller (Millena & Sagum, 2018) ve vitaminlerdir (Asensi-Fabado & Munné-Bosch, 2010). Vişne; melatonin, antosiyaninler, fenolik bileşikler, hidrokisisamik asitler gibi biyoaktif bileşikler açısından zengin olması ve bu bileşenlerin sağlığı koruyucu ve destekleyici rol oynaması nedeni ile diğer meyve sebze ürünleri arasında önemli bir yere sahiptir. Ancak vişne asidik tadı (pH 3,3) (Norouzi, Fadavi & Darvishi, 2021) nedeniyle genellikle taze meyve olarak tüketime elverişli değildir. Bu nedenle üretilen vişnenin sınırlı olan ev tüketimleri dışında kalan kısmı endüstriyel ürün (meyve nektarı, reçel, kurutulmuş ve dondurulmuş meyve) olarak işlenmektedir.

Meyve suyu ve nektarı üretimi, Türkiye ekonomisinde önemli bir paya sahip gıda sektörlerinden biridir. Vişne de meyve nektarı üretiminde kullanılan hammaddelerden biridir. Faostat (2020) verilerine göre 2020 yılında ülkemiz, 0,2 milyon ton vişne üretimi ile dünyada birinci sıradadır. Vişne nektarı üretiminde nektar verimi %70 civarındadır. Geri kalan %30'luk kısım ise atık olarak ayrılmaktadır. Bu atıkların büyük kısmı posadır. Fakat posanın sadece %1 gibi az bir miktarı hayvan yemlerine karıştırılarak kullanılmakta geri kalan miktarı toprak altına gömülerek ya da çöp alanlarına atılarak uzaklaştırılmaktadır. Bu işlemler için harcanan maliyet, içecek endüstrisine ekonomik bir yük oluşturmaktadır. Bu atıkların bertarafı emek yoğun ve zaman alan bir süreç olup ekonomik kayıplara ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Atıkların bertarafının yanı sıra vişne meyvesi ile biyoaktif bileşenler açısından eş değer nitelikte olan posanın atılması besinsel bir kayıp oluşturmakta bu da ülkemizin öncelikli alanlar için belirlediği sürdürülebilir kalkınma amaçlarında (Anonim, 2019) yer alan "gıda yoksulluğu-açlık" ile mücadele hedefleri (Hedef 2.1 ve 2.2) ile bağdaşmamaktadır. Tüm bu nedenler göz önüne alındığında bir endüstri atığı olan vişne posasının değerlendirilerek gıda maddesi olarak kullanımı araştırılmalıdır.

İnsan vücudunun sentezleyemediği ve sağlığa yararlı olduğu bilinen esansiyel yağ asitlerinden, çoklu doymamış yağ asitlerinin beslenme ile alınması gerekmektedir (Whelan & Fritsche, 2013). Bu yağ asitleri kalp damar hastalıkları riskinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Çoklu doymamış bir yağ asidi olan linoleik asidin de bağışıklık fonksiyonunu etkilediği ve kanser, obezite, diyabet ve ateroskleroza karşı koruyucu etkilerinin yanı sıra büyümeyi ve kemik oluşumunu destekleyici özellikleri olduğu belirlenmiştir (Kim, Park & Park, 2014). Farvid vd. (2014)'nin çalışmasında beslenmedeki linoleik asit miktarı ile kardiyovasküler hastalık insidansı arasındaki ilişki ele alınmış ve linoleik asit alımının %15 daha düşük koroner kalp hastalığına yakalanma ihtimali olduğu ortaya konulmuştur. Shultz vd. (1992) araştırmasında da linoleik asit, insan malign melanomunun ve kolorektal kanser hücrelerinin çoğalmasını engellediği, epidermal tümörleri, mide ve meme kanseri gelişimini yavaşlattığı bilinmektedir. Ayrıca linoleik asit, epiderminin transdermal su bariyerinin korunmasında rol oynamasından dolayı cilt tedavilerine yardımcı olarak da kullanılmaktadır (Whelan & Fritsche, 2013).

Tekli doymamış yağ asitlerinden biri olan oleik asidin vücut ağırlığını düzenlemede ve obezite kontrolünde olumlu etkilerinin olduğu raporlanmıştır. Bunun yanı sıra bu yağ asidinin yüksek yoğunluklu lipoproteini (HDL [iyi kolesterol]) artırıcı etkisi olduğu belirlenmiştir (Tutunchi, Ostadrahimi & Saghafi-Asl, 2020). Oleik asidin geniş fizyolojik fonksiyonlarda olumlu etkileri gözlenirken, bazı çalışmalar bu yağ asidinin yara iyileşmesini kolaylaştırmasının (Ribeiro Barros Cardoso vd., 2004) yanında otoimmün hastalıklar üzerinde yararlı antiinflamatuvar etkileri olduğu, meme kanseri üzerinde koruyucu etki gösterdiği ve bağışıklık sistemi fonksiyonunun iyileştirilmesinde etkili olduğu öne sürülmüştür (Solanas vd., 2002). Tüm bu nedenlerden dolayı beslenmede başta kardiyovasküler hastalıklar olmak üzere dolaşım sistemi kaynaklı rahatsızlıkları tetiklediği bilinen doymuş yağ asitleri yerine doymamış yağ asitlerinin tüketiminin artırılması önerilmektedir (Eroğlu Samur, 2012). Vişne posasından elde edilen yağın da bitkisel kaynaklı olması nedeni ile doymuş yağ asidi miktarının düşük, doymamış yağ asidi oranının ise yüksek olması beklenmektedir.

Mikrodalga, hem evsel hem de endüstriyel ölçekte gıda işlemede pişirme, kurutma, kaynatma, çözme, tavlama, ekstraksiyon, fırınlama, pastörizasyon ve sterilizasyon gibi geniş uygulamaları olan bir teknolojidir.

Mikrodalga teknolojisi evsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmakta ve gıdadaki iyonik bileşenlerin elektrik alan şiddetine göre hareketini sağlamaktadır. Bu teknoloji, moleküllerin polarizasyon-depolarizasyonundan dolayı hacimsel ısıtma yapan bir uygulamadır. Mikrodalganın malzemeye hızlı nüfuz etmesinin sağladığı kısa bekleme

süresi ve içten dışa bu hızlı ısıtmanın avantajları işlem süresini kısaltır ve enerji tasarrufu sağlar. Son yıllarda mikrodalga uygulamaları, kurutma gibi geleneksel yöntemlere yardımcı olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürde vişnenin kısımlarından; çekirdek (C. Yılmaz, 2013), çekirdek içi (Bak vd., 2010; C. Yılmaz & Gökmen, 2013), çekirdek içi yağı (C. Yılmaz & Gökmen, 2013; Górnas vd., 2016; Almasi vd., 2021) ve yağı alınmış çekirdeğin (Başyigit vd., 2022) kimyasal bileşimleri incelenmiştir. Ancak vişne posasından elde edilen yağ üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca kurutma aşamasının uzun sürmesi nedeni ile yağın kalitesi etkilenmekte ve peroksit değeri, sabunlaşma, renk değerleri ile fenolik içerik ve yağın antioksidan karakteristiği gibi fonksiyonel özellikler azalmaktadır. Bu çalışmanın amacı da, vişne nektarı üretimi atıklarının büyük kısmını oluşturan vişne posasının konvansiyonel ve mikrodalga destekli olarak kurutulmasının ardından örneklerden elde edilen yağın fizikokimyasal ve fonksiyonel özelliklerinin karşılaştırılmasıdır. Böylece işlem süresini kısaltma ve ürün özelliklerinde minimum değişim meydana getirmesi beklenen mikrodalga ile yağın özelliklerine etkisini karşılaştırmalı olarak ortaya koymak mümkün olmuştur. Bunun yanı sıra vişne posasının yağ ekstraksiyonu açısından bir potansiyel oluşturup oluşturmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca elde edilen bulgular ulusal/uluslararası kriterler ve önceki çalışmalarda belirlenen yağların özellikleri ile karşılaştırılarak vişne posası yağının beslenmedeki yeri belirlenmeye çalışılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada kullanılan vişne (*Prunus cerasus* L.) posası, bir meyve suyu fabrikasından (Dimes Gıda Sanayi ve Ticaret A.Ş., Tokat, Türkiye) 2019 yılı hasadı sonrası temin edilerek +4°C’de depolanmış ve 60 gün içinde işlenmiştir. İlk olarak posadan çekirdek, yaprak ve sap kısımları elle ayrılmıştır. Daha sonra kalan kısım örnek hazırlamak için kullanılmıştır. Kontrol örneği, bir tepsili kurutucuda (Harvest Saver, Model R5A, Commercial Dehydrator Systems Inc., OR, ABD) 60°C’de 48 saat süreyle %30 nispi nemde kurutulmuştur. Mikrodalga ile kurutulmuş örnekler ise önce 900 watt çıkış gücüne sahip ev tipi (2450 MHz) mikrodalga fırında 15 dakika işlenmiş ve ardından kontrol örneği şartlarında 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma parametreleri ön denemelerle belirlenmiştir. Her iki örnek grupta da örnekler kuru temelde %5 nem, %4,85 ham yağ içeriğine sahiptir. Kurutulan 20 g posa örnekleri 30 saniye boyunca öğütücü (Siemens, MC23200GB, Slovenya) kullanılarak boyutu küçültülmüş ve 200-mesh (74 µm) elekten (Endecotts, Londra, İngiltere) geçirilmiştir. Yeterli örnek elde edilene kadar öğütme ve eleme işlemine devam edilmiştir. Kurutulan ve boyutu ayarlanan vişne posaları, gıdaya uygun plastik bir şişe içinde +4°C’de saklanmıştır.

Metot

Bu çalışmada petrol eteri kullanılarak gerçekleştirilen ekstraksiyonda vişne posasından yağ elde edilmiş ve bu yağın yağ asidi kompozisyonu, iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asitlik ve renk değeri ölçülerek yağın fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir.

Yağ Ekstraksiyonu

Sonawane vd. (2016) çalışmasında yer alan yöntem kullanılarak %5 nem içeriğine kadar kurutulmuş ve boyutu ayarlanan vişne posasından yağ ekstrakte edilmiştir. Elde edilen yağ, kullanılabildiği kadar kahverengi cam şişelerde -18 °C’de saklanmıştır.

Yağ Asidi Analizi

100 mg vişne posası yağı numunesi, AOCS (1998)’ye göre standart titrimetrik yöntemden yararlanılarak bir baz katalizli trans-esterifikasyon ve ardından bir Boron triflorür katalizli esterleştirme kullanılarak örneğin yağ asitleri, metil esterlerine trans-esterleştirilmiştir. Yağ asidi metil esterleri preparasyonunda her örneğe trikosanoik asit (23:0) eklenmiştir. Yağ asidi metil esterleri, alev iyonizasyon dedektörü bulunan gaz kromatografisine (Agilent Technologies, model 7890B Palo Alto, CA, ABD) 1,0 µL enjekte edilmiştir. İşlemden önce, ayırma 5:1 oranında ve taşıyıcı gaz olarak helyum kullanılarak bir DB-23 kapiler kolonu (60 m x 250 µm x 0,15 µm) (Agilent Technologies, CA, ABD) yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı gaz akış hızı 25 mL dk⁻¹ olarak ayarlanmış, hidrojen ve hava akış hızları sırasıyla dakikada 30 mL ve 400 mL olarak belirlenmiştir. Kullanılan sıcaklık programı başlangıç sıcaklığı 50°C olmak üzere ilk olarak sıcaklık dakikada 10°C yükselerek 130°C’ye kadar ulaşılmış ve örnekler bu sıcaklıkta 60 saniye tutulmuştur. İkinci olarak sıcaklık dakikada 10°C yükseltilerek 170°C’ye ulaşılmıştır. Üçüncü olarak sıcaklık dakikada 2,75°C yükseltilerek 215°C’ye ulaşılmış ve örnekler bu sıcaklıkta 12 dakika tutulmuştur. Son olarak ise sıcaklık dakikada 40°C artırılarak 230°C’ye ulaşılmış ve örnekler bu sıcaklıkta 3 dakika tutulmuştur. Metil esterler, OpenLAB CDS ChemStation Edition yazılımı kullanılarak Supelco (Bellefonte, PA, ABD)’dan elde edilen

37 bileşenli standart karışımın alıkonma sürelerinin karşılaştırılmasıyla tanımlanmaya çalışılmış ve eş zamanlı olarak miktarları belirlenmiştir. Toplam yağ asitlerinin yüzdesi olarak ifade edilen yağ asidi bileşimleri iki paralelli olarak çalışılmış ve her bir şişeden iki enjeksiyon yapılarak analiz gerçekleştirilmiştir (n=3).

Fizikokimyasal Özellikler

Vişne posası yağının iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asit değeri ve renk gibi fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. Yağ örneklerinin iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asit değeri AOAC (1990)'de yer alan yöntemle uygun olarak ölçülmüştür. Renk değerleri ise Buslig (1992) tarafından açıklanan yöntemle göre bir Hunter Lab Color Flex kolorimetresinde (Hunter Associates Laboratory, Reston, VA, ABD) açıklık (L), kırmızılık/yeşillik (a), sarılık/mavilik (b) ve renk farklılığı (ΔE) değeri ile tespit edilmiştir. Cihaz, standart karolar (siyah ve beyaz) ile kalibre edilmiş ve beyaz karonun renk değerleri referans olarak alınmış ($L_o = 93,81$, $a_o = -1,09$ ve $b_o = -0,51$) ve ΔE^* hesaplanması için eşitlik [1]'de sunulmuştur.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_o - L)^2 + (a_o - a)^2 + (b_o - b)^2} \quad [1]$$

Fonksiyonel Özellikler

Toplam Fenolik Madde

Toplam fenolik içerik ölçümü Folin Ciocalteu yöntemi ile yapıldı (Slinkard & Singleton, 1977). Fenolik bileşikleri ekstrakte etmek için 100 mg örneğe 1 mL etanol:asetik asit: su (50:8:42) karışımı ilave edildi. Karışım 1 dakika vortekslenildi, 0,45 μ m filtreden süzüldü ve 2,5 mL 0,2 N Folin-Ciocalteu reaktifi (Sigma-Aldrich, Steinheim, Germany), 500 μ L filtrelenmiş çözeltiliye ilave edildi ve tekrar vortekslenildi. Çözeltiler, 25°C'de 5 dakika karanlıkta tutuldu. Çözeltiliye 2 mL 75 g L⁻¹ sodyum karbonat (Sigma-Aldrich, Steinheim, Germany) çözeltilisi eklendi. Ardından çözeltiler karanlık ortamda 60 dakika bekletildi. Bekletilen çözeltilerin absorbans değerleri UV-Vis spektrofotometresi (Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, USA) kullanılarak 760 nm dalga boyunda ölçüldü. Kalibrasyon eğrisi etanol:asetik asit:su (50:8:42) ortamında çözülmüş farklı gallik asit konsantrasyonları ile hazırlandı. Toplam fenolik içerikler, eşitlik [2]'ye göre hesaplanarak örneğin gram kuru ağırlığı başına mg gallik asit eşdeğeri (GAE) cinsinden olarak sunuldu.

$$\text{mg GAE g}^{-1} = \frac{C \times V}{m} \quad [2]$$

Burada C, kalibrasyon eğrisindeki absorbansa karşılık gelen konsantrasyon, V, mL cinsinden örnek çözeltilisinin hacmini temsil ederken m ise g cinsinden örnek ağırlığını ifade etmektedir.

Toplam Antioksidan Kapasite

Antioksidan kapasite, DPPH' (2,2-Difenil-1-pikrilhidrazil) yöntemi ile ölçülmüştür (Wang, Cao & Prior, 1996). Bunun için örnekler 100 mg tartıldı ve 1 mL etanol:asetik asit: su karışımında (50:8:42 v/v) çözüldü. Süspansiyon 60 saniye vortekslenildi ve sulu katman, 0,45 μ m şırınga filtresi (Thermo Fisher Scientific, ABD) kullanılarak süzüldü. 100 μ L metanole 3,9 mL 25 ppm DPPH' radikal solüsyonu eklendi. Ayrıca 100 μ L numune solüsyonu 3,9 mL 25 ppm DPPH' solüsyonu ile karıştırılarak 25°C'de karanlık bir yerde 60 dakika bekletildi. DPPH' çözeltilisinin metanol (A_1) ve örnek çözeltilisi (A_2) içindeki absorbansları, kör olarak metanol kullanılarak bir UV-Vis spektrofotometrede (Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, MA, USA) 517 nm dalga boyunda ölçüldü. Sonuçlar mmol DPPH 100 g⁻¹ olarak eşitlik [3]'e göre hesaplanarak örneğin 100 gram kuru ağırlığı başına mmol DPPH olarak sunuldu.

$$\text{mmol DPPH 100 g}^{-1} = \frac{(C_1 - C_2)}{W_{\text{örnek}}} \times \frac{V \times d}{MW_{\text{DPPH}}} \times 100 \quad [3]$$

Burada C_1 ve C_2 sırasıyla kalibrasyon eğrisinde A_1 ve A_2 'ye karşılık gelen konsantrasyondur; $W_{\text{örnek}}$ g cinsinden örnek miktarıdır, V mL cinsinden örnek solüsyon hacmidir, d ise çözeltme seyreltme oranıdır. MW_{DPPH} de DPPH'nin moleküler ağırlığını (394 g mol⁻¹) ifade etmektedir.

İstatistiksel Analiz

Deneysel verilerin tanımlayıcı istatistikleri, SPSS paket programı (versiyon 23, 2018, IBM Corp., New York, ABD) kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar için ortalama alınarak hesaplanan değer "ortalama \pm standart sapma"

olarak sunulmuştur. Gruplar arasındaki karşılaştırma bağımsız örneklem t-testi kullanılarak %95 güven aralığında ($p=0,05$) gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Yağ Asidi Kompozisyonu

Vişne posası yağına ait yağ asidi kompozisyonu, iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asitlik ve renk değerleri sunulmuştur. Yağ asidi kompozisyonuna ait bulgular Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Vişne Posası Yağ Asidi Kompozisyonu

Yağ asitleri	Toplam yağ asidinin yüzde değeri (%)		
		Konvansiyonel	Mikrodalga
Doymuş yağ asitleri	Karbon sayısı	16,10±0,13	16,16±0,65
Palmitik	(C16:0)	10,28±0,14 ^a	10,01±1,22 ^a
Heptadekanonik	(C17:0)	0,12±0,01 ^a	0,33±0,24 ^a
Stearik	(C18:0)	2,94±0,13 ^a	3,11±1,02 ^a
Araşidik	(C20:0)	0,31±0,14 ^a	0,38±0,23 ^a
Behenik	(C22:0)	2,45±0,25 ^a	2,33±0,54 ^a
Tekli doymamış yağ asitleri		52,88±0,38	53,02±0,84
Palmitoleik	(C16:1)	0,73±0,02 ^a	0,69±0,24 ^a
Oleik	(C18:1n9c)	52,01±1,03 ^a	52,22±2,26 ^a
Erusik	(C22:1n9)	0,14±0,08 ^a	0,11±0,03 ^a
Çoklu doymamış yağ asitleri		31,02±0,52	30,95±1,06
Linoleik	(C18:2n6c)	20,85±0,18 ^a	21,03±1,29 ^a
α -Linolenik (ALA)	(C18:3n3)	7,14±0,43 ^a	6,99±1,07 ^a
Eikosapentenoik (EPA)	(C20:5n3)	3,03±0,94 ^a	2,93±0,81 ^a
Omega-3 yağ asitleri		10,17±0,69	9,92±0,94
Omega-6 yağ asitleri		20,85±0,18	21,03±1,29
Omega-6/Omega-3 oranı		2,05±0,26	2,12±1,37
Doymuş/Doymamış yağ asitleri oranı		0,19±0,14	0,19±0,34

Farklı harflendirme, aynı satırdaki sonuçların $p \leq 0,05$ ’ e göre farklı olduğunu göstermektedir.

Tablo 1’deki sonuçlar incelendiğinde konvansiyonel ve mikrodalga destekli kurutulan örnekler arasında anlamlı farklılık bulunmamıştır ($p > 0,05$). Örneklerin tekli doymamış yağ asitleri, yağın %50’sinden fazlasını oluşturmaktadır. Bu oranın neredeyse tamamını oleik asit oluşturmaktadır. Benzer bir meyve olan üzüm için ise Baydar vd. (2007) çalışmasına göre farklı üzüm türlerine (emir, narince, hasandede ve kalecik karası) ait posaların oleik asit miktarları %16,07-22,57 arasında değişmektedir. Üzüm posası yağ asidi profiline bakıldığında ise oleik asit içeriğinin %16,27 olduğu belirlenmiştir (Vašeková vd., 2020). Şan vd. (2022) çalışmasında da farklı avokado çeşitlerinin oleik asit değerlerinin %56,76-69,80 arasında olduğunu saptamıştır. Buna göre vişne posasında bulunan oleik asit miktarı üzüm posasında bulunan miktarın üç katından fazla olup avokado çeşitlerinin meyve etindeki miktardan daha düşük oranda ama yakın olduğu görülmektedir. Bu durum Bayram & Aşkın (2006)’nın belirttiği gibi avokadonun %8 üzerinde yağ içermesi (vişne posasının yaklaşık 2 katı) nedeni ile yağ asidi kompozisyonunun daha zengin olmasından kaynaklanabilir. Mokhtar vd. (2018) çalışmasında da altınçilek posası yağ içeriğindeki oleik asit miktarı %11,32 olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre de vişne posası yağının oleik asit içeriği altınçilek posası yağında bulunan miktarın yaklaşık beş katı kadardır. Vişne çekirdeği yağı sonuçları ile karşılaştırıldığında ise E. Yılmaz vd. (2020) çalışmasında vişne çekirdeği yağ içeriğindeki oleik asit miktarı %35,28 ölçülmüştür. Vişne posası yağındaki oleik asit miktarının çekirdek yağında bulunandan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şan vd. (2022) çalışmasında da avokadonun meyve eti ile çekirdeğinde benzer farklılık gözlemlenmiştir. Bu durum oleik asidin fosfolipit ve kolesterol esterlerinin bir bileşeni olmasından kaynaklanmaktadır (Ntambi & Miyazaki, 2003). Bu yapılar su ve yağ fazlarını bir arada tuttuğu için su miktarı yüksek olan meyve etinde (posada) daha fazla bulunmaktadır (Aremu vd., 2017).

Vişne posası yağının çoklu doymamış yağ asidi içeriği ise toplam yağ asidi kompozisyonunun %30’undan fazladır (Tablo 1). Bu oran içinde en yüksek yüzde linoleik aside aittir ($> %20$). Şan vd. (2022) çalışmasında da farklı avokado çeşitlerinin linoleik asit değerlerinin %11,08-14,11 arasında olduğunu saptamıştır. Buna göre vişne posası yağının

avokado çeşitlerinin içerdiği linoleik asit içeriğinden zengin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca vişne posası yağ asidi kompozisyonunda esansiyel yağ asitlerinden ve omega 3 yağ asitlerinden olan alfa-linolenik aside (ALA) %7,14 oranında rastlanmıştır. ALA, üç uzun zincirli yağ asidinin (EPA, dokosapentaenoik asit [DPA], DHA) öncü bileşenidir. Bir esansiyel yağ olan EPA'nın kan basıncı ve kardiyak fonksiyonları düzenlemenin yanı sıra güçlü iltihap önleyici (anti-inflamatuar) etkileri bulunmaktadır (Hooper vd., 2004). Vişne posası yağında da %3,03 oranında EPA tespit edilmiştir (Tablo 1). Vişne posasının yağ asidi içerikleri sınıflandırıldığında ise omega-3 yağ asitlerinin %10,17; omega-6 yağ asitlerinin ise toplam yağ asidi kompozisyonunun %20,85'ini oluşturduğu tespit edilmiş, doymuş yağ asitlerinin ise sadece %16,10 oranında bulunduğu belirlenmiştir.

Fizikokimyasal ve Fonksiyonel Özellikleri

Vişne posası yağının iyot sayısı, peroksit, sabunlaşma, asit ve renk değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, peroksit değeri 30 mEq peroksit kg^{-1} 'dan düşük olan yağların insan tüketimi için güvenli olduğu kabul edilmektedir (Gotoh & Wada, 2006). Ayrıca peroksit değerinin, Codex Alimentarius Komisyonu (1999) ile Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen 15 mEq peroksit kg^{-1} seviyesinin altında olması vişne posası yağı tüketiminin oldukça güvenli olduğunu göstermektedir.

Tablo 2. Fizikokimyasal ve Fonksiyonel Özellikler

Özellikler	Değerler	
	Konvansiyonel	Mikrodalga
İyot sayısı (g iyot 100 g^{-1})	44,17±1,23 ^a	36,87±2,55 ^b
Peroksit değeri (mEq peroksit kg^{-1})	6,68±0,03 ^a	4,41±1,67 ^b
Sabunlaşma değeri (mg KOH g^{-1})	175,19±1,08 ^a	162,31±3,45 ^b
Asit değeri (mg KOH g^{-1})	9,73±1,07 ^a	9,89±1,10 ^a
<i>L</i> *	1,48±0,02 ^b	3,87±1,14 ^a
<i>a</i> *	3,16±0,06 ^a	2,02±0,78 ^b
<i>b</i> *	1,60±0,04 ^a	1,45±0,86 ^b
ΔE^*	92,45±0,02 ^a	90,02±0,93 ^b
Toplam fenolik madde (mg GAE g^{-1})	75,14±2,56 ^b	84,43±2,22 ^a
Toplam antioksidan kapasite (mmol DPPH 100 g^{-1})	79,44±3,07 ^b	90,19±4,10 ^a

Farklı harflendirme, aynı satırdaki sonuçların $p \leq 0,05$ ' e göre farklı olduğunu göstermektedir.

E. Yılmaz vd. (2020)'nin çalışmasında da vişne çekirdeği yağı incelenmiş ve peroksit değeri 16,32 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 5,69 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 189,54 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 77,29 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Vişne posası ile vişne çekirdeği karşılaştırıldığında, posa yağının peroksit, sabunlaşma değeri ve iyot sayısının daha düşük olduğu asitliğinin ise çekirdek yağından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna göre posa yağının oksidasyona, ekstraksiyon gibi işlemlere ve bu işlemlerde kullanılan kimyasallara daha dayanıklı olduğu söylenebilir. Mikrodalga yöntemi ile kurutulmuş örnekte ise bu değerlerin daha düşük bulunması da işlem süresinin kısa olmasından kaynaklanabilir. Benzer sonuçlar Oomah, Liang, Godfrey & Mazza (1998) çalışmasında da raporlanmıştır. Azlan vd. (2010)'nin de bildirdiği gibi yağlarda yüksek sabunlaşma değeri, yağlarda bulunan yağ asitlerinin yüksek sayıda karbon atomuna sahip olduğunu göstermiştir. Buna göre vişne posası yağının, E. Yılmaz vd. (2020) çalışmasında kullanılan çekirdek yağından daha az sayıda karbon atomuna sahip yağ asitlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Yağın asitlik değeri incelendiğinde ise vişne posasında E. Yılmaz vd. (2020) çalışmasındaki vişne çekirdeği için bulunan sonuçlara göre daha yüksek bulunmuştur. Falade vd. (2008)'de de düşük iyot içeriğinin gıdalarda oksidatif bozulmayı önlediğini bildirmiştir. Böylece vişne posası yağının önceki çalışmada incelenen vişne çekirdeği yağından raf ömrü ve oksidatif bozulma açısından daha kaliteli olduğu ifade edilebilir.

Mokhtar vd. (2018) çalışmasında da altınçilek posası yağ içeriğinin peroksit değeri 8,2 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 2,36 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 186,2 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 109,5 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Vişne posası yağı ile karşılaştırıldığında vişnenin sabunlaşma ve iyot sayısının daha iyi olduğu belirlenmiştir. Issa vd. (2017) çalışmasında 13 farklı zeytinyağına ait peroksit değeri 11,20-60,40 mEq peroksit kg^{-1} , asitlik değeri 0,737-17,94 mg KOH g^{-1} , sabunlaşma değeri 185,34-199,65 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 71,00-94,10 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Bora vd. (2001) de avokado pulpunun yağına ait peroksit değeri 1,40 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 1,23 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 178,3 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 77,6 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Aynı çalışmada avokado çekirdeği yağının peroksit değeri 1,37 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 2,06 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 231,6 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 69,4 g iyot 100 g^{-1} olarak ölçülmüştür. Buna göre altınçilek

posası yağına, 13 farklı zeytinyağına, avokado pulpu ve çekirdeğinin yağına göre vişne posası yağının daha iyi kalitede ve daha uzun raf ömrüne sahip olduğu, daha az karbonlu yağ asitlerinden oluştuğu bildirilebilir.

Azlan vd. (2010) çalışmasında palm yağının peroksit değeri 7,98 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 0,84 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 200,05 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 60,27 g iyot 100 g^{-1} bulunmuştur. Aynı çalışmada zeytinyağına ait değerler ise şu şekilde ölçülmüştür: Peroksit değeri 7,98 mEq peroksit kg^{-1} ; asitlik değeri 0,84 mg KOH g^{-1} ; sabunlaşma değeri 189,30 mg KOH g^{-1} ve iyot sayısı 83,1 g iyot 100 g^{-1} olarak ölçülmüştür. Buna göre palm yağı ve zeytinyağına göre vişne posası yağının daha iyi kalitede, daha uzun raf ömrüne sahip olduğu, daha az karbonlu yağ asitlerinden oluştuğu ve oksidatif bozulma açısından daha kaliteli olduğu ifade edilebilir.

Sanibal & Mancini-Filho (2004)'ün de ifade ettiği gibi renk değeri yağ kalitesinin bir göstergesidir. Tablo 2'de vişne posası yağının renk değerleri verilmiştir. Mikrodalga destekli ve konvansiyonel olarak kurutulan vişne posası yağ renkleri farklılık göstermiştir. Bunun nedeni peroksit değerinden kaynaklanmış olabilir. Mikrodalga destekli kurutmanın konvansiyonel kurutmaya göre daha kısa sürmesinden dolayı peroksit değerinin düşük olmasına bağlı yağın L^* değeri yüksek, a^* ve b^* değeri ise düşük bulunmuş olabilir. Benzer sonuç Oomah vd. (1998) çalışmasında da üzüm çekirdeği için bulunmuştur. Bunun dışında E. Yılmaz vd. (2020) çalışmasında da vişne çekirdeği yağının renk değerleri L^* için 26,63; a^* için -2,22; b^* için 11,14 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre vişne posası ve çekirdek yağı arasında renk değerleri açısından farklılık olduğu belirlenmiştir. Özellikle L^* ve a^* değerinin beklenenden düşük çıkması vişnenin posa kısmında antosiyaninlerin etkisi ile oluşan rengin yağ ekstraksiyonu aşamasında yağa geçmemesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Örneklerin fonksiyonel özellikleri açısından toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan kapasiteleri mikrodalga destekli kurutulan örneklerin yağlarında daha yüksek bulunmuştur. Bu durum konvansiyonel olarak kurutulan örneklerin yarısı kadar süren kurutma süresinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca mikrodalga uygulamasında hızlı buharlaşmadan kaynaklı hücre içi basıncında artış meydana gelmesi sonucu hücre içeriğinin taşınımı hızlanmaktadır (Feng vd., 2001). Böylece fenolik maddelerin hücre dışına çıkışının daha fazla olması mümkündür. Bu durum fenolik maddelerin bir etkisi olarak antioksidan kapasitenin yüksek bulunması ile de desteklenmiştir.

SONUÇ

Vişne posası yağ asidi kompozisyonunun büyük kısmını tekli doymamış yağ asitleri oluşturmaktadır. Bu yağ asitlerinin içinde de en yüksek oran oleik aside aittir. Çoklu doymamış yağ asidi içeriğinde ise linoleik asit en yüksek oranda bulunmuştur. Vişne posasından elde edilen yağın diğer fizikokimyasal özellikleri incelendiğinde özellikle sabunlaşma, iyot sayısı ve peroksit değeri, karşılaştırılan yağ örneklerine göre düşük bulunmuştur. Mikrodalga destekli kurutma ise yağ asidi kompozisyonunda anlamlı farklılık meydana getirmeyen yağın fizikokimyasal özelliği olarak iyot, peroksit, sabunlaşma değerleri ile a^* , b^* ve ΔE^* renk değerlerinin daha düşük, fonksiyonel özellik olarak da toplam fenolik madde ve antioksidan kapasitenin daha yüksek olmasını desteklediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında vişne posası yağının raf ömrünün daha uzun olabileceği yönünde bir fikir oluşturmuştur. Raf ömrünün uzun olmasını sağlayan şartlar ise ekstraksiyon ve depolama işlemlerinde meydana gelebilecek hidroliz, oksidasyon ve bunun sonucunda yağda meydana gelebilecek acılaştırmanın gecikmesini sağladığı için vişne posası yağının kaliteli olduğu söylenebilir. Bu sayede meyve suyu üretimi atıklarının büyük bir kısmını oluşturan vişne posasından elde edilen yağ, özellikle insan sağlığını koruyucu etkiler gösteren oleik asit içeriğinin yüksek olmasından dolayı insani tüketim amaçlı kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

Anonim (2019). Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (2019). Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Erişim tarihi: 3 Ekim 2022. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/03/Surdurulebilir-Kalkinma-Amaclari-Degerlendirme-Raporu_13_12_2019-WEB.pdf

AOAC, 1990. Official Method for Analysis, 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.

AOCS Official Method Ce 2-66 (1998). Preparation of methyl esters of fatty acids. AOCS Champaign. IL.

Almasi, S., Najafi, G., Ghobadian, B. ve Jalili, S. (2021). Biodiesel production from sour cherry kernel oil as novel feedstock using potassium hydroxide catalyst: Optimization using response surface methodology. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 35, 102089.

Aremu, M.O., Ibrahim, H., Andrew, C. (2017). Comparative studies on the lipid composition of blood Plum (*Haematostaphis barteri*) pulp and seed oils. *The Open Biochemistry Journal*, 11, 94.

- Asensi-Fabado, M. A. ve Munné-Bosch, S. (2010). Vitamins in plants: Occurrence, biosynthesis and antioxidant function. *Trends in plant science*, 15(10), 582-592.
- Azlan, A., Prasad, K. N., Khoo, H. E., Abdul-Aziz, N., Mohamad, A., Ismail, A. ve Amom, Z. (2010). Comparison of fatty acids, vitamin E and physicochemical properties of *Canarium odontophyllum* Miq.(dabai), olive and palm oils. *Journal of food composition and analysis*, 23(8), 772-776.
- Bak, I., Lekli, I., Juhasz, B., Varga, E., Varga, B., Gesztelyi, R., ... Tosaki, A. (2010). Isolation and analysis of bioactive constituents of sour cherry (*Prunus cerasus*) seed kernel: An emerging functional food. *Journal of medicinal food*, 13(4), 905-910.
- Baker, E. J., Miles, E. A., Burdge, G. C., Yaqoob, P. ve Calder, P. C. (2016). Metabolism and functional effects of plant-derived omega-3 fatty acids in humans. *Progress in lipid research*, 64, 30-56.
- Başıyigit, B., Görgüç, A., Gençdağ, E., Cansu, Ü., Yılmaz, F. M. ve Karaaslan, M. (2022). Functional characterization of high-yield plant protein powder valorized from de-oiled sour cherry seed using microwave-assisted enzymatic extraction followed by spray- and freeze-drying. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi:10.1007/s13399-022-03225-2
- Baydar, N. G., Özkan, G. ve Çetin, E. S. (2007). Characterization of grape seed and pomace oil extracts. *Grasas y aceites*, 58(1), 29-33.
- Bayram, S., Aşkın, M.A. (2006). Bazı avokado çeşitlerinde hasat zamanının belirlenmesinde yağ ve kuru ağırlık parametrelerinin kullanımı. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(2), 38-48.
- Bora, P. S., Narain, N., Rocha, R. V. ve Paulo, M. Q. (2001). Characterization of the oils from the pulp and seeds of avocado (cultivar: Fuerte) fruits. *Grasas y aceites*, 52(3-4), 171-174.
- Buslig, B. S. (1992). Measurement of orange juice color with a 0/45 portable colorimeter (C. 105, ss. 153-155). Proceedings of the Florida State Horticultural Society, sunulmuş bildiri.
- Eroğlu Samur, G. (2012). *Kalp damar hastalıklarında beslenme* (s. 20). Ankara: Reklam Kurdu.
- Falade, O. S., Adekunle, A. S., Aderogba, M. A., Atanda, S. O., Harwood, C. ve Adewusi, S. R. (2008). Physicochemical properties, total phenol and tocopherol of some *Acacia* seed oils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(2), 263-268.
- Faostat, (2020). FAO statistical database, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Erişim Tarihi: 16 Ekim 2022).
- Farvid, M. S., Ding, M., Pan, A., Sun, Q., Chiuve, S. E., Steffen, L. M., ... Hu, F. B. (2014). Dietary linoleic acid and risk of coronary heart disease: A systematic review and meta-analysis of prospective cohort studies. *Circulation*, 130(18), 1568-1578.
- Feng, H., Tang, J., Cavalieri, R. P. ve Plumb, O. A. (2001). Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed. *AIChE Journal*, 47(7), 1499-1512. doi:10.1002/aic.690470704
- Górnaś, P., Rudzińska, M., Raczky, M., Mišina, I., Soliven, A. ve Segliņa, D. (2016). Composition of bioactive compounds in kernel oils recovered from sour cherry (*Prunus cerasus* L.) by-products: Impact of the cultivar on potential applications. *Industrial Crops and Products*, 82, 44-50.
- Gotoh, N. ve Wada, S. (2006). The importance of peroxide value in assessing food quality and food safety. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(5), 473.
- Hooper, L., Harrison, R. A., Summerbell, C. D., Moore, H., Worthington, H. V., Ness, A., Ebrahim, S. (2004). Omega 3 fatty acids for prevention and treatment of cardiovascular disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (4).
- Issa, R. A., AlHanash, H. B., Kaakul, T. E., AlKout, R. ve Alkmishi, H. (2017). An investigation on Libyan olive oil in the western region. *Moroccan Journal of Chemistry*, 5(4), 5-4.
- Kim, J., Park, Y. ve Park, Y. (2014). Trans-10, cis-12 CLA promotes osteoblastogenesis via SMAD mediated mechanism in bone marrow mesenchymal stem cells. *Journal of functional foods*, 8, 367-376.
- Millena, C. G. ve Sagum, R. S. (2018). Philippine Pili (*Canarium ovatum*, Engl.) varieties as source of essential minerals and trace elements in human nutrition. *Journal of Food Composition and Analysis*, 69, 53-61.

- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M. ve Embaby, H. E.-S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1-7.
- Norouzi, S., Fadavi, A. ve Darvishi, H. (2021). The ohmic and conventional heating methods in concentration of sour cherry juice: Quality and engineering factors. *Journal of Food Engineering*, 291, 110242.
- Ntambi, J. M., Miyazaki, M. (2003). Recent insights into stearoyl-CoA desaturase-1. *Current opinion in lipidology*, 14(3), 255-261.
- Oomah, B. D., Liang, J., Godfrey, D. ve Mazza, G. (1998). Microwave Heating of Grapeseed: Effect on Oil Quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(10), 4017-4021. doi:10.1021/jf980412f
- Ozturk, B., Parkinson, C. ve Gonzalez-Miquel, M. (2018). Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 206, 1-13.
- Ribeiro Barros Cardoso, C., Aparecida Souza, M., Amália Vieira Ferro, E., Favoreto Jr, S. ve Deolina Oliveira Pena, J. (2004). Influence of topical administration of n-3 and n-6 essential and n-9 nonessential fatty acids on the healing of cutaneous wounds. *Wound repair and regeneration*, 12(2), 235-243.
- Rodsamran, P. ve Sothornvit, R. (2019). Extraction of phenolic compounds from lime peel waste using ultrasonic-assisted and microwave-assisted extractions. *Food bioscience*, 28, 66-73.
- Sanibal, E. A. A. ve Mancini-Filho, J. (2004). Frying oil and fat quality measured by chemical, physical, and test kit analyses. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81(9), 847-852.
- Shultz, T., Chew, B., Seaman, W. ve Luedecke, L. (1992). Inhibitory effect of conjugated dienoic derivatives of linoleic acid and β -carotene on the in vitro growth of human cancer cells. *Cancer letters*, 63(2), 125-133.
- Slinkard, K. ve Singleton, V. L. (1977). Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(1), 49.
- Solanas, M., Hurtado, A., Costa, I., Moral, R., Menéndez, J. A., Colomer, R. ve Escrich, E. (2002). Effects of a high olive oil diet on the clinical behavior and histopathological features of rat DMBA-induced mammary tumors compared with a high corn oil diet. *International journal of oncology*, 21(4), 745-753.
- Sonawane, S. K., Bagul, M. B., LeBlanc, J. G. ve Arya, S. S. (2016). Nutritional, functional, thermal and structural characteristics of *Citrullus lanatus* and *Limonia acidissima* seed flours. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(1), 72-79.
- Şan, B., Yıldırım, A.N., Yıldırım, F., Binici, S., Çelik, C., Bayram, S., Yılmaz, M. (2022) Antalya ekolojik koşullarında bazı avokado (*Persea americana* Mill.) çeşitlerinin yağ asitleri içerikleri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 27(3) : 525-531.
- Tutunchi, H., Ostadrahimi, A. ve Saghafi-Asl, M. (2020). The effects of diets enriched in monounsaturated oleic acid on the management and prevention of obesity: A systematic review of human intervention studies. *Advances in nutrition*, 11(4), 864-877.
- Vašková, P., Juráček, M., Bíro, D., Šimko, M., Gálik, B., Rolinec, M., Ivanišová, E. (2020). Bioactive compounds and fatty acid profile of grape pomace. *Acta Fytotechn. Zootechn*, 23, 230-235.
- Wang, H., Cao, G. ve Prior, R. L. (1996). Total Antioxidant Capacity of Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(3), 701-705. doi:10.1021/jf950579y
- Whelan, J. ve Fritsche, K. (2013). Linoleic Acid. *Advances in Nutrition*, 4(3), 311-312. doi:10.3945/an.113.003772
- Yılmaz, C. (2013). Vişne çekirdeği atıklarının gıda ingrediyesi olarak değerlendirilmesi.
- Yılmaz, C. ve Gökmen, V. (2013). Compositional characteristics of sour cherry kernel and its oil as influenced by different extraction and roasting conditions. *Industrial crops and products*, 49, 130-135.
- Yılmaz, E., Keskin, O. ve Ok, S. (2020). Valorization of sour cherry and cherry seeds: Cold press oil production and characterization. *J. Agroaliment. Proc. Technol.*, 26(3), 228-240.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.11.2022
Kabul Tarihi : 05.04.2023

Received Date : 29.11.2022
Accepted Date : 05.04.2023

SYSTEM DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING FOR THE RECOVERY OF LUBRICANT POWDER USED IN WIRE DRAWING PROCESS

TEL ÇEKME PROSESLERİNDE KULLANILAN TOZ SABUNUN GERİ KAZANIMI İÇİN SİSTEM TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Orhan EREN^{1*} (ORCID: 000-0002-1368-0944)
Eyyüp GERÇEKÇİOĞLU² (ORCID: 0000-0002-8418-7364)
Esra BENLİCE¹ (ORCID: 0000-0002-0129-9310)
Erkan YILMAZ³ (ORCID: 0000-0001-8962-3199)
Ali DURAN⁴ (ORCID: 0000-0002-6260-2424)

¹Hascelik Kablo Co., 38070, Melikgazi, Department of R&D, Kayseri, Turkey

²Erciyes University, Department of Mechanical Engineering, Kayseri, Turkey

³Erciyes University, Department of Basic Pharmacy Science, Kayseri, Turkey

⁴Abdullah Gül University, Department of Nanotechnology Engineering, Kayseri, Turkey

*Corresponding Author: Orhan EREN, oeren@hascelik.com.tr

ABSTRACT

Recycling processes have gained great importance for both environmental and economic sustainability and development. A prototype system was developed using physical separations including size sieving and magnetic separation for the recycling of solid die soaps used as lubricants in industrial wire drawing processes. The chemical composition of the waste obtained after the wire drawing process was elucidated by using X-ray fluorescence (XRF) analysis and extraction methods. The results showed that there was 67% reusable soap in the waste, and most of the remaining waste was made up of metals. Parameters such as particle size, sieve pore diameters, shaking time and magnetic field strength were optimized and an industrial scale prototype recycling system was designed. Finally, a prototype recovery system was established. Scanning electron microscopy (SEM), light microscopy, thermogravimetric/differential thermal analyzes (TGA/DTA), X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were used for the characterization. 88% of the soap in the waste was recovered, and the soap obtained was successfully used in wire drawing process without causing any deformation in the wire. These findings clearly demonstrate that offered system design engineered solution has a great potential to become a way out point for the waste recycling gain in the recovery and reuse of lubricant powder.

Keywords: Wire drawing, reduction, die soap, recovery

ÖZET

Günümüzde geri dönüşüm süreçleri hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirlik ve kalkınma için büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada, endüstriyel tel çekme işlemlerinde yağlayıcı olarak kullanılan katı kalıp sabunlarının geri dönüşümü için eleme ve manyetik ayırmayı içeren fiziksel yöntemler kullanılarak yeni bir yöntem ve prototip sistem geliştirilmiştir. Tel çekme işlemi sonrasında elde edilen atığın kimyasal bileşimi X-ray floresan (XRF) analizi ve ekstraksiyon yöntemleri kullanılarak görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, atıkta %67 oranında yeniden kullanılabilir sabun bulunduğunu ve kalan atığın çoğunun metallere olduğunu göstermiştir. Geri dönüşüm için partikül boyutu, elek gözenek çapları, sallama süresi ve manyetik alan gücü gibi parametreler optimize edilmiş olup optimum koşullar kullanılarak endüstriyel ölçekli bir prototip geri dönüşüm sistemi tasarlanmıştır. Son olarak optimum koşulları içeren bu veriler ışığında bir prototip kurtarma sistemi kurulmuştur. Bu çalışmada, analizler için elektron mikroskobu (SEM), ışık mikroskobu, termogravimetrik/diferansiyel termal analizler (TGA/DTA), X-ışını floresan spektroskopisi (XRF) ve fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır. Sonuçlar, atıktaki sabunun %88' inin geri

ToCite: EREN, O., GERÇEKÇİOĞLU, E., BENLİCE, E., YILMAZ, E. & DURAN, A., (2023). SYSTEM DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING FOR THE RECOVERY OF LUBRICANT POWDER USED IN WIRE DRAWING PROCESS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 451-461.

kazanıldığını ve elde edilen sabunun telde herhangi bir deformasyona neden olmadan tel çekme işleminde başarıyla kullanıldığını göstermiştir. Bulgular, önerilen sistem tasarımı çözümünün, yağlayıcı tozun geri kazanılması ve yeniden kullanılmasında atık geri dönüşümü kazanımı için bir çıkış noktası olma konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Tel çekme, redüksiyon, hadde sabunu, geri kazanım

INTRODUCTION

Wire drawing is a process that pulls the rod manufactured in the line rolling process through a die with a hole by means of an applying tensile force to the exit side. The end product of this process is called wire. In industrial manner, these are used for many different purposes. Wires having 3 mm-50 μm of diameter are usually used for making wire ropes and defined as thin wire. The wires having 3 mm-40 mm of diameter are used for manufacturing bolt and fastener through a cold heading process and defined as thin wire (Kim et al., 2014; Byon et al., 2011). Lubrication is the most important determining parameter for high productivity in cold heading. Therefore, the lubricating strategy adopted must be defined in the product design phase just at the beginning. The geometry of the product, customer request details, the materials need, etc. are all factors that effects the lubricating systems options. After defining the lubricating strategy, the performance level will be easily maintained to ensure a regular process. During the wire drawing process, the friction force that occurs as a result of the metal-metal contact during the winding of the wires through the die to the wire drawing machine blocks creates a resistance in the process (Gustavo et al., 2020; Andre et al., 2001). The friction force creates a resistance, releases high heat, deteriorates the wire quality, shortens the life of the mold and causes excessive energy consumption (Moon and Kim, 2012). Lubricating soaps are used to reduce this resistance and facilitate shrinkage. In this regard, different soap solutions are being researched recently (Hu et al., 2023; Wu et al., 2023; Jeiman et al., 2023; Sarma and Vinu, 2022; Donato et al., 2021; Xu et al., 2020).

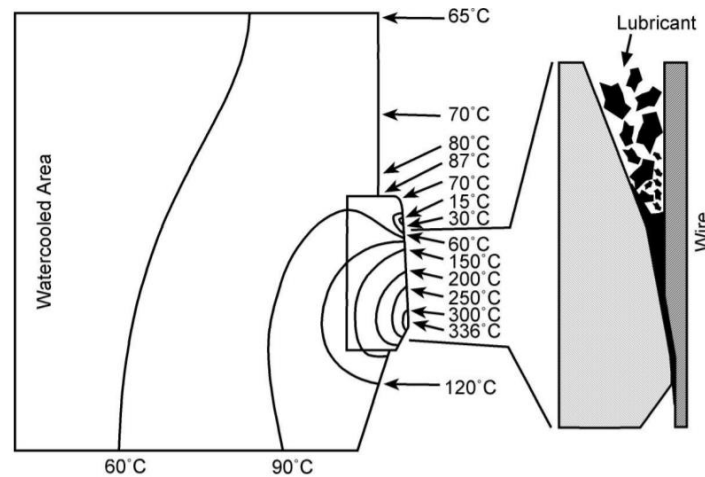


Fig. 1. Shows the Wire Drawing Process Using Solid Lubricant and the Resulting Temperatures (Dove et al., 1980)

Wire drawing lubricants show distinctness according to the using processes. They are basically divided into two as solid and liquid lubricants (Masao et al., 2004). Liquid lubricants are generally used during the reduction (diameter reduction) process of copper wires. Solid lubricants are divided into three as calcium, sodium and aluminum stearate soaps. Calcium and sodium soaps once are used in steel wire rod (wire) drawing and aluminum stearate soaps are generally used in drawing operations with thick cross-sections such as bolts and nuts (Wright et al., 2011; McNulty, 2006; Eickemeyer et al., 1996; Brard, 1991). The solid lubricants used in the wire drawing process are miscible with the metal parts stripped from the wire surface during the reduction process and become wastes that must be disposed of at the end of the process. The generated waste cannot be used once for the same process with the waste state. The waste soaps subject to recycling have been classified as hazardous waste by the competent authorities of developed countries. These hazardous wastes have limited storage times and have to be disposed of (Sarma and Vinu, 2022).

Characteristic analysis such as FTIR, TGA, XRF, SEM and light microscopy were applied in soap conversion. In addition, the wires drawn with converted soap were evaluated in terms of mechanical properties. Tensile strength and torsional properties were examined. In addition to the mechanical strength after recovery, the deformations on the wire surface, the growth in the rolling diameters and the changes in the rolling temperatures were taken into consideration. With this study, it is aimed to transform the waste soap, which is classified as hazardous waste (Tripp,

1998), to be used in wire drawing without harming the environment and living things, and to contribute both financially and environmentally. The methods used during the recovery process are physical and do not involve a chemical process. This paper proposes tools for the physical separation. Therefore, due to the physical separation there is no new side waste during the recycle process. And with its low energy consumption, it is suitable for automation ensuring that this process fulfills many criteria of green recycling processes.

EXPERIMENTAL AND RESULTS

Design of New Experimental Process

The size distribution of soap and metal parts in the waste varies according to the run times of wire drawing and reduction rates. In the laboratory-scale studies, waste samples were sieved by using sieve systems with pore sizes ranging from 2 to 300 mesh. In the selection of the sieves used in the sieving process of the wastes, the sieve analysis made on the original soaps was also taken into consideration. Sieve analysis test results are shared in Table 1.

Table 1. Sieve Analysis Results for Original Lubricant Soap

Characteristics	Unit	Value	Low Limit	High Limit
PARTICULE SIZE - D10% IN MM	mm	0.33	0.24	0.57
PARTICULE SIZE - D10% IN MM	mm	0.33	0.24	0.57
PARTICULE SIZE - D50% IN MM	mm	0.98	0.80	1.52
PARTICULE SIZE - D90% IN MM	mm	2.29	2.16	2.67
PARTICULE SIZE - XM IN MM	mm	1.16	1.00	1.56

Waste and soap sifted in sieves with different pore diameters were classified according to their particle size. In this way, the size-separated waste was made ready for the magnetic separation, which is the next step. In the laboratory-scale separations, a neodymium magnet was placed approximately 10 cm sized the continuously stirred waste's above, thereby removing metal impurities from the waste. With the removal of metal impurities, ready-to-use recycled soap is left behind (Fig. 2).

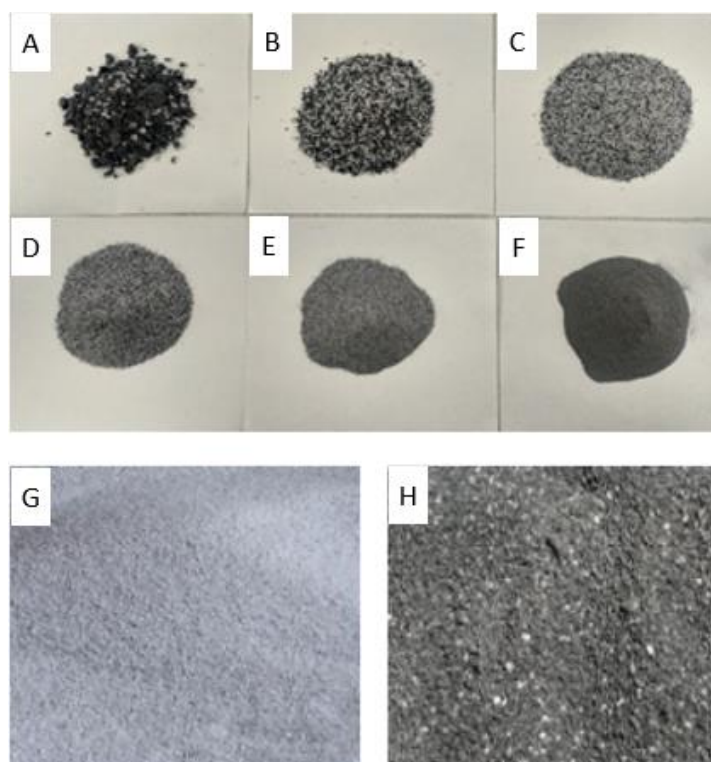


Fig. 2. Waste Samples of Different Sizes (A), (B), (C), (D), (E), (F), Subjected to Sieving Processes, Soap (G) and Metals (H) Obtained After Magnetic Separation

After optimizing the laboratory-scale separation process, the process of establishing an industrial-scale soap recycling system was carried out. For this, an automated system was developed by imitating the system developed at the laboratory scale. In this system, the wastes are transported to sieves with a size of within the range 6-100 mesh, which

are constantly vibrating, by a conveyor belt system and are separated according to their sizes on these sieves. Since the wastes have a wide size distribution, a more efficient magnetic separation process was achieved by using a multi-sieve system.

After the sieving process, the wastes are passed through belts and metal impurities are separated from the wastes by using the magnets with a power of 5000-15000 Gauss on each layer of these belts. A representative recycling system with single band is shown in Fig. 3. Soaps obtained in different sizes are mixed and reused in the appropriate wire drawing processes. All stages are shared in Fig. 4.

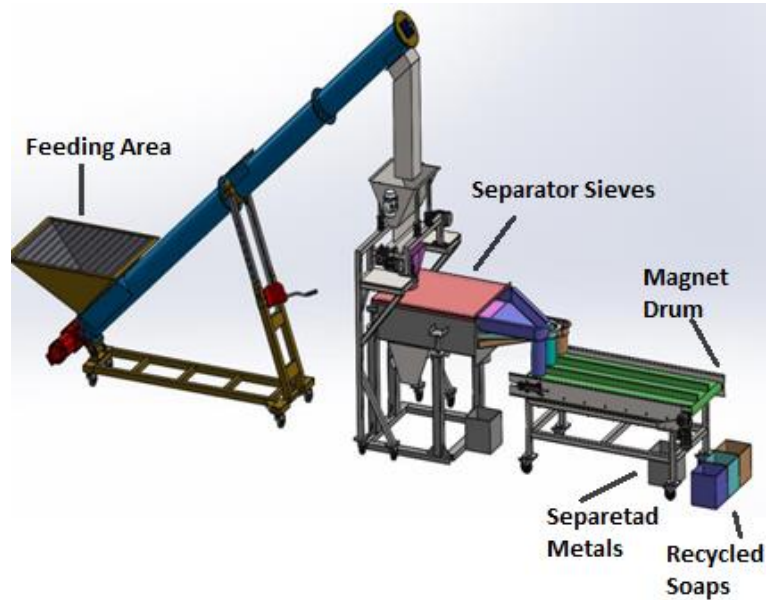


Fig. 3. The System Design for Recovery

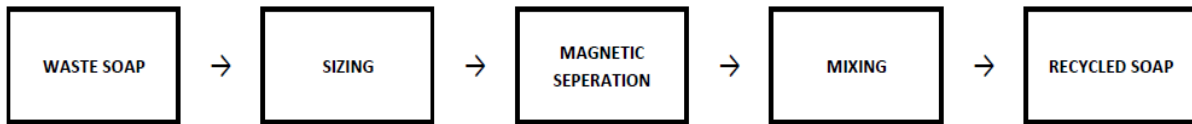


Fig. 4. All Stages for Recovery

The Characterization of Recycled Soap Powders

Instrumentation

Zeiss Evo LS10 model SEM analyzer and Leica Brand DM 750 M model light microscope were used in the analysis of the wire surfaces. Panalytical Brand Axios Advanced model XRF spectrometer was used in clarification of the chemical composition of waste and recycled soaps. Perkin Elmer 400 FT-IR / FT-FIR spectrometer device was used in clarification of the chemical composition of pure, waste and recycled soaps. TGA/DTA analyses were carried out for characterization of pure, waste and recycled soaps (Perkin Elmer Diamond model TG/DTA). The tensile strength of the wires was measured with the Zwick/Roell Z050 tensile device.

Analysis and Evaluations

Hot water extraction was used to determine the soap quantity in the waste sample. In this method, the sodium-based soap dissolved in hot water (~ 90 0C), while the remaining wastes did not dissolve in water. When the aqueous part was filtered by the filtration method, the sodium-based soap dissolved in hot water and the waste part were separated from each other. Quantification was carried out by weighing the remaining soap after the water was removed by evaporation. The results obtained show that there is 67% of usable soap in the waste obtained after the wire drawing reduction process.

This novel physical recycling process has been applied to recover 88% of soap in the waste, and the recovered soap has been successfully used in wire drawing without causing any deformation of the wire. In the literature, a unique scientific research paper is available that proposes a technique in terms of soap particle recovery with a rate of 85.45%

(Kim et al., 2014). When you explore some published patents on the same field, you see lubricating powder recovery device solution offers (Zhendong, 2011; Gyucheol and Giate 2010). But unfortunately, there is no information for the recovery rates. Only 2 patents are found. One has the title of “Dry Drawing Lubricant Recycling Machine for Steel Wire”, having the feature to remove up to 98% of iron pollutants at a cost of 50 liters per hour (Mun and Kyung-ho, 2011). And the other one with the title of “Wire drawing dry lubricant recycling machine”, shows a result of removal rate of the iron powder can be 80% or more just for a sample they investigated (Toru, 2005).

XRF analysis was carried out for clarification of chemical contents of pristine, recovered and waste soaps. Sodium-based soap was recovered in this process, therefore the sodium (Na) ratio was taken as a basis in the pristine, recovered and waste soaps. It was found that the sodium ratio in the recovered soap is parallel to the sodium ratio found in the original soap. Like sodium (Na), other elements including potassium (K), phosphorus (P) and silicon (Si) ratios have almost the same percentage values compared to the original soap. A decrease in the rate of sodium and an increase in the rate of other specified elements were observed in the wastes consisting of a mixture of soap and metal, which are described as waste soap, due to metal impurities (Fig. 5). The results obtained showed that the waste soap could be recovered with an efficiency of over 95%.

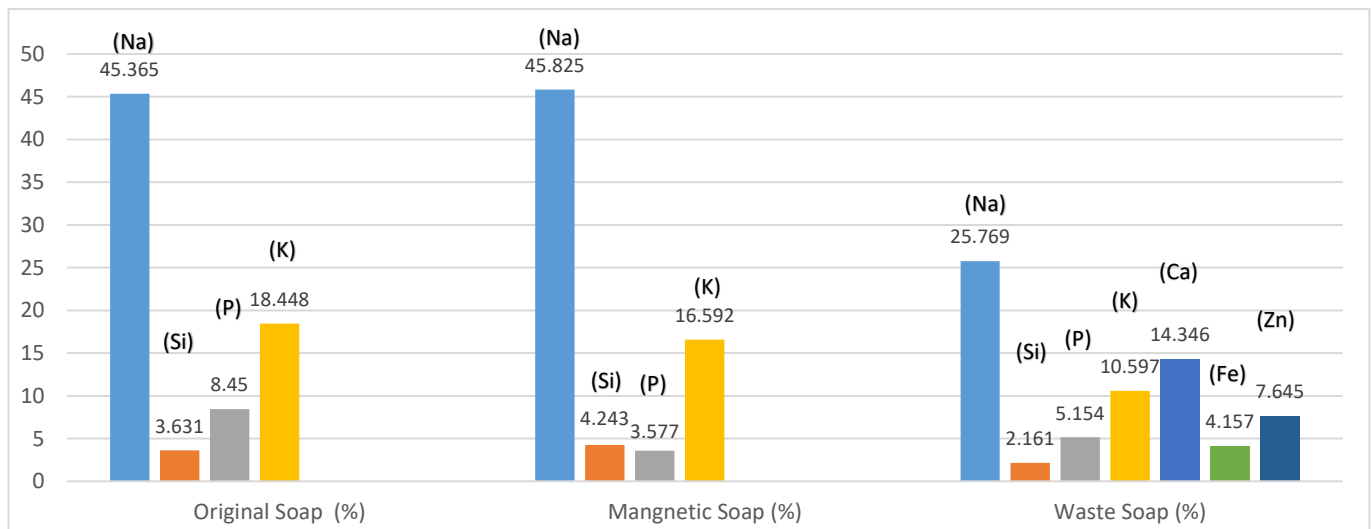


Fig. 5. XRF Analysis of Unused (Original), Recycled and Waste Soaps

FT-IR analysis were also conducted to determine if impurities remain in recycled soap and to observe chemical differences between original unused soap and recovered soap samples. It is predicted that the absorption peaks occurring above 3600 cm^{-1} in the samples are caused by O-H vibration peaks. Similarly, C = C peaks occurring in the range of $1400\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$, C-O absorption peaks occurring around 1100 cm^{-1} (Fig. 6). When the FT-IR spectrum is examined in the two samples, it is seen that there is no significant difference between the spectra and even the spectra are very close to each other. FT-IR results prove that waste soap is successfully recycled.

The thermal behaviours of the original unused soap and recovered soap was also investigated to illuminate if impurities remain in recycled soap and to observe chemical differences between original unused soap and recovered soap samples. The results obtained from TGA analysis show that both samples do not deteriorate up to $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ and their chemical structures begin to change above $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fig. 7). When both TGA spectra are examined, it is seen that both soap samples give very similar and compatible thermal degradation graphs.

By using the unused original soap and the reclaimed soaps, the wire drawing reduction process was carried out for the 5 km long wire. After the wire drawing reduction process, the surface structures of the wire samples were examined with using scanning electron microscope (Fig. 8) and the light microscope (Fig. 9) techniques. When the images obtained from both methods were examined, it was clearly seen that there was no deformation such as scratches or breakage on the wire surfaces and it was also observed that there was no significant difference in the morphology of the wire surfaces.

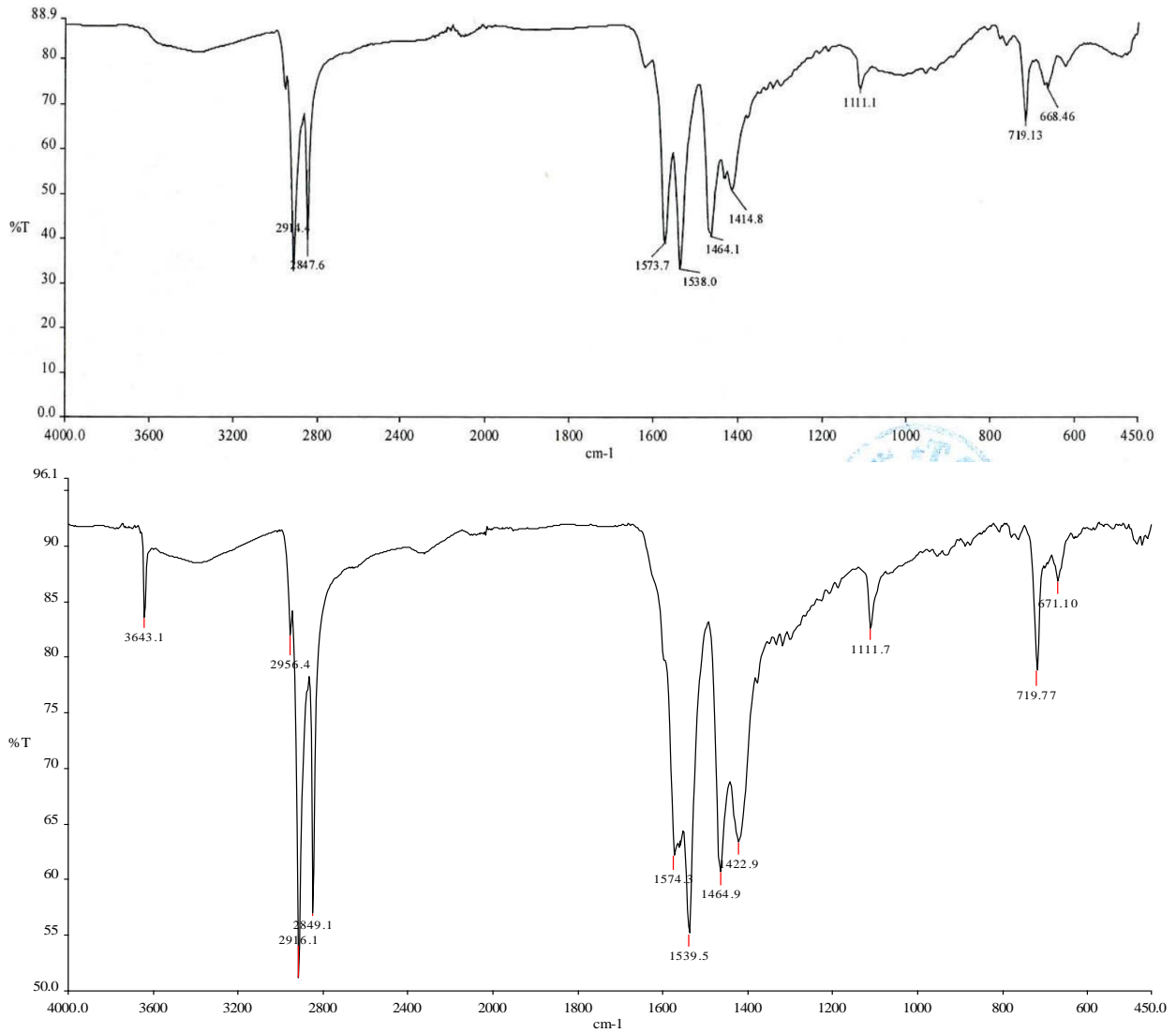


Fig. 6. FT-IR Spectrums of Recovered Soap (A) and Original Unused Soap (B)

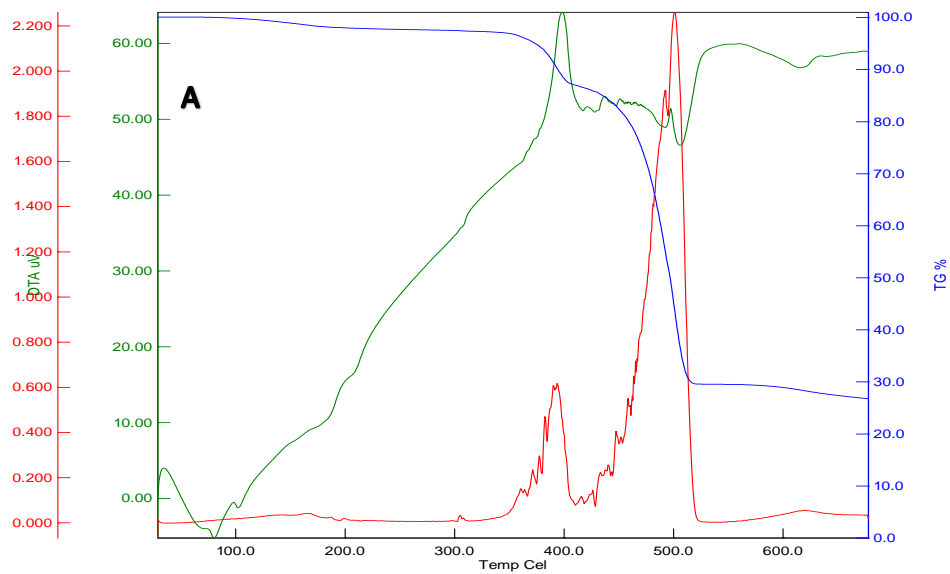


Fig. 7. TGA/DTA Analyses of Original Unused Soap (A) and Recovered Soap (B)

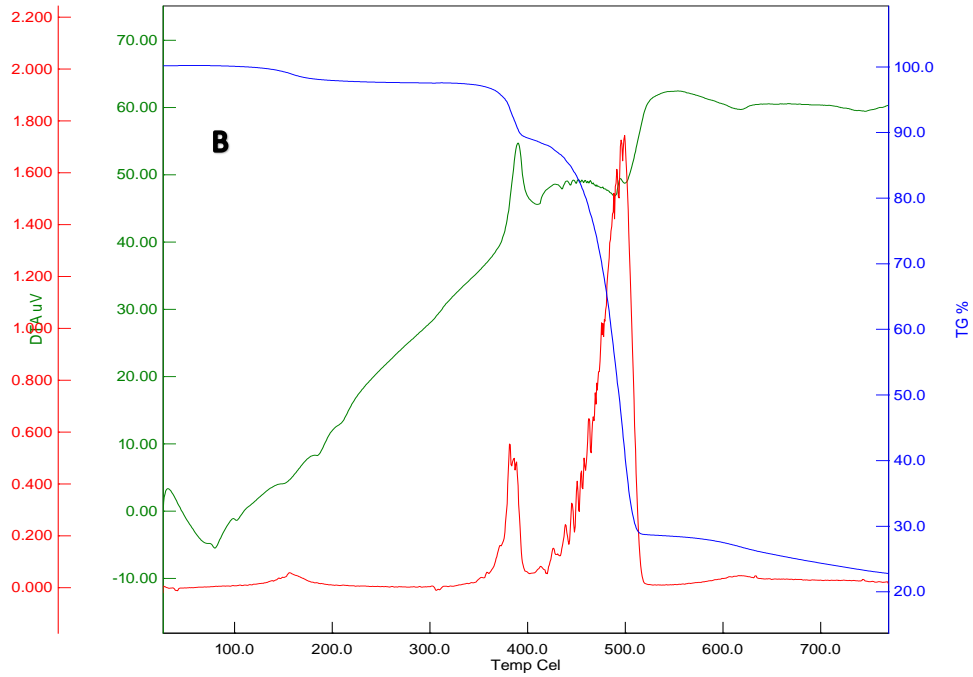


Fig. 7. TGA/DTA Analyses of Original Unused Soap (A) and Recovered Soap (B)

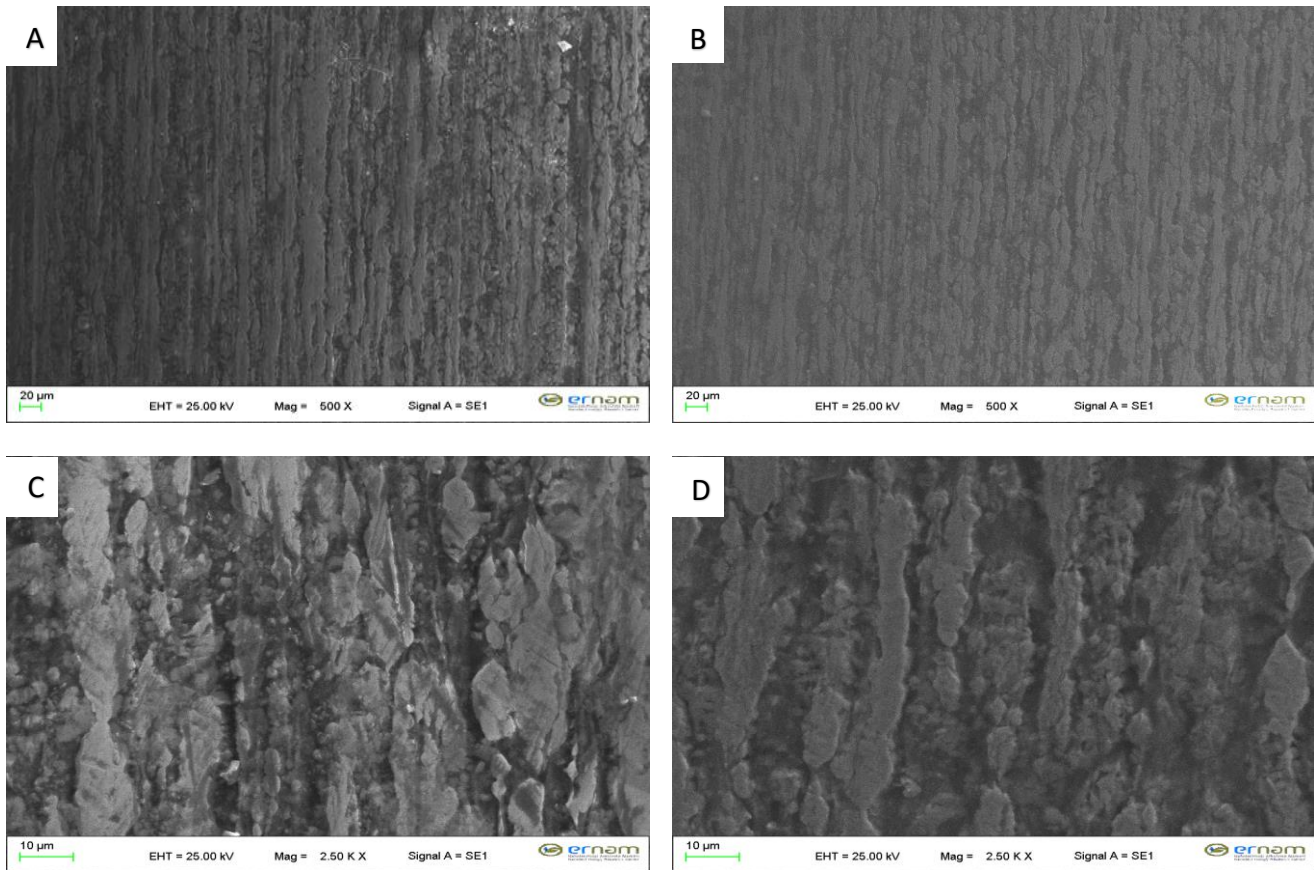


Fig. 8. SEM Images of Drawn Wire by Unused Soap at 500 X Magnification (A), SEM Images of Drawn Wire by Used Soap at 500 X Magnification (B), SEM Images of Drawn Wire by Unused Soap at 2.50 KX Magnification (C), SEM Images of Drawn Wire by Used Soap at 2.50 KX Magnification (D)

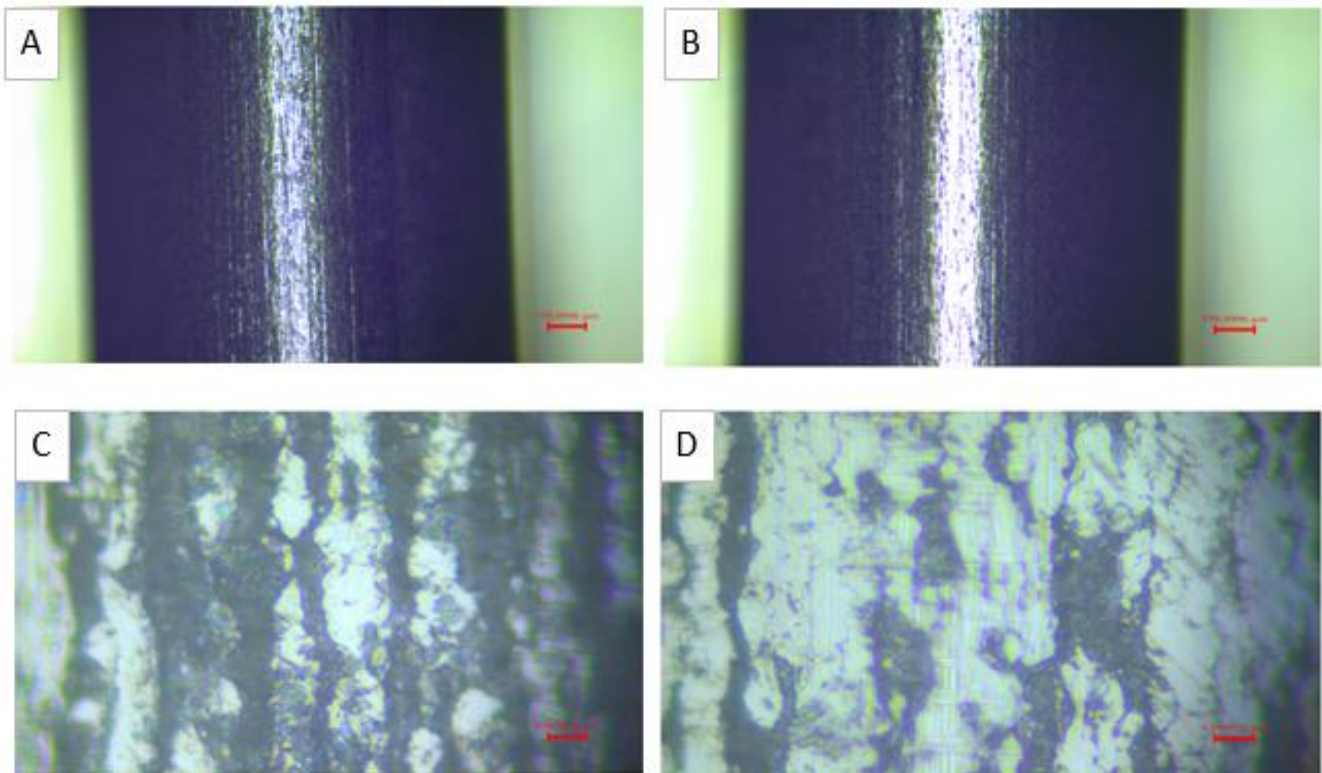


Fig. 9. Light Microscope Images of Drawn Wire by Unused Soap at 5 X Magnification (A), Light Microscope Images of Drawn Wire by Used Soap at 5 X Magnification (B), Light Microscope Images of Drawn Wire by Unused Soap at 100 X Magnification (C), Light Microscope Images of Drawn Wire by Used Soap at 100 X Magnification (D)

Mechanical properties of wire rods that were the original soaps and the recovered soaps were compared by doing in the wire drawing reduction process for the 5 km long wire. The tensile strength and twisting amount of the wires were measured. The tests in the graphics shown in Figure 10 were made according to the EN 10270-1: 2011 standard (EN 10270-1, 2011). According to the samples 1, 2 and 3 shown in the graphs, the bars on the left represent the wires taken from the original soap draw, and the bars on the right represent the test data applied to the wires drawn with soap recovered from the waste. According to the EN 10270-1: 2011 standard; the maximum tensile strength is 1710 MPa, the minimum tensile strength is 1490 MPa (Fig. 10) and the minimum number of twists is 22 (Fig. 11). During the reduction process of the wires, there should not be any deformation on the die surface. Diameter growth in dies should occur at the desired level and time. After wire drawing using the original soap and the recovered soap, there was no difference in the changes in the die diameter.

XRF, FT-IR TGA and DTA analysis were performed to elucidate the chemical structures of the recycled soap and the unused soap, and the results showed that the chemical content of the original soap and the recycled soap were very close to each other and exhibited similar characteristics. When the scanning electron microscope, light microscope and mechanical test analysis of the wires produced in the wire drawing reduction processes with the recycled soap and the original unused soap were examined, it was shown that the wire properties obtained after both production were the same. In other words, all studies showed that the recovered soap exhibited the same lubricating properties as the original soap.

The original soaps have a certain size distribution within themselves, the smaller the grain size, the less the separation rate. The inability to the recover soaps with very small micron size can cause problems in small diameter wire drawing processes. The expressed soap particles can be increased by reducing the mesh intervals of the sieves used in the sieving system and increasing the number of sieves.

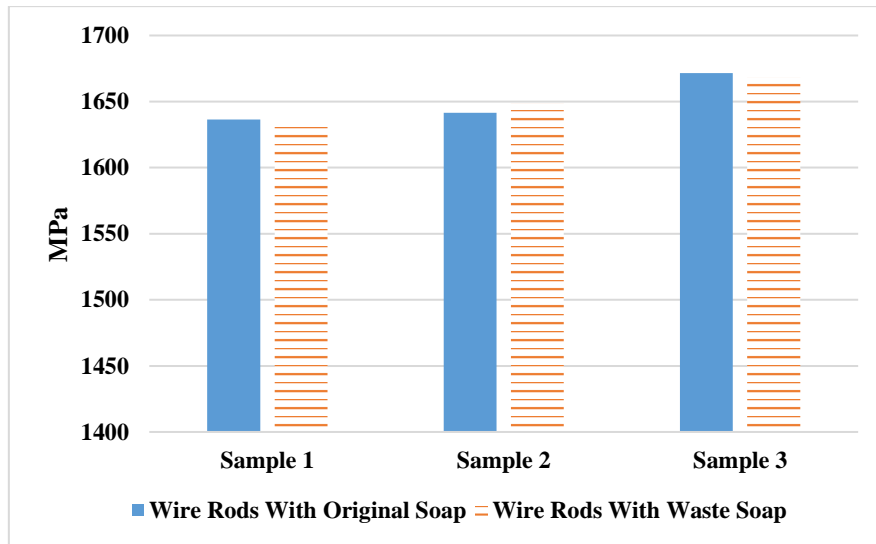


Fig. 10. Wires' s Tensile Strength and Torsion Number

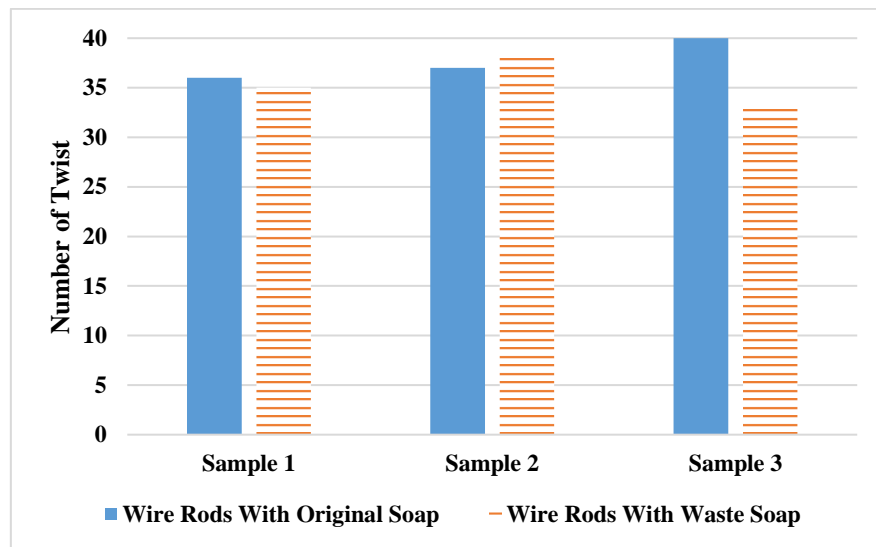


Fig. 11. Wires' s Torsion Number

CONCLUSION

It has been determined that 67% of the waste left after the wire drawing process is lubricating powder soap, while the remaining 33% is composed of other impurities, mostly metal powders. In order to the recycle solid die soaps used as lubricants in industrial wire drawing processes, a simple and cheap method and prototype system based on physical separations including sieving and magnetic separation stages has been developed. It is clear that our rate is better when you compare the values. The characterization techniques performed have proven that there was no change in the chemical properties of the soap in the waste and both physical and chemical properties of the recycled soap were largely similar to the original soap. In this recycling process based on physical separation, there is no chemical process based on chemical consumption, it does not leave secondary waste to the environment, it has low energy consumption and is suitable for automation, which ensures that this process meets many criteria of green recycling processes.

CONFLICT OF INTEREST

The authors do not have financial and personal relationships with other people or organizations that could inappropriately influence their work.

ACKNOWLEDGMENTS

This study has been carried out within Hasçelik Cable Industry and Trade Incorporated Company R & D center. Thanks to Hasçelik Kablo Industry and Trade Incorporated Company and TUBITAK for its contribution to this work. Project number is '3190313'.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS

The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Orhan EREN: He wrote the article. He was involved in laboratory studies, field trials, prototype studies and tests. He provided making of characterization analysis and interpretation. He provided coordination.

Eyyup GERÇEKÇİOĞLU: Within the scope of the project, he supervised the master's thesis, contributed to the interpretation of the tests and analysis and to the writing of the article.

Esra BENLİCE: Contributed to article writing. He was interested in laboratory studies, prototype studies and tests.

Erkan YILMAZ: He participated in laboratory studies, contributed to the interpretation of tests and analysis and to writing articles.

Ali DURAN: He participated in laboratory studies, contributed to the interpretation of tests and analysis and to writing articles.

REFERENCES

- Aristides, G., Martinez, S., Qian, W., Kabayama, L., K., and Prisco, U., (2020). Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing. *Metals*, doi:10.3390/met10010105.
- Brard, D., (1991). Lubrication-Quality and Innevation, *Wire Industry*, 733-734.
- Byon, S.M., Lee, S.J., Lee, D.W., Lee, Y.H., Lee, Y., (2011). Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 21, Supplement 1, March 2011, Pages s104-s110.
- Can, W., Ni Jing, Y., Paul, D. T., Lidan, Y., Xinglin L., (2023). Investigation of mixed hBN/Al₂O₃nanoparticles as additives on grease performance in rolling bearing under limited lubricant supply. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 659, 20 February 2023, 130811.
- Chengliang, H., Haitang, C., Wenlong, Z., Hironori, O., (2023). Enhancing the sensitivity of a tribological testing method to enable development of lubricants for cold forging. *Tribology International*, Volume 179, January 2023, 108156.
- De-Chun, X., Si-Yuan, Z., Hao-Yi, C., Awoke G., Hong-Cheng W., Jing-Long H., Cheng-Yan L., Ai-Jie W., (2020).
- Dove, A., Moritz, J., Smigel, W., (1980). *Steel Wire Handbook*, 372 s, U.S.A.
- Dubois, A., Lazzarotto, L., Dubar, L., Oudin, J., (2001). A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing–extrusion–cold heading sequence. *Wear*. 249, 951-961. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00830-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00830-4)
- Eickemeyer, J., Vogel, H.-R., Reichert, J., Rehm, M., (1996). Metal drawing by means of solid soap films. *Journal of Materials Processing Technology*. 61, 250-253. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02185-X](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02185-X).
- EN 10270-1, (2011). "Steel wire for mechanical springs patented cold drawn unalloyed spring steel wire".
- Gyucheol, J., Giate, H., (2010). Magnetic separator for removing oxidized steel from dry lubricant and recycling machine with the same. Patent No. KR101151382B1.
- Jeimin, R. Joshi, Khodidas, K., Bhanderi, J., Patel, V., (2023). Waste cooking oil as a promising source for bio lubricants-A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, Volume 100, Issue 1, January 2023, 100820.
- Kim, S., H., Gyu-Chul, J., Chi-Wook, L., (2014). Development and Evaluation of Dry Lubricant Recycle Technologies for Wire Drawing Process. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.13 No.2, pp.35~40.

- Mariana, T. D., Rogério, C., Branco, C. L., Benilde, S., (2021). A review on alternative lubricants: Ionic liquids as additives and deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, Volume 333, 1 July 2021, 116004.
- McNulty, M. 2006. Spotlight on Drawing Machines, *Wire and Cable Technology*, 54 – 56.
- Moon, C. S., Kim, N., (2012). Study on dimensional change in wire product during wire-drawing process, *Journal of KSME*. Vol. 36, pp.723-730. DOI: 10.3795/KSME-A.2012.36.7.723.
- Mun, B., Kyung-ho, S., (2011). Dry Drawing Lubricant Recycling Machine For steel Wire. Patent No. KR101380168B1.
- Murakawa, M., Jin, M., Hayashi, M., (2004). Study on semidry/dry wire drawing using DLC coated dies. *Surface and Coatings Technology*. 177, 631-637. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.057>
- Sarma, R. Narayana, Vinu, R., (2022). Current status and future prospects of biolubricants: properties and applications. *Lubricants*, 10 (4) (2022), p. 70, 10.3390/lubricants10040070
- Toru, Y., (2005). Wire drawing dry lubricant recycling machine. Patent No. JP2006289196A.
- Tripp, I., (1998). Health and Safety Concerns for the Wire Drawing Industry, *Wire and Cable Technology*, 55-56.
- Wire-drawing process with graphite lubricant as an industrializable approach to prepare graphite coated stainless-steel anode for bioelectrochemical systems. *Environmental Research*, Volume 191, December 2020, 110093.
- Wright, R.N., (2011). *Wire Technology-Process Engineering and Metallurgy*, doi:10.1016 / B978-0-12-382092 1.00002-6, UK.
- Zhendong, C., (2011). Automatic lubricating powder recovery device. Patent No. CN102172651A.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.12.2022
Kabul Tarihi : 04.03.2023

Received Date : 02.12.2022
Accepted Date : 04.03.2023

COMBINING GREY WOLF OPTIMIZATION AND WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM FOR BENCHMARK TEST FUNCTIONS

KIYASLAMA TEST FONKSİYONLARI İÇİN GRİ KURT OPTİMİZASYONU İLE BALINA OPTİMİZASYON ALGORİTMASININ BİRLEŞTİRİLMESİ

Mustafa Serter UZER¹ (ORCID: 0000-0002-8829-5987)
Onur INAN^{2*} (ORCID: 0000-0003-4573-7025)

¹ Selçuk Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Konya, Türkiye
² Selçuk Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa Serter UZER, msuzer@selcuk.edu.tr

ABSTRACT

Many optimization problems have been successfully addressed using metaheuristic approaches. These approaches are frequently able to choose the best answer fast and effectively. Recently, the use of swarm-based optimization algorithms, a kind of metaheuristic approach, has become more common. In this study, a hybrid swarm-based optimization method called WOAGWO is proposed by combining the Whale Optimization Algorithm (WOA) and Grey Wolf Optimization (GWO). This method aims to realize a more effective hybrid algorithm by using the positive aspects of the two algorithms. 23 benchmark test functions were utilized to assess the WOAGWO. By running the proposed approach 30 times, the mean fitness and standard deviation values were computed. These results were compared to WOA, GWO, Ant Lion Optimization algorithm (ALO), Particle Swarm Optimization (PSO), and Improved ALO (IALO) in the literature. The WOAGWO algorithm, when compared to these algorithms in the literature, produced the optimal results in 5 of 7 unimodal benchmark functions, 4 of 6 multimodal benchmark functions, and 9 of 10 fixed-dimension multimodal benchmark functions. Therefore, the suggested approach generally outperforms the findings in the literature. The proposed WOAGWO seems to be promising and it has a wide range of uses.

Keywords: Benchmark test functions, whale optimization algorithm, grey wolf optimization.

ÖZET

Bir çok optimizasyon problemi, metasezgisel yaklaşımlar kullanılarak başarıyla ele alınmıştır. Bu yaklaşımlar sıklıkla en iyi yanıtı hızlı ve etkili bir şekilde seçebilmektedir. Son zamanlarda, metasezgisel yaklaşımların bir türü olan sürü tabanlı optimizasyon algoritmalarının kullanımı daha yaygın hale gelmiştir. Bu çalışmada, Balina Optimizasyon Algoritması (WOA) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) birleştirilerek WOAGWO adı verilen hibrit sürü tabanlı bir optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, iki algoritmanın olumlu yönlerini kullanarak daha etkin bir hibrit algoritma gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. WOAGWO'yu değerlendirmek için 23 kıyaslama testi işlevi kullanıldı. Önerilen yaklaşım 30 kez çalıştırılarak ortalama uygunluk ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar literatürdeki WOA, GWO, Karınca Aslanı Optimizasyonu algoritması (ALO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Geliştirilmiş ALO (IALO) ile karşılaştırıldı. WOAGWO algoritması, literatürdeki bu algoritmalarla karşılaştırıldığında, 7 unimodal kıyaslama fonksiyonundan 5'inde, 6 multimodal kıyaslama fonksiyonundan 4'ünde ve 10 sabit boyutlu multimodal kıyaslama fonksiyonundan 9'unda en uygun sonuçları vermiştir. Bu nedenle, önerilen yaklaşım genel olarak literatürdeki bulgulardan daha iyi performans göstermektedir. Önerilen WOAGWO ümit verici görünmektedir ve geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Balina optimizasyon algoritması, gri kurt optimizasyonu, kıyaslama test fonksiyonları

INTRODUCTION

Typically, the goal of optimization strategies is to narrow down a list of potential options in the issue search space to the best possible solutions. Optimization has drawn a lot of interest in recent years from a variety of disciplines, including engineering, computer science, business, and energy (Mostafa et al., 2022; Oliva & Elaziz, 2020). Static, dynamic, multi-objective, single-objective, constrained, and unconstrained categories of optimization problems can be used to classify optimization issues (Hussien & Amin, 2022). Some classes of problems are difficult to solve using traditional mathematical programming methodologies because numerous topics in artificial intelligence and machine learning are limited, discrete, continuous, uncontrolled, etc. (Abbassi et al., 2019; Faris et al., 2019; Heidari et al., 2019). Developed metaheuristic algorithms (MA) have been employed for a variety of situations as competing problem solvers because of their flexibility, simplicity in usage, and problem-solving ability. These algorithms have the capacity to quickly and effectively identify the ideal solution by utilizing key information from the search space (Arora et al., 2020). MA can be divided into three groups. These are swarm-based, physics-based, and evolution-based methods (Mirjalili & Lewis, 2016). From the literature, the following are a few examples of swarm-based optimizations: Grey Wolf Optimization (GWO) (Mirjalili et al., 2014), Artificial Bee Colony (ABC) (Karaboga & Basturk, 2007; Karaboga & Basturk, 2008), Butterfly Optimization Algorithm(BOA) (Arora & Anand, 2019), Harris Hawks Optimization (HHO) (Heidari et al., 2019), Honey Badger Algorithm (HBA) (Hashim et al., 2022), Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) (Mirjalili et al., 2018), Selfish Herd Optimizer (SHO) (Fausto et al., 2017), Particle Swarm Optimization (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995), Snake Optimizer (SO) (Hashim & Hussien, 2022), Optimal Foraging Algorithm (OFA) (Zhu & Zhang, 2017), Whale Optimization Algorithm (WOA) (Mirjalili & Lewis, 2016).

The population of interacting agents or swarms that have the capacity to self-organize is modeled by the research field known as swarm intelligence (Karaboga & Basturk, 2007). Some of the examples of swarm intelligence or swarm-based optimization are described in the remainder of this section. An example of swarm intelligence is the way bees cluster around their hives. The ABC technique presented by Karaboga and Basturk is based on the intelligent behavior of a honey bee swarm. In this article, ABC algorithm is used for multivariate optimization and compared with other algorithms (Karaboga & Basturk, 2007). The HHO algorithm is presented by Heidari et al. (Heidari et al., 2019). With the help of collaboration between many hawks to attack from varying angles to confuse their prey, the HHO algorithm is simulated and it is based on this swarm scenario. In response to the escape strategies of their prey, hawks have evolved many hunting techniques. In order to create HHO, these distinct tactics were mathematically modeled. In 2016, Mirjalili and Lewis introduced the WOA (Mirjalili & Lewis, 2016). WOA is based on the strategies used by humpback whales, which produce bubbles and constrict their prey into a bubble spiral. Humpback whales gather their food, which frequently consists of fish communities, with the aid of air bubbles. They then reach the surface of the sea and wrap the target fishes in a more restricted region. The stages of WOA are prey encircling, a bubble-net attack unleashing, and prey searching. To estimate daily reference evapotranspiration using meteorological data, a hybrid technique that combines extreme gradient boosting (XGB) and WOA was developed in (Yan et al., 2021). Two binary WOA algorithm variants are presented to identify the optimal feature subsets in (Mafarja & Mirjalili, 2018). Mirjalili et al. created GWO, an optimization system that simulates the hunting techniques used by grey wolves in the wild (Mirjalili et al., 2014). It is established on group hunting strategies that grey wolves used to hunt in accordance with their social structures. Moreover, many problems of GWO algorithm have been applied and some of them are as follows. For multi-level thresholding segmentation, the discrete multi-objective shuffled gray wolf optimizer (D-MOSG) technique was presented in (Karakoyun et al., 2021). To find a solution to the multi-objective optimization problems, multi-objective shuffled GWO (MOSG) has been proposed in (Karakoyun et al., 2020). An improved form of the Ant Lion Optimization algorithm (IALO) has been proposed in (Toz, 2019). 23 benchmark functions and image clustering problems have been solved with IALO. In cases where optimization algorithms alone are not sufficient, researchers have tried hybridizing the algorithms. In optimization problems, hybrid optimization methods can sometimes give better results than using a single optimization problem. In order to provide solutions for scheduling challenges in cloud jobs, a hybrid method called HGWWO is presented in (Ababneh, 2021). This method is established using GWO and WOA. A novel Hybrid WOA with gathering strategies (HWOAG) has been proposed for solving high-dimensional problems in (Zhang & Wen, 2021).

The main contributions of this article can be summarized as follows:

- In this research, a hybrid optimization technique called WOAGWO was created by combining the WOA and GWO algorithms to achieve improved optimization outcomes.

- 23 benchmark test functions have been used to evaluate this method's performance.
- After running the suggested method 30 times, average fitness and standard deviation values were acquired.
- The WOAGWO algorithm's findings were contrasted with those of other techniques found in literature and the proposed algorithm was found to perform better than previously reported techniques.
- According to the literature has shown that the suggested method is promising and that it may be used in a variety of applications.

The remainder of the article has covered the WOA and GWO algorithms in the 'Methods' section. The proposed hybrid WOAGWO algorithm is detailed in the section called 'The Proposed Method', while in the next section, the results of the proposed algorithm, discussion, and their comparison with the literature are presented. The article concludes with a summary of the findings of the WOAGWO algorithm.

METHODS

Whale Optimization Algorithm (WOA)

Due to their ability to generate answers for issues in a variety of sectors, swarm-based optimization algorithms have gained popularity recently. Mirjalili and Lewis created the WOA algorithm in 2016, drawing inspiration from how humpback whales compress their prey into the bubble spiral they create while foraging (Mirjalili & Lewis, 2016).

The hunting strategy of humpback whales involves creating air bubbles to corral groups of small fish, then narrowing their focus to target fish. The three stages of WOA include enclosing prey, using a bubble-net attack, and looking for prey.

Humpback whales locate their target during the encircling prey stage, at which point they wrap their target. In this method, the position of the prey is the ideal outcome. The best solution value found to get to this optimum value is updated for other solutions. This behavior is mathematically predicted by Equations (1) and (2).

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \left| \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \right| \quad (2)$$

where X and X^* denote the position vector, and the best solution position vector, respectively. Also, t refers to the iteration currently in progress.

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (4)$$

With the help of r , a random vector between 0 and 1, and a , a linearly decreasing value from 2 to 0, the vectors A and C , which are coefficient vectors in Equations (3) and (4), are created. The following formula can be used to derive the a in Equation (3):

$$a = 2 - t \frac{2}{MaxIter} \quad (5)$$

The number of iterations is given in Equation (5) as t , and the maximum number is denoted as $MaxIter$. Before creating the spiral formula between the current solution and the best leading solution, the distance between the solutions of X and X^* is used to compute the path that has a spiral shape. In this case, X is the answer, and X^* is the leading answer. By lowering a in Equation (3), the diminishing encircling movement occurs. Equation (6) describes the spiral movement.

$$\vec{X}(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (6)$$

In Equation (6), b denotes shape of the spiral, \vec{D}' is the distance between a whale X and a prey, l is a random number between -1 and 1 (Mafarja & Mirjalili, 2018).

Equation (7) represents the situation in which whales choose one of these two-shaped paths at random.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \text{Use Eq.2} & \text{if } (p < 0.5) \\ \text{Use Eq.6} & \text{if } (p \geq 0.5) \end{cases} \quad (7)$$

During the search for prey stage, the whale normally searches for prey at random. As a result, vector A is used, which generates random values. Equations (8) and (9) express this mechanism (Mafarja & Mirjalili, 2018).

```

Create initial whale' population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Compute fitness values for each solution
 $X^*$  = the best solution
while ( $t < \text{Max\_Iteration}$ )
  for each solution
    Update  $a, A, C, l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Update the location of the current solution by computing Eq. (2).
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Choose a solution ( $x_{rand}$ ) at random.
        Calculate Eq. (9)
      end if2
    else if1 ( $p > 0.5$ )
      Update the current search's location using the Eq. (6)
    end if1
  end for
  Verify and correct any solutions that extend beyond the search space.
  Compute each solution's fitness and Update  $X^*$  if a better solution emerges.
   $t = t + 1$ 
end while
return  $X^*$ 

```

Figure 1. Pseudocode of the WOA Algorithm

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot X_{rand} - \vec{X} \right| \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = X_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (9)$$

In the case of $|A| < 1$, Equation (2) is used, and in the case of $|A| \geq 1$, Equation (9) is used. The WOA algorithm pseudocode is shown in Figure 1 (Mirjalili & Lewis, 2016).

Grey Wolf Algorithm (GWO)

The GWO method was formulated by Mirjalili et al. and is inspired by the hunting strategies employed by grey wolves in their social hierarchy (Mirjalili et al., 2014). The grey wolves are arranged in four groups, as illustrated in Figure 2: alpha (α), beta (β), delta (δ) and omega (ω). The alpha group, which consists of a male and a female wolf, is responsible for making important decisions such as hunting. The beta wolves assist the alpha wolves in implementing their decisions. The delta wolves occupy the third position in the pack hierarchy and are subservient

to the alpha and beta wolves. The omega wolves are last in line to be allowed to eat, as they are at the bottom of the wolf hierarchy.

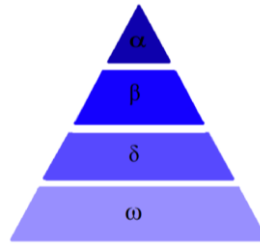


Figure 2. Hierarchy of Grey Wolves

The GWO algorithm has four stages: surrounding the prey, hunting, assaulting the prey (exploitation), and seeking prey (exploration). The grey wolves surrounding the prey are expressed by Equations (10) and (11).

$$\vec{H}(t+1) = \vec{H}l(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (10)$$

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{H}l(t) - \vec{H}(t) \right| \quad (11)$$

where Equations (12) and (13) produce A and C coefficient vectors. The location of the target at the i iteration is denoted by $\vec{H}l(t)$, whereas the position of a grey wolf is indicated by $\vec{H}(t+1)$.

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 + a \quad (12)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (13)$$

The value of a decreases in a linear fashion from 2 to 0. The \vec{r}_1 and \vec{r}_2 variables are made up of random values between [0, 1]. By altering the A and C vectors, the best agent's closest new places may be controlled.

Once the encircling stage is complete, the search for the best solution commences during the hunting phase. During this stage, alpha leads the hunt, with beta and delta joining in. As a result, the three best positions are used to regenerate grey wolves' position by Equations (14), (15), and (16).

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{H}_\alpha - \vec{H} \right|, \vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{H}_\beta - \vec{H} \right|, \vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{H}_\delta - \vec{H} \right| \quad (14)$$

$$\vec{H}_1 = \vec{H}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{H}_2 = \vec{H}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{H}_3 = \vec{H}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (15)$$

$$\vec{H}(t+1) = \frac{\vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3}{3} \quad (16)$$

To summarize, the GWO algorithm generates a haphazard population. The position of probable prey is predicted by delta, alpha, and beta wolves. The distance of the possible solution is then updated. Then, from 2 to 0, a is lowered to emphasize exploration and exploitation. If $A < I$, they proceed to the prey. If $A > I$, they stop assaulting the prey. GWO is terminated when it has achieved a satisfying conclusion. GWO is depicted in Figure 3 as a pseudocode. (Mirjalili et al., 2014).

```

Create grey wolf population  $H_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Create  $a, A, C$ 
Compute each search agent's fitness.
 $H_\alpha$  = The most effective search agent
 $H_\beta$  = The second most effective search agent
 $H_\delta$  = The third most effective search agent
    while ( $t < Max\_iteration$ )
        for every search agent
            Upgrade current search agent position using Equation (16)
        end for
        Upgrade  $a, A, C$ 
        Compute all search agent's fitness.
        Upgrade  $H_\alpha, H_\beta, H_\delta$ 
         $t=t+1$ 
    end while
return  $H_\alpha$ 
    
```

Figure 3. The GWO Algorithm's Pseudocode

THE PROPOSED METHOD

In addressing comparison functions or engineering challenges, WOA and GWO algorithms may not be adequate to get the desired value. With the method we created, a hybrid algorithm dubbed WOAGWO is suggested, which highlights the best qualities of WOA and GWO. Figure 4 depicts the WOAGWO algorithm's pseudocode.

```

Create random initialize population  $X_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ )
 $r=0, Best\_score=10E+10$ ;
while ( $r < T$ ) do
    [ $Leader\_score, Leader\_pos, wPositions$ ]=WOA( $Positions, fobj, r$ );
    if  $Leader\_score < Best\_score$ 
         $Best\_score = Leader\_score$ ;
         $Best\_pos = Leader\_pos$ ;
         $Positions=wPositions$ ;
    else
         $r=r+1$ ;
        [ $Alpha\_score, Alpha\_pos, gPositions$ ]=GWO( $Positions, fobj, r$ );
        if  $Alpha\_score < Best\_score$ 
             $Best\_score = Alpha\_score$ ;
             $Best\_pos = Alpha\_pos$ ;
             $Positions=gPositions$ ;
        end if
    end if
     $r=r+1$ 
end while
Return  $Best\_score, Best\_pos$ 
    
```

Figure 4. Pseudocode of the Proposed WOAGWO

After the initial population and initial parameters are established, the fitness function of WOA is first calculated in the proposed WOAGWO technique. If WOA's leader score value is better than the best score value, the WOA leader score value is assigned as the best score value. In addition, the WOA leader position value is assigned as the best position value and the population values of WOA are assigned as the best population value. If WOA's leader score value is worse than the best score value, the GWO Alpha score value is assigned as the best score value. In addition, the GWO Alpha position value is assigned as the best position value and the population values of GWO are assigned as the best population value. This procedure is repeated until the desired maximum iteration is reached.

RESULTS AND DISCUSSION

First, to measure the success of the proposed WOAGWO algorithm, the results of 23 benchmark test functions were found. Of these benchmark test functions, those between F1 and F7 are called single-mode, those between F8-F13 are called multimodal, and those between F14-F23 are called fixed-size multimodal functions. The results obtained from these functions were then used to compare with different methods in the literature. In order to make this literature comparison more reliable, the same parameters were used as much as possible and it was tried to reach the articles containing the same parameters. In the literature, the number of independent runs, the number of population, and the maximum number of iterations for WOA, GWO, and PSO algorithms have been used as 30, 30, and 500, respectively (Mirjalili & Lewis, 2016; Mirjalili et al., 2014). The number of independent runs, the number of population, and the maximum number of iterations for the ALO and IALO algorithms have been utilized in the literature as 30, 40, and 500, respectively (Toz, 2019). To compare with the literature, independent runs, the number of population and the maximum number of iterations for the proposed WOAGWO algorithm have been chosen as 30, 30, and 500, respectively. The mean and standard deviation values were calculated using these 30 times run results. When the proposed WOAGWO and GWO, WOA, ALO, PSO, and IALO algorithms were compared, in general, WOAGWO was discovered that better results were attained. Table 1 shows the unimodal F1-F7 functions (Mirjalili & Lewis, 2016). The function's limitations in the search space are represented by *Range*, while the optimum value is represented by F_{min} . The function dimension is denoted by *Dim*. The F1-F7 functions can measure the performance and capabilities of the optimization method during use.

Table 1 Unimodal Functions

Func. Num	Function	F_{min}	Range		Dim
			Lb	Ub	
1	$\sum_{i=1}^n d_i^2$	0	-100	100	30
2	$\sum_{i=1}^n d_i + \prod_{i=1}^n d_i $	0	-10	10	30
3	$\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i d_j)^2$	0	-100	100	30
4	$\max_i \{ d_i , 1 \leq i \leq n\}$	0	-100	100	30
5	$\sum_{i=1}^{n-1} [100(d_{i+1} - d_i^2)^2 + (d_i - 1)^2]$	0	-30	30	30
6	$\sum_{i=1}^n (d_i + 0.5)^2$	0	-100	100	30
7	$\sum_{i=1}^n id_i^4 + random[0,1)$	0	-1.28	1.28	30

Table 2. Results of F1-F7 Functions

Functions	1	2	3	4	5	6	7	Winner/Total
GWO (Mirjalili et al., 2014)	Ave. 6.5900E-28	7.1800E-17	3.2900E-06	5.6100E-07	2.6813E+01	8.1658E-01	2.2130E-03	1/7
	Std. 6.3400E-05	2.9014E-02	7.9150E+01	1.3151E+00	6.9905E+01	1.2600E-04	1.0029E-01	
WOA (Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. 1.4100E-30	1.0600E-21	5.3900E-07	7.2581E-02	2.7866E+01	3.1163E+00	1.4250E-03	0/7
	Std. 4.9100E-30	2.3900E-21	2.9300E-06	3.9747E-01	7.6363E-01	5.3243E-01	1.1490E-03	
ALO (Toz, 2019)	Ave. 4.3800E-09	5.5354E-01	6.5900E-04	8.5600E-04	2.7842E+01	4.6200E-09	1.5767E-02	0/7
	Std. 1.8100E-09	1.3245E+00	8.3500E-04	1.1980E-03	6.2201E+01	2.2200E-09	9.8230E-03	
PSO (Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. 1.3600E-04	4.2144E-02	7.0126E+01	1.0865E+00	9.6718E+01	1.0200E-04	1.2285E-01	0/7
	Std. 2.0200E-04	4.5421E-02	2.2119E+01	3.1704E-01	6.0116E+01	8.2800E-05	4.4957E-02	
IALO (Toz, 2019)	Ave. 3.6800E-11	3.4600E-04	5.7663E-01	2.7898E-02	3.4984E+02	4.5400E-11	1.3740E-02	1/7
	Std. 1.1400E-10	7.7400E-04	6.2807E-01	9.2275E-02	7.4489E+02	1.7600E-10	9.3790E-03	
WOAGWO	Ave. 6.9361E-63	4.3941E-43	1.3401E-07	2.2606E-03	2.6575E+01	3.4826E-01	1.2430E-03	5/7
	Std. 2.6601E-62	2.3711E-42	2.6048E-07	8.3332E-03	8.4498E-01	3.1568E-01	4.6156E-04	

Table 2 displays the results of the F1-F7 functions. WOAGWO algorithm obtained the optimal result for 5 of 7 unimodal comparison functions. In other words, it has been seen that it is better than other comparison algorithms except for F4 and F6 results. The GWO algorithm for F4 and the IALO algorithm for F6 achieved the best results. In light of the results obtained, it is seen that the proposed WOAGWO algorithm provides an improvement in 7 functions according to the WOA algorithm, while an improvement is achieved in 6 functions according to the GWO algorithm. Figure 5 shows the best representations of F1-F7 functions in search space and objective space. The F5 and F7 functions reach the optimal solution before the maximum number of iterations is reached. Conversely, other functions converge the target value when they are very close to the maximum iteration value.

In order to arrive at the global optimum, an optimization algorithm seeks to avoid all local optima. This operation can be tested using the F8-F13 functions. In essence, these benchmark functions can assess the performance of an optimization algorithm in terms of its ability to evade local optima. Table 3 displays F8-F13 functions (Mirjalili & Lewis, 2016).

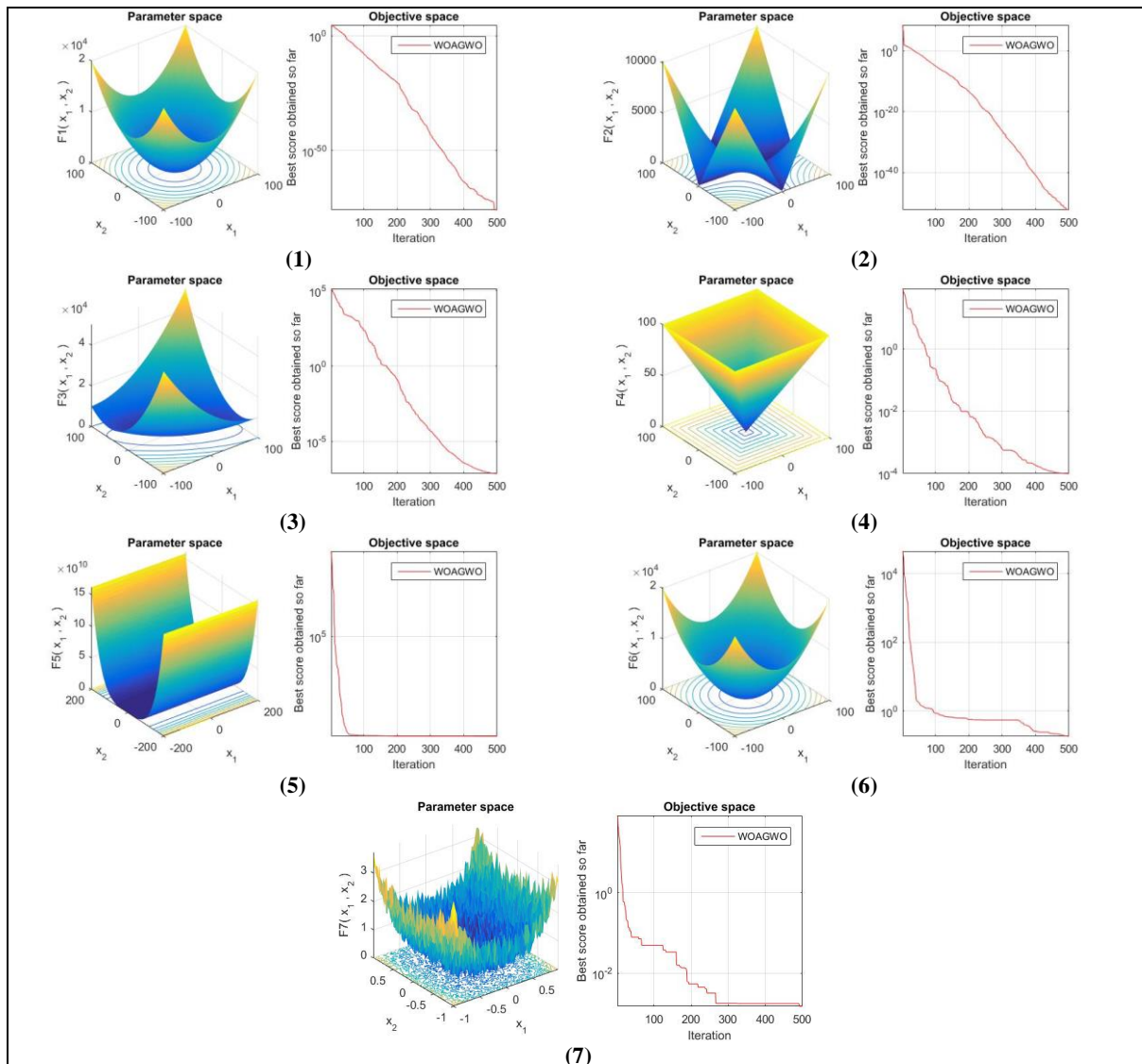


Figure 5. The Best Representations of F1-F7 Functions in Search Space and Objective Space

Table 4 displays the F8-F13 functions' results (Mirjalili & Lewis, 2016). The WOAGWO algorithm obtained the optimal result for 4 of 6 multimodal comparison functions. In other words, it has been seen that it is better than different comparison algorithms except for F8 and F13 results. For F13 and F8, the ALO algorithm achieved the best results. It is seen that the proposed WOAGWO algorithm gives the same or better optimum results in 5 of 6 functions according to the WOA algorithm, and the same or better optimum results in 5 of 6 functions according to the GWO algorithm.

Figure 6 shows the best representations of F8-F13 functions in search space and objective space. The F8 and F10 functions converge the target value before reaching the maximum iteration value. Conversely, F9, F11, F12, and F13 functions converge the target value when they are very close to the maximum iteration value.

Table 3 Multimodal Functions

Func. Num	Function	F_{min}	Range Lb	Ub	Dim
8	$\sum_{i=1}^n -d_i \sin(\sqrt{ d_i })$	-418.9829x5	-500	500	30
9	$\sum_{i=1}^n [d_i^2 - 10 \cos(2\pi d_i + 10)]$	0	-5.12	5.12	30
10	$-20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi d_i)) + 20 + e$	0	-32	32	30
11	$\frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n d_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(\frac{d_i}{\sqrt{i}}) + 1$	0	-600	600	30
12	$\frac{\pi}{n} \{ 10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \}$ $+ \sum_{i=1}^n u(d_i, 10, 100, 4)$ $y_i = 1 + \frac{d_i + 1}{4} \quad u(d_i, a, k, m) = \begin{cases} k(d_i - a)^m & d_i > a \\ 0 & -a < d_i < a \\ k(-d_i - a)^m & d_i < -a \end{cases}$	0	-50	50	30
13	$0.1 \{ \sin^2(3\pi d_1) + \sum_{i=1}^n (d_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi d_i + 1)]$ $+ (d_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi d_n)] \} + \sum_{i=1}^n u(d_i, 5, 100, 4)$	0	-50	50	30

Table 4. Results of F8-F13 Functions

Functions	8	9	10	11	12	13	Winner/Total
GWO (Mirjalili et al., 2014)	Ave. -6.1231E+03	3.1052E-01	1.0600E-13	4.4850E-03	5.3438E-02	6.5446E-01	0/6
	Std. -4.0874E+03	4.7356E+01	7.7835E-02	6.6590E-03	2.0734E-02	4.4740E-03	
WOA (Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. -5.0808E+03	0.0000E+00	7.4043E+00	2.8900E-04	3.3968E-01	1.8890E+00	1/6
	Std. 6.9580E+02	0.0000E+00	9.8976E+00	1.5860E-03	2.1486E-01	2.6609E-01	
ALO (Toz, 2019)	Ave. -2.4391E+03	1.9402E+01	2.9240E-01	2.2125E-01	1.4850E+00	7.0100E-04	2/6
	Std. 4.4985E+02	1.1247E+01	6.1341E-01	1.0754E-01	1.7889E+00	3.8380E-03	
PSO (Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. -4.8413E+03	4.6704E+01	2.7602E-01	9.2150E-03	6.9170E-03	6.6750E-03	0/6
	Std. 1.1528E+03	1.1629E+01	5.0901E-01	7.7240E-03	2.6301E-02	8.9070E-03	
IALO (Toz, 2019)	Ave. -2.8191E+03	1.4725E+01	7.8411E-01	2.0489E-01	1.1932E-01	2.1990E-03	0/6
	Std. 3.1346E+02	5.0693E+00	1.0061E+00	1.0017E-01	2.3377E-01	4.4720E-03	
WOAGWO	Ave. -8.1152E+03	0.0000E+00	8.8818E-16	0.0000E+00	4.4121E-03	5.6975E-01	4/6
	Std. 4.7598E+02	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	3.2210E-03	2.3965 E-01	

Fixed-dimension multimodal functions from F14 to F23 are depicted in Table 5 (Mirjalili & Lewis, 2016). These functions use to evaluate how well exploitation and exploration of the search process are balanced in optimization algorithms.

The results obtained from the first 5 and the last 5 of the F14-F23 functions are given in Table 6 and Table 7, respectively. The WOAGWO algorithm achieved the optimal result in 9 of 10 fixed-dimension multimodal comparison functions. It has been seen that the proposed WOAGWO algorithm is better than other comparison algorithms except for the F17 result only. The WOA algorithm for F17 achieved the best results. It is seen that the proposed WOAGWO algorithm gives the same or better optimum results in 9 of 10 functions according to the WOA algorithm, and the same or better optimum results in 10 of 10 functions according to the GWO algorithm. In Figure 7, the best representations of F14-F23 functions in search space and objective space are given. Except for F15, other functions in this group converge to the target values before reaching the maximum iteration value.

Comparing the WOAGWO to WOA, GWO, ALO, PSO, and IALO algorithms in the literature, we found that WOAGWO performed optimally in 5 of 7 unimodal benchmark functions, 4 of 6 multimodal benchmark functions, and 9 of 10 fixed-dimension multimodal benchmark functions. In total, 18 of 23 benchmark functions have been found the results closest to the target value. The winner/total ratios in Tables 2, 4, and 7 are given for better comparison. These ratios are obtained by increasing the winner value by 1 when the benchmark function results are higher or the same compared to other algorithms. According to all results of the proposed approach, it generally performs better than the findings in the literature.

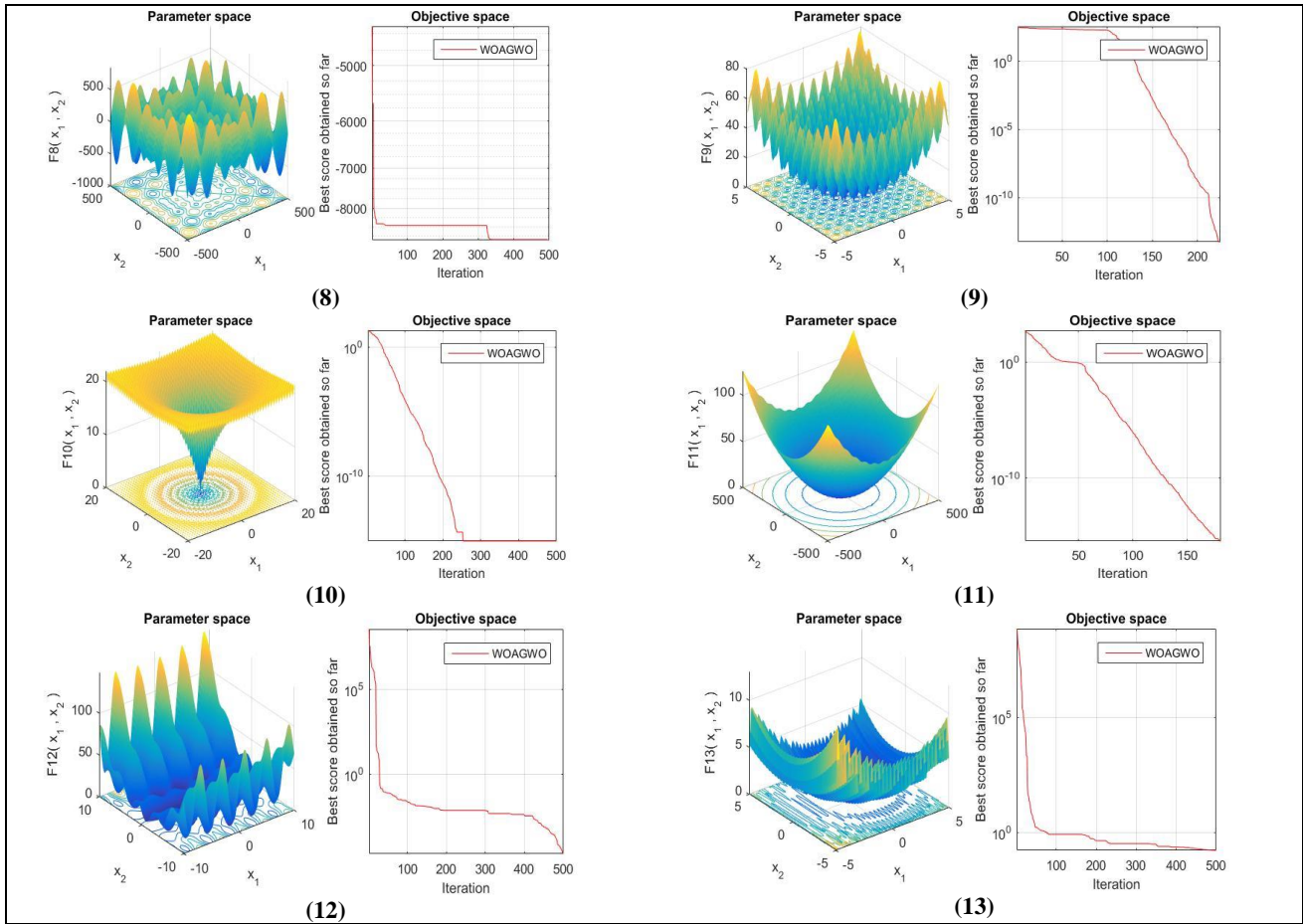


Figure 6. The Best Representations of F8-F13 Functions in Search Space and Objective Space

Table 5. Fixed-Dimension Multimodal Functions

Func. Num	Function	F_{min}	Range Lb	Ub	Dim
14	$(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (d_i - a_{ij})^6})^{-1}$	1	-65	65	2
15	$\sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{d_1(b_i^2 + b_i d_2)}{b_i^2 + b_i d_3 + d_4} \right]^2$	0.00030	-5	5	4
16	$4d_1^2 - 2.1d_1^4 + \frac{1}{3}d_1^6 + d_1d_2 - 4d_2^2 + 4d_2^4$	-1.0316	-5	5	2
17	$(d_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}d_1^2 + \frac{5}{\pi}d_1 - 6)^2 + 10(1 - \frac{1}{8\pi})\cos d_1 + 10$	0.398	-5	5	2
18	$\left[1 + (d_1 + d_2 + 1)^2(19 - 14d_1 + 3d_1^2 - 14d_2 + 6d_1d_2 + 3d_2^2) \right] \times$ $\left[30 + (2d_1 - 3d_2)^2 \times (18 - 32d_1 + 12d_1^2 + 48d_2 - 36d_1d_2 + 27d_2^2) \right]$	3	-2	2	2
19	$-\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^3 a_{ij}(d_j - p_{ij})^2)$	-3.86	1	3	3
20	$-\sum_{i=1}^4 c_i \exp(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(d_j - p_{ij})^2)$	-3.32	0	1	6
21	$-\sum_{i=1}^5 [(D - a_i)(D - a_i)^T + c_i]^{-1}$	-10.1532	0	10	4
22	$-\sum_{i=1}^7 [(D - a_i)(D - a_i)^T + c_i]^{-1}$	-10.4028	0	10	4
23	$-\sum_{i=1}^{10} [(D - a_i)(D - a_i)^T + c_i]^{-1}$	-10.5363	0	10	4

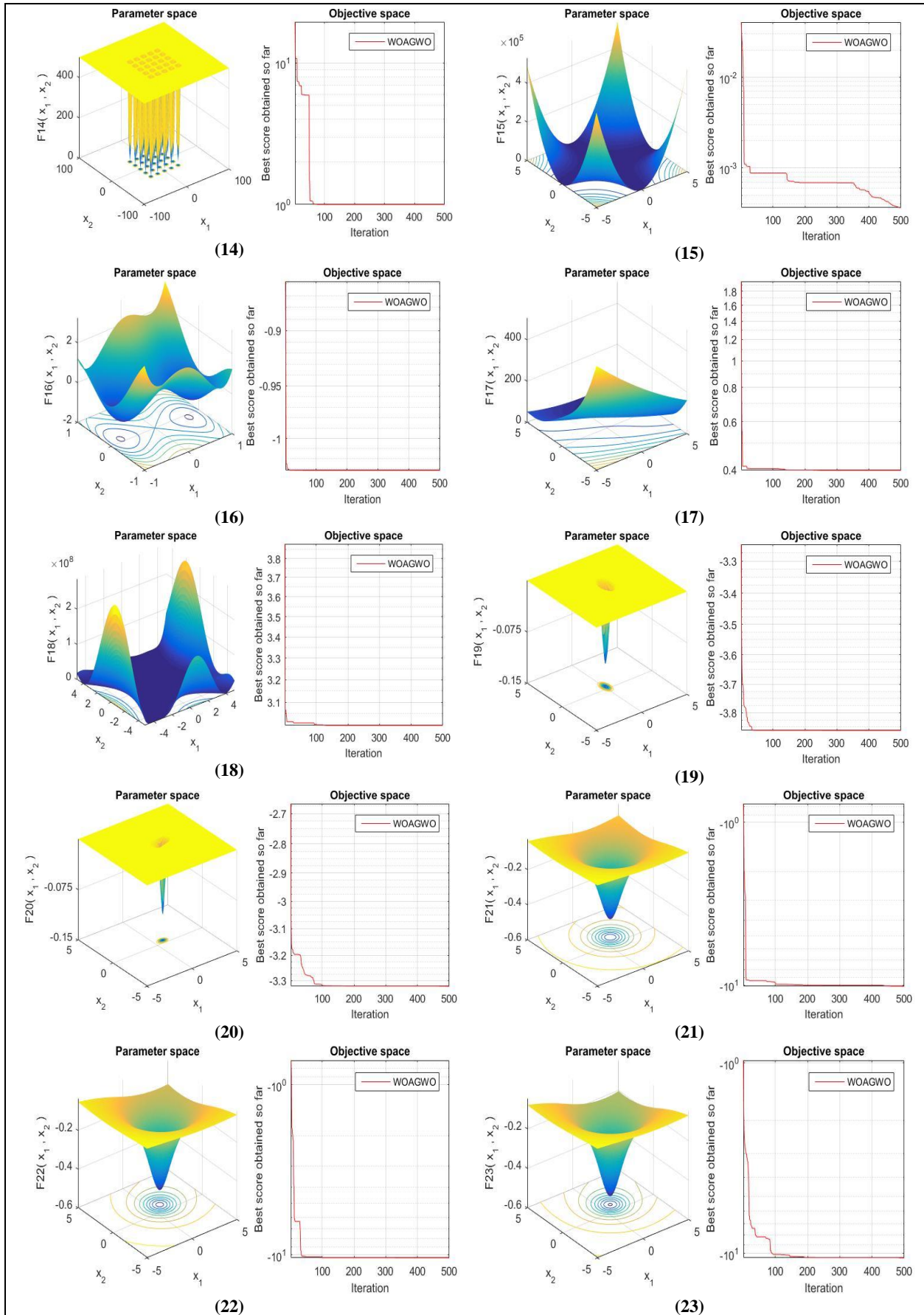


Figure 7. The Best Representations of F14-F23 Functions in Search Space and Objective Space

Table 6. Results of the First 5 of the F14-F23 Functions

Functions	14	15	16	17	18
GWO(Mirjalili et al., 2014)	Ave. 4.0425E+00	3.3700E-04	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
	Std. 4.2528E+00	6.2500E-04	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
WOA(Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. 2.1120E+00	5.7200E-04	-1.0316E+00	3.9791E-01	3.0000E+00
	Std. 2.4986E+00	3.2400E-04	4.2000E-07	2.7000E-05	4.2200E-15
ALO (Toz, 2019)	Ave. 2.7076E+00	2.8430E-03	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
	Std. 2.3599E+00	5.9450E-03	9.8600E-14	5.5900E-14	3.3100E-13
PSO(Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. 3.6272E+00	5.7700E-04	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
	Std. 2.5608E+00	2.2200E-04	6.2500E-16	0.0000E+00	1.3300E-15
IALO (Toz, 2019)	Ave. 1.2295E+00	2.1910E-03	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
	Std. 6.2052E-01	4.9450E-03	5.7600E-16	0.0000E+00	4.9300E-15
WOAGWO	Ave. 1.1965E+00	3.1143E-04	-1.0316E+00	3.9789E-01	3.0000E+00
	Std. 5.4668E-01	7.7603E-06	4.8114E-07	1.6085E-06	9.3406E-06

Table 7. Results of the Last 5 of the F14-F23 Functions

Functions	19	20	21	22	23	Winner/Total
GWO(Mirjalili et al., 2014)	Ave. -3.8626E+00	-3.2865E+00	-1.0151E+01	-1.0402E+01	-1.0534E+01	3/10
	Std. -3.8628E+00	-3.2506E+00	-9.1402E+00	-8.5844E+00	-8.5590E+00	
WOA(Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. -3.8562E+00	-2.9811E+00	-7.0492E+00	-8.1818E+00	-9.3424E+00	2/10
	Std. 2.7060E-03	3.7665E-01	3.6296E+00	3.8292E+00	2.4147E+00	
ALO (Toz, 2019)	Ave. -3.8628E+00	-3.2624E+00	-6.3766E+00	-7.1015E+00	-8.2471E+00	2/10
	Std. 2.3000E-13	6.0657E-02	3.2796E+00	3.4428E+00	3.3601E+00	
PSO(Mirjalili & Lewis, 2016)	Ave. -3.8628E+00	-3.2663E+00	-6.8651E+00	-8.4565E+00	-9.9529E+00	0/10
	Std. 2.5800E-15	6.0516E-02	3.0196E+00	3.0871E+00	1.7828E+00	
IALO (Toz, 2019)	Ave. -3.8628E+00	-3.2775E+00	-7.2848E+00	-8.3333E+00	-8.2543E+00	2/10
	Std. 2.8900E-12	5.9564E-02	2.7947E+00	3.2587E+00	3.3636E+00	
WOAGWO	Ave. -3.8619E+00	-3.2978E+00	-1.0151E+01	-1.04022E+01	-1.05351E+01	9/10
	Std. 2.3817E-03	4.8753E-02	4.9824E-03	5.4572E-04	2.5352E-03	

CONCLUSION

A very successful and effective hybrid algorithm consisting of the combination of WOA and GWO, which are swarm-based optimizations, is presented. This hybrid algorithm is called WOAGWO. Using 23 benchmark functions, the suggested algorithm's effectiveness was evaluated. These test functions consist of three groups that measure the algorithm's capacity, the algorithm's power to avoid local optimum, and the algorithm's balance between exploitation and exploration. The results obtained from these three test groups show the efficiency of the proposed algorithm. In order to obtain more reliable results, the proposed method was run 30 times, and then calculate the mean fitness value and standard deviation value. Moreover, the best graphs of both search space and objective space obtained as a result of running these 30 times are presented.

The proposed WOAGWO's mean value was compared to that of the GWO, WOA, ALO, PSO, and IALO algorithms used in the literature. When the proposed algorithm and the literature were compared, it was discovered that WOAGWO produced the best results in 9 of 10 fixed-dimension multimodal benchmark functions, 4 of 6 multimodal benchmark functions, and 5 of 7 unimodal benchmark functions. Consequently, the suggested approach generally performs better than the findings in the literature. Therefore, we plan to use it in engineering applications in the future.

REFERENCES

- Ababneh, J. (2021). A Hybrid Approach Based on Grey Wolf and Whale Optimization Algorithms for Solving Cloud Task Scheduling Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- Abbassi, R., Abbassi, A., Heidari, A. A., & Mirjalili, S. (2019). An efficient salp swarm-inspired algorithm for parameters identification of photovoltaic cell models. *Energy Conversion and Management*, 179, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.069>

Arora, S., & Anand, P. (2019). Binary butterfly optimization approaches for feature selection. *Expert Systems with Applications*, 116, 147-160.

Arora, S., Sharma, M., & Anand, P. (2020). A Novel Chaotic Interior Search Algorithm for Global Optimization and Feature Selection. *Applied Artificial Intelligence*, 34(4), 292-328. <https://doi.org/10.1080/08839514.2020.1712788>

Faris, H., Al-Zoubi, A. M., Heidari, A. A., Aljarah, I., Mafarja, M., Hassonah, M. A., & Fujita, H. (2019). An intelligent system for spam detection and identification of the most relevant features based on evolutionary Random Weight Networks. *Information Fusion*, 48, 67-83. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.08.002>

Fausto, F., Cuevas, E., Valdivia, A., & Gonzalez, A. (2017). A global optimization algorithm inspired in the behavior of selfish herds. *Biosystems*, 160, 39-55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2017.07.010>

Hashim, F. A., Houssein, E. H., Hussain, K., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2022). Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 192, 84-110. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.08.013>

Hashim, F. A., & Hussien, A. G. (2022). Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 242, 108320.

Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. L. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems-the International Journal of Escience*, 97, 849-872.

Hussien, A. G., & Amin, M. (2022). A self-adaptive Harris Hawks optimization algorithm with opposition-based learning and chaotic local search strategy for global optimization and feature selection. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 13(2), 309-336. <https://doi.org/10.1007/s13042-021-01326-4>

Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>

Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.

Karakoyun, M., Gulcu, S., & Kodaz, H. (2021). D-MOSG: Discrete multi-objective shuffled gray wolf optimizer for multi-level image thresholding. *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech*, 24(6), 1455-1466. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.03.011>

Karakoyun, M., Ozkis, A., & Kodaz, H. (2020). A new algorithm based on gray wolf optimizer and shuffled frog leaping algorithm to solve the multi-objective optimization problems. *Applied Soft Computing*, 96, Article 106560. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106560>

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks,

Mafarja, M., & Mirjalili, S. (2018). Whale optimization approaches for wrapper feature selection. *Applied Soft Computing*, 62, 441-453.

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.

Mirjalili, S. Z., Mirjalili, S., Saremi, S., Faris, H., & Aljarah, I. (2018). Grasshopper optimization algorithm for multi-objective optimization problems. *Applied Intelligence*, 48(4), 805-820. <https://doi.org/10.1007/s10489-017-1019-8>

Mostafa, R. R., El-Attar, N. E., Sabbeh, S. F., Vidyarthi, A., & Hashim, F. A. (2022). ST-AL: a hybridized search based metaheuristic computational algorithm towards optimization of high dimensional industrial datasets. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07115-7>

Oliva, D., & Elaziz, M. A. (2020). An improved brainstorm optimization using chaotic opposite-based learning with disruption operator for global optimization and feature selection. *Soft Computing*, 24(18), 14051-14072. <https://doi.org/10.1007/s00500-020-04781-3>

Toz, M. (2019). An improved form of the ant lion optimization algorithm for image clustering problems. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(2), 1445-1460.

Yan, S. C., Wu, L. F., Fan, J. L., Zhang, F. C., Zou, Y. F., & Wu, Y. (2021). A novel hybrid WOA-XGB model for estimating daily reference evapotranspiration using local and external meteorological data: Applications in arid and humid regions of China. *Agricultural Water Management*, 244.

Zhang, X. M., & Wen, S. C. (2021). Hybrid whale optimization algorithm with gathering strategies for high-dimensional problems. *Expert Systems with Applications*, 179, Article 115032. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115032>

Zhu, G. Y., & Zhang, W. B. (2017). Optimal foraging algorithm for global optimization. *Applied Soft Computing*, 51, 294-313.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.12.2022
Kabul Tarihi : 07.04.2023

Received Date : 05.12.2022
Accepted Date : 07.04.2023

TANE BOYUTU VE DEHİDRATASYON SICAKLIĞININ ANHİDRİT ALÇI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

A STUDY ON THE EFFECT OF GRAIN SIZE AND DEHYDRATION TEMPERATURE ON ANHYDRITE GYPSUM PROPERTIES

Lütfullah GÜNDÜZ¹ (ORCID: 0000-0003-2487-467X)
Şevket Onur KALKAN^{2*} (ORCID: 0000-0003-0250-8134)

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada inşaat sektörüne yönelik üretimi yapılacak alçılarda, hammadde olan jipsin tane boyutunun ve pişirme sıcaklığının son ürünün performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle, alçıtaşıdan anhidrit III alçı üretiminin aşamaları detaylandırılmıştır. Analizlerde kullanılan alçıtaşı boyut aralıkları sırasıyla <0.50 mm, 0.50-0.75 mm, 0.75-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm ve >16 mm'dir. Her bir boyut aralığındaki alçıtaşı örnekleri sıcaklığı önceden sırasıyla 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240, 255 ve 270 °C'ye ayarlanmış bir fırında 10'ar dakika krozeler içinde bekletilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, özellikle 0.75-1 mm boyut aralığındaki alçıtaşı örneklerinin anhidrit alçı için dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerinin 200°C olduğu belirlenmiştir. Bu tane boyutu ve sıcaklık ile üretilen anhidrit III ürünü tekrar boyutlandırılmış ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 500-750 µm olarak boyutlandırılan anhidrit III'te tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: alçı, dehidratasyon, sıcaklık, tane boyutu, anhidrit.

ABSTRACT

In this study, the effects of grain size and dehydration temperature of gypsum rock, which is the raw material, on the performance of the final product in gypsum to be produced for the construction industry were investigated experimentally. In particular, the stages of anhydrite III gypsum production from gypsum rock are detailed. The gypsum grain size ranges used in the analyzes are <0.50 mm, 0.50-0.75 mm, 0.75-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm and >16 mm, respectively. Gypsum samples in each grain size range were kept in crucibles for 10 minutes in an oven whose temperature was previously set to 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240, 255 and 270°C, respectively. According to the results of the study, it was determined that the grain size and dehydration temperature values for anhydrite gypsum of gypsum rock samples, especially in the 0.75-1 mm size range, were 200°C. The anhydrite III product produced with this grain size and temperature was resized and its mechanical properties were investigated. The highest compressive strength was found in anhydrite III with grain size of 500-750 µm.

Keywords: gypsum, dehydration, temperature, grain size, anhydrite.

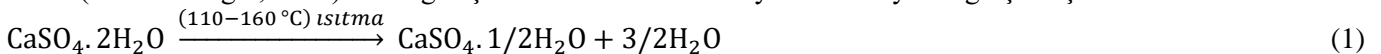
GİRİŞ

Jips, bazen sulu kalsiyum sülfat olarak adlandırılan kalsiyum sülfat ve sudan ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oluşan ve yer kabuğunda bulunan rengi beyazdan griye değişen bir mineraldir. Kimyasal olarak kalsiyum sülfat dehidrattan oluşan yumuşak sülfat mineralidir (İstanbuluoğlu, 1997; Yu vd., 2009; Gürdal, 2010). İki su molekülünün bağlı olduğu mineral kalsiyum sülfattır. Ağırlık olarak yaklaşık %79 kalsiyum sülfat ve %21'i sudur. Alçıtaşı %23 kalsiyum ve %18 kükürt içerir ve çözünürlüğü kireçtaşı-kalkere göre 150 kat daha fazla olup, bu özelliği sebebiyle doğal bir bitki besin kaynağı ve toprak ıslahında yaygın olarak da kullanılabilir (İstanbuluoğlu, 1997; Thoeny, 2020). İnşaat endüstrisinde doğal kayaç formu olarak özel durumlar hariç doğrudan genellikle kullanımı pek yaygın değildir. Ancak, bünyesindeki kristal suyunu belirli oranlarda ve/veya tamamen fiziksel ve/veya kimyasal etkilerle atılması sağlandığında, kullanımı mümkün olabilmektedir. Örneğin, bünyesindeki 2 mol kristal suyun ısı ile 3/2'lik kısmının ayrışması sağlandığında yapı alçısı olarak sıva vb. uygulamalarda kullanılabilir. Bununla birlikte 190-200 °C'nin üzerinde bir ısı ile tabii tutulduğunda, özgül ağırlığı 2.3'ten 2.95 gr/cm³'e yükselerek genellikle kristal suyunun tamamı ayrıştırılmasıyla susuz alçı olarak da adlandırılan anhidrit formuna dönüşümü sağlanmış olur. Jipsin ısı ile işlem sonucu bu yeni ürünü suya karşı daha duyarlı formda olup, bu bağlamda gerekli önlemler alınarak uygulandığında yüksek mukavemet oluşturan alçı harcı uygulamalarında ve alçı ürünlerin geliştirilmesinde kullanımı gündeme gelmektedir (Padevet vd., 2011; Anonim, 2022a).

Doğal ve saf jipsin ısı ile işlemle farklı sıcaklık değerlerinde ısıtılması sonucu kristal suyunu kaybetme oranları değişkenlik gösterir. Bu olgu, jipsin doğal karakteristiğine bağlı olarak farklı değerlerde olabilmektedir. Alçının inşaat sektöründe kullanımı için bünyesindeki kristal suyunun ayrıştırılması önemli olduğu kadar, bu işlemin gerçekleştirilmesinde jipsin optimum hangi tane boyutunda ve hangi süreyle ısı ile tabii tutulması gerekliliği, doğal her jips için özelden deneysel çalışmalar ile detaylı etüt edilerek belirlenmesi, alçı ürününün daha sağlıklı kullanımını sağlamaktadır. Literatürde jips kalsinasyonu üzerine farklı araştırmacılar tarafından yapılmış çalışma bulgularında bu bağlamda farklı değerler görülmekle birlikte, ısı ile maruz bırakılacak jipsin tane boyutunun farklılık göstermesi önemli bir parametre olarak vurgulanmıştır (Al-Qaisi, 2004; al-Ridha vd., 2015; Salih & Hussein, 2018; Thoeny, 2020). Ayrıca, alçıtaşı kalsinasyonunda tane boyutu değiştiğinde elde edilen alçı ürünün ayrışan kristal suyu ve kaybedilen ağırlığı sebebiyle mekanik performanslarında ve sertleşme sürelerinde değişkenlikler olduğu araştırmalarda tecrübe edilmiştir (İstanbuluoğlu, 1997; Aljubouri & Al-Rawas, 2009; Al-Ameeri, 2014; Thoeny, 2020). Bu makalede Aksaray bölgesindeki jips oluşumlarında yer alan jips örneklerinin farklı tane boyutlarında sınıflandırılarak farklı kalsinasyon sıcaklık değerlerinde ağırlık azalması ve kristal suyu kaybı miktarlarının belirlenmesi üzerine yapılan bir deneysel araştırma ve alçı ürün geliştirme çalışmasının özet bulguları sunulmaktadır. Jipsin kristal suyu kaybında özellikle jips tane boyutunun etkisi ve sıcaklık ilişkisi üzerine teknik bulgular karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, jipsten susuz alçı formu olarak anhidrit alçının üretilebilirliği üzerine sürdürülen inceleme çalışmasında jipsin bu üretim için gerekli optimum kabul edilebilecek tane boyutu aralığı, ısı ile işlem için gerekli sıcaklık değeri ve anhidrit alçı ürünün priz alma ve basınç dayanımı vb. gibi bazı teknik özellikler analiz edilmiştir. Araştırmanın ana odak noktası, anhidrit alçı üretimi ve bu alçı ürünü kullanılarak tasarlanmış anhidrit harcı örneklerinin bazı özelliklerini incelemek ve anhidrit alçı ürünü özelliklerine etken teknik faktörlerin belirlenmesini araştırmaktır. Araştırma bulguları karşılaştırmalı olarak özetle tartışılmıştır. Bu makalede sunulmuş olan bulgular, deneysel çalışmada kullanılmış jipsi karakterize etmekte olup, jipsin oluşum, bulunuş ve karakteristik formu değişkenlik gösterdiğinde farklı bulgular elde edilebilmektedir. Bu bağlamda, araştırma bulguları konu üzerine yeni düzenlenecek araştırmalara ışık tutması amaçlanmıştır.

JİPSİN DEHİDRASYONU

Jips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ kimyasal formülüne sahip kalsiyum sülfat dehidrattan oluşan yumuşak bir sülfat mineralidir (İstanbuluoğlu, 1997; Serrano vd., 2015; Fisher vd., 2016). Jips saf olduğu durumda bileşiminde ağırlıkça yaklaşık %20.93 oranında kristal su ve %79.07 oranında CaSO_4 bulunur. Jipsin doğal nemi, 45 °C'lik bir sıcaklıkta ısıtılmayla bünyesinden atılabilir. Ancak bu sıcaklıkta kristal suyun bünyeden atılımı gerçekleşmez. Bunun için saf alçının bünyesindeki iki molekül suyun genellikle bir ısı ile işlemde bünyeden uzaklaştırılması sağlanır. Kristal suyun bünyeden uzaklaştırılmasına "dehidratasyon" denilmektedir (İstanbuluoğlu, 1997; Gürdal, 2010; Thoeny, 2020). Jipsin dehidratasyon işleminde uygulanan sıcaklık değerine göre farklı oranlarda kristal suyu atılımı ve jipsin ağırlığında azalmalar meydana gelebilmektedir. Örneğin; iki molekül suya sahip saf jips 110-160 °C aralığında ısıtıldığında bünyesindeki kristal suyunun yaklaşık %75'lik kısmını kaybederek kütlesi ortalama %15.7'lik bir oranda azalır (İstanbuluoğlu, 1997). Bu olgu eşitlik 1'de belirtilen kimyasal reaksiyonla gerçekleşir.



Bu reaksiyon sonucu elde edilen ürün kalsiyum sülfat yarımhidratıdır. Bu ürüne sektörel uygulamalarda yarım hidrat alçı da denilmektedir. Genellikle bu ürün normal yapı alçısı olarak kullanılabilir. Ayrıca bu yarım hidrat alçı uygulanan dehidratasyon ve ısıtma şekli itibarıyla “β yarım hidrat alçı” olarak da adlandırılabilir (Guan vd., 2010). Jips 190-220 °C aralığında ısıtıldığında ise bünyesindeki kristal suyunun tamamını kaybeder ve ağırlığı %20.93 oranında azalır. Bu olgu da eşitlik 2’de belirtilen kimyasal reaksiyonla gerçekleşir (İstanbuluoğlu, 1997; Gürdal, 2010).



Bu reaksiyon sonucu oluşan kalsiyum sülfat jipsin yapısal özelliğine göre bazen $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$ formunda veya CaSO_4 III formunda olabilir. Bu ürün susuz alçı, çözünür heksagonal anhidrit veya Anhidrit III gibi isimlerle adlandırılabilir. Anhidrit III yapı alçısından daha az plastiktir. Ancak uygun şartlarda tekrar suyla birleştiği zaman yapı alçısından daha yoğun ve dayanımı daha yüksek bir kütle oluşturur (İstanbuluoğlu, 1997; Gürdal, 2010). Bu alçı ürününün en belirgin özelliği ise suya karşı çok fazla duyarlılık göstermesidir. Diğer bir deyişle, sertleşmiş olan kütle, içinde bulunduğu ortamda suya maruz kalırsa, sertleşen alçı kütlesi yumuşama davranışı göstererek mukavemet kaybı sergiler. Ancak, ortamdaki su herhangi bir şekilde uzaklaştığında veya kaybolduğunda, tekrar eski sertleşme formuna geri dönme özelliği gösterir. Bu nedenle, Anhidrit III’ün kullanıldığı ortamlarda mümkün olduğunca su varlığından uzak tutulması önemlidir.

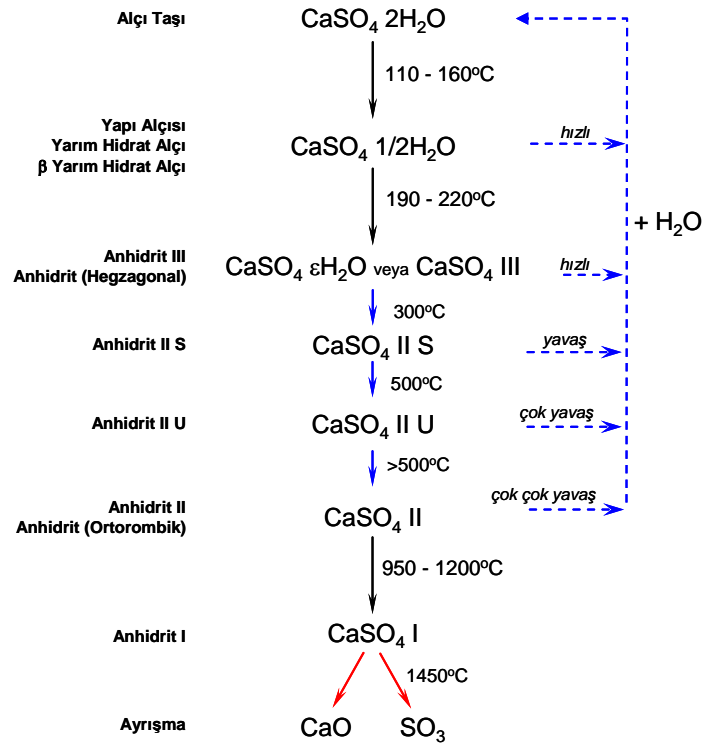
Eğer kalsinasyon sıcaklığı 300-500°C’lere ulaştığında, CaSO_4 yapısında ekzotermik bir reaksiyon gelişerek Anhidrit III formu Anhidrit II formuna dönüşüm gösterir. Kalsinasyon sıcaklık değeri 300°C dolayında ise “ CaSO_4 II S” formunda bir ürün oluşur. Bu ürün, suda az çözünür, priz yapmaz bir davranış sergiler. Ancak hızlandırıcı bir katkı ile birlikte kullanımında priz yapma özelliği kazanır. Diğer taraftan, kalsinasyon sıcaklık değeri 500°C dolayına çıkar ise “ CaSO_4 II U” formunda bir ürün oluşur. Bu ürün suda çözünmez ve priz yapmaz bir Anhidrit II formudur (İstanbuluoğlu, 1997; Gürdal, 2010). Ancak bazı hızlandırıcı katkılar ile çok yavaş bir seyirde sertleşme olgusu gösterebilir. Kalsinasyon sıcaklığı >500 °C’nin üzerine çıktığında ise CaSO_4 II formu oluşumu görülür ki, bu ürüne de suda çözünmez Anhidrit’de denilmektedir. Bu ürünün su ile tekrar birleşerek katılaşma özelliği hemen hemen yoktur ya da çok çok yavaştır. CaSO_4 formları içerisinde en az çözünebilir özelliğe sahip olan ürün türevidir. Bu ürünlerin oluşmasında gelişen kimyasal reaksiyon denklemleri Eşitlik 3 – Eşitlik 5’deki gibi geliştiği kabul edilir (Gürdal, 2010).



950- 1200°C sıcaklık değerlerinde CaSO_4 II ısıtılmaya devam ederse Anhidrit I formuna dönüşür. Bu ürüne “ CaSO_4 I” adı da verilmektedir. Bu sıcaklık değerlerinde anhidrit malzeme akkor durumuna geldiği için kalsiyum sülfat yapısı bozulmaya ve ayrışmaya başlar. Bu süreçte bünyesindeki kükürt bileşimini gaz formunda ortama bırakmaya başlar. Malzeme içindeki kalsiyum oksit oranı artma eğilindedir. Bu sebeple, Anhidrit I suyla karıştırıldığında jipsin diğer ürünlerine göre daha yavaş bir eğilimle sertleşir. Sertleşmesi tamamlandığında, daha yüksek yoğunlukta ve çok daha sert ve yüksek mukavemetli bir form kazanmış olur. Bu ayrışma ve kimyasal reaksiyonlar Eşitlik 6 ve Eşitlik 7’deki gibi gelişmektedir (Gürdal, 2010).



Jipsin kimyası üzerine literatürde yer alan teknik not ve bilgiler derlenerek (İstanbuluoğlu, 1997; Gürdal, 2010; Anonim, 2022b) jipsin ayrışma sıcaklığı ve elde edilen ürünlerin gelişimi sembolik bir akış şeması olarak Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Jipsin Ayrışma Sıcaklığı Ve Elde Edilen Ürünlerin Gelişimi.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada anhidrit alçı üretimi için kullanılan jips örnekleri Aksaray bölgesinde rezervleri bulunan jips ocaklarından piyasa koşullarında doğal kayaç formları korunarak iri parça kütleler şeklinde tedarik edilmiştir (Şekil 2). Laboratuvar ortamına getirilen jips örnekleri genelde büyük boyutlu kayaç parçaları şeklinde olup, öncelikle bu kayaç parçalarının boyutlarının küçültme işlemi manuel kırmayla yapılmıştır. Sonra parçalanmış kayaç parçaları 32 mm'lik bir kare göz açıklıklı elekten elenerek 32 mm boyut altında kalan malzeme bu çalışmada jips ana hammadde olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu jips malzemesi laboratuvar ortamında bir kırıcı yardımıyla tekrar kırılarak 32 mm boyut altında farklı tane boyutlarında sınıflandırılmıştır. En büyük tane boyutu 16 mm – 32 mm boyut aralığı olup, çalışma kapsamında bu boyut >16 mm olarak kodlanmıştır. 2 mm boyut altındaki jips, laboratuvar ortamında öğütmeye tabi tutularak daha ince boyutlarda hammadde oluşturulması sağlanmıştır. Tasarlanan test uygulamalarına göre jipsin boyutlandırılmalarına ilişkin bulgular, aşağıdaki alt bölümlerde analiz irdelemeleriyle birlikte sunulmuştur.



Şekil 2. Çalışmada Kullanılan Jips Örneği.

Anhidrit alçı harcı karışımlarının elde edilmesinde karma suyu olarak normal şebeke suyu kullanılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Jips Tane Boyutunun Kristal Suyu Kaybına Etkisi

Jips belirli süreyle ısıtmaya maruz kalırsa, bünyesinde bulunan kristal suyunu kaybederek ağırlık değişimine uğramaktadır. Ancak, jipsin ısıtma etkisiyle kristal suyu kaybı sıcaklığa maruz kalan tane boyutuna bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında Aksaray jips (AJ) örneklerinin kristal suyu kaybı davranışını incelemek amacıyla laboratuvar ortamında jips birincil bir kırıcıda kırılarak, öncelikle kırılan malzeme 2 mm göz açıklıklı bir elekten elenerek 2 mm boyut altındaki AJ örnekleri ayrı bir grup malzeme olarak ayrılmıştır. Daha sonra bu 2 mm boyut altındaki AJ örnekleri laboratuvar ortamında bir değirmende öğütülerek daha ince boyutlu malzemeler elde edilmiştir. Sonrasında kırılmış ve öğütülmüş AJ örnekleri 8 ayrı boyut aralığında sınıflandırılmıştır. Analizlerde kullanılan boyut aralıkları sırasıyla <0.50 mm, 0.50-0.75 mm, 0.75-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm ve >16 mm. Her bir boyut aralığındaki AJ örnekleri sıcaklığı önceden sırasıyla 160, 170, 180, 190, 200, 220, 240, 255 ve 270°C'e ayarlanmış dokuz ayrı sıcaklıkta bir fırında 10'ar dakika krezeler içinde bekletilmiştir. Isıtma işlemi TS EN 13820 (2004) standardının öngördüğü şekilde tamamlanmıştır. Sembolik bir görünüm olarak 1-2 mm tane boyutlarında sınıflandırılmış jipsin ısıtma işlemi uygulandıktan sonraki görünüşleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 1-2 mm Tane Boyutlarında Sınıflandırılmış Jipsin Isıl İşlem Uygulandıktan Sonraki Görünüşleri.

Sıcaklık etkileşimi öncesi ve sonrası tüm örneklerin ağırlıkları ölçülmüş olup, test öncesi ve sonrası ağırlık değişimlerinden ağırlık azalması değerleri belirlenmiştir. AJ örneklerinin sıcaklık etkileşimi sonrası ağırlık değişimleri (azalmaları) Tablo 1'de her bir boyut aralığı için verilmiştir.

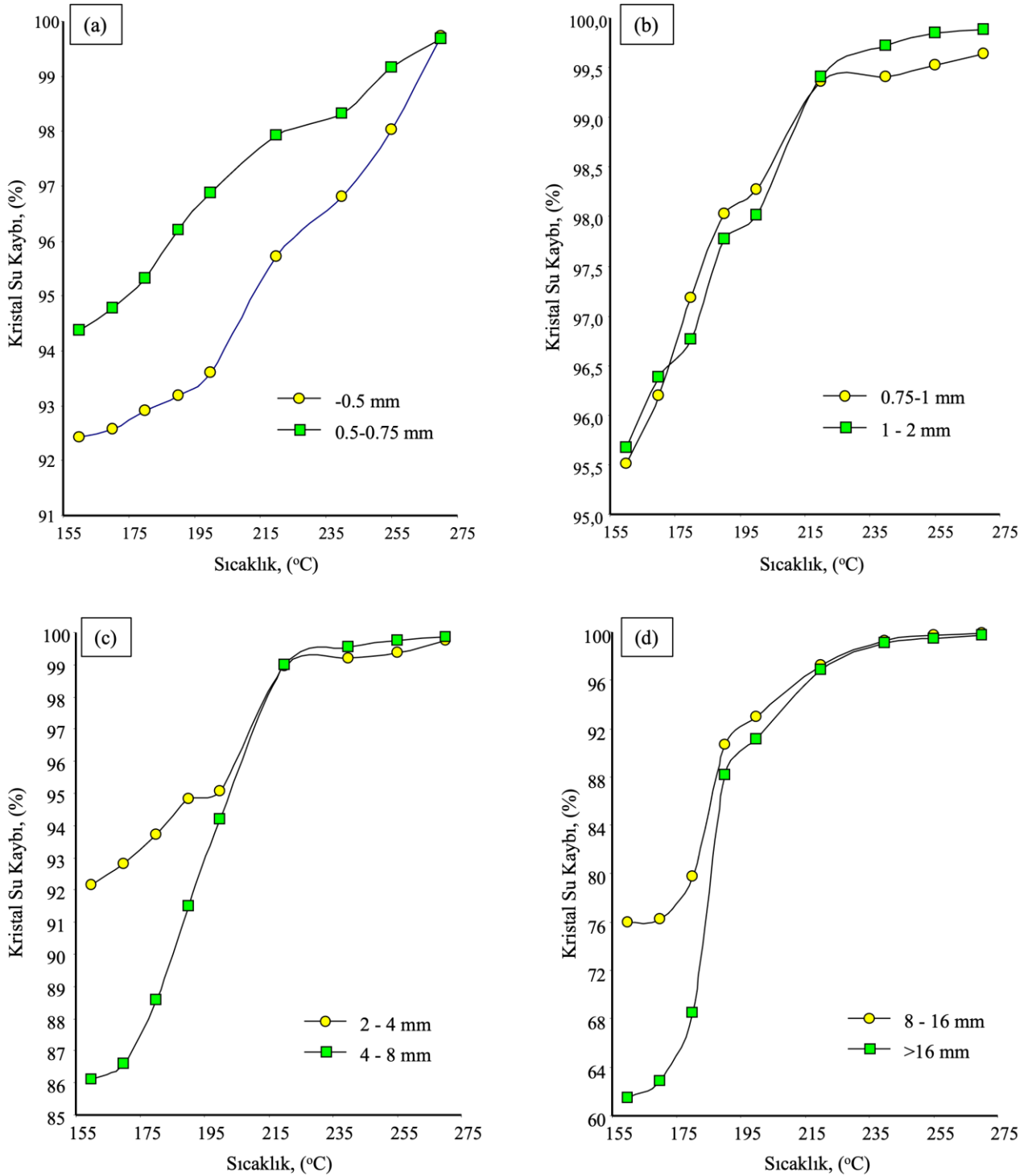
Tablo 1. Jipsin Tane Boyutuna ve Sıcaklık Değişimine Göre Ağırlık Azalma Oranları (%)

Sıcaklık (°C)	-0.50 (mm)	0.50-0.75 (mm)	0.75-1.00 (mm)	1.0-2.0 (mm)	2.0-4.0 (mm)	4.0-8.0 (mm)	8.0-16.0 (mm)	>16.0 (mm)
160	19,34	19,75	19,99	20,02	19,29	18,02	15,89	12,86
170	19,37	19,83	20,13	20,17	19,42	18,12	15,96	13,16
180	19,44	19,95	20,34	20,25	19,61	18,54	16,69	14,34
190	19,50	20,13	20,51	20,46	19,85	19,14	18,97	18,45
200	19,59	20,27	20,57	20,51	19,90	19,71	19,45	19,06
220	20,03	20,49	20,79	20,80	20,71	20,71	20,35	20,28
240	20,26	20,58	20,80	20,87	20,76	20,83	20,77	20,73
255	20,51	20,75	20,83	20,90	20,80	20,88	20,87	20,82
270	20,87	20,86	20,85	20,90	20,87	20,90	20,90	20,87

Tablo 1 irdelendiğinde görüldüğü üzere, jipsin tane boyutu ve maruz kaldığı sıcaklık değeri değiştikçe, birbirinden farklı değerlerde ağırlık değişimleri görülmektedir. Jips ısıtma etkisiyle tamamen kristal suyunu kaybettiğinde ağırlık

kaybı maksimum %20.93 seviyesinde olmaktadır. Bu değer baz alındığında, analiz bulgularında elde edilen ağırlık kaybı yüzde oranlarıyla mukayese edilerek her bir sıcaklık değeri ve her bir boyut aralığındaki kristal suyu kaybı oranları tanımlanmıştır. Buna göre, her bir boyut aralığında sıcaklık değeri arttıkça, jipsin ağırlık kaybı da artmıştır. Ancak, jipsin tane boyutu irileştikçe eşdeğer sıcaklık etkileşiminde ağırlık kaybı azalmıştır. Bu olgu, jipsin daha ince boyut aralıklarında ısıtıldığında daha etkin bir şekilde su kaybı oluşturarak, ağırlık azalma oranının artmasını sağlamaktadır. Örneğin, <0.50 mm boyut aralığındaki AJ örneğinin 160°C sıcaklıkta ısıtma işlemi sonrası ağırlığı %19.34 azalırken, eşdeğer sürede aynı sıcaklık değerine maruz kalmış >16 mm boyut aralığındaki AJ örneğinin ağırlığı ise ortalama %12.86 oranında azalmıştır. Tane boyutu irileştikçe, toplam yüzey alanının düşmesi sebebiyle sıcaklık etkileşimi sonrası su kaybı azalmakta ve buna bağlı olarak ağırlık kaybı oranı da düşmektedir (İstanbuluoğlu, 1997). Bu da, iri boyutlu tanelerde jipsin su kaybı oranını artırmak için daha yüksek sıcaklıklarda dehidratasyon ve kavurma (kalsinasyon) işlemi yapmak gerektiğini göstermektedir. Jipsin kalsinasyon işlemi sonrası genellikle ağırlığını ortalama %15.68'lik oranda kaybettiğinde inşaat alçı formu elde edilmesi için yeterli olduğu görülmektedir (İstanbuluoğlu, 1997). Bununla birlikte kalsinasyon işlemiyle ağırlığının ortalama %20.90'lık oranda kaybettiğinde de anhidrit alçı formu elde edildiği kabul edilmektedir (İstanbuluoğlu, 1997). Çalışma kapsamında ağırlık kaybı oranları dikkate alındığında dehidratasyon ve kalsinasyon işlemi bağlamında en etkin tane boyut aralığının 0.75-1 mm aralığı olduğu düşünülmüştür. Bu boyut aralığında 160 °C sıcaklık etkisinde kalsine edilmiş AJ örneklerinin kolaylıkla alçı formuna dönüştüğü, bununla birlikte 200 °C sıcaklıkta ise ortalama %20.57'lik oranda ağırlık kaybettiği görülmüştür. Bu sıcaklık değerinden sonra ağırlığındaki azalma oranlarının ihmal edilebilecek büyüklüklerde değişim gösterdiği belirlenmiştir (270°C'de ağırlık kaybı %20.85). Diğer bir değişle, AJ örneği 160 °C'de kristal suyunun %95.51'ini, 200 °C'de ise %98.27'sini kaybetmiştir. Bulunan bu değerler literatürde özellikle anhidrit alçı oluşumu için verilen ağırlık oranına (%20.90) ve kristal suyu kaybı oranı (%100) yakınsak değerdedir (İstanbuluoğlu, 1997; Yu vd., 2009; Gürdal, 2010). Doğal haliyle jips ocağından temin edilen örneklerin tamamıyla saf bir jips karakteristiği sergilemesinin söz konusu olmayacağı dikkate alındığında 200°C'de AJ örneklerinin kristal suyunu tümüyle kaybettiği kabul edilebilir. Bu kabul bağlamında çalışma kapsamında özellikle 0.75-1 mm boyut aralığındaki AJ örneklerinin anhidrit alçı için dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerinin 200°C olduğu belirlenmiş olup, bu sıcaklıkta elde edilen AJ örneğinin yeni formu Anhidrit III olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte diğer tane boyut aralıkları için yapılan değerlendirmelerde Anhidrit III elde edilmesi için gerekli dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerinin sırasıyla <0.5 mm boyutu için 255°C, 0.5-0.75 mm boyutu için 240 °C, 1-2 mm boyutu için 220 °C, 2-4 mm boyutu için 220 °C, 4-8 mm boyutu için 220 °C, 8-16 mm boyutu için 240 °C ve >16 mm boyutu için ise 240 °C olarak belirlenmiştir.

AJ örneklerinin farklı tane boyut aralıklarında dehidratasyon ve kalsinasyon işlemi için sıcaklık değeri değişimlerinde elde edilen kristal suyu kaybı değerleri grafiksel analizlerle Şekil 4'te verilmiştir. Farklı tane boyutlarında AJ örneklerinde, kristal suyu kaybı oranları oldukça farklı karakteristik sergilemektedir. 0.5 mm boyut altında sınıflandırılmış AJ örneklerinin 160-270°C sıcaklık değişiminde kristal suyu kaybı %92.43 - %99.72 oranlarında değişmektedir. Bu boyut grubunda dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değeri arttıkça kristal suyu kaybı da artmıştır. Çalışma kapsamında 160°C'lik başlangıç sıcaklık değerinde <0.50 mm boyutundaki AJ örneklerinin kristal su kaybı oranı itibarıyla yapı alçısı elde edilebilirliği için yeterli kavurma sıcaklığına maruz kaldığı görülmektedir. Ancak, anhidrit alçı üretimi için ise kalsinasyon sıcaklığının >240°C'nin üzerine çıkıldığında mümkün olduğu görülmüştür. AJ örneklerinin boyutu <0.50 mm'lik aralıktan 1-2 mm boyut aralığına kadar irileştikçe, artan eşdeğer kalsinasyon sıcaklık değerlerinde kristal suyu kaybı oranlarının lineer bir eğilimle arttığı belirlenmiştir. Ancak, 4-8 mm boyut aralığı ve daha büyük tane boyut aralıklarında ise özellikle 200°C sıcaklık değerine kadar kristal suyu kaybı oranları, daha ince boyutlarda elde edilen oranlardan daha düşüktür. İnce tane boyutlarında kristal suyu kaybı oranı daha hızlı, tane boyutu büyüdükçe kristal suyu kaybı hızı ise azalmıştır. Bu azalmanın hızı 2 mm ile 8 mm aralığında yavaş, 8 mm'den sonra ise daha yüksek hızlı seyretmiştir. Tane boyutu büyüdükçe tanelerin azalan toplam yüzey alanı sebebiyle, sıcaklığa maruz kalan yüzey oranı düşmekte, tanelerin özellikle orta kısımları yeterli düzeyde ısınmadığı görülmüş ve daha az kristal suyu kaybı oluşmuştur. İri tane boyutlarında kalsinasyon işlemi için eşdeğer sıcaklıkta daha uzun süreye ihtiyaç duyulacağı tecrübe edinilmiştir. Sıcaklık değerinin 200 °C'nin üzerine çıkışı ile birlikte bu etkinin büyük oranda kaybolduğu ve kristal suyu kaybı oranına sıcaklık artışının bir önemi kalmadığı kabul edilmiştir. Diğer bir değişle, Anhidrit III'e dönüşüm için ince tane boyutlarda daha düşük dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerlerinde ulaşılabilirken, tane boyutu irileştikçe daha yüksek kalsinasyon sıcaklık değerine gereksinim duyulduğu gözlenmiştir.



Şekil 4. a. <0.5 mm ve 0.50-0.75 mm BOYUT ARALIKLARI İÇİN **b.** 0.75-1 mm ve 1-2 mm Boyut Aralıkları İçin **c.** 2-4 mm ve 4-8 mm Boyut Aralıkları İçin **d.** 8-16 mm ve >16 mm Boyut Aralıkları İçin AJ Örneklerinin Sıcaklık – Kristal Suyu Kaybı İlişkisi.

Çalışma kapsamında tüm tane boyut aralıklarında elde edilen kristal suyu kaybı oranları irdelendiğinde Anhidrit III için en optimum boyut aralığının 0.75 – 1.0 mm olduğu gözlenmiştir. Bu boyut aralığında kristal suyu kaybı 160 °C’de %95.51 iken 200°C’de %98.27’e ulaşmıştır. Anhidrit III için en düşük kalsinasyon sıcaklık değerinde olup en yüksek kristal suyu kaybı oranı bu sıcaklık değerinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Diğer bir gözlem ise, 200°C dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklığında AJ örneklerinin tane boyutu irileştikçe, jips bünyesinden kristal suyu kaybetme oranlarında düşük oranlarda da olsa bir azalma olduğu gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni, Anhidrit III formu olarak fırından çıkan malzemenin neme karşı çok duyarlı olması ve fırın çıkışında ortamdaki havanın neminin bir kısmını tekrar bünyeye hızla soğurarak, kalsinasyon işleminde kaybetmiş olduğu suyun bir miktarını tekrar

kazanması olarak yorumlanmıştır. Kalsinasyon işlemi sonrası malzeme bünyesinde tutulmaya devam eden su oranı 200°C sıcaklık sonrası tane boyut aralıklarına göre sırasıyla 0.75-1 mm için %0.36, 1-2 mm için %0.42, 2-4 mm için % 1.03, 4-8 mm için %1.22, 8-16 mm için 1.48 ve >16 mm boyut için ise %1.87 olarak belirlenmiştir. 200 °C sıcaklık sonrası AJ örneklerinde tane boyutunun büyümesine paralel olarak kristal su tutumunun kısmi artışı, azalan toplam yüzey alanına rağmen jipsin gözenekliliğinin artması, su emmeye karşı davranışının daha duyarlı olmasının bir sonucu olarak irdelenmiştir.

Tablo 1 ve Şekil 1’de belirtilen test bulguları irdelendiğinde, 0.75-1.0 mm boyut aralığındaki AJ örnekleri 160 °C’de kalsinasyon işlemi yapıldığında %19.99 ve 200 °C’e ısıtıldığında ise %20.57 ağırlık azalması oranları ile yapı alçısı ve Anhidrit III için literatürde belirtilen teknik tecrübelerle en yakınsak bulguları verdiği görülmüştür.

Anhidrit III Tane Boyutunun Tekrar Su Kazanma Oranına Etkisi

200 °C ve üzerinde kalsinasyon işlemine maruz kalarak Anhidrit III formuna dönüşmüş jips örneklerinin ısıtma işlemi sonrasında normal ortam koşullarında ısıtma işlemle kaybettiği kristal suyunun bir kısmının tekrar bünyeye kazanılarak yarım hidrat kalsiyum sülfat formuna dönüşme duyarlılığı oldukça yüksektir (İstanbuluoğlu, 1997; Yu vd., 2009; Theony, 2020). Bu olgu, çalışma kapsamında tane boyutuna bağlı olmaksızın Anhidrit III formuna dönüşmüş tüm örneklerde değişen oranlarda da olsa benzer tecrübe edinilmiştir. Fırın çıkışı elde edilen ürünün, serbest ortamdan nem almasını önleyici tedbirler alındığında, Anhidrit III örneklerinin geri su kazanımı ihmal edilebilecek büyüklüklere gelebilmektedir. Fırın çıkışı Anhidrit III örneklerinin tekrar nem kazanımı duyarlılığı sebebiyle (İstanbuluoğlu, 1997), ortamdaki hava içerisinde bulunan nem ile hızla reaksiyona girerek bünyesine havadan su (nem) soğurmakta ve bunun doğal bir sonucu olarak ağırlığı artmaktadır. Tekrar su kazanımının yüksek oranlarda olması, ürünün Anhidrit III formunun bozulmasına ve beklenen dayanım ve durabilite performansının kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bu bağlamda, kalsinasyon işlemiyle Anhidrit III formuna dönüşmüş olan malzemenin belirli zaman periyotlarında serbest ortamdaki havadan tekrar su kazanımı davranışı detaylı etüt edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında 200 °C’de dehidratasyon ve kalsinasyon işlemine tabi tutulan tüm boyut aralıklarındaki AJ örneklerin, fırın çıkışı sonrası serbest ortamdaki hava koşullarında 3 saatten başlayarak sırasıyla 6, 24, 36, 480 ve 672 saatlik altı ayrı periyotta ağırlıklarındaki artış miktarı ve ortamdan tekrar kazandıkları su miktarları analiz edilmiştir. Deneysel bulgular tüm tane boyut aralıkları için Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Anhidrit Alçının Tane Boyutu ve Zamana Göre Ortalama Ağırlık Artış Oranları (%)

Tane Boyutu (mm)	3 (saat)	6 (saat)	24 (saat)	36 (saat)	480 (saat)	672 (saat)
0-0,50	6,83	7,36	7,32	7,38	6,96	6,24
0,50-0,75	6,68	7,28	7,34	7,40	7,08	7,01
0,75-1,0	6,53	7,20	7,38	7,42	7,15	6,92
1,0-2,0	5,96	6,89	7,42	7,48	7,07	6,84
2,0-4,0	4,87	6,33	7,49	7,55	7,01	6,79
4,0-8,0	3,52	5,20	7,37	7,50	7,03	6,93
8,0-16,0	2,13	3,51	6,82	6,88	6,97	6,98
>16,0	1,97	2,56	5,97	6,02	6,93	6,83

Tablo 2 irdelendiğinde, 200°C ısıtılmaya maruz kalmış AJ örneklerinin fırın çıkışı sonrası ilk dakikalarda tane boyutu büyüdükçe ağırlıklarındaki artış oranı düşmüştür. Diğer bir değişle, tane boyutu irileştikçe serbest ortamdan su kazanma hızı düşmüştür. Örneğin fırın çıkışı sonrası 3 saat sürede tane boyutu <0.50 mm olan AJ örneklerinde ağırlık artışı %6.83 iken bu oran >16 mm boyutlu örneklerde %1.97 olarak elde edilmiştir. Benzer olgu 6 saat süre için de %7.36’dan %2.56’ya düşen bir oranla değişmiştir. Tane boyutu büyüdükçe, ağırlıkça belirli miktar AJ örneği ele alındığında, bu miktar içerisinde daha az tane sayısı olması ve aynı zamanda bu tanelerin oluşturduğu toplam yüzey alanının azalması, ortamdan tekrar su kazanımı tanenin yüzeyi ile ortamdaki suyun yüzeyle temas oranının azalması sebebiyle daha düşük değerlerde nem emilimi ve ağırlık artışı oluşturmaktadır. İlk 24 saat sürede tüm tane boyutlarında ortamdan tekrar su kazanımının oldukça hızlı olduğu, ancak 36 saat süreye ulaşıldığında da genel bir eğilim olarak ortamdan su kazanımı ve ağırlık artışı oranlarında belirgin bir doygunluğa ulaşıldığı görülmüştür. Ancak, ilerleyen sürelerde ise en düşük tane boyutundan 8 mm tane boyutuna kadar olan AJ örneklerinde ağırlık artış hızının zamanla tersine döndüğü görülmüştür. 8-16 mm boyut aralığında 672 saat sonra dahi çok düşük oranda da olsa su kazanımının devam ettiği görülmüştür. Bununla birlikte >16 mm boyut aralığındaki örneklerde denge durumu ancak 480 saat sonra gerçekleşmiş olup, bu süreden sonra göreceli olarak su kazanımı azalmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgularda, AJ örneklerinin her bir tane boyutu için ısıtma işlemi sırasında kaybettikleri kristal suyunun bir kısmını tekrar kazanarak birbirine yakınsak değerler sergileyen su kazanım değerlerinde denge durumuna ulaştıkları belirlenmiştir. <0.5 mm boyut aralığındaki AJ örneklerinde 36 saatlik sürede %7.38'lik bir ağırlık artışı ile ısıtma işlemi sırasında kaybettiği kristal suyunun yaklaşık %30.3'ünü geri kazanarak denge durumuna gelmiştir. Benzer bir şekilde, 0.50-0.75 mm boyut aralığındaki örneklerde ise 36 saatlik sürede %7.40'lık bir ağırlık artışı ile ısıtma işlemi sırasında kaybettiği kristal suyunun yaklaşık %29.1'ini geri kazanarak denge durumuna gelmiştir. Diğer 0.75-1.0 mm, 1-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm ve >16 mm boyutlarında da dengeye ulaşma süresi, ağırlık artışı ve kaybedilen suyun tekrar kazanım oranları bağlamında sırasıyla 36 saat %7.42 - %28.7, 36 saat %7.48 - %29, 36 saat %7.55 - %30.4, 36 saat %7.50 - %30.5, 672 saat %6.98 - %28.9 ve 480 saat %6.93 - %29.4'dür. Genel bir eğilim olarak, AJ örneklerinin tane boyutu düştükçe yaklaşık 36 saatte denge durumuna geldiği ve ısıtma işlemi sırasında kaybettikleri kristal suyunun yaklaşık %30 civarındaki kısmını serbest ortadaki havanın nemini bünyesine alarak tekrar kazandığı görülmüştür. Tane boyutu irileştikçe hem süre uzamış hem de tekrar su kazanım oranı bir miktar azalmıştır. Deneysel bulgulardan Anhidrit III için kristal suyu kaybı miktarının arzu edilen oranlarda olması ve fırın çıkışı sonrası havadan tekrar nem alarak yarıhidrat formuna dönüşüm hızının diğer boyut aralıklarına kıyasla görece daha düşük düzeyde olması sebebiyle, çalışma kapsamında Anhidrit III priz süresi ve basınç dayanımı test örneklerinin hazırlanmasında 0.75-1.0 mm boyut aralığındaki AJ örneğinin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Anhidrit III Tane Boyutunun Priz Süresine Etkisi

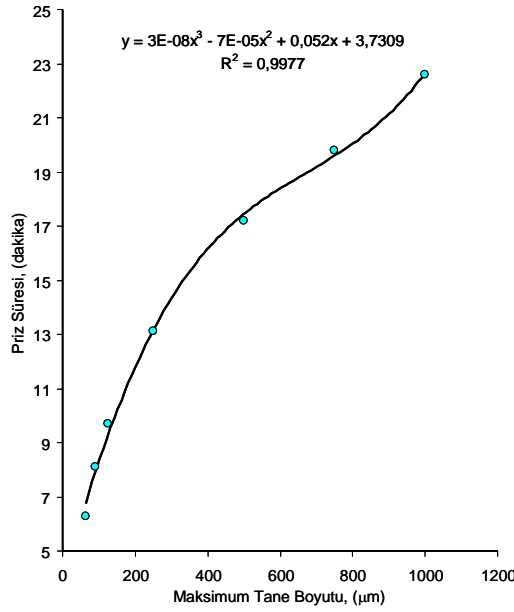
Priz süresi tayini amacıyla 0.75 – 1.0 mm boyut aralığında 200°C'de ısıtma işlemi tabii tutularak Anhidrit III formuna dönüşümü sağlanmış ve fırın çıkışı ürün bekletmeksizin laboratuvar ortamında bir desikatör içerisine alınarak havadan nem alması engellenerek ortalama 48 saat süreyle soğumaya ve dinlenmeye bırakılmıştır. Daha sonra desikatörde muhafaza edilmiş Anhidrit III örneğinden deneysel çalışmanın bu aşamasında yeter miktar malzeme alınarak tekrar boyut küçültme işlemine tabii tutulmuştur. Öğütülmüş Anhidrit III örneğinin elek analizi yapılarak 1.0 mm altında boyut fraksiyonları ve bu fraksiyonlardaki malzeme miktarlarının yüzdeleri belirlenmiştir. Anhidrit III örneğinin elek analizi bulguları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Anhidrit Alçının Elek Analizi

Tane Boyutu Aralığı (µm)	Ağırlık Oranı* (%)
<63	27,83
63-90	23,41
90-125	18,48
125-250	13,33
250-500	11,03
500-750	4,58
750-1000	1,34

*200°C'de kavrulmuş olan 0.75-1.0 mm boyutlu Anhidrit III'ün kırıldıktan sonraki ağırlık oranı değerleri

Anhidrit III örneği kırıldıktan sonra oluşan malzeme oranları bağlamında ince tane boyutlarında ağırlık kazandığı ve özellikle <63 µm ile 63-90 µm boyut aralıklarının daha etkin olduğu belirlenmiştir. Bu elek analizinde yer alan 7 ayrı boyut aralığında her bir Anhidrit III'den örnekler alınarak kıvamı tüm karışımlarda eşdeğer olacak bir formda 7 ayrı anhidrit harç karışımları oluşturulmuştur. Eşdeğer kıvam elde etmek amacıyla, anhidrit harç karışımlarında karma suyu/ Anhidrit III miktarına oranı 0.32 olarak sabit tutulmuştur. Bu karma suyu oranının altındaki su miktarlarında karışım kıvamının kısmen kuru kaldığı ve Anhidrit III tanelerinde topaklanmaların olduğu görülmüş ve harcın işlenebilirliği düşmüştür. Daha yüksek oranda su kullanımında ise harç kıvamı çok akıcı olmuş, priz süreleri uzamış ve daha zayıf karakterde örnekler elde edilmiştir. Hazırlanan 7 ayrı anhidrit harç karışımları, karma suyu sonrasında 2 dakika süreyle hızla karıştırılmış ve bekletmeksizin Vicat konisi düzeneği kalıpları içerisine yerleştirilmiştir. Vicat konisi yöntemi kullanılarak tüm boyut aralıklarında hazırlanmış Anhidrit III harcı karışımlarının priz süreleri ölçülmüştür. Bu yöntemde priz alma işlemi devam ederken konik batma iğnesinin (koninin) alçı/su hamuruna batma derinliği tayin edilir. Bu yöntem, priz başlangıç süresinin tayini için kullanılır (TS EN, 2007; TS EN, 2009). Deneysel çalışmada elde edilen bulgular karışımdaki Anhidrit III maksimum tane boyutu bağlamında Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Anhidrit III Örneklerinin Tane Boyutu – Priz Süresi İlişkisi

Anhidrit III harcı örneklerinde anhidritin maksimum tane boyutu arttıkça priz süresi de artmıştır. 63 µm boyut altındaki Anhidrit III ile oluşturan anhidrit harcı örneğinin ortalama priz süresi 6.3 dakika iken, 750-1000 µm aralığındaki Anhidrit III ile oluşturan harç örneğinin ortalama priz süresi ise 22.6 dakikadır. Diğer bir deyişle tane boyutu büyümesiyle birlikte priz süresi yaklaşık 3.6 kat artmıştır. Anhidrit III boyutu azaldıkça (daha ince taneli form), anhidrit harcında yer alan tanelerin sayısının artmasına paralel olarak tanelerin toplam yüzey alanının artması, karma suyu ile daha fazla yüzey alanında temasın sağlanması ve buna bağlı olarak daha hızlı reaksiyon gelişmesini sağlamıştır. Bu durum da harcın daha kısa sürede sertleşmesini mümkün kılmıştır. Tane boyutu büyüdükçe bu davranış daha geciken bir sürede gerçekleşmiştir. Tüm anhidrit harcı karışımlarının ortalama 5 saat sürede tamamıyla sertleşmesini tamamlayarak normal ortam koşullarında matris yüzeylerinde kuruma oluşturarak mukavemet kazandığı belirlenmiştir.

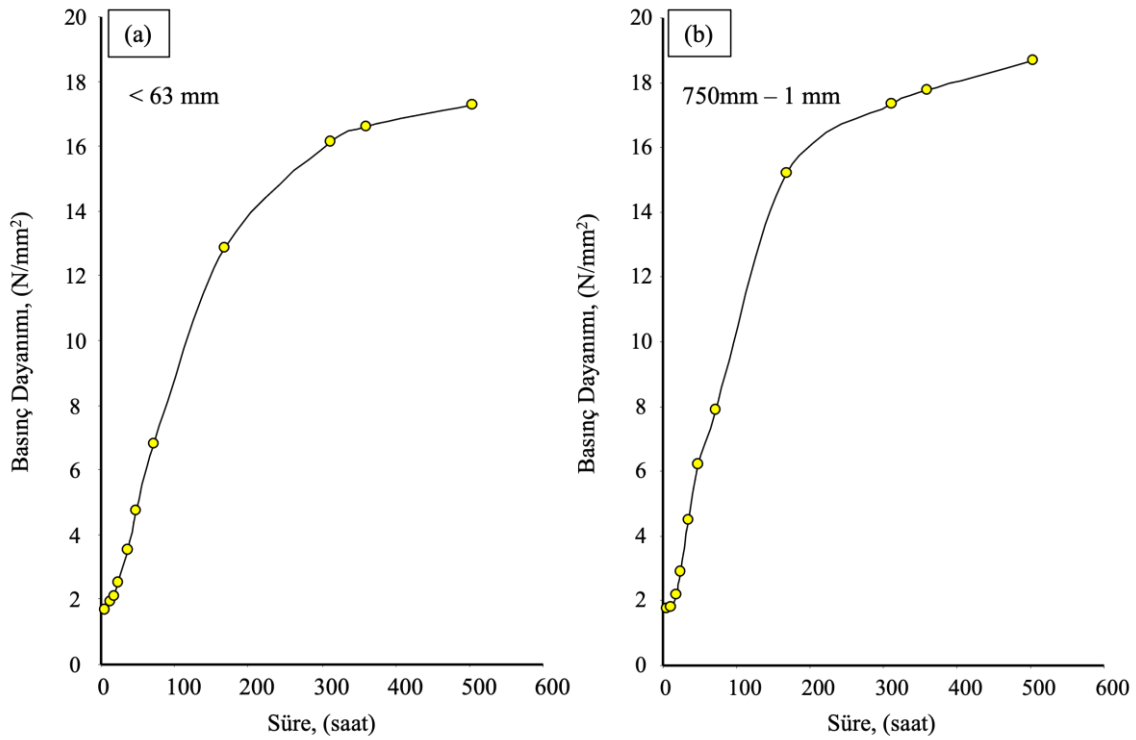
Anhidrit III Tane Boyutunun Basınç Dayanımına Etkisi

1000 µm tane boyutu altında oluşturulan 7 ayrı boyut aralığındaki her bir Anhidrit III malzemeden karma suyu/Anhidrit III miktarına oranı 0.32 olan anhidrit harç karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlar sabit karma suyu sonrasında 2 dakika süreyle hızla karıştırılmış ve bekletmeksizin 50x50x50 mm³ boyutlu küp kalıplara dökümleri yapılarak dayanım testleri için örnekler hazırlanmıştır. Her bir boyut aralığındaki Anhidrit III ile yapılan karışımlardan 44'er adet küp örnek dökümü yapılmıştır. Döküm işlemi sonrası karışımların priz alma kabiliyetleri gözlemlenmiş olup, ilk 5 dakika süre sonra 4'er adet örnek kalıplardan çıkartılarak basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Sonrasında, sırasıyla 12, 18, 24, 36, 48, 72, 168, 312, 360 ve 504'üncü dakikalarda her bir boyut aralığına ait 4'er adet örnek kalıplardan çıkartılarak basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen dayanım bulguları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Anhidrit III Harcının Süre ve Tane Boyutuna Bağlı Ortalama Basınç Dayanım Analizi

Süre (dk)	Ortalama Basınç Dayanım Analizi						
	<63 µm (MPa)	63-90 µm (MPa)	90-125 µm (MPa)	125-250 µm (MPa)	250-500 µm (MPa)	500-750 µm (MPa)	750-1000 µm (MPa)
5	1,70	1,75	1,81	1,93	1,77	1,84	1,76
12	1,93	1,78	1,85	1,99	1,91	1,97	1,82
18	2,12	2,18	2,37	2,56	2,74	2,83	2,19
24	2,54	2,95	3,04	3,29	3,46	3,61	2,88
36	3,51	3,62	3,76	4,07	4,36	4,52	4,48
48	4,74	4,98	5,44	5,75	6,17	6,28	6,22
72	6,82	6,98	7,14	7,45	7,83	7,89	7,91
168	12,86	13,11	13,56	14,17	14,91	15,11	15,23
312	16,14	16,53	16,97	17,73	18,55	17,21	17,34
360	16,61	16,96	17,33	18,18	18,88	18,62	17,79
504	17,27	17,64	18,08	18,91	19,16	19,29	18,68

Tüm boyut aralıklarındaki Anhidrit III harcı örnekleri artan süreyle birlikte dayanım kazanmıştır. Ancak, tane boyutuna göre harcin dayanım kazanma hızı eşdeğer olmayıp, Anhidrit III tane boyutu düştükçe dayanım kazanma hızının azaldığı, maksimum tane boyutu artığında da dayanım kazanma hızı süresinin düştüğü veya kısaldığı görülmüştür. İlk 5 dakikalık süre sonunda tane boyutuna bağlı basınç dayanımları 1.70 N/mm^2 ile 1.93 N/mm^2 aralığında değişim göstermiştir. $125\text{-}250 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralığına kadar basınç dayanımları artmış, ancak bu boyut aralığından sonra dayanım değerleri düşmüştür. Çalışma kapsamında ilk 5 dakika süre sonunda kazanılan dayanım değerleri baz alınarak, her bir boyut için artan sürelerdeki kazanılan dayanım bu baz dayanım değerine olan oranı “dayanım oranı” adlandırılmasıyla bir kriter olarak tanımlanmış olup, değerlendirmeler bu kritere göre irdelenmiştir. $63 \text{ }\mu\text{m}$ boyut altındaki Anhidrit III harcının dayanım oranı 5 saat süreden 504’üncü saate kadar 10.16 kat artmıştır. Bu süreçte özellikle 312’nci saate kadar dayanım oranı artış hızı diğer boyut aralıklarına göre göreceli olarak daha düşüktür. Bununla birlikte $750\text{-}1000 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralığında ise 168’inci saate kadar dayanım oranı artış hızı diğer boyut aralıklarına göre göreceli olarak daha yüksektir. Bu sürelerden sonra anhidrit harcının dayanım kazanma gelişimi durağan bir eğilim izleyerek sabit bir dayanım değerine doğru gelişim göstermiştir. $63 \text{ }\mu\text{m}$ boyut altı ve $750\text{-}1000 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralıkları için örneklerin basınç dayanım gelişimi (dayanım kazanması) grafiksel olarak Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. a. <63 µm Boyut Aralığı İçin **b.** 750-1000 µm Boyut Aralığı İçin 63 µm Boyut Altı ve 750-1000 µm Boyut Aralıkları İçin Örneklerin Basınç Dayanım Gelişimi.

Yapılan analizlerde en yüksek dayanım oranı 10.82’lik değerle $250\text{-}500 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralığında 504’üncü saat (21. gün)’de görülmüştür. Ayrıca $250\text{-}500 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralığından daha düşük boyutlara sahip anhidrit harç örneklerinin süreye bağlı basınç dayanım oranları daha iri boyutlara kıyasla daha düşüktür. İlerleyen zamanlarda ince boyutlu anhidrit harç örneklerinin kazanmış olduğu dayanım, eşdeğer zamanlarda daha iri boyutlu anhidrit harç örneklerinin dayanımından daha düşük seviyelerdedir. Bu çalışma bulguları, maksimum tane boyutu $500 \text{ }\mu\text{m}$ ’nin üzerinde olan Anhidrit III harcı karışımlarında 72 saat (3 gün) sonra 7.5 N/mm^2 ’lik dayanıma ulaşabilmekte, tüm boyut aralıkları ile oluşturulmuş Anhidrit III harcı karışımlarının ise 168 saat (7 gün) sonra ise 10 N/mm^2 ’nin üzerinde basınç dayanımlarına ulaşabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte 21. günden sonra, karışım bileşimi $250\text{-}750 \text{ }\mu\text{m}$ boyut aralığındaki Anhidrit III ile tasarımılandırılan anhidrit harçlarının 20 N/mm^2 ’lik taşıyıcı özellikte mukavemet değerleri sağlayabilme potansiyeli olduğu öngörülebilmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, anhidrit alçı üretimi ve bu alçı ürünü kullanılarak tasarlanmış anhidrit harcı örneklerinin bazı özelliklerini incelenmiş ve anhidrit alçı ürünü özelliklerine etken teknik faktörler belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre;

1. Jips ısıtma etkisiyle tamamen kristal suyunu kaybettiğinde ağırlık kaybı maksimum %20.93 seviyesinde olmaktadır.
2. Çalışma kapsamında özellikle 0.75-1 mm boyut aralığındaki AJ örneklerinin anhidrit alçı için dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerinin 200°C olduğu belirlenmiş olup, bu sıcaklıkta elde edilen AJ örneğinin yeni formu Anhidrit III olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte diğer tane boyut aralıkları için yapılan değerlendirmelerde Anhidrit III elde edilmesi için gerekli dehidratasyon ve kalsinasyon sıcaklık değerinin sırasıyla <0.5 mm boyutu için 255°C, 0.5-0.75 mm boyutu için 240 °C, 1-2 mm boyutu için 220 °C, 2-4 mm boyutu için 220 °C, 4-8 mm boyutu için 220 °C, 8-16 mm boyutu için 240 °C ve >16 mm boyutu için ise 240 °C olarak belirlenmiştir.
3. Çalışma kapsamında ağırlık kaybı oranları dikkate alındığında dehidratasyon ve kalsinasyon işlemi bağlamında en etkin tane boyut aralığının 0.75-1 mm aralığı olduğu görülmüştür.
4. Etüvden çıkan kristal suyunu tamamen kaybetmiş alçıların havadan nem alarak tekrar ağırlıklarında artış olduğu tespit edilmiştir. AJ örneklerinin tane boyutu düştükçe yaklaşık 36 sürede denge durumuna geldiği ve ısıtma işlem sırasında kaybettikleri kristal suyunun yaklaşık %30 civarındaki kısmını serbest ortadaki havanın nemini bünyesine alarak tekrar kazandığı görülmüştür. Tane boyutu irileştikçe hem süre uzamış hem de tekrar su kazanım oranı bir miktar azalmıştır.
5. Anhidrit III harcı örneklerinde anhidritin maksimum tane boyutu arttıkça priz süresi de artmıştır. 63 µm boyut altındaki Anhidrit III ile oluşturan anhidrit harcı örneğinin ortalama priz süresi 6.3 dakika iken, 750-1000 µm aralığındaki Anhidrit III ile oluşturan harç örneğinin ortalama priz süresi ise 22.6 dakikadır. En yüksek basınç dayanımı 19.29 MPa ile 21. günde ve 500-750 µm aralığında öğütülen anhidrit III örneklerinden elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Ameeri, A. S. (2014). Effect of Elevated Temperature on Some Properties of Technical Gypsum Reinforced by Cellulose Fiber. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 5(4), 10-27.
- Aljubouri Z.A. & Al-Rawas, A. M. (2009). Physical Properties and Compressive Strength of the Technical Plaster and Local Juss. *Iraqi Journal of Earth Sciences*, 9(2), 49-58.
- Al-Qaisi W. (2004). Some of the effect of Chemical Additives on the Setting Time for Iraqi Technical Gypsum. *Journal of Engineering and Development*, 23(1), 25-32.
- Al-Ridha, S. D., Abbood, A. A. & Hussein, H. H. (2015). Improvement of gypsum properties using SF additive. *International Journal of Science and Research*, 6(8), 504-509.
- Anonim. (2022a). Gypsum Products and Properties as A Building Material for Construction. <https://theconstructor.org/building/gypsum-products-properties-building-construction/14949/> (Erişim Tarihi: 04.12.2022).
- Anonim. (2022b). Lecture Notes, Chemistry of Gypsum & Lime. https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2020_07_26!01_51_37_PM.pdf (Erişim Tarihi: 04.12.2022).
- Fisher, K., Rikhert, K., Burianov, A. & Strokova, V. (2016). Recrystallization of Gypsum Particles. *International Journal of Environmental & Science Education*, 11(18), 12361-12366.
- Guan, B., Ye, Q., Wu, Z., Lou, W. & Yang, L. (2010) Analysis of the relationship between particle size distribution of α-calcium sulfate hemihydrate and compressive strength of set plaster—Using grey model. *Powder Technology*, 200(3), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.02.015>
- Gürdal, E. (2010). Bir Yapı Malzemesi Olarak Alçı. *Malzeme Dergisi*, (4), 37-43.
- İstanbuluoğlu, Y. S. (1997). Alçıtaşı ve anhidrit üzerine bir çalışma. *Madencilik Dergisi*, 36(3), 13-23.
- Padevet, P., Tesárek, P. & Plachý, T. (2011). Evolution of Mechanical Properties of Gypsum in Time. *International Journal of Mechanics*, 5(1), 1-9.

Salih, M. A. & Hussein, A. A. (2018). Enhancing the compressive strength property of gypsum used in walls plastering by adding lime. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(3), pp. 58-66.

Serrano, S., Barreneche, C., Navarro, A., Haurie, L., Fernandez A. I. & Cabeza L. F. (2015). Study of fresh and hardening process properties of gypsum with three different PCM inclusion methods. *Materials*, 8(10), 6589-6596. <https://doi.org/10.3390/ma8105324>

Thoeny, Z. A. R. (2020). The Effect of Particle Size Distribution on some Properties of Gypsum. *Key Engineering Materials*, 857, 145-152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.145>

TS EN 13279-1. (2009). Yapı ve Sıva Alçıları- Bölüm 1: Tarifler ve Gerekler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s20.

TS EN 13279-2. (2007). Yapı ve Sıva Alçıları- Bölüm 2: Deney Yöntemleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s15.

TS EN 13820. (2004). Yalıtım mamülleri - Binalarda kullanılan - Organik muhteva tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, s11.

Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. & De Korte, A. C. J. (2009, September). Gypsum hydration: a theoretical and experimental study. In 17th Internationale Baustofftagung, 23-26 Eylül 2009, Weimar, Almanya.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.12.2022
Kabul Tarihi : 20.03.2023

Received Date : 14.12.2022
Accepted Date : 20.03.2023

KOCASEYİT POLİMETALİK Cu-As-Ni-Pb DAMAR TİPİ CEVHERLEŞMENİN JEOKİMYASAL VE MİNERALOJİK İNCELENMESİ, HAVRAN (BALIKESİR), KB TÜRKİYE

GEOCHEMICAL AND MINERALOGICAL INVESTIGATION OF KOCASEYİT POLYMETALLIC Cu-As-Ni-Pb VEIN-TYPE MINERALIZATION, HAVRAN (BALIKESİR), NW TÜRKİYE

Demet Kiran YILDIRIM¹ (<https://orcid.org/0000-0001-5995-5723>)

Amr ABDELNASSER^{1,2} (<https://orcid.org/0000-0001-5994-7088>)

Mustafa KUMRAL¹ (<https://orcid.org/0000-0001-7827-8721>)

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Benha Üniversitesi, Fen Fakültesi, Jeoloji Bölümü, Benha, Mısır

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Demet Kiran YILDIRIM, kirand@itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin kuzeybatısındaki Kocaseyit bölgesindeki (Balıkesir-Havran ilçesi) polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi mineralizasyonunun kökenini daha iyi anlamaktır. Bu, mineralizasyonun ve ilişkili olduğu hidrotermal alterasyon türlerinin mineralojik, petrolojik ve jeokimyasal özelliklerinin incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kocaseyit bölgesi, Üst Paleozoik yaşlı Kalabak Formasyonu, Jura yaşlı Bayırköy ve Bilecik Formasyonları ile Oligosen-Miyosen yaşlı Düztarla granitoyitleri tarafından kesilen Paleosen-Eosen yaşlı Bağburun Formasyonundan oluşmaktadır. Düztarla granitoyitleri ile dokanaktaki Balya Formasyonu'ndaki (arkozik kumtaşları) KD-GB fay zonu boyunca lokalize olan polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi cevherleşme göstermektedir. Cevherleşme ile ilişkili olarak az miktarda karbonatlaşma ve kloritleşme ile birlikte yoğun serisitleşme, kaolinleşme ve piritleşme, çalışma alanında gözlenen baskın alterasyon tipleridir. Çalışma alanında üç cevherleşme fazı belirlenmiştir. Magmatik-hidrotermal fazda, pentlandit, pirit ve bazı arsenopirit minerallerinin olduğu gözlenmektedir. Hidrotermal fazda, pirit, arsenopirit, kalkopirit ve sfalerit mineralleri oluşmuştur. Süpergen faz döneminde ise kalkopirit ve piritten sonra sırasıyla malakit, kovellit ve götit oluşumları belirlenmiştir. Granitoid kayaçlar, kalk-alkali metaalumina I-tipi granitlere özgü özellikler sergilemektedir. Granodiyorit örnekleri granodiyorit, monzonit ve kuvars-monzonit, granit örnekleri ise granit olarak sınıflandırılmış, manyetit serileri ile uyumlu ve geç orojenik ortamda oluşmuşlardır. Alterasyona uğramış kayaçların jeokimyasal özellikleri, bunların Mn-karbonat-serisit-klorit alterasyonu ile birlikte serisit-pirit-klorit alterasyonundan güçlü bir şekilde etkilendiklerini ortaya koymuştur. Alterasyon indeksi ve K₂O indeksinin Hafif nadir toprak elementleri (HNTE) ve Ağır nadir toprak elementleri (ANTE) ile korelasyonlarına göre ya HNTE'lerin hidrotermal çözeltilerden kayalara taşınabildiğini ya da HNTE'lerinin kayalarda zenginleştiğini göstermektedir. MgO indeksinin HNTE ve ANTE arasındaki ilişkiye göre, serisitleşme (K bakımından zengin) oluşumunun kloritleşme oluşumundan daha yaygın ve yoğun bir şekilde meydana geldiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi cevherleşmeler, mineraloji, jeokimya, Kocaseyit (Balıkesir), Türkiye

ABSTRACT

This study aims to provide a better understanding of the genesis of the polymetallic Cu-As-Ni-Pb vein-type mineralization in the Kocaseyit area (Balıkesir-Havran district), NW Turkey. This is accomplished by examining the mineralogical, petrological, and geochemical properties of this mineralization and the associated hydrothermal alteration types. The Kocaseyit area is made up of Upper Paleozoic Kalabak Formation, Jurassic Bayırköy, Bilecik

ToCite: YILDIRIM, D.K., ABDELNASSER, A., & KUMRAL, M., (2023). Kocaseyit polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi cevherleşmenin jeokimyasal ve mineralojik incelenmesi, Havran (Balıkesir), KB Türkiye. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 489-505.

Formations, and Paleocene-Eocene Bağburun Formation that were intruded by Oligocene-Miocene Düztarla Pluton. The polymetallic Cu-As-Ni-Pb vein-type mineralization was occurred along the NE-SW fault zone at the arkosic sandstone in contact with the Düztarla granitoids. Intense sericitization, kaolinization, and pyritization are the predominant alteration types associated with mineralization with subordinate carbonatization and chloritization. Three main phases of mineralization are observed in Kocaseyit area. (1) the magmatic-hydrothermal phase has pentlandite, pyrite, and some arsenopyrite minerals. (2) The hydrothermal phase exhibits pyrite, arsenopyrite, chalcopyrite, and sphalerite minerals. In the supergene phase (3), malachite, covellite, and goethite were formed after chalcopyrite and pyrite, respectively. The granitoid rocks exhibit typical calc-alkaline metaluminous I-type granites. They were classified as granodiorite, monzonite, and quartz-monzonite for the granodiorite samples and as granite for the granite samples, matched with magnetite series, and were formed in a late-orogenic environment. The geochemical features of the altered rocks revealed that they are strongly affected by the sericite-pyrite-chlorite alteration with subordinate Mn-carbonate-sericite-chlorite alteration. The behavior of rare earth elements (REE) during alteration and mineralization processes reveals the correlations of alteration index and K₂O index with Light rare earth elements (LREE) and Heavy rare earth elements (HREE) show that either LREEs were preferentially added to the rocks from hydrothermal solution, or LREEs were not leached from the rocks. Based on the relationship of MgO index between HREE and LREE, the sericitization (K-rich) formation occurs more widely and intensely than chlorite formation.

Keywords: Polymetallic Cu-As-Ni-Pb vein type mineralization, mineralogy, geochemistry, Kocaseyit (Balıkesir), Turkey

GİRİŞ

Tetis-Avrasya metalojenik kuşağının (TEMB; Janković, 1997, Mao vd., 2014) (Şekil 1a) bir parçası olarak kabul edilen Batı Anadolu, porfiri (bakır-altın ve bakır-molibden), düşük ve yüksek sülfidasyonlu epitermal (altın ve altın-gümüş), mezotermal (kurşun, çinko, bakır) ve skarn (demir-bakır, kurşun-çinko) tipi çeşitli maden yataklarına ev sahipliği yapmaktadır (Yiğit, 2009) (Şekil 1b). Bu oluşumların çoğu (yüksek ve düşük sülfidasyonlu epitermal cevherleşmeler dahil) coğrafi olarak Eosen'den Pliyosen'e kadar magmatik aktivitenin hüküm sürdüğü Biga Yarımadası'nda (özellikle Çanakkale ve Balıkesir civarında) yer almaktadır. Orta Eosen'den Geç Miyosen-Pliyosen'e kadar, Batı Anadolu'daki cevherleşme olayları, epizonal magmatizma ile zamansal ve mekansal ilişkiye sahiptir (Kuşçu vd., 2011).

Batı Anadolu'daki magmatik ve hidrotermal olayların tektonik konumu ve jeokronolojisi üzerine yapılan son çalışmalar, magmatizmanın Vardar-İzmir-Ankara okyanusunun kapanması sonrasında geliştiğini göstermektedir (Yiğit, 2009, 2012). Okyanusun kapanması sonrasında oluşan yaygın genişleme rejimi; geniş alanlarda gözlemlenen, ve kimyaları yüksek potasyumlu kalk-alkalenden ultrapotasiğe kadar değişen intürezif kayaçlar ve bunların yüzey eşleniklerinin geliştiği yoğun bir magmatizmaya neden olmuştur (Altunkaynak vd, 2012; Ersoy vd., 2012). Bu magmatizma Kuzeybatı Anadolu'da yoğun hidrotermal proseslerin gelişimini sağlamıştır (Yiğit, 2006; Kuşçu, 2019, Akıska vd., 2013; Kumral vd., 2022). Özellikle önemli cevherleşmelerin oluşumuna neden olan Düztarla, Ilıca-Şamlı, Kozak ve bunun gibi granitoid oluşumlarının oluşturduğu cevherleşmeler bu bölgede bulunmaktadır. Çalışma alanı ve civarında benzer granitoidlere bağlı olarak gelişen birçok cevherleşme türü görülmektedir (Şekil 1a ve b).

Biga Yarımadası'nda yer alan çalışma alanı, jeotektonik olarak Pontidler tektonik birliğinin Sakarya Zonundadır (Okay vd., 1990). Sakarya Zonu'nda amfibollü gnays, metaofiyolitler ve kuvarso-feldispatik gnayslardan oluşan Kazdağı Metamorfikleri (Gözler, 1986; Duru vd., 2004), bunlarla tektonik dokanaklı, alt seviyelerde epiklastik, üst seviyeler piroklastik kökenli litolojilerin metamorfizmasından oluşan Kalabak birimi yer almaktadır. Bu birim metagranodiyoritler tarafından kesilmektedir. Çalışma alanında Karakaya Kompleksi adı verilen litolojiler en yaygın kaya türleridir. Bu kaya grubu Permo-Karbonifer yaşlı kireçtaşı blokları, hafif metamorfizma geçirmiş, Alt Triyas yaşlı çakıltaşı, feldspatlı kumtaşı, kuvarsit, siltaşı, sleyt, radiolarit, çamurtaşı, metaspilit, spilitik bazalt ve diyabazlar içermektedir. Tüm bu birimleri Üst Triyas-Alt Kretase (Albiyen) yaşlı kayaçlar uyumsuz olarak örtmektedir. Metamagmatik ve metadetritik kayaçlar Oligosen-Erken Miyosen yaşlı granotoidik kayaçlar ile bunlarla eş yaşlı kalkalkalen volkanitler tarafından kesilmişlerdir.

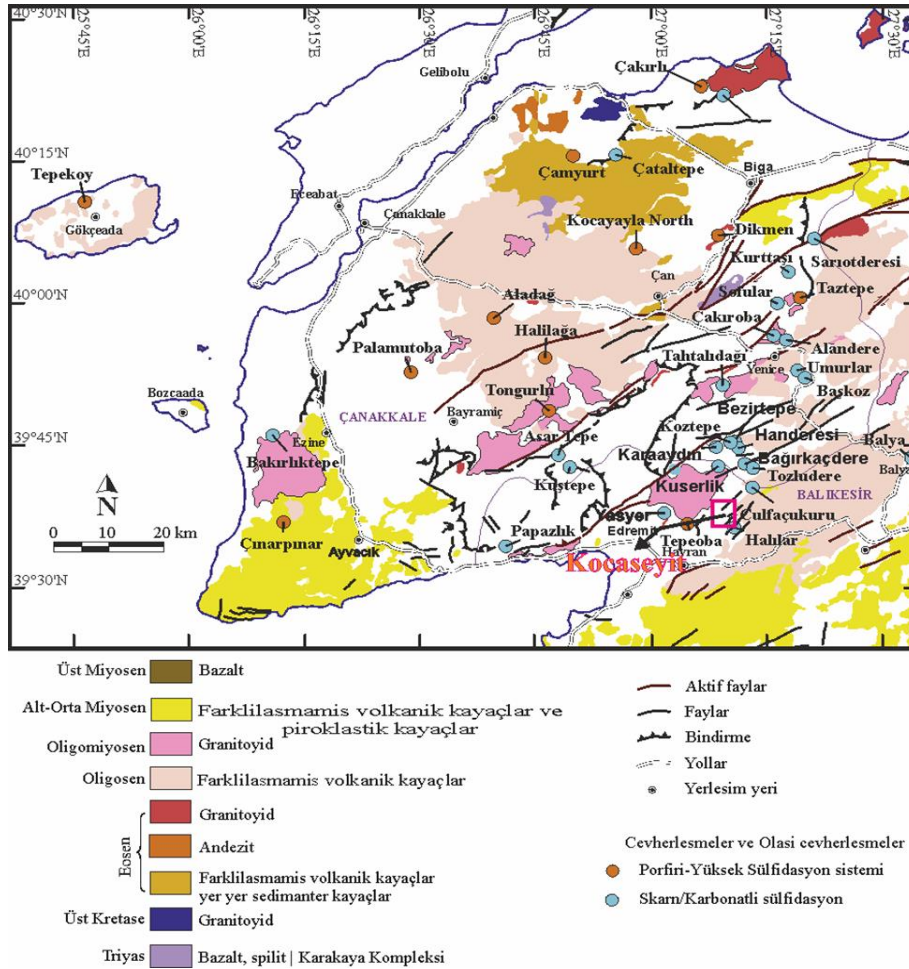
Türkiye'nin batısındaki Tetis-Avrasya metalojenik kuşağında (TAMK) porfiri, skarn ve epitermal yataklar dahil olmak üzere çok sayıda yatak tipi bulunmaktadır (Jankovic, 1977; Mao vd., 2014). Biga Yarımadası'nda (Çanakkale) oluşan bu yataklar, Eosen-Pliyosen yaşlı intrüzif ve ekstrüzif magmatizma ile ilişkilidir (Yigit, 2012) (Şekil 1). Balıkesir ilindeki Kocaseyit polimetallik cevherleşmesi, Düztarla granitoidlerinin Miyosen ekstrüzif ve Oligosen

intrüzif kayaçları ile ilişkilidir (Yigit, 2012). Kocaseyit bölgesinin yakın çevresinde oluşan Tepeoba porfiri-skarn yataklarının çoğu (Karaman vd., 2021; Abdelnasser vd., 2022) ve Halılar Cu-Pb (Zn) cevherleşmesi (Yildirim, 2022) derinlemesine incelenmiştir. Ancak Kocaseyit bölgesinde oluşan polimetalik cevherleşmenin kökeni kapsamlı bir şekilde çalışılmamıştır. Bu çalışma ile Kocaseyit mevkiinde bulunan polimetalik Cu-As-Ni-Pb cevherleşmelerinin yapısal özellikleri, mineralojik, petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri ortaya konarak kökensel açıdan değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma alanında yapılan arazi gözlemleri sonucunda toplanan 50 adet örnekten derlenen 21 adet örnek üzerinde jeokimyasal analizler gerçekleştirilmiş olup, seçilen örnekler üzerinde de mineralojik ve petrografik analizler yapılmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ/JAL) Jeokimya Araştırma Laboratuvarları'nda agat havanlı öğütme cihazı kullanılarak öğütülen tozlar üzerinde tüm kaya (ana ve iz elementler) analizleri yapılmıştır. Ana oksit analizleri, dalga boyu aralığı 0,01 ila 12 nm olan Bruker S8 Tiger X-ışını floresan (XRF) spektrometresi analiz cihazında yarı kantitatif element tayinleri elde edilmiştir.

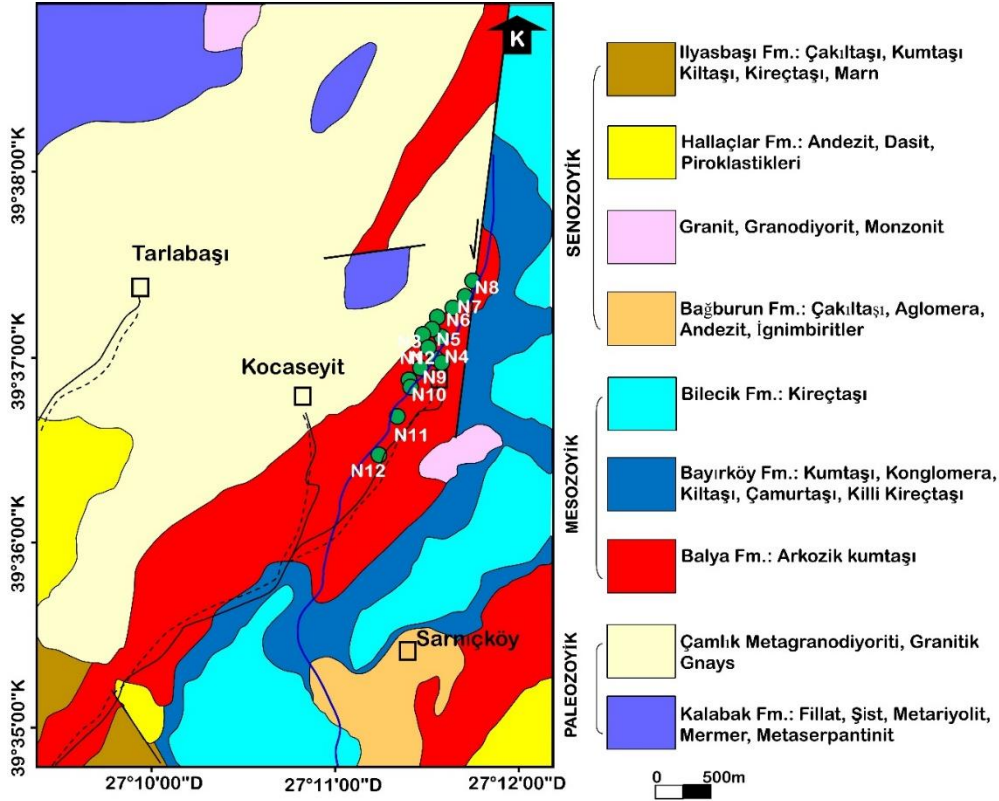
İz, nadir toprak ve Au-Pt grubu elementlerin analizleri için Perkin Elmer Elan DRC-e İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi (ICP-MS) cihazı kullanılmıştır. Yaklaşık 50 mg toz numune kullanılan iki aşamalı bir çözündürme işlemi uygulanmıştır; (1) 6 mL %37 HCl, 2 mL %65 HNO₃ ve 1 mL %38-40 HF asit karışımı, (2) 6 mL %5 borik asit solüsyonu kullanılarak 185°C'de basınç ve sıcaklık kontrollü Berghoff marka mikrodalgı fırında çözündürme işlemi yapılmıştır. Analizlerde bağıl standart sapma (RSD%) %2'yi geçmemektedir. Mineral parajenezi, mineral ilişkileri, dokusal özellikler vb. özelliklerin saptanması amacıyla örneklerden elde edilen kesitler Leica DM4500P birleşik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 1. Biga Yarımadası'nda Bulunan Plütonik, Volkanik ve Metamorfik Kayaçların (A) Basitleştirilmiş Jeoloji Haritası; (B) Çalışma Alanı'nın Yeri (Yigit, 2012'den değiştirilerek kullanılmıştır)

JEOLOJİ

Çalışma alanı, Türkiye'nin batısında Balıkesir ili Kocaseyit bölgesinde yer almaktadır. Bu çalışma alanı ve çevresinde, Üst Paleozoyik yaşlı Kalabak Formasyonu, Çamlık Metagranodiyorit, Üst Triyas yaşlı Balya Formasyonu, Jura yaşlı Bayırköy ve Bilecik Formasyonları, Paleosen-Eosen yaşlı Bağburun Formasyonu ile hepsini kesen Oligosen-Miyosen yaşlı Düztarla granitoyitleri bulunmaktadır (Şekil 2-3). Kalabak Metamorfikleri olarak adlandırılan bu birim, düşük dereceli metamorfizmadan etkilenmiş fillat ve şistlerden oluşmaktadır (Duru vd., 2012).



Şekil 2. Çalışma Alanının Jeoloji Haritası (Duru vd, 2007'den alınarak yeniden çizilmiştir).

Bu birim, bölgede ince taneli, gri-gümüş ve yeşilimsi renkli, iyi derecede foliasyonlu, fillat ve mika-kuarsışistler ile kahve-sarı renkli fillat, grafitşist, metatüf ve metavolkanitlerle tanımlanmaktadır. Bu litolojilerin alt sınırı çalışma alanının batısındaki Kalabak ve Fazlıca köyleri arasında, Çamlık metagranodiyoritleri ile tektonik dokanaklıdır. Metagranodiyoritler içerisinde Kalabak Formasyonu'nun anklavlarının olması, bu formasyon içerisinde kondağa yakın kesimlerde yer yer felsik dokuda kayaçların görülmesi, granodiyoritlerin Kalabak Formasyonu'nun içerisine sokulum yaptığının işaretidir. Bu iki farklı kaya grubunun benzer konumlu foliasyonları birlikte metamorfizma geçirdiklerini göstermektedir. Üst Paleozoyik yaşlı Çamlık Metagranodiyorit tarafından kesilen bu kayaçlar, stratigrafik olarak Üst Triyas yaşlı Balya formasyonu tarafından diskordans olarak örtülmektedir. Kalabak birimini kesen Çamlık Metagranodiyoritleri'nin yaşı zirkon yaş tayiniyle 399 ± 13 milyon yıl olarak saptanmıştır (Okay, 1996). Metagranodiyorit, granitik gnays ve metariyolitlerden oluşan ve yoğun bir alterasyona uğramış Çamlık Metagranodiyorit (Okay vd., 1990) önceki araştırmacılar tarafından kumtaşı-grovak (Bingöl vd., 1973; Krushensky vd., 1980), plütonik kompleks (Gümüş, 1964; Aslaner, 1965) olarak tanımlanmıştır. Çamlık Metagranodiyoritleri'nin yaşı, zirkon yaş tayiniyle 399 ± 13 milyon yıl olarak saptanmıştır (Okay, 1996). Alt Jura yaşlı Bayırköy Formasyonu (Altınlı, 1973), genel olarak sarı-kırmızı renkli konglomera, sarımsı-kahve renkli kumtaşı, siltaşı, ve killi kireçtaşıdan oluşmaktadır. Balya Formasyonu üzerinde geçişli ve devami şeklinde gözlenmektedir.

Bayırköy Formasyonu'nun üst sınırı ise keskin bir dokanakla ve/veya paralel bir uyumsuzlukla Bilecik Formasyonu tarafından örtülmektedir. Üst Oligosen yaşlı andezitik lav, ignimbirit, aglomera ve az oranda volkaniklastiklerden oluşan Bağburun Formasyonu, bu birimleri uyumsuz olarak örtmektedir. Oligo-Miyosen yaşlı granodiyorit ve silileşmiş porfiritik mikrogranitten oluşan Düztarla granitoyitleri, bu birimleri kesmektedir.

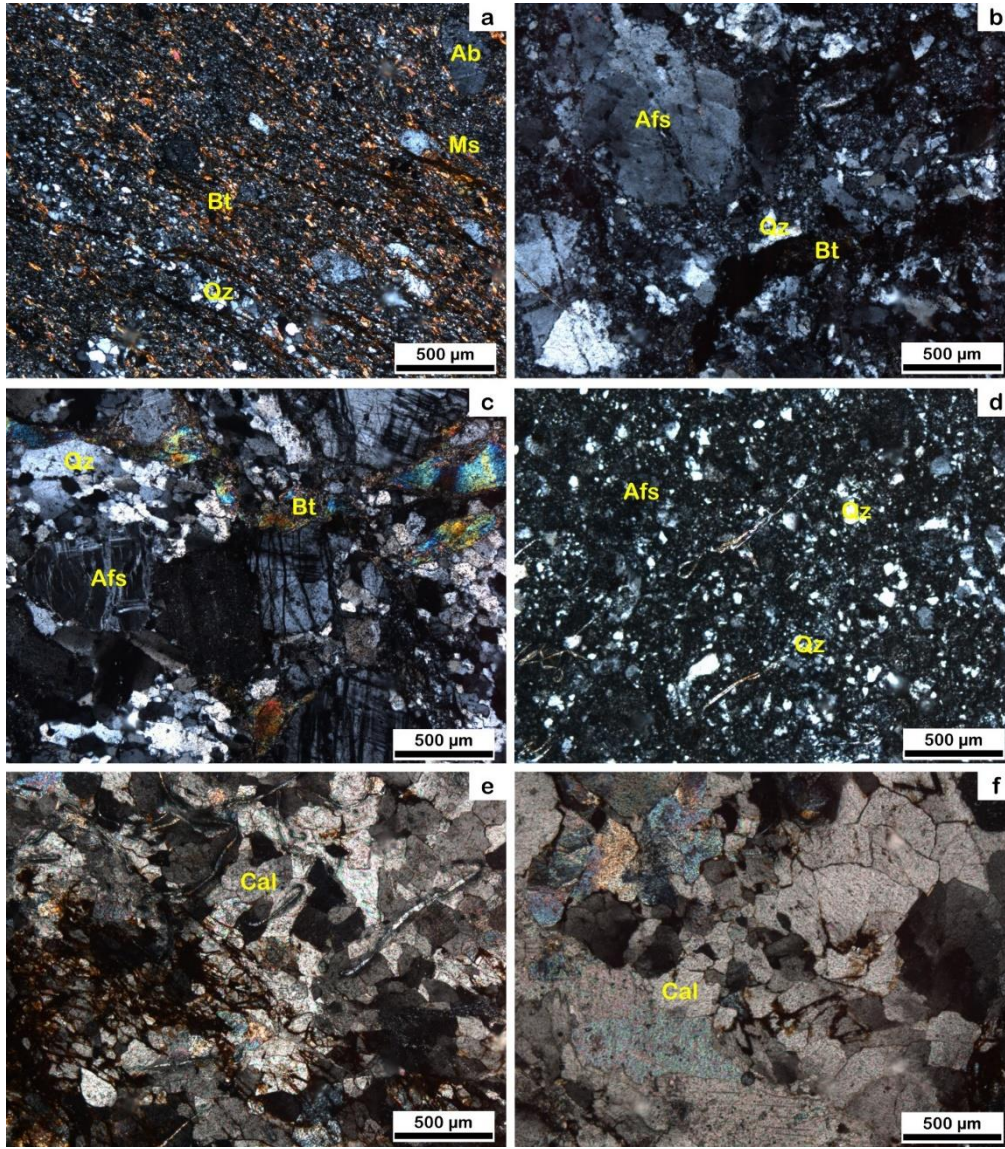
SİSTEM	SERİ	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZOYİK	PALEOJEN-NEOJEN		İlyasbaşı Fm.: Çakıtaşı, Kumtaşı, Kilitaşı, Kireçtaşı, Marn
			Hallaçlar Fm.: Andezit, Dasit, Piroklastik Düztarla Granitoyid Bağburun Fm.: Aglomera, Andezit, İgnimbirit Uyumsuzluk
MESOZOYİK	TRİYAS-JURA		Bilecik Fm.: Kireçtaşı
			Bayırköy Fm.: Konglomera, Kumtaşı, Kilitaşı, Çamurtaşı, Balya Fm.: Arkozik kumtaşı Uyumsuzluk
PALEOZOYİK	ÜST PALEOZOYİK		Çamlık Metagranodiyorit, Granitik Gnays
			Kalabak Fm.: Fillat, Şist, Metariyolit, Mermer, Metaserpantinit

Şekil 3. Çalışma Alanına Ait Stratigrafik Sütun Kesiti (Duru vd, 2007'den alınarak yeniden çizilmiştir).

BULGULAR

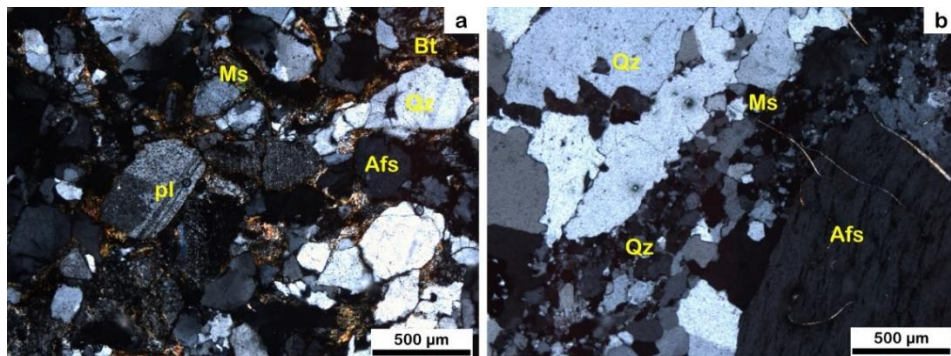
Mineralojik ve Petrografik İncelemeler

Kalabak Formasyonu, petrografik olarak farklı kayaç çeşitlerini (şist, metavolkanik ve metagranitoyid) içermektedir. Mikaşistler başlıca kuvars, biyotit, muskovit ve plajiyoklas oluşmaktadır (Şekil 4a). Biyotit minerallerinde az da olsa kloritleşme görülmektedir (Şekil 4a). Çalışma alanında metavolkanik kayaçlar, ince taneli matris içine gömülmüş kuvars, alkali feldispat ve biyotit minerallerinin fenokristallerinden oluşan porfirik dokulu metariyolitler ile temsil edilmektedir (Şekil 4b). Bu kayaçların matrisi ise; kuvars, biyotit ve az miktarda alkali feldispat ve volkanik cam içeren biyotitten oluşmaktadır (Şekil 4b). Metagranitoyid kayaçlar, metagranodiyoritler ve granitik gnayslarla temsil edilmektedir. Granitik gnayslar, hafif altere, kataklastik ve granüler dokuludur. Esas olarak kuvars, biyotit, alkali feldispat ve az miktarda plajiyoklazdan oluşmaktadır (Şekil 4c). Balya Formasyonuna ait demir oksitle çimentolanmış arkozik kumtaşları kötü boylanmalı kuvars ve serisitleşmiş, kaolinleşmiş feldispatlardan oluşmaktadır (Şekil 4d). Bu bileşenler, değiştirilmiş feldispat ve silisleşmiş ince taneli matris içine gömülü bulunmaktadır (Şekil 4d). Bilecik Formasyonuna ait kireçtaşları bazı bölgelerde yeniden kristalize bir dokuya sahiptir ve iri taneli kalsit kristalleri içermektedir (Şekil 4e-f).



Şekil 4. Çalışma Alanı'nda Yer Alan Kayaçların Optik Mikroskop Görüntüleri (a) Şist, (b) Metariyolit, (c) Granitik Gnays, (d) Arkozik kumtaşı, (e) ve (f) Kireçtaşı. Kısaltmalar: Alkali Feldspat (Afs), Albit (Ab), Biyotit (bt), Kalsit (cal), Muskovit (ms), Plajiyoklaz (pl), Kuvars (qz).

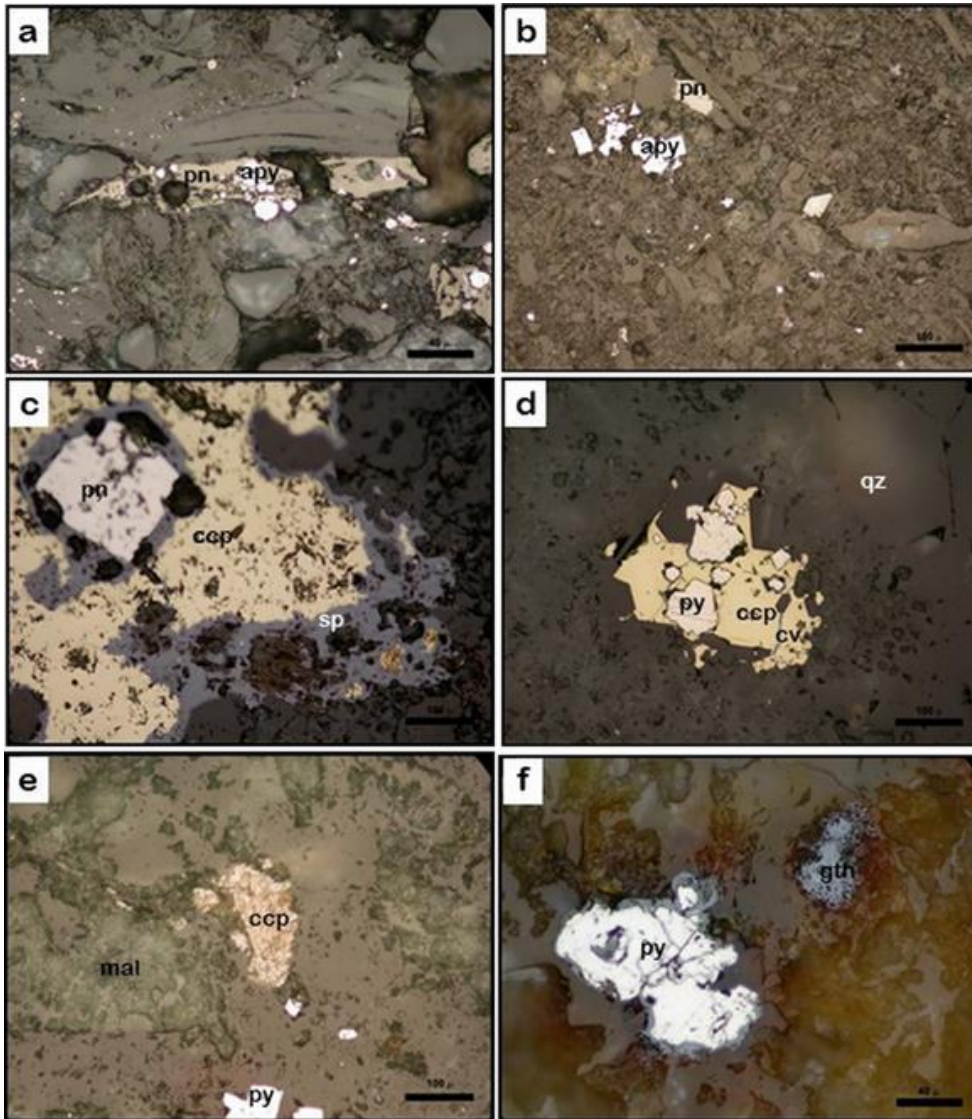
Düztarla granitoyitleri, granodiyorit ve silisleşmiş porfiritik mikrogranitten oluşmaktadır. Granodiyorit optik mikroskopta incelendiğinde içerisinde %20-25 kuvars, alkali feldispat (mikroklin) %10-15 (pertitleşme), plajiyoklaz %45-50, biyotit, muskovit ve opak mineraller görülmektedir (Şekil 5a). Silisleşmiş porfiritik mikrogranit, kuvars, K-feldspat ve muskovit oluşan bir mikrokristalin matris içine gömülü yerel mikrografik dokulara sahip kuvars ve K-feldispat fenokristallerinin küresel agregatlarından oluşmaktadır (Şekil 5b).



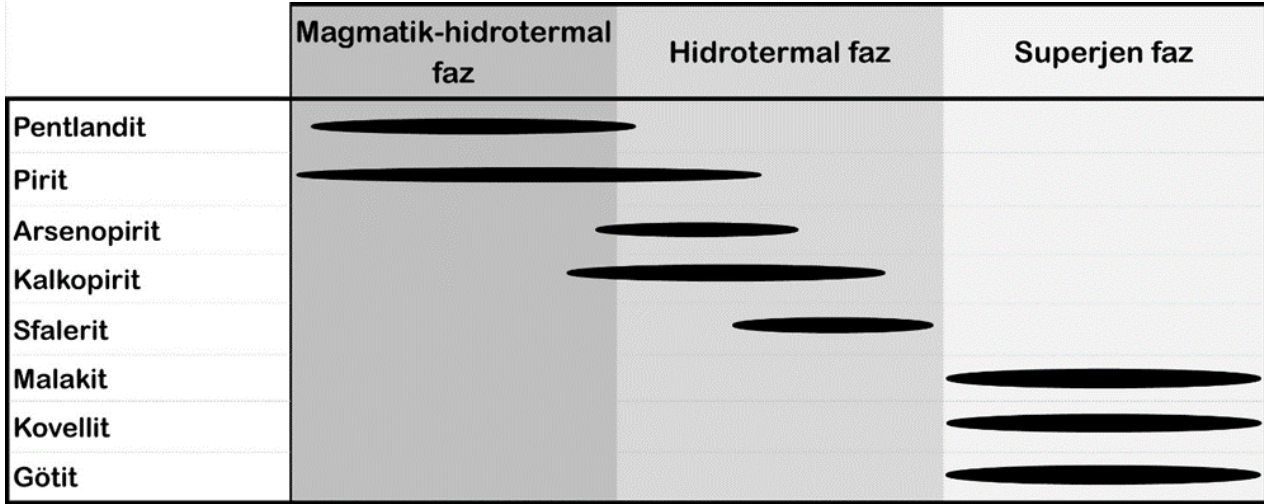
Şekil 5. Düztarla Granitoyitlerine Ait Kayaçların Optik Mikroskop Görüntüleri (a) Granodiyoriti, (b) Porfiri Granit. Kısaltmalar: Alkali Feldspat (Afs), Biyotit (bt), Manyetit (mag), Muskovit (ms), Plajiyoklaz (pl), Kuvars (qz).

Hidrotermal alterasyon ve cevher mikroskopi çalışmaları

Çalışma alanındaki Kocaseyit cevherleşmeleri, Düztarla granitoyitleri ile dokanaktaki Balya Formasyonu'ndaki (arkozik kumtaşları) KD-GB fay zonu boyunca lokalize olan polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi cevherleşme göstermektedir. Az miktarda karbonatlaşma ve kloritleşme ile birlikte yoğun serisitleşme, kaolinleşme ve piritleşme, cevherleşme ile ilişkili görülen baskın alterasyon tipleridir. Kocaseyit yöresindeki cevher mineralleri pentlandit, pirit, arsenopirit, kalkopirit ve sfalerit ile malakit, kovellit ve götit gibi süpergen mineralleri içermektedir (Şekil 6). Cevherleşmede etkin üç ayrı faz belirlenmiş olup bunlar; (1) magmatik-hidrotermal, (2) hidrotermal ve (3) süperjen fazdır (Şekil 6-7). Çalışma alanındaki cevherleşmelerde; magmatik-hidrotermal fazda pentlandit, pirit ve biraz miktar arsenopirit mineralleri gözlenmektedir (Şekil 6a-b). Hidrotermal fazda pirit, arsenopirit, kalkopirit, ve sfalerit görülmektedir (Şekil 6b). Pirit ve arsenopirit, altere kayaçlarda ve/veya kuvars damarlarında saçınımlı, soluk sarımsı renkli yarı özşekilli tanelerle karakterizedir (Şekil 6a-b). Ayrıca kalkopirit içinde kapanımlar halinde de gözlenmektedir (Şekil 6c-d). Kalkopirit, kuvars damarlarında saçınımlı sarımsı iri taneler ile karakterize edilir (Şek. 6c-d). Yer yer pirit kapanımları (Şekil 6d) ve sfaleritli dış çözünme (Şekil 6c) içermektedir. Süperjen fazda kalkopirit ve piritten sonra malakit (Şekil 6e), kovellit (Şekil 6d) ve götit (Şekil 6f) oluşmuştur.



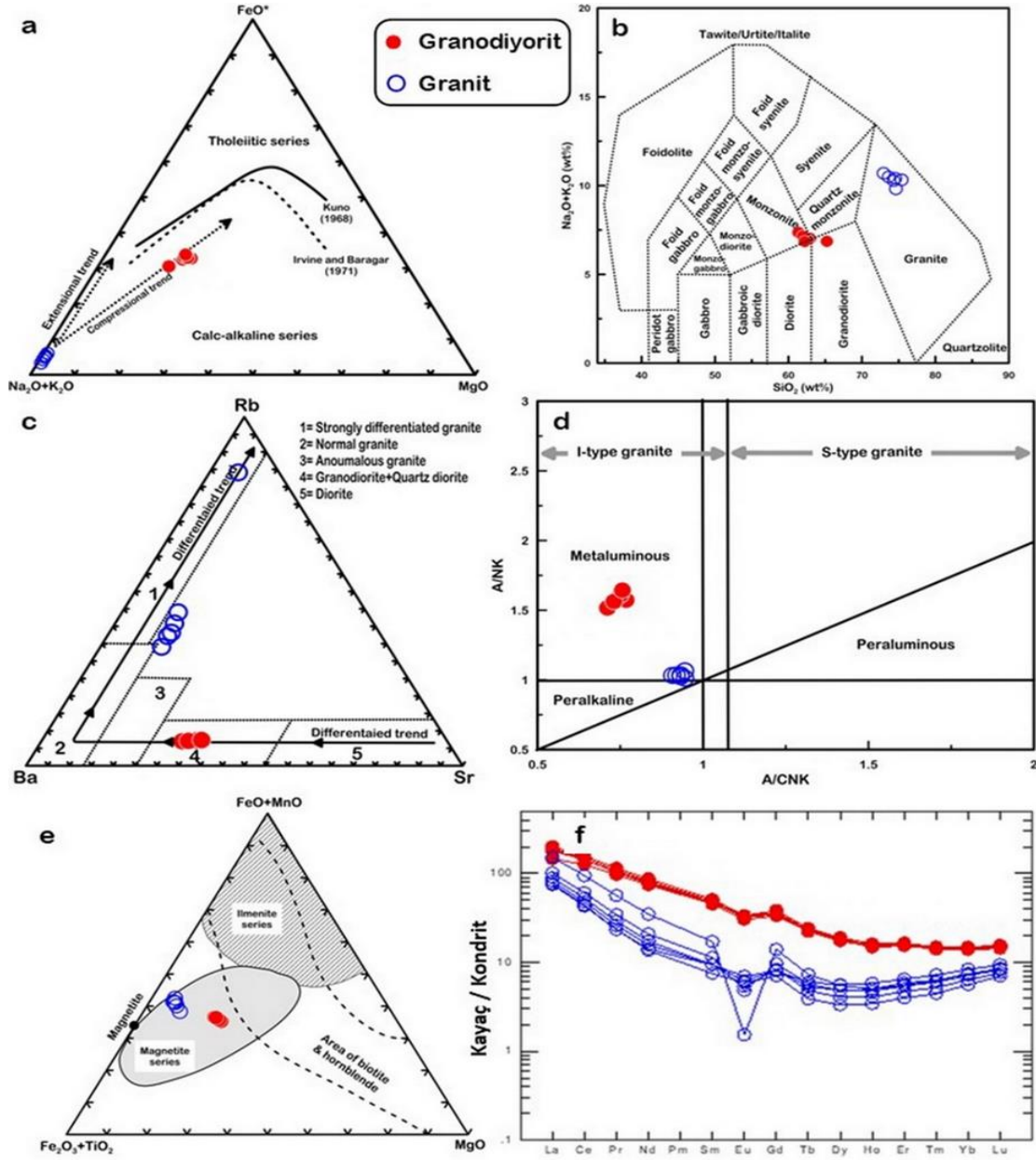
Şekil 6. Çalışma Alanında Görülen Cevher Minerallerinin Opak Mikroskop Görüntüleri. (A) Pentlandit İçerisinde Arsenopirit Mineralleri Gözlenmektedir, (B) Arsenopirit ile İlişkili Pentlandit, (C) Kalkopirit ve Sfalerit ile İlişkili Pentlandit, (D) Kalkopirit Mineralleri İçerisinde Pirit ve Kovellit Oluşumları, (E) Kalkopirit, Malakit ve Pirit Oluşumları, (F) Pirit ve Götit Oluşumları Kısaltmalar: Arsenopirit (Apy), Kalkopirit (Ccp), Götit (Gth), Malakit (Mal), Pentlandit (Pn), Pirit (Py), Kovellit (Cv), Kuvars (Qz), Manyetit (Mag), Sfalerit (Sp).



Şekil 7. Kocaseyit Köyü (Havran) ve Civarı Polimetalik Cu-As-Ni-Pb Damar Tipi Cevherleşmelerinin Genelleştirilmiş Parajenetik Dizisi.

Granit Jeokimyası

Çalışma alanı Kocaseyit bölgesindeki granitoid kayaçlarından jeokimyasal çalışmalar için (6 granodiyorit ve 6 granit) 12 numune seçilmiştir. Major oksit, iz element ve nadir toprak element bileşimlerini içeren değerler Tablo 1'de verilmiştir. Granodiyorit numuneleri için, SiO₂ (ağırlıkça %61.35-65.22), Al₂O₃ (ağırlıkça %14.54-15.08), K₂O (ağırlıkça %3.64-4.50), Na₂O (ağırlıkça %2,87-3,23) ve CaO (ağırlıkça % 5,33-5,97), MgO (ağırlıkça %2.04-3.07) ve TiO₂ (ağırlıkça %0.58-0.82) içerikleri oldukça değişkendir. Granodiyorit ile karşılaştırıldığında, granit örneklerinde daha yüksek SiO₂ (ağırlıkça %72.94-75.41), K₂O (ağırlıkça %6.39-9.41) ve daha düşük Al₂O₃ (ağırlıkça % 12.24-13.37), Na₂O (ağırlıkça %1.28-3.43) içerir. CaO (ağırlıkça %0.47-0.93), MgO (ağırlıkça %0.08-0.09 ve TiO₂ (ağırlıkça %0.08-0.10) içeriğine sahiptir.



Şekil 8. Sinorojenik ve Geç Orojenik Granitoid Kayaçların Jeokimyasal Diyagramları: (a) AFM Diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971, Petro, vd., 1979), Sıkışma ve Genişleme Eğilimleri (Kuno, 1968). (b) İncelenen Granitoid Kayaçlar için TAS Diyagramı, (Middlemost, 1985) (c) Ba-Rb-Sr Üçlü Diyagramı, (El-Bouseily, A.M. ve El-Sokkary, 1975) (d) Çalışılan Granitik Kayaçlarda Alümina Doymunluk İndeksi (ASI). Shand'dan (1927) ASI = 1, Chappell ve White'dan (1992) ASI = 1.1. (e) İncelenen Granitoidlerin Fe₂O₃+TiO₂-FeO+MnO-MgO Diyagramı, (Ishihara, 1977) (f) Kondrite Göre Normalize Edilmiş Nadir Toprak Element (NTE) Diyagramı. (Sun ve McDonough, 1989).

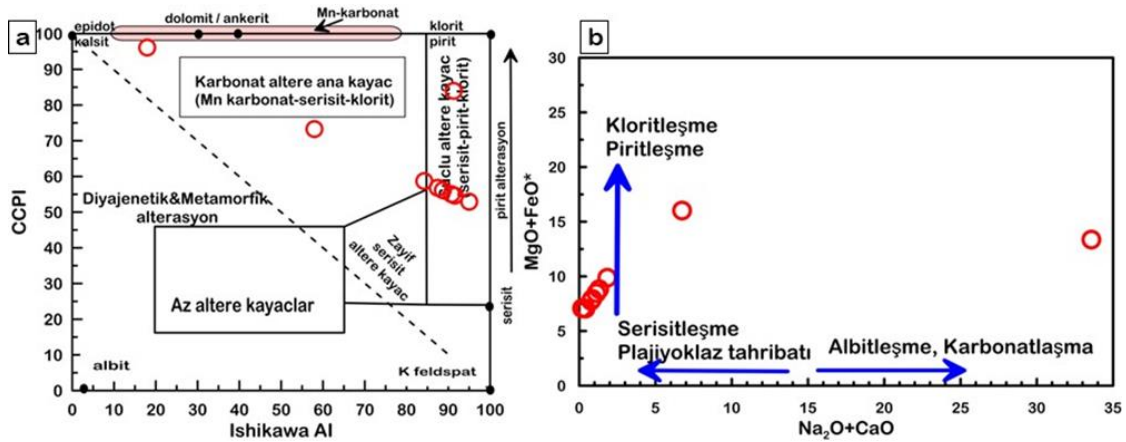
Tablo 1. Çalışma Alanındaki Kayaçların Majör Oksit (%), İz Element ve Nadir Toprak Element (ppm) Analiz Değerleri

Örnek	KS1	KS2	KS3	KS4	KS5	KS6	KS7	KS8	KS9	KS10	KS11	KS12
	Granodiyorit						Granit					
SiO ₂	62,93	65,22	62,57	61,35	61,96	62,21	74,33	72,94	73,63	75,41	74,52	74,62
Al ₂ O ₃	14,72	14,54	14,90	14,54	14,72	15,08	12,77	12,70	12,73	12,24	12,48	13,37
Fe ₂ O ₃	5,11	4,34	5,23	5,64	5,44	5,34	0,59	0,68	0,63	0,40	0,51	0,71
MgO	2,56	2,04	2,56	3,07	2,81	2,56	0,09	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09
CaO	5,74	5,33	5,83	5,97	5,90	5,92	0,76	0,93	0,84	0,47	0,66	0,87
Na ₂ O	3,07	3,23	3,10	2,87	2,98	3,12	2,11	1,28	1,69	1,61	1,65	3,43
K ₂ O	3,96	3,64	3,84	4,50	4,17	3,73	8,17	9,41	8,79	8,72	8,76	6,39
TiO ₂	0,69	0,58	0,68	0,82	0,75	0,67	0,09	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08
P ₂ O ₅	0,32	0,30	0,32	0,36	0,34	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Cr ₂ O ₃	0,08	0,00	0,17	0,00	0,08	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
LOI	0,52	0,47	0,55	0,52	0,54	0,58	0,68	1,13	0,91	0,56	0,73	0,35
İz ve Nadir Toprak Element (NTE), ppm												
Ba	1083,3	975,6	1019,6	1318,3	1168,9	956,0	306,6	404,9	355,7	481,9	418,8	32,9
Be	3,2	3,0	3,0	3,7	3,4	2,9	3,6	1,5	2,6	3,7	3,1	5,8
C	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Cd	0,7	1,2	0,5	0,6	0,6	0,4	1,0	2,0	1,5	0,7	1,1	0,4
Co	29,1	31,3	27,4	30,2	28,8	25,7	31,7	30,2	30,9	42,2	36,6	22,7
Cs	5,6	4,6	5,8	6,3	6,0	6,0	6,3	5,0	5,6	5,7	5,7	8,3
Ga	51,9	48,1	48,7	62,1	55,4	45,5	22,7	25,5	24,1	27,1	25,6	15,4
Hf	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	1,4	1,9	1,7	1,8	1,7	0,6
Li	29,5	27,9	28,2	33,9	31,0	26,9	8,6	7,5	8,1	5,3	6,7	13,1
Pd	2,5	2,1	2,5	2,6	2,6	2,6	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,1
Pt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Rb	131,6	117,2	128,5	152,2	140,3	125,4	312,5	324,5	318,5	316,7	317,6	296,1
Rh	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ru	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,3	0,1	0,2	0,0
Sb	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	1,9	3,6	2,8	1,7	2,3	0,4
Sn	2,3	2,5	2,2	2,3	2,3	2,1	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Sr	628,9	563,1	625,5	701,6	663,6	622,1	91,2	120,7	106,0	129,9	117,9	23,1
U	9,1	6,4	8,2	13,4	10,8	7,3	38,5	31,5	35,0	67,7	51,3	16,5
Zn	157,8	314,3	111,9	93,4	102,6	65,9	203,6	448,3	325,9	101,0	213,5	61,6
Se	4,9	8,9	2,9		2,9	0,9	3,0	0,6	1,8	6,8	4,3	1,7
Sc	53,4	50,3	53,4	56,7	55,0	53,3	48,8	50,9	49,8	53,0	51,4	42,6
Y	23,1	23,0	22,8	24,1	23,4	22,4	7,6	5,5	6,5	8,9	7,7	8,5
La	42,5	34,5	44,0	47,5	45,8	45,5	24,0	18,3	21,1	17,7	19,4	35,9
Ce	87,1	77,2	87,6	96,0	91,8	88,1	37,1	27,1	32,1	26,3	29,2	57,9
Pr	9,9	9,2	9,8	10,9	10,4	9,7	3,3	2,2	2,7	2,2	2,5	5,3
Nd	37,3	34,9	36,7	40,8	38,7	36,1	9,8	6,4	8,1	6,6	7,3	16,3
Sm	7,3	6,9	7,2	7,8	7,5	7,1	1,7	1,1	1,4	1,4	1,4	2,6
Eu	1,9	1,8	1,9	2,0	1,9	1,9	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1
Gd	7,3	6,9	7,2	7,9	7,6	7,1	2,0	1,4	1,7	1,6	1,7	2,9
Tb	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Dy	4,6	4,4	4,6	4,8	4,7	4,5	1,2	0,8	1,0	1,4	1,2	1,4
Ho	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Er	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6	0,9	0,7	0,8	1,1	0,9	1,0
Tm	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Yb	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,4	1,2	1,0	1,1	1,4	1,3	1,3
Lu	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Th	30,8	27,0	27,9	40,3	34,1	25,1	39,8	34,5	37,1	47,4	42,3	37,6

İncelenen granitoidler, toplam alkallerin ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) zenginleşmesinden dolayı kalk-alkali afiniteye sahiptir (Şekil 8a). Bunlar çoğunlukla, tek model magmanın ürettiği kayalardır (Petro vd., 1979) (örneğin yitim zonu ile ilgili granitler) (Şekil 8a). Plütonik kayalar için toplam alkali-silika (TAS) diyagramı (Middlemost, 1985), granodiyorit örneklerini granodiyorit, monzonit ve kuvars-monzonit olarak sınıflandırırken, granit örnekleri tutarlı bir şekilde granit alanına düşmektedir (Şekil 8b). Ayrıca, El Bouseily ve El Sokkary (1975) tarafından yapılan Rb, Ba ve Sr üçlü diyagramı, granitlerin, granodiyorit ve kuvars diyorit alanında yer alan granodiyoritlerden oldukça farklı olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 8c). Granit örnekleri ise oldukça farklılaşmış granit alanlarında çizilir (Şekil 8c). Ayrıca, I- ve S-tipi granitik kayalar, Shand'ın (1927) alümina doygunluk indeksi (ASI) değerinden (molar $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) tanınabilir. İncelenen granitoidler, I-tipi granitik sütler olarak sınıflandırılan ve bu nedenle metalümin grubu olarak gruplandırılan 1.1'den daha az A/CNK'ye sahiptir (Şekil 8d). Granitoidlerin iki serisi, $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2-\text{FeO}+\text{MnO}-\text{MgO}$ diyagramı (Ishihara, 1977) ile manyetit serisi granitoidlere (Şekil 8e) açıkça ayrılmıştır. Kondrit ile normalize edilmiş nadir toprak elementi (NTE) paterni, HNTE'nin ANTE'e göre granodiyoritler ve granitler için negatif Eu anomalileri ile zenginleştiğini ortaya koymaktadır (Şekil 8f).

Alterasyon Jeokimyası

Kocaseyit polimetalik Cu (30436.7 ppm'e kadar)-As (219.6 ppm'e kadar)-Ni (257.6 ppm'e kadar)-Pb (189.3 ppm'e kadar) damar tipi cevherleşme (Tablo 2), Düztarla granitoyitleri ile dokanaktaki Balya Formasyonu'ndaki (arkozik kumtaşları) KD-GB fay zonu boyunca az miktarda karbonat alterasyonu ile serisit-kaolinit-kuvars-pirit \pm albit alterasyon tiplerini içeren bir alterasyon zonu içerisinde oluşmuştur. Large ve diğerleri, (2001) ve Ishikawa ve diğerleri, (1976)'nın klorit-karbonat-pirit indeksinin (CCPI) alterasyon ayırtlama diyagramına dayanarak, altere örnekler serisit-pirit-klorit alterasyon tiplerine sahip kuvvetli altere kayalar alanında yer almakta olup, bazı örnekler Mn-karbonat-serisit-klorit alterasyon tiplerine düşmektedir (Şekil 9a). $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO} - \text{MgO}+\text{FeO}^*$ ikili diyagramına göre, bu numunelerin daha az miktarda albitleşme ve karbonatlaşma ile plajiyoklaz yıkımı ile oluşan serisitleşmeden oldukça fazla etkilendiğini ifade etmektedir (Şekil 9b).



Şekil 9. (a) Kocaseyit Bölgesinde İncelenen Altere Örneklerin AI (Ishikawa vd., 1976) ve CCPI (Large vd., 2001) Karşılaştırması, (b) $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ ve $\text{MgO}+\text{FeO}^*$ Karşılaştırması (Large vd., 2001).

Tablo 2. Çalışma Alanındaki Altere Kayaçların Majör Oksit (%), İz Element ve Nadir Toprak Element (ppm) Analiz Değerleri

Örnek	KS13	KS14	KS15	KS16	KS17	KS18	KS19	KS20	KS21
SiO ₂	58,39	61,69	59,63	60,87	60,66	60,04	49,99	12,54	68,34
Al ₂ O ₃	17,92	15,43	16,99	16,05	16,21	16,68	17,86	4,23	4,83
Fe ₂ O ₃	6,42	6,02	6,27	6,12	6,15	6,22	10,34	7,29	7,08
MgO	4,10	1,64	3,18	2,26	2,41	2,87	6,71	6,80	0,70
CaO	0,63	0,28	0,50	0,37	0,39	0,46	3,48	33,58	0,13
Na ₂ O	1,21	0,13	0,81	0,40	0,47	0,67	3,26	0,00	0,06
K ₂ O	5,74	6,15	5,89	6,05	6,02	5,95	2,58	0,54	1,29
TiO ₂	0,68	0,52	0,62	0,56	0,57	0,60	0,79	0,15	0,07
P ₂ O ₅	0,17	0,10	0,14	0,12	0,12	0,14	0,34	0,03	0,02
MnO	0,20	0,10	0,16	0,13	0,13	0,15	0,23	0,59	0,04
LOI	4,53	3,81	2,83	1,13	1,42	2,27	4,43	34,25	4,90
İz ve Nadir Toprak Element (NTE), ppm									
Ag	0,5	3,2	1,5	2,5	2,3	1,8	0,3	0,3	36,7
As	96,8	164,0	122,0	147,2	143,0	130,4	112,5	151,3	219,6
Au	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Ba	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	105,9	0,4
Be	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,4	7,2	3,8
Cd	0,2	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,2	3,6
Co	16,7	31,9	22,4	28,1	27,1	24,3	25,4	19,5	45,3
Cs	5,7	11,5	7,9	10,0	9,7	8,6	5,9	1,5	1,6
Cu	2887,5	2866,4	2845,3	7101,4	3165,1	1348,5	2803,0	2972,1	30436,8
Ga	88,2	82,4	86,0	83,8	84,2	85,3	54,3	17,8	23,1
In	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3
Ir	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Li	110,2	93,2	103,8	97,4	98,5	101,7	131,6	40,0	72,5
Ni	257,6	247,6	253,9	250,1	250,7	252,6	218,2	237,9	220,3
Pb	9,5	189,3	76,9	144,4	133,1	99,4	14,2	14,1	1,2
Pd	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	0,3	0,2
Rb	170,3	120,6	151,6	133,0	136,1	145,4	91,2	25,9	41,9
S	0,0	75500,0	28312,5	56625,0	51906,3	37750,0			40926,9
Sb	1,5	8,2	4,0	6,5	6,1	4,8	5,5	3,6	4,6
Sn	4,1	3,0	3,7	3,3	3,3	3,5	7,2	0,9	2,2
Sr	107,6	70,9	93,8	80,1	82,4	89,3	0,9	0,8	14,8
Te	0,0	0,8	0,3	0,6	0,5	0,4	1,4	0,1	1,1
Tl	2,5	3,2	2,8	3,0	3,0	2,9	1,1	0,3	0,9
U	3,6	2,6	3,2	2,9	2,9	3,1	1,3	1,3	0,3
Se	3,3	5,3	4,1	4,8	4,7	4,3	3,2	2,7	14,0
Y	12,1	14,3	12,9	13,8	13,6	13,2	17,0	20,6	2,3
La	13,1	22,4	16,6	20,1	19,5	17,8	9,9	11,8	2,4
Ce	43,1	42,3	42,8	42,5	42,5	42,7	26,8	20,4	4,8
Pr	4,5	5,5	4,9	5,3	5,2	5,0	3,7	2,5	0,6
Nd	17,8	21,1	19,0	20,3	20,1	19,4	15,2	10,0	2,1
Sm	3,5	4,1	3,7	3,9	3,9	3,8	3,3	2,2	0,5
Eu	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	0,7	0,1
Gd	2,9	3,5	3,1	3,3	3,3	3,2	3,5	2,8	0,4
Tb	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1
Ho	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,1
Er	1,3	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,6	1,6	0,2
Tm	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Yb	1,3	1,6	1,4	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3	0,2
Lu	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0
Parametre									
FeO*	5,78	5,42	5,64	5,51	5,53	5,60	9,31	6,56	6,37
CCPI	58,70	52,92	56,84	54,63	55,02	56,14	73,28	96,12	83,97
Ishikawa AI	84,25	95,00	87,43	91,54	90,77	88,68	57,95	17,94	91,28
Na ₂ O+CaO	1,84	0,41	1,30	0,77	0,86	1,13	6,74	33,58	0,19
MgO+FeO*	9,88	7,06	8,82	7,76	7,94	8,47	16,02	13,36	7,07
Σ NTE	89,69	104,42	95,21	100,74	99,81	97,05	67,98	54,72	11,46
Σ HNTE	82,96	96,26	87,94	92,93	92,10	89,61	60,10	47,64	10,37
Σ ANTE	6,74	8,16	7,27	7,80	7,71	7,45	7,88	7,08	1,09
Σ ANTE/Σ NTE	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,12	0,13	0,09
Σ HNTE/Σ NTE	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,88	0,87	0,91
MgO indeksi	35,10	20,00	30,63	24,86	25,94	28,87	41,86	16,62	32,11
K ₂ O indeksi	49,14	75,00	56,81	66,68	64,84	59,81	16,09	1,32	59,17

Alterasyon ve Mineralizasyon süreçlerinde Nadir Toprak Elementlerin Davranışı

Genel olarak, kayaların nadir toprak element değerleri, kökeni ve petrojenetik tarihi, fraksiyonasyon derecesi, akışkan kaynağı ve hidrotermal alterasyonun gelişiminin anlaşılması hakkında jeokimyasal bilgi içeren çeşitli kanıtlara sahiptir (Lottermoser, 1992; Zou vd., 1996; Zou, 1998; Zou, 2000; Takahashi vd., 2002). Tablo 2’de Hafif nadir toprak elementlerinin, Ağır nadir toprak elementlerine göre zenginleştiği görülmektedir. NTE'lerin hidrotermal alterasyon sırasındaki davranışını anlamak için, altere olmuş kayaların HNTE oranı ($\sum \text{HNTE} / \sum \text{NTE}$) ve ANTE oranı ($\sum \text{ANTE} / \sum \text{NTE}$) jeokimyasal arama indeksleri [örneğin, altersyon indeksi (A.I.) (Ishikawa vd, 1976), K₂O indeksi (K.I.) ve magnezyum indeksi (M.I.)] ile karşılaştırılır (Abdelnasser vd, 2018). Alterasyon indeksi (A.I.), MgO indeksi (M.I.), ve K₂O indeksi (K.I.) aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilmektedir (Shikazono vd., 2008):

$$\text{A.I.} = (\text{MgO} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{M.I.} = \text{MgO} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) \times 100 \quad (2)$$

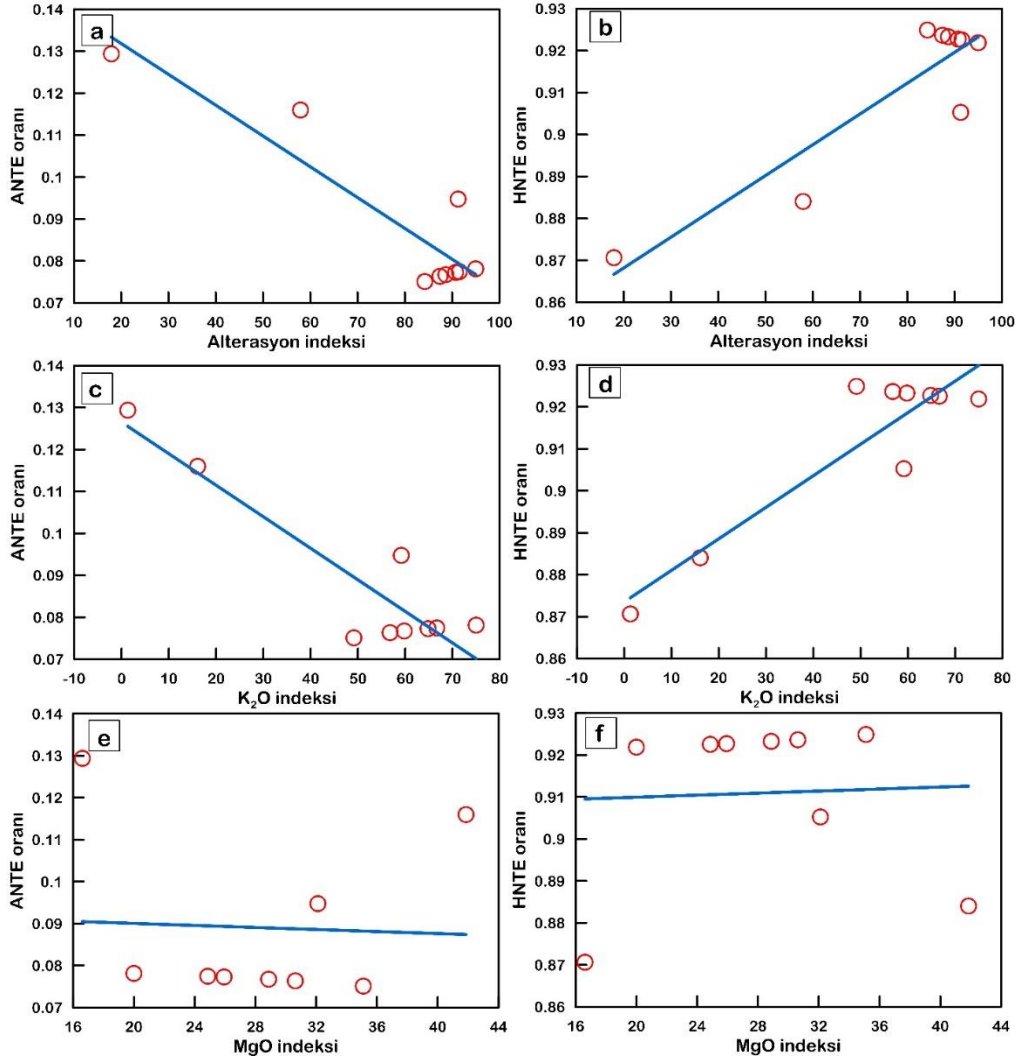
$$\text{K.I.} = \text{K}_2\text{O} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) \times 100 \quad (3)$$

Kocaseyit bölgesindeki altere kayalar esas olarak serisitleşme ve piritleşmeye, çok az oranda kloritleşme ve karbonatlaşmaya uğramıştır. A.I. ve K.I., HNTE oranıyla pozitif bir korelasyon ve ANTE oranıyla negatif bir korelasyon göstermektedir (Şekil 10a-d). Bu ilişki, ya HNTE'lerin hidrotermal çözeltilerden kayalara taşınabildiğini ya da HNTE'lerinin kayalarda zenginleştiğini göstermektedir. M.I. ile HNTE ve ANTE oranları arasında gözlenen rasgele dağılımlar ve/veya korelasyon olmaması (Şekil 10e-f), K bakımından zengin mineral oluşumunun klorit oluşumundan daha yaygın ve yoğun bir şekilde meydana geldiğini göstermektedir (Utada vd, 1983).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Kocaseyit Bölgesi'nde bulunan Düztarla granitoyitleri ile dokanaktaki Balya Formasyonu'ndaki (arkozik kumtaşları) KD-GB fay zonu boyunca lokalize olan polimetalik Cu-As-Ni-Pb damar tipi cevherleşme göstermektedir. Bu kaya birimleri, major-iz element ve NTE jeokimyası için analiz edilmiştir. Bu bilgilere dayanarak elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- (1) Üç tür cevherleşme fazı belirlenmiştir. Bunlar; (1) magmatik-hidrotermal, (2) hidrotermal ve (3) süperjen faz olarak tanımlanmıştır.
- (2) Magmatik-hidrotermal fazda; pentlandit, pirit ve bazı arsenopirit mineralleri,
- (3) Hidrotermal fazda; pirit, arsenopirit, kalkopirit ve sfalerit mineralleri,
- (4) Süperjen faz döneminde ise kalkopirit ve piritten sonra sırasıyla malakit, kovellit ve götit oluşumları gözlenmektedir.
- (5) Cevherleşmeler ile ilişkili olarak yoğun miktarda serisitleşme, kaolinleşme ve piritleşme, az miktarda ise karbonatlaşma ve kloritleşme görülen alterasyon türleridir.
- (6) Burada görülen granitoyit kayaların kalk-alkali metaalumina I-tipi granit özellikleri gösterdiği düşünülmektedir.
- (7) Granodiyorit örnekleri granodiyorit, monzonit ve kuvars-monzonit, granit örnekleri ise granit olarak sınıflandırılmıştır.
- (8) Altere kayaların Mn-karbonat-serisit-klorit alterasyonu ile birlikte serisit-pirit-klorit alterasyonundan güçlü bir şekilde etkilendikleri görülmektedir.
- (9) Alterasyon indeksi (A.I.) ve K₂O indeksi (K.I.), HNTE oranı ile pozitif bir korelasyon göstermektedir.
- (10) A.I. ve K.I., ANTE oranı ile negatif bir korelasyon göstermektedir.
- (11) Bu korelasyonlara bakıldığında HNTE'lerin hidrotermal çözeltilerden kayalara taşındığı ya da HNTE'lerinin kayalarda zenginleştiği düşünülmektedir.
- (12) MgO indeksi (M.I.) ile HNTE ve ANTE oranları arasında korelasyon olmaması, serisitleşme ve kaolinleşme (K bakımından zengin) oluşumunun kloritleşmeden (Mg bakımından zengin) daha yaygın ve yoğun olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. (a) Alterasyon indeksi (A.I.) – Ağır nadir toprak element (ANTE) oranı. (b) Alterasyon indeksi (A.I.) – Hafif nadir toprak element oranı. (c) K₂O index (K.I.) – Ağır nadir toprak element oranı. (d) K₂O index (K.I.) – Hafif nadir toprak element oranı. (e) MgO index (M.I.) – Ağır nadir toprak element oranı. (f) MgO index (M.I.) – Hafif nadir toprak element oranı.

TEŞEKKÜR

Öncelikle İTÜ Rektörlüğü'ne, jeokimyasal analizler sırasındaki çabaları dolayısıyla İstanbul Teknik Üniversitesi Jeokimya Araştırma Laboratuvarı (ITU-JAL) çalışma ekibine ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi editörlerine ile bilimsel olarak makalenin gelişmesini sağlayan hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., Karaman, M., & Weihed, P. (2018). REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 145, 317-330.
- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., & Yilmaz, H. (2022). Evolution of the Tepeoba porphyry-skarn Cu-Mo-Au deposit, NW Turkey: New mineralogical and geochemical findings. *Ore Geology Reviews*, 147, 104967.
- Altunkaynak, Ş., Dilek, Y., Genç, C. Ş., Sunal, G., Gertisser, R., Furnes, H., & Yang, J. (2012). Spatial, temporal and geochemical evolution of Oligo–Miocene granitoid magmatism in western Anatolia, Turkey. *Gondwana Research*, 21(4), 961-986.

- Akiska, S., Demirela, G., & Sayili, S. (2013). Geology, mineralogy and the Pb, S isotope study of the Kalkim Pb-Zn[±]-Cu deposits, Biga Peninsula, NW Turkey. *Journal of Geosciences*, 58(4).
- Altınlı, İ. E. (1973a). Bilecik Jurasîği. Cumhuriyetin 50. yılı Yerbilimleri Kongresi, 159-187, Ankara.
- Aslaner, M. (1965). Etude géologique et pétrographique de la région d'Edremit-Havran (Turquie): MTA Yayım no: 110, 98 pp.
- Bingöl, E., Akyürek, B., & Korkmazer, B. (1973). Biga yarımadasının jeolojisi ve Karakaya formasyonunun bazı özellikleri, Cumhuriyetin 50. yılı Yerbilimleri Kong. Tebliğleri, s. 70, Ankara.
- Chappell, B. W., & White, A. J. R. (1992). I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83 (1-2), 1-26.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Şentürk, Y., Yavaş, F., & Kar, H. (2004). New results on the lithostratigraphy of the Kazdağ Massif in northwest Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13(2), 177-186.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Dönmez, M., Ilgar, A. ve Akçay, A. E. (2007). Balıkesir –İ18 Paftası Jeoloji Haritası, Maden Tetkik ve Arama Müdürlüğü, Ankara.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Aral, İ.O., Şentürk, Y., Yavaş, F., & Kar, H. (2012). Biga Yarımadası'nın Tersiyer Öncesi Jeolojisi, M.T.A. Özel Yayınlar Serisi, No 28, 7-74.
- El Bouseily, A. M., & El Sokkary, A. A. (1975). The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. *Chemical Geology*, 16(3), 207-219.
- Ersoy, Y., Helvacı, C., & Palmer, M.R. (2012). Petrogenesis of the Neogene volcanic units in the NE-SW trending basins in western Anatolia, Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163, 379-401.
- Gümüş, A. (1964). Contribution à l'étude géologique du secteur septentrional de Kalabak Köy-Eymir Köy (region d'Edremit), Turquie. M.T.A. Publ., no. 117, 109 p.
- Gözler, M.Z. (1986). Kazdağ batısı Mıhlıdere Vadisi'nin jeolojik petrografik incelenmesi. *TJK Bülteni*, C. 29, 133-142.
- Irvine, T.N., & Baragar, W.R.A. (1971). A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Ishihara, S. (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining geology*, 27(145), 293-305.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S., & Hariuchi, M. (1976). Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism underlying dacite and alteration halos. *Mining Geology* 26, 105-117.
- Janković, S. (1977). The copper deposits and geotectonic setting of the Tethyan Eurasian metallogenic belt. *Miner 482 Deposita*, 12, 37-47. 483 3.
- Jiang N., Sun S., Chu X., Mizuta T., Ishiyama D. (2003). Mobilization and enrichment of high-field strength elements during late-and post-magmatic processes in the Shuiquangou syenitic complex, Northern China. *Chemical Geology*, 200, 117-128.
- Karaman, M., Kumral, M., Yildirim, D. K., Doner, Z., Afzal, P., & Abdelnasser, A. (2021). Delineation of the porphyry-skarn mineralized zones (NW Turkey) using concentration-volume fractal model. *Geochemistry*, 81(4), 125802.
- Krushensky, R., Akçay, Y., & Karaege, E. (1980). Geology of the Karalar-Yeşiller area, Northwest Anatolia; U.S. Geological Survey Bulletin, 1461, 72.
- Kumral, M., Kabiru, M., Aydoğan, M. S., Kocaturk, H., & Unluer, A. T. (2022). The Soma polymetallic hydrothermal Pb-Zn-Cu (±Mo±Ag±Au) mineralizations in the south of Biga Peninsula, NW Turkey: constraints from mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion data. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), 1-23.
- Kuno, H. (1968). Origin of andesite and its bearing on the island arc structure. *Bulletin Volcanologique*, 32(1), 141-176.
- Kuşcu, I., Yilmazer, E., Güleç, N., Bayir, S., Demirela, G., Kuşcu, G., Kuru, G. And Kaymakçı, N. (2011). U-Pb and 40Ar-39Ar geochronology and isotopic constraints on the genesis of copper-gold-bearing iron oxide deposits in the hasaңcelebi district, eastern Turkey. *Economic Geology*, 106(2).

- Kuşçu, İ. (2019). Skarns and skarn deposits of Turkey. In *Mineral Resources of Turkey* (pp. 283-336). Springer, Cham.
- Large, R. R., Gemmell, J. B., Paulick, H., & Huston, D. L. (2001). The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic geology*, 96(5), 957-971.
- Lottermoser, B. G. (1992). Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes. *Ore Geology Reviews*, 7(1), 25-41.
- Mao, J., Pirajno, F., Lehmann, B., Luo, M., & Berzina, A. (2014). Distribution of porphyry deposits in the Eurasian 484 continent and their corresponding tectonic settings. *J Asian Earth Sci.*, 79, 576-584.
- Middlemost, E. A., Magmas, K., & Rocks, M. (1985). An introduction to igneous petrology. *Magma and magmatic Rocks*. Longmans.
- Okay, A. Đ, Siyako, M. ve Bürkan K. A. (1990). Biga Yarımadası'nın Jeolojisi ve Tektonik Evrimi, T.P.J.D., 2/1, 83-121.
- Okay, A. I. (1996). Paleo-and Neo-Tethyan events in northwest Turkey: geological and geochronological constraints. *Tectonics of Asia*, 420-441.
- Parr, J. M. (1992). Rare-earth element distribution in exhalites associated with Broken Hill-type mineralisation at the Pinnacles deposit, New South Wales, Australia. *Chemical Geology*, 100(1-2), 73-91.
- Parsapoor, A., Khalili, M., & Mackizadeh, M. A. (2009). The behaviour of trace and rare earth elements (REE) during hydrothermal alteration in the Rangan area (Central Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2), 123-134.
- Petro, W.L., Vogel, T.A., & Wilband, J.T. (1979). Major-element chemistry of plutonic rock suites from compressional and extensional plate boundaries. *Chem. Geol.*, 26, 217-235.
- Shand, S. J. (1927). On the relations between silica, alumina, and the bases in eruptive rocks, considered as a means of classification. *Geological Magazine*, 64(10), 446-449.
- Shikazono, N., Ogawa, Y., Utada, M., Ishiyama, D., Mizuta, T., Ishikawa, N., & Kubota, Y. (2008). Geochemical behavior of rare earth elements in hydrothermally altered rocks of the Kuroko mining area, Japan. *Journal of Geochemical Exploration*, 98(3), 65-79.
- Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345.
- Takahashi, Y., Yoshida, H., Sato, N., Hama, K., Yusa, Y., & Shimizu, H. (2002). W-and M-type tetrad effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit, central Japan. *Chemical geology*, 184(3-4), 311-335.
- Torres-Alvarado, I. S. (2002). Chemical equilibrium in hydrothermal systems: the case of Los Azufres geothermal field, Mexico. *International Geology Review*, 44(7), 639-652.
- Utada, M., Ishikawa, Y., Takahashi, T., & Hashiguchi, H. (1983). The distribution of alteration zones in the western area (Hanaoka-Matsumine-Shakanai mineralization area) of the Hokuroku District, northeast Japan. *Mining Geologists Japan Spec. Paper*, 11, 125-138.
- Yigit, O. (2006). Gold in Turkey—a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 28(2), 147-179.
- Yigit, O. (2009). Mineral deposits of Turkey in relation to Tethyan metallogeny: implications for future mineral exploration. *Economic Geology*, 104(1), 19-51.
- Yigit, O. (2012). A prospective sector in the Tethyan Metallogenic Belt: Geology and geochronology of mineral deposits in the Biga Peninsula, NW Turkey. *Ore Geology Reviews*, 46, 118-148.
- Yildirim, D. K. (2022). Genesis of the Halılar Metasediment-Hosted Cu-Pb (\pm Zn) Mineralization, NW Turkey: Evidence from Mineralogy, Alteration, and Sulfur Isotope Geochemistry. *Minerals*, 12(8), 991.
- Zou, H. and Zindler, A. (1996). Constrains on the degree of dynamic partial melting and source composition using concentration ratios in magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60 (4), 711-717.
- Zou, H. (1998). Trace element fractionation during modal and nonmodal dynamic melting and open-system melting. A mathematical treatment, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, pp. 711-717.

Zou, H. (2000). Modeling of trace element fractionation during nonmodal dynamic melting with linear variations in mineral melt distribution coefficients. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64(6), pp. 1095-1102



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.12.2022
Kabul Tarihi : 18.04.2023

Received Date : 19.12.2022
Accepted Date : 18.04.2023

UÇAK İTKİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN BATARYA SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

RELIABILITY ASSESSMENT OF BATTERY SYSTEMS USED IN AIRCRAFT PROPULSION SYSTEMS

*Tahmineh RAOOFI*¹ (ORCID: 0000-0002-7988-1853)

Melih YILDIZ^{2*} (ORCID: 0000-0002-7546-4462)

¹ Eastern Mediterranean University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Famagusta, Mersin 10, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Melih YILDIZ, melihy@erciyes.edu.tr

ÖZET

Elektrikli Uçak ve Hibrit Elektrikli Uçağın en önemli bileşenlerinden biri olan enerji depolama cihazlarının güvenliği ve güvenilirliği esastır. Bu nedenle, bataryaların güvenilirlik değerlendirmesi bilhassa elektrikli itki sistemlerinin tasarım mimarisi için çok önemlidir. Li-ion batarya sistemlerinin güvenilirlik değerlendirmesi, arızaların veya bozulma olasılığının batarya kapasitesi ve çekilebilir güç üzerindeki etkisinin hesaplanması olarak tanımlanır. Li-ion batarya hücrelerinin arızaları hem güvenlik sorunlarına (yangın ve patlama) neden olan arızaları hem de tasarım amacına göre bataryanın ideal performansını azaltan arızaları içerir de bu çalışmanın ana odak noktası batarya performans kaybına yol açan arızalardır. Elektrikli itki sistemlerinin güvenilirliğini tahmin etmek için, yaşlanma etkileri ile batarya performansı arasındaki bağlantıyı tanımak çok önemlidir. Bu çalışmada, uçaklarda kullanılacak lityum-iyon batarya sistemlerinin, uçak tasarım aşamalarından itibaren sistem, bileşen ve işlev güvenilirlikleri açısından analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada elektrikli itki sistemlerinde kullanılan batarya sistemlerinin güvenilirlik analizi gerçekleştirilerek, analiz sonucu ile sertifikasyonuna yönelik mevcut standartlar karşılaştırılmış ve sektörün elektrikli tahrik sistemlerini yaygın ve güvenilir olarak kullanmasının önündeki yasal boşluklara dikkat çekilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit elektrikli uçak, uçak bataryası, lityum-iyon batarya, batarya güvenilirliği

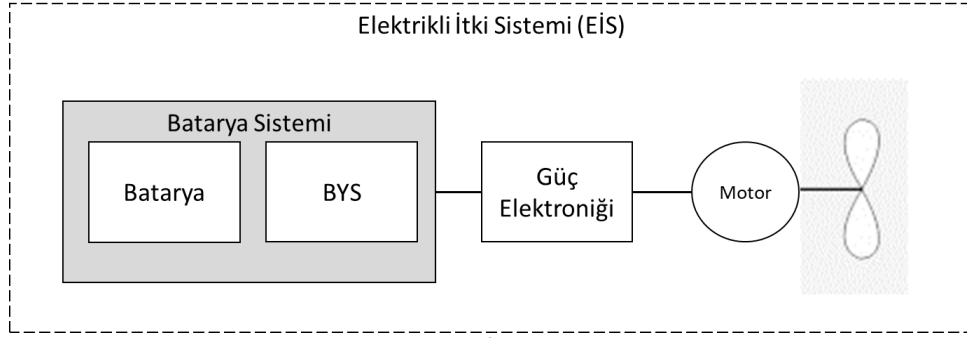
ABSTRACT

Safety and reliability of the energy storage devices as one of the most important components of Electric Aircraft and Hybrid Electric Aircraft is essential. Therefore, reliability evaluation of batteries is crucial for Electric Propulsion System design architecture. Li-ion battery reliability assessment is defined as calculating the faults or degradation occurrence probability and its impact on the obtainable capacity and power. Although failures of Li-ion battery cells involve both failures that cause safety issues (fire and explosion) and failures that reduce the ideal performance of the battery against the design intent, the focus of this study is on failures that lead to battery degradation. To estimate Electric Propulsion System reliability, it is critical to recognize the link between aging effects and battery performance. In this study, the lithium-ion battery systems to be used in aircraft were analyzed in terms of system, component and functional reliability from the aircraft design stages. In this study, reliability analysis of battery systems used in electric propulsion systems was performed, analysis results and current standards for certification were compared, and legal gaps in front of the industry's widespread and reliable use of electric propulsion systems were pointed out.

Keywords: Hybrid electric propulsion, aircraft battery, lithium-ion battery, battery reliability

GİRİŞ

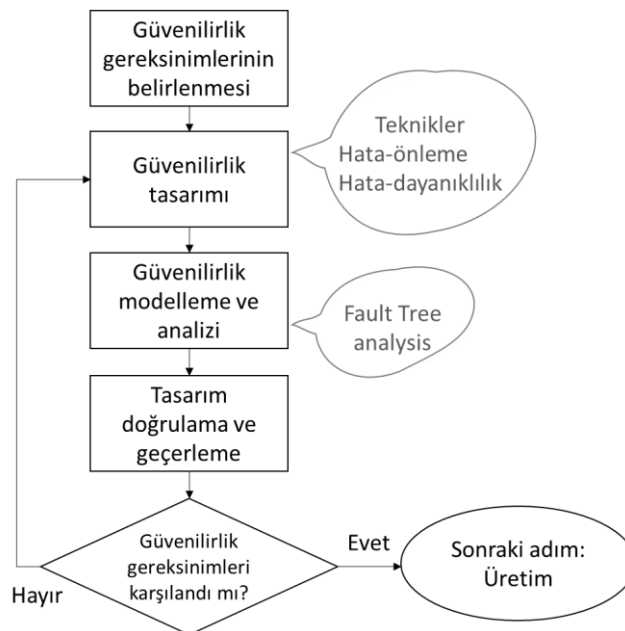
Hava araçlarında gerek çevresel etkinin, gerek maliyetlerin azaltılması amacı ile farklı enerji türleri kullanımı arayışı bulunmaktadır. Hava araçları için elektrikli itki sistemi (EİS), önceleri çevre kirliliğine karşı önerilmiş olsa da enerji verimliliği ve ömür devri maliyetlerine yönelik avantajlar içerdiğinden havacılık endüstrisinin dikkatini çekmiştir. Havacılıkta elektrik enerjisinin itki sisteminde kullanımı görece yeni olduğundan beraberinde bazı zorluklar da getirmektedir. Havacılıkta, hava aracının uçuş sırasında sistemlerinin istenen işlevleri tam olarak yerine getirmesi beklenir. Normal dışı bir işleyiş veya kaza durumunda ise sistemlerin işlevlerini en azından güvenli uçuş şartlarını sağlayabilecek kadar yerine getirmesi önemlidir. Uçaklarda EİS enerji kaynağı olarak kullanılacak bataryaların da güvenilirlik analizi önemlidir.



Şekil 1. EİS Mimarisi

Uçak yaşam döngüsünün güvenilirliği tasarım ve geliştirme aşamasında, tasarım gereksinimlerini karşılayacak bileşenlerin seçimi ve sistemlerin tasarımı sırasında kazanılan bir yetkinliktir. Ardından tasarım süreci, tasarım çözümlerinin gereksinimleri karşıladığından emin olmak için doğrulama ile tamamlanır. Lityum-iyon bataryaların (LIB) elektriksel, mekanik ve çevresel durumlardan kaynaklanan belirli risklere dayanıklılığını test için standardizasyon üzerine çalışan kurumlar deney prosedürleri geliştirmiştir. Bununla birlikte, teknolojiye sürekli ilerleme nedeniyle LIB'nin olası performans kaybı durumları halen araştırılmaya devam etmektedir (Stephens vd., 2017).

Güvenilirlik tasarımı ve geliştirme süreci, Şekil 2'de gösterilen adımlardan oluşur. Bu çalışmada, Elektrikli Uçak (EU) ve Hibrit Elektrikli Uçağın (HEU) için güvenilirlik tasarımı ve geliştirme aşamaları detaylandırılmıştır. Çalışmanın odak noktası, EİS'nin ana birimi olarak batarya sistemini güvenilirliğini ve sistemin genel güvenilirliğini etkileyen önemli faktörleri tanımlamaktır. Araştırmanın metodolojisi ve işlem adımları Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Güvenilirlik Tasarımı ve Geliştirilmesi

METOD

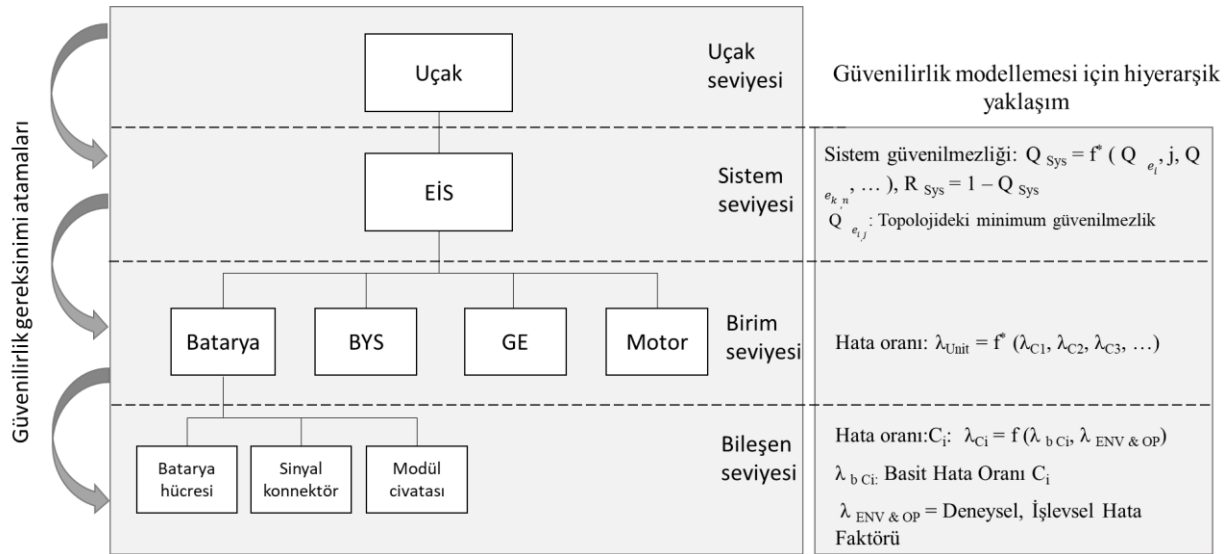
Bu çalışmada havacılık endüstrisinin gündemine giren elektrikli itki sistemlerinde kullanılması düşünülen LIB sistemlerine yönelik güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Uçak elektrik sistemlerinin tasarım aşamasında güvenilirliğini modelleyerek değerlendirmek için literatürde genel kabul gören Hiyerarşik Seviye (HL) yaklaşımı (Xu vd., 2019) kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre öncelikle güvenilirlik gereksinimleri sistemin farklı seviyelerine atanmıştır. Her bir sistem seviyesinde karşılaşılan hatalar literatür analizi ile tanımlanmış ve karşılaşılan durumlara göre güvenilirlik kriterleri incelenmiştir. Sistem seviyelerinde görülen hata modları daha sonra bir balık kılıçığı diyagramı üzerinde incelenmiş ve aralarındaki ilişkiler gösterilmiştir. Bu ilişkilere göre hata modları dört temel alanda gruplandırılmıştır. Elde edilen bu model ile endüstrinin kullandığı standartlar karşılaştırılmış, mevcut standartların güvenilirlik açısından bu alanları kapsayıp kapsamadığı değerlendirilmiştir.

GÜVENİLİRLİK GEREKSİNİMLERİ TANIMLAMA VE ATAMA

Tasarım güvenilirliği, uçak seviyesinde güvenilirlik gereksinimlerinin tanımlanmasıyla başlar. Bu gereksinimler daha sonra uçak seviyesinden sistem seviyesine ve son olarak da bileşen seviyesine atanacaktır. Başlıca güvenilirlik indeksleri Tablo 1'de listelenmiştir. EİS kullanan elektrikli uçaklarda, hiyerarşik model (Xu vd., 2019) Şekil 3'te gösterilmektedir. Bu yöntemle göre güvenilirlik 3 seviyede hesaplanır. Birinci seviye (Ünite seviyesi), yük (güç/akım) ve sıcaklık gibi operasyonel ve çevresel özellikleri dikkate alarak bileşen seviyesindeki arıza oranı ile ilgilenir. İkinci seviye, bileşenlerden oluşan alt sistemlerin güvenilirliğinin modellendiği Birim seviyesidir. Üçüncüsü, alt sistem güvenilirlik modeline dayalı olarak sistem güvenilirliğini ölçmek için Sistem seviyesidir. Bu yöntem, aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanarak sistem güvenilirliği özelliklerini sayısal olarak elde etmeye imkân sağlar (Xu vd., 2019).

Tablo 1. Güvenilirlik Gereksinim Atamaları

Güvenilirlik İndeksleri	Uçak Seviyesi	Sistem Seviyesi	Birim Seviyesi	Bileşen Seviyesi
		EİS	Batarya Modülü	Batarya Hücresi
Emniyet	√	√	√	√
Güvenilirlik	√	√	√	√
Dayanıklılık	√	√		
Hazır bulunurluk	√	√		
Bakım yapılabilirlik	√	√		
Tahmin edilebilirlik	√	√		√

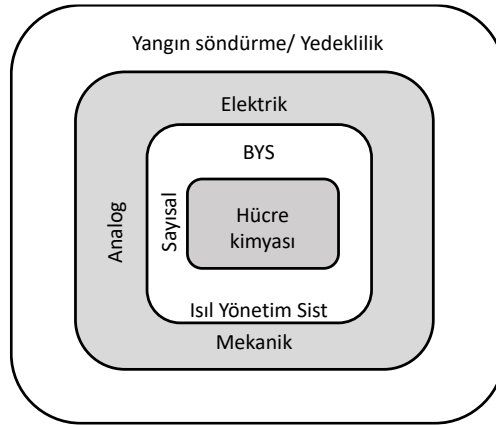


*Fonksiyon mimariye bağlıdır

Şekil 3. Güvenilirlik Modellemesi için Hiyerarşik Yaklaşım

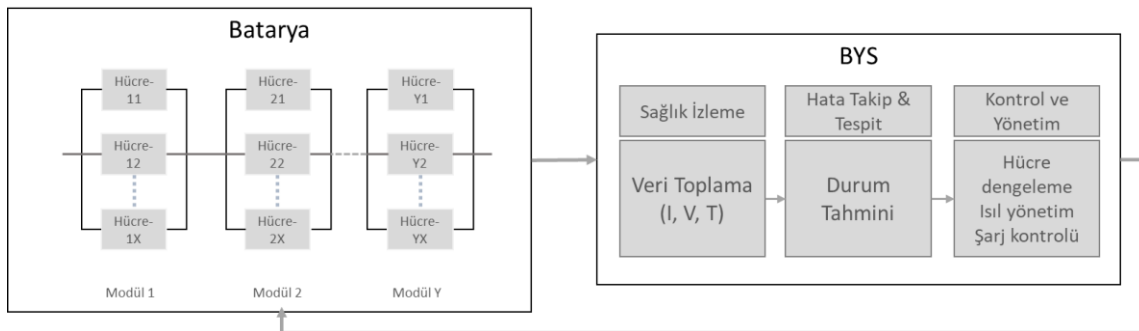
GÜVENİLİRLİK TASARIMI

Güvenilirlik tasarımı, güvenilirlik analizindeki bir sonraki adımdır. Bu aşamada, belirlenen güvenilirlik gereksinimlerini karşılayabilecek uygun tasarım özelliklerini geliştirmek için güvenilirlik teknikleri kullanılır. Batarya için hiyerarşik yaklaşım göz önüne alındığında, batarya hücresi, eleman seviyesinde tasarım tekniklerinin uygulanması için önemli bir bileşendir. Eleman seviyesindeki arıza analizi, uçak seviyesindeki arıza için bir temel sağlayabilir. Havacılıkta tasarım teknikleri çoğunlukla hatadan kaçınma ve hataya dayanıklı olarak sınıflandırılır (Zio vd., 2019). İlk çözüm, donanımın güvenilirliğini artırmayı ve herhangi bir arıza olasılığını azaltmayı amaçlar ve ikincisi, bir veya daha fazla bileşen çoğunlukla fazlalık nedeniyle arızalansa bile bir sistemin normal işlevselliğini korumaktır. Batarya hücresi arıza durumu, Dahili ve Harici arıza olmak üzere 2 ana gruba ayrılır (Stephens vd., 2017). Dahili arıza, ekzotermik reaksiyonlar/termal kaçak, dahili kısa devreler, yaşlanma ve dahili mekanik stres ile ilgilidir. Harici arızalar harici elektriksel, mekanik, kimyasal ve termal nedenler olarak kategorize edilebilir. Hataya dayanıklı tekniklerin uygulanması, olası tüm arızaların üstesinden gelmek için farklı arıza koruma mekanizmaları sağlayabilir. Katman katman “Soğan güvenlik mekanizması”, hücre kimyası, hücre tasarımı ve paketleme, kısa devre koruması (sigorta), batarya konektörü (kontaktör), Sistem tasarımı ve hücre muhafazası, BMS, Isıl Yönetim Sistemi ve mekanik çarpışma korumasını içerir (Larsson ve Mellander, 2017). Ayrıca, Yedeklilik ve yangınla mücadele mekanizmaları, arıza etkisinin şiddetini azaltacaktır. EPS batarya sistemindeki olası arıza koruma tekniklerinin bir özeti Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Çok Katmanlı Hata Önleme Teknikleri

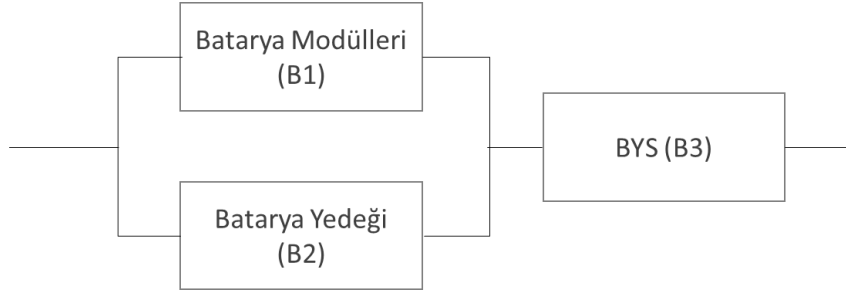
EİS'de gerekli güç ve voltajın sağlanabilmesi için ister silindir ister poşet şeklinde yüzlerce, binlerce hücrenin seri ve paralel bağlanması gerekir. Bir modüldeki her bir batarya hücresindeki arıza, diğer batarya hücrelerinin yaşlanma sürecini artıracaktır, bu nedenle bir batarya hücresi arızası bile batarya modülünün sağlığını ve batarya sisteminin toplam güvenilirliğini etkileyebilir (Shu vd., 2020). X*Y hücreleri ve BYS işlevlerinden oluşan batarya sisteminin bir topolojisi Şekil 5'te gösterilmektedir. BYS, her bir hücre durumu ve genel performans hakkında veri toplamak için sensör kullanır. Verileri uygun bilgilere dönüştürmek ve bataryanın sağlık durumunu analiz etmek için farklı arıza teşhis ve tahmin teknikleri uygulanmaktadır. Arıza teşhisi, arızanın konumu ve modları hakkında bilgi verirken, prognoz, bir batarya hücresinin ve batarya sisteminin tahmini Kalan Faydalı Ömrünü (RUL) sağlar. Son olarak, arıza teşhisi ve prognoz sonuçlarına göre güvenli çalışma penceresinde pil çalışmasına ilişkin pil kontrolü ve yönetimi gerçekleştirilir.



Şekil 5. Batarya Hücreleri Bağlantı Topolojisi ve BYS İşlevi

GÜVENİLİRLİK MODELİ ANALİZİ

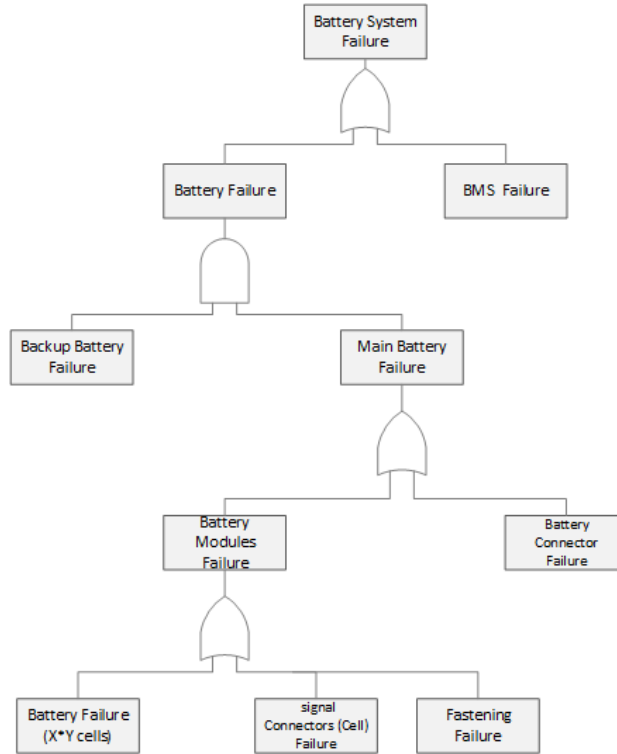
Tasarlanan mimariye ve sunulan tedbirlere dayalı olarak bir sonraki adım güvenilirlik modeli analizidir. Güvenilirlik Blok Diyagramları (RBD) ve Hata Ağacı Analizi (FTA) "ELEKTRONİK GÜVENİLİRLİK TASARIM EL KİTABI"nda sunulmaktadır. "Bir RBD, her kullanım durumu için öğenin tüm seviyeleri (birimler veya bileşen) veya işlevsel grupları arasındaki karşılıklı bağımlılıkları gösterir" ve "FTA tekniği, alt seviye öğeleri oluşturan blok diyagramları oluşturmak için bir yöntemdir" (DoD, 1998). Bataryanın güvenilirlik blok şeması Şekil 6'daki gibidir. Sunulan topolojiye göre batarya sistemi batarya modülleri ve batarya yedeklemesinden oluşmaktadır (Shu vd., 2020). Batarya sisteminin güvenilirliği Denklem 1'e göre tahmin edilir. Burada RB3 batarya konektörünün güvenilirliğidir, RB1 ve RB2 sırasıyla batarya modülünün ve yedek bataryanın güvenilirliğidir.



Şekil 6. Batarya Güvenilirliği Blok Diyagramı

$$R = R_{B3} (1 - R_{B1}R_{B2}) \quad (1)$$

Batarya sisteminin her bir elemanının güvenilirliğini hesaplamak için, Tablo 2'de verilen arıza indekslerine dayalı olarak Şekil 7'de ki gibi FTA kullanılır.



Şekil 7. Batarya sistemi Hata Analizi Ağacı (FTA)

Önerilen topolojiye bağlı olarak, ana batarya hatası (λ_{B1}) Denklem 1'e göre hesaplanır:

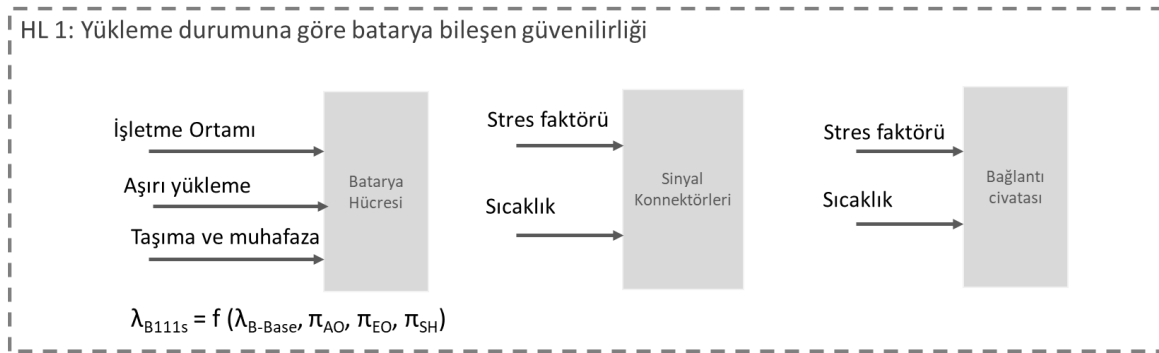
$$\lambda_{B1} = \lambda_{B11} + \lambda_{B12} = [1/X * \lambda_{B11s} * Y + Y * \lambda_{B112} + (Y+1) * \lambda_{B113}] + \lambda_{B12} \quad (2)$$

Burada λ_{B111s} tek hücre hatasıdır. Eğer yedek batarya ve ana batarya hata oranları eşit kabul edilirse; $\lambda_{B1} = \lambda_{B2}$. Buradan da $\lambda_B = \lambda_{B1}/2$ olacaktır. O zaman batarya sistemi hata oranı $\lambda_{B5} = \lambda_B + \lambda_{B3}$.

Tablo 2. Olay Hata İndeksi

Olay	Hata Oranı
Batarya sistem hatası	λ_{BS}
Batarya hatası	λ_B
Ana batarya hatası	λ_{B1}
Yedek batarya hatası	λ_{B2}
BYS Hatası	λ_{B3}
Batarya modülü hatası	λ_{B11}
Batarya konnektörü hatası	λ_{B12}
Batarya hatası (X*Y hücre)	λ_{B111}
Sinyal konnektörü hatası	λ_{B112}
Bağlantı civatası hatası	λ_{B113}

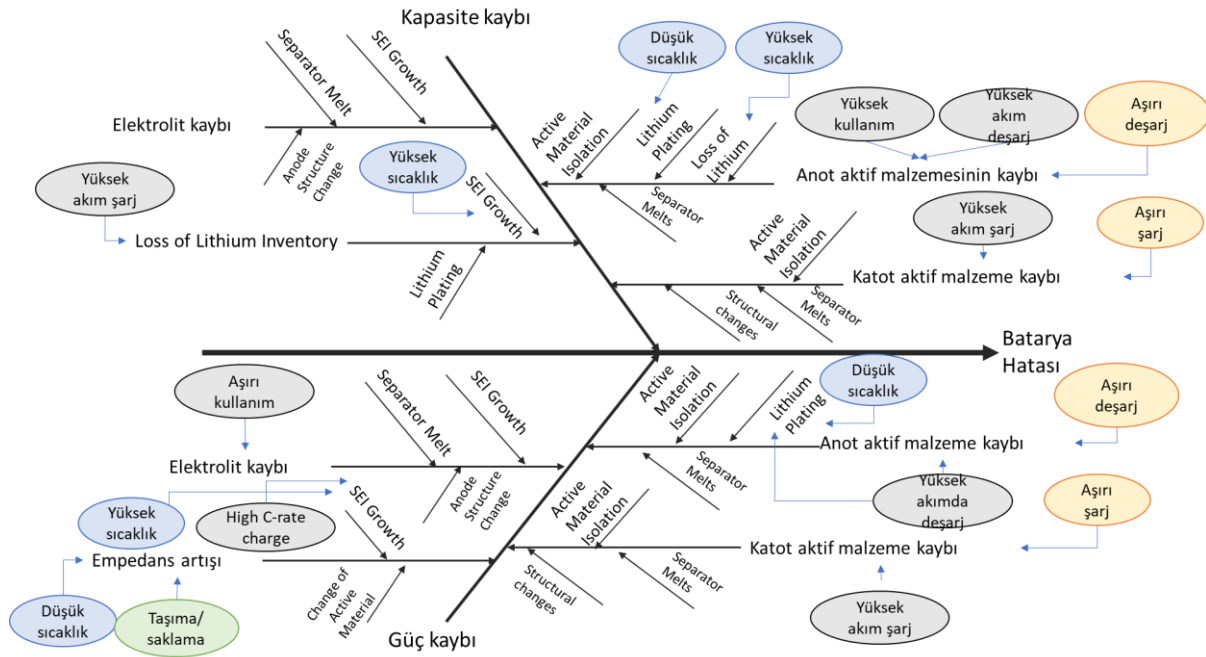
Xu vd. tarafından sunulan güvenilirlik modeli 3 HL'ye göre (Xu vd., 2019), her bileşenin güvenilirliği, bağlantı sıcaklığı ve yükleme koşullarının bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Bir batarya hücresi arıza oranı, temel arıza oranının ($\lambda_{B-Temel}$) bir fonksiyonu olup, tasarım ve üretim özellikleri ve ayrıca ortam çalışma koşulu (π_{AO}), aşırı çalışma koşulu (π_{EO}) ve depolama ve taşıma koşulları (π_{SH}) tarafından belirlenir. Benzer şekilde, bataryanın diğer bileşenleri de çevresel ve mekanik faktörlerden etkilenir (sinyal konektörleri ve sabitleme vidaları). Genel olarak, batarya hücrelerinin güvenilirlik değerlendirmesi için kimyasal, elektrik, mekanik ve termal olmak üzere dört ana faktör dikkate alınmalıdır (Gandoman vd., 2021). Bileşen seviyesinde batarya güvenilirliği Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Bileşen Seviyesinde HL1

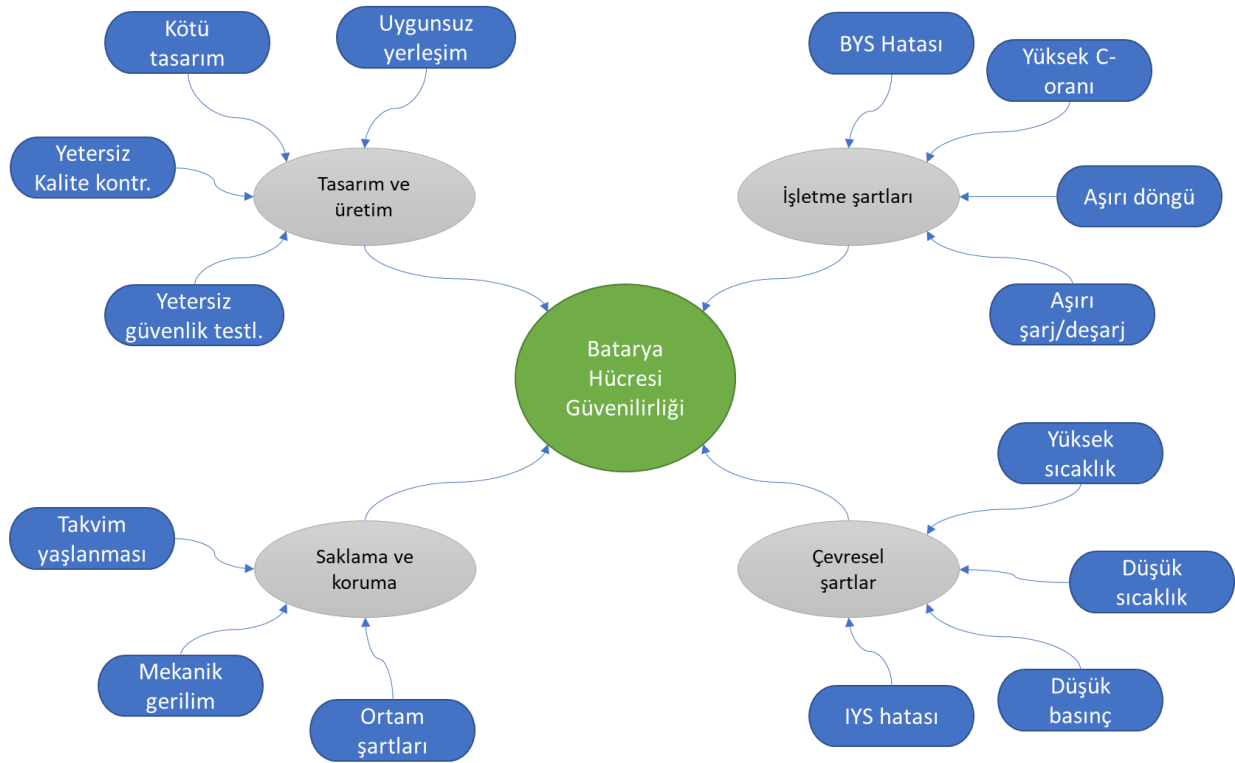
Bataryanın işlevselliği, batarya ömrü boyunca kademeli olarak gelişen güç azalması, kapasite düşüşü ve empedans artışı şeklinde olumsuz yönde gelir (Sripad vd., 2021; Vetter vd., 2005). Batarya performans kaybını etkili bir şekilde ele almak için, öncelikle nedenleri belirlemek önemlidir. Ancak, LIB yaşlanma mekanizmasının karmaşıklığı nedeniyle, kapasite ve güç azalmasının temel nedenlerinin araştırılması zorluklar barındırmaktadır; bu kayıplar tekil bir kaynaktan değil, farklı nedenlerden kaynaklanmaktadır (Vetter vd., 2005). Her bir LIB bileşeninde (anot, katot ve elektrolit) yaşlanma süreci farklıdır (Hendricks vd., 2015; Vetter vd., 2005). Döngünün etkisi altındaki bir anotta, elektrolit ayrışması, empedans artışıyla aynı anda kapasite ve gücün azalmasına neden olan lityum kaybına yol açar.

Öte yandan, aktif karbonda lityum korozyonu meydana gelir, bu da lityum kaybı dolayısıyla kendi kendine deşarj ve kapasite düşüşüne neden olur. Ayrıca çevrim sırasında hacim değişiklikleri sonucu aktif malzeme katmanlarının birbiri ile temaslarını kaybetmesi, aktif malzeme kaybına yol açarak kapasite düşüşüne ve empedans artışına neden olur. Katot tarafında, yığın malzemenin yapısındaki faz geçişleri ve değişiklikler yaşlanmayı hızlandırır ve anottaki süreçlerden daha önemli olumsuzluklara yol açar (Vetter vd., 2005). LIB'de kapasite ve güç azalmasına yol açan yaşlanmaya katkıda bulunan nedenlerin (Ilie ve Ciocoiu, 2010) bir özeti Şekil 9'da bir kılçık diyagramı şeklinde gösterilmektedir. Yaşlanma, kullanım, ortam koşulu (yüksek/düşük sıcaklık), aşırı kullanım/çalışma koşulu (yüksek çevrim hızı, yüksek C oranı ve aşırı şarj/deşarj) ve bunların kombinasyonu (Diao vd., 2019; Hendricks vd., 2015; Vetter vd., 2005) ile oluşur. Batarya hücresi arıza oranının değerini tahmin etmek için ölçülmesi gereken parametreler, batarya paketi tasarımında yer alan sensörler ile okunan hücre sıcaklığı, voltaj ve akımdır.



Şekil 9. Batarya Hatası için Balık Kılıçığı Modeli

Juarez-Robles vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen yaşlandırma çalışmasının sonuçlarına göre, alt ve üst voltaj limitlerinin her iki ucunda 200 mV azaltılarak, kapasitenin sadece %20 oranında azalmasına karşılık bataryanın şarj döngüsü ömrü %100 artırılmıştır. Ayrıca, SEI oluşumuna bağlı olarak lityumun azalması, delaminasyon nedeniyle katodun elektrokimyasal deaktivasyonu ve partikül çatlamasının, sık çevrim altında çalışan hücrelerin kapasite kaybına neden olan ana mekanizmaları olduğu gösterilmiştir.



Şekil 10. Batarya Hücresi Güvenilirlik Etkenleri

Şarj Durumu (SOC) ne kadar enerjinin erişilebilir olduğunu gösteren bir parametredir ve Deşarj Derinliği (DOD) bataryadan çekilen enerji miktarını gösterir. Bir batarya hücresinin çıkış voltajı, nominal kapasitesine ve ayrıca SOC'ye bağlı olarak bataryadan çekilen akıma, başka bir ifadeyle deşarj hızına bağlıdır (Hornung ve Sizzmann, 2013).

Juarez-Robles vd. (2020) voltaj ve sıcaklık çalışmaları, SOC'nin iç dirence ve ısı üretim hızına bağlı olduğunu göstermiştir. Şarj ve deşarj döngülerinin etkisi altında bataryanın maksimum enerji kapasitesi (Ah) azalır. Sağlık Durumu (SOH), bataryanın başlangıç kapasitesine oranla anlık kapasitesi olarak tanımlanır. Literatür daha çok SOH modellemesine odaklanırken, elektrikli uçakların uçuş emniyeti açısından, güç kapasitesi ve ani işlev kaybı riskini tahmin etmek ve pilota doğru olarak göstermek önemlidir (Sripad vd., 2021). Bu tür arızaların analizi, elektrikli uçak tahrik sistemlerinin güvenilirliği açısından uçuş sırasında ortaya çıkabilecek işlev kayıplarının önlenmesi için çok önemlidir (Bills vd., 2020).

Bataryanın tasarımında uygun elektrokimyanın seçilmesi, güvenilirliğin temel faktörüdür (Can vd., 2022). Bunun yanı sıra, bataryanın güvenilirliği, Şekil 10'da gösterildiği gibi EİS uygulamasındaki diğer çalışma parametrelerinden de bağımsız değildir.

DOĞRULAMA VE GEÇERLEME

Güvenilirlik analizi süreci ve tasarım tamamlandığında, sistem prototipi güvenilirlik gereksinimlerine uygun olduğunu doğrulamak için test edilir. LIB için hassas üretim kalite kontrolü ve testi uygulamak, batarya hücresi temel arıza oranını azaltmak için çok önemlidir. Sertifikasyon sürecinde bataryanın uygunluğu ve güvenilirliği tecrübe veya RTCA-DO-311, DO-347, UN T 38.3 ve UL-1642 gibi geçerli standartlara göre testler yapılarak, otorite onayı ile elde edilebilir. Bununla birlikte CS-25.1309 "Ekipman, sistemler ve kurulumlar"ın gereksinimleri de karşılanmalıdır. Felaket ve tehlikeli durum güvenlik gereksinimlerinin bir örneği, "batarya içindeki herhangi bir arızanın sonucu olarak sıcaklık veya basınçta kendi kendine devam eden, kontrolsüz artışlar her uçuş saati için 10-9 değerinden az olmalıdır" şeklindedir.

Tablo 3. Büyük Uçaklar için LIB Gereksinimleri (CS-25)

Kabul Edilebilir Uygulamalar (MOC)	Test Gereksinimleri	Sistem Emniyet Değerlendirmesi	Karmaşık Elektronik Donanım	Yanıcılık
Part 21 CS-25.1301 Equipment Function and Installation (Ekipman işlevleri ve kurulumu) CS-25.1309 Equipment, Systems, and Installations (Ekipmanlar, sistemler ve kurulumlar) CS-25.1351 Electrical Systems and Equipment, General (elektrik sistemleri ve ekipmanları, genel) CS-25.1353 Electrical Equipment and Installations (elektrik ekipmanları ve kurulumları) SC E-19 EHPS.380 Propulsion Battery (İtki bataryası)	DO-160G/ ED-14G Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment (uçuş ekipmanları için çevresel şartlar ve test prosedürleri) RTCA DO-311 Minimum Operational Performance Standards for Rechargeable Lithium Battery Systems (Şarj edilebilir batarya sistemleri için minimum işletme performans standartları)	ARP 4761 AMC CS-25.1309	AMC 20-152A/ DO-254/ED-80	CS 25.869 Fire protection: systems (yangın önleme: sistemler) CS 25.863 Flammable fluid fire Protection (yanıcı sıvı yangınları: korunma) CS 25.853 Compartment interiors (iç kompartmanlar)

Öngörülebilir herhangi bir şarj veya deşarj durumunun bir sonucu olarak hücre sıcaklığında veya basıncında sürekli, kontrolsüz artışlar ise her bir uçuş saatinde 10-7 değerinden daha az olmalıdır. Diğer hata durumları da FAA § 25.1309 veya EASA CS-25.1309 (büyük uçaklar için) gereksinimlerini sağlamalıdır. Bununla birlikte, itki sistemi bataryası için arıza modunun etkilerinin geleneksel bataryalardan farklı olması beklenir. Bu nedenle itki sistemi bataryalarının havacılık endüstrisindeki teknolojik ilerlemenin kümülatif deneyiminin yansıtıldığı Kabul edilebilir uygulamalarda (MOC) veya endüstri standartlarında yeni bir açılım gerekmektedir. Tablo 3'de, örnek olarak büyük uçaklar için LIB için sertifikalandırma sürecine ilişkin uçuşa elverişlilik gereksinimlerinin, kabul edilebilir MOC'lerin ve standartların listesi verilmiştir. Görüleceği gibi bu standartların ana konusu itki sistemi bataryaları olmadığı için, itki sistemleri gereksinimleri doğrudan tanımlanmamıştır, ancak ASTM, diğer standartlara referanslar vererek, onlarla birlikte kullanılması amacı ile "F3235-17a Uçak Elektrik Enerjisi Depolama Bataryaları için Standart

Şartnamesi”ni geliştirmiştir. ASTM F3235, itki enerjisi depolama gereksinimlerine yer verse de büyük uçakların itki sistemi gereksinimlerine bu standartta değinilmemiştir. .

Havacılığa özgü düzenlemelere ve standartlara ek olarak, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE), Sigortacılar Laboratuvarları (UL), Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE), diğer düzenleyici kurumlar da batarya standartları üzerine çalışmaktadır. Uluslararası Standardizasyon Örgütü ve Amerika Birleşik Devletleri Gelişmiş Batarya Konsorsiyumu (USABC), elektrikli araçlardaki olası batarya arıza modlarına karşı elektrik tasarımı sertifikasyonu ve yürütülecek güvenlik testleri için standartlar geliştirmektedir (Stephens vd., 2017; Hunt, 1996). Elektrikli araçlar için geçerli standartların ve testlerin listesi Tablo 4 ile verilmiştir.

Tablo 4. Elektrikli Araç Bataryası Standartları ve Testleri

Kurum	Kodu	Uygulama seviyesi				Testler
		Hücre	Modül	Paket	Araç	
SAE International	SAE J2464	√	√	√		Mekanik şok, düşme, ezilme, daldırma, mekanik bütünlük, delinme Isıl control olmadan döngü, pasif İlerleme, seperatör tıkanması, kısa devre testleri aşırı şarj/deşarj
	SAE J2929				√	Titreşim, ısıl şok, nem, ışığa maruz kalma, düşme, daldırma, mekaik şok, elektrik kısa devre, aşırı şarj/deşarj koruma, system hatası, ısıl control system arızası, yüksek gerilim koruması
International Organization for Standardization	ISO 6469-1	√	√	√		Elektrik itkili kara yolu araçları emniyet gereksinimleri Kısım 1: Araç üstü şarj edilebilir enerji depolama sistemi
	ISO 6469-2				√	Elektrik itkili kara yolu araçları emniyet gereksinimleri Kısım 2: Araç kullanma emniyet esasları ve hatalara karşı koruma
Underwriters Laboratories	UL 2580		√	√		Aşırı şarj lkoruması, kısa devre, aşırıdeşarj koruması, sıcaklık testi, dengelemesiz şarj, yalıtım direnci, soğutma/ısıl denge system arızası, Şok, ezilme, düşme, ısıl döngü, harici/dahili yangın durumu
United States Advanced Battery Consortium		√	√	√		Performans, emniyet, aşırı kullanım, ömür devri

Testlerin çoğunun, akut ısıl tehlikelere dayanmayı amaçladığı, EU ve HEU'da ise herhangi bir ani güç veya kapasite azalmasının kapsamadığı görülmektedir. USABC yaşam döngüsü testi, hızlandırılmış yaşlanmayı veya yaşam döngüsü testlerini içermektedir (Hunt, 1996). Elektrikli Araç Bataryası Test Prosedürleri Kılavuzuna dayalı olarak, bataryaların hizmet ömrünü (takvim ve döngü) incelemek için bir dizi test gereksinimleri belirlenmiştir. Hem hızlandırılmış yaşlanma hem de normal koşullar, batarya performansındaki bozulmayı yaşamın bir işlevi olarak yetkin bir şekilde tanımlamak ve uygulanabilir arıza modlarını tanımak için kullanılır. EİS kullanımında, bataryanın normalden daha yüksek döngü hızındaki hızlandırılmış yaşlanma sonucu yeni bir arıza modu ortaya çıkmamalıdır. USABC yaşam döngüsü test prosedürü şunları kapsar:

- **Hızlandırılmış Yaşlanma:** Normal kullanım sırasında batarya ömrünü azaltan veya bozulmayı hızlandıran stresli parametreler uygulamak (kazalar veya kötüye kullanım koşulları hariç). Örneğin, bu prosedürde sürekli elektrik döngüsü gereklidir.
- **Gerçek Kullanım Simülasyonu:** Elektrikli araç bataryasının gerçek işletimde çalışabileceği koşullar uygulama ortamlarında geniş bir sıcaklık aralığından farklı düzenli ve coğrafi değişikliklere kadar simüle edilir.
- **Referans Performansı:** farklı performans ve arıza özelliklerini belirlemek için aralıklı olarak tekrarlanan bir grup elektriksel performans testi dahil olmak üzere bataryanın ömrü boyunca meydana gelebilecek bozulmayı göstermek için gerçekleştirilir.
- **Temel Yaşam Döngüsü:** hızlandırılmış ömür testinin sonuçlarıyla karşılaştırma için bir “referans” olarak veya batarya ömrünü belirlemek için gerçekleştirilir (Hunt, 1996).

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, EİS’lerde kullanılan LIB için güvenilirlik değerlendirmesi ve güvenilirlik analizi yapılmış ve her bölümde tasarım aşamasında güvenilirliğe yönelik adımlar açıklanmıştır. Güvenilirlik gereksinimi tanımı yapılarak 3 hiyerarşik seviyede güvenilirlik yaklaşımı ile uçak seviyesinden sistem, ünite ve bileşen seviyesine güvenilirlik gereksinimlerinin dağılımı açıklanmıştır. Bir batarya sistem tasarımının örnek mimarisi için hata toleransı ve hatadan kaçınma tekniklerini içeren güvenilirlik tasarımı uygulanmıştır. Ardından güvenilirlik modeli analizi, güvenilirlik blok diyagramını ve FTA’yı kullanılarak sistemin genel güvenilirliğinin, batarya hücresi güvenilirliğinin bir fonksiyonu olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, kılçık diyagramını kullanarak batarya hücrelerinin arıza modları, batarya hücresi arızasının nedenlerini ve katkıda bulunan faktörler belirlenmiştir. Batarya hücresi güvenilirliğinin, tasarım ve üretim açısından temel güvenilirliğe ek olarak operasyonel, çevresel ve depolama ve taşıma koşullarından etkilendiği gösterilmiştir. Son olarak, mevcut geçerli havacılık gereksinimleri ve elektrikli araç standartları dikkate alınarak tasarım kriterlerinin doğrulanması için güvenlik testleri tanıtılmış ve havacılıkta LIB güvenilirliği için bilhassa yaşlanma açısından yeni düzenlemelere ihtiyaç olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bills, A., Sripad, S., Fredericks, W. L., Guttenberg, M., Charles, D., Frank, E., & Viswanathan, V. (2020). Universal Battery Performance and Degradation Model for Electric Aircraft. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.12616169.v1>
- Can, S., Gül, C. G., Koruyucu, E., & Yıldız, M. (2022). Reliability Considerations of the Common Unit in Hybrid Electric Propulsion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1226/1/012076>
- Diao, W., Saxena, S., & Pecht, M. (2019). Accelerated cycle life testing and capacity degradation modeling of LiCoO₂-graphite cells. *Journal of Power Sources*, 435, 226830. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226830>
- DoD. (1998). Military Handbook Electronic Reliability Design Handbook. In DoD (MIL-HDBK-3, Issue 1 October).
- Gandoman, F. H., Ahmadi, A., Bossche, P. Van den, Van Mierlo, J., Omar, N., Nezhad, A. E., Mavalizadeh, H., & Mayet, C. (2019). Status and future perspectives of reliability assessment for electric vehicles. *Reliability Engineering and System Safety*, 183, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.013>
- Gandoman, F. H., Ahmed, E. M., Ali, Z. M., Berecibar, M., Zobaa, A. F., & Aleem, S. H. E. A. (2021). Reliability evaluation of lithium-ion batteries for e-mobility applications from practical and technical perspectives: A case study. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/SU132111688>
- Hendricks, C., Williard, N., Mathew, S., & Pecht, M. (2015). A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 297, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.100>
- Hornung, M., & Sizmann, A. (2013). Battery Pack Modeling.
- Hunt, G. (1996). Electric Vehicle Battery Test Procedures Revision 2. Idaho National Engineering Laboratory (INEL), January, 1–40.

- Ilie, G., & Ciocoiu, C. N. (2010). Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes Management Research Application Of Fishbone Diagram To Determine The Risk Of An Event With Multiple Causes. *Management Research and Practice*, 2(1), 1–20. <http://mrp.ase.ro/no21/f1.pdf>
- Juarez-Robles, D., Jeevarajan, J. A., & Mukherjee, P. P. (2020). Degradation-Safety Analytics in Lithium-Ion Cells: Part I. Aging under Charge/Discharge Cycling. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(16), 160510. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abc8c0>
- Larsson, F., & Mellander, B. (2017). Lithium-ion Batteries used in Electrified Vehicles – General Risk Assessment and Construction Guidelines from a Fire and Gas Release Perspective. Borås, 1–25. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/252355/252355.pdf>
- Shu, X., Yang, W., Guo, Y., Wei, K., Qin, B., & Zhu, G. (2020). A reliability study of electric vehicle battery from the perspective of power supply system. *Journal of Power Sources*, 451, 227805. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227805>
- Sripad, S., Bills, A., & Viswanathan, V. (2021). A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion. *MRS Bulletin*, 46(5), 435–442. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00097-1>
- Stephens, D., Shawcross, P., Stout, G., Sullivan, E., Saunders, J., Risser, S., & Sayre, J. (2017). Lithium-ion Battery Safety Issues for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles. US DOT, October, chapter 2-page 7, 10. www.ntis.gov.
- Vetter, J., Novák, P., Wagner, M. R., Veit, C., Möller, K. C., Besenhard, J. O., Winter, M., Wohlfahrt-Mehrens, M., Vogler, C., & Hammouche, A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1–2), 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006>
- Xu, Q., Xu, Y., Tu, P., & Zhao, T. (2019). Systematic Reliability Modeling and Evaluation for On-Board Power Systems of More Electric Aircrafts. *IEEE Transactions on Power Systems* 34(4), 3264–3273. <https://doi.org/10.0.4.85/TPWRS.2019.2896454>
- Zio, E., Fan, M., Zeng, Z., & Kang, R. (2019). Application of reliability technologies in civil aviation : Lessons learnt and perspectives. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(1), 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.05.014>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.12.2022
Kabul Tarihi : 26.02.2023

Received Date : 20.12.2022
Accepted Date : 26.02.2023

THE COMPARISON OF THE EFFECTS OF THRESHOLDING METHODS ON SEGMENTATION USING THE MOTH FLAME OPTIMIZATION ALGORITHM

EŞİKLEME METOTLARININ SEGMENTASYON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN GÜVE ALEV OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI KULLANILARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Murat KARAKOYUN (ORCID: 0000-0002-0677-9313)

Necmettin Erbakan University, Department of Computer Engineering, Konya, Turkey

*Corresponding Author: Murat KARAKOYUN, mkarakoyun@erbakan.edu.tr

ABSTRACT

Segmentation is an important preprocessing step that directly affects the success in image processing applications. There are many methods and approaches used for the segmentation process. Thresholding is a frequently used approach among these methods. There are several suggested approaches to thresholding. In this study, six different thresholding approaches were used as the fitness functions using the moth flame algorithm and the results obtained from these approaches were compared. In experimental studies, seven different threshold levels of 10 different images were studied. In comparisons made with three different metrics, it was seen that the Otsu method was generally more successful. It has also been observed that the minimum cross entropy and Renyi entropies can be used as alternatives.

Keywords: Kapur, moth flame optimization, Otsu, segmentation, thresholding

ÖZET

Segmentasyon görüntü işleme uygulamalarında başarıyı doğrudan etkileyen önemli bir ön işlem adıdır. Segmentasyon süreci için kullanılan birçok yöntem ve yaklaşım mevcuttur. Eşikleme bu yöntemler içerisinde sıklıkla kullanılan bir yaklaşımdır. Eşikleme için önerilen birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmada moth flame algoritması kullanılarak altı farklı eşikleme yaklaşımı uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmış ve bu yaklaşımlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda 10 farklı görüntünün yedi farklı eşik seviyesi üzerinde çalışılmıştır. Üç farklı metrik ile yapılan kıyaslamalarda Otsu metodunun genel olarak daha başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca minimum cross entropy ve Renyi entropilerinin de alternatif olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kapur, güve alev optimizasyonu, Otsu, segmentasyon, eşikleme

INTRODUCTION

Segmentation is a very important and difficult step for image processing applications. A successful segmentation or an unsuccessful segmentation result directly affects the success of the image processing application. Therefore, this step needs to be handled and performed carefully. The segmentation process is applied to make the image more understandable for the next stages and to prepare it for further processing. The main purpose at this stage is to group the pixels in the image according to their similarities and to ensure that the image is represented with fewer pixel groups. After this stage, it is easier to separate the objects in the image from the background. Because segmentation is such a difficult and important process, researchers have developed and proposed different approaches. Clustering-based (Karakoyun et al., 2017b), edge-based (Priyadharsini & Sharmila, 2019), region-based (Yupeng Li et al., 2020), thresholding-based (Selçuk et al., 2017) etc. are the most known approaches that used for image segmentation. When compared with the others, thresholding methods are widely used because of its simplify and practical applicability (Cai et al., 2022; Karakoyun et al., 2017a; Karakoyun et al., 2021).

The aim of the thresholding methods is to separate the images into similar pixel regions with the selected threshold values. The histogram of the image plays an important role when the threshold values are selected. The number of thresholds is a value used to categorize thresholding methods. According to the number of threshold values, these methods categorized as bi-level and multi-level thresholding. In bi-level thresholding, there is only one threshold value that separate the image into two classes. The pixels under the threshold value are assigned as 0 (black) and the pixels greater than threshold value are assigned as 1 (white). So that a binary image is generated when bi-level thresholding is applied to the image. On the other hand, more than one threshold value is needed when multi-level thresholding is used. Although thresholding approach is effective and simple, there is a complex problem with the selection of the threshold value(s). Especially when the number of thresholds is high, this complexity raises more (Abdel-Basset et al., 2022; Chen et al., 2022; Houssein et al., 2022; Karakoyun et al., 2021). To handle and solve this problem, many methods like Otsu (Otsu, 1979), Kapur (Kapur et al., 1985), Tsallis (De Albuquerque et al., 2004), Renyi (Sahoo et al., 1997) etc. have been proposed for the image thresholding. These approaches generally work based on variance or entropy and measure the quality of selected threshold values. Since the thresholding problem is a combinatorial problem, its complexity is quite high. It is therefore very difficult to consider all combinations individually for threshold values within an acceptable time limit. It is almost impossible, especially in cases where the number of thresholds is high. In the course of time, metaheuristic algorithms have started to be used in order to get rid of this time complexity and to obtain sensible solutions within an acceptable time. Metaheuristic algorithms use thresholding methods as fitness functions and try to optimize these functions to determine the best threshold values. When we look at the literature, it is seen that there are many studies that have been put forward with this approach. It is almost impossible in terms of time and effort to consider and examine all of these studies. For this reason, some of these studies were analyzed within the scope of related works.

Ryalat et al. (Ryalat et al., 2022) used Harris hawks optimization (HHO) algorithm to segment chest images of covid-19 patients. They used the Otsu thresholding method as a fitness function. The performance of the HHO algorithm was compared with the Otsu method with three metrics to calculate the quality of the segmented images. On the other hand, comparison was made in terms of time and it was stated that the HHO algorithm was in advance in terms of speed. Günay and Taze (Günay & Taze, 2022) performed segmentation for the detection of cytoplasm in multiple myeloma plasma cells. They used the Otsu method as the thresholding method. They stated that the deep learning supported U-net network approach they used generally achieved satisfactory results. Zhao et al. (Zhao et al., 2021) proposed a diffusion association slime mould algorithm (DASMA) for multi-level image thresholding. The suggested algorithm was applied on the images taken from Berkeley dataset and CT images by using Renyi's entropy as a fitness function. They compared the performance of the DASMA with the performance of the several algorithms. They declared that the proposed algorithm has successful results on image segmentation process. Xing and He (Xing & He, 2021) used marine predators algorithm (MPA) on segmentation of the infrared images. The authors handled the segmentation as a multi-objective problem by using 9D Kapur as a fitness function. The aim of the work is to detect the fault regions in the infrared images of the power systems by using a boost MPA (BMPA). The performance of the proposed BMPA was compared with the performances of the other multi-objective algorithms. It has been stated that the BMPA is successful to diagnosis the faults in images and has better performance than the compared algorithms. Ma and Yue (Ma & Yue, 2022) improved a method based on the whale optimization algorithm (WOA) to solve the multi-level thresholding problem. They applied their method which is named as RAV-WOA on a set of benchmark images (include gray and color samples) by using Otsu's between class variance as an objective function. The performance comparison was made between the proposed method and several metaheuristic algorithms with the

PSNR and MSSIM metrics. They stated that the RAV-WOA method has better results than the other algorithms. Huang et al. (Huang et al., 2021) applied fruitfly optimization algorithm (FOA) for a thresholding segmentation problem. They used three benchmark images as dataset and Otsu's method as an objective function. They compared the performance of their algorithm with the classical Otsu's method. Fitness value and speed of the algorithms' used as comparison metrics. They stated that their algorithm has equal fitness values but is faster than classical Otsu's method. Kalyani et al. (Kalyani et al., 2020) used exchange market algorithm (EMA) with minimum cross entropy (MCE) for image segmentation. They applied EMA on optimization of benchmark functions and segmentation of brain images with different threshold levels. They specified that the EMA has better performance than compared algorithms on different metrics. Raj et al. (Raj et al., 2019) employed differential evolution (DE) algorithm with Tsallis-Fuzzy entropy method for an image segmentation problem. The performance of the Tsallis-Fuzzy approach was compared with the Shannon and Tsallis methods. Besides, a performance comparison of the DE with Tsallis-Fuzzy was done with the performance of the different state-of-the-art algorithms. SSIM, PSNR, SNR and statistical tests were used as performance comparison metrics. They marked that the proposed algorithm has better results than the other algorithms. Koc et al. (Koc et al., 2018) applied GWO algorithm with the Otsu thresholding approach on six benchmark images for multilevel image thresholding problem. They applied the GWO algorithm with four (2, 3, 4, 5) different threshold levels and compared the performance of the algorithm with five metaheuristic algorithms. According to the experimental results they stated that the GWO algorithm was generally more successful than the other algorithms. Naidu et al. (Naidu et al., 2018) selected Shannon entropy and firefly algorithm (FA) for a thresholding image segmentation problem. The FA applied on benchmark images and a performance comparison was done with three metaheuristic algorithms by using SSIM, PSNR, error rate and CPU time metrics. The experimental results of the study show that the performance of the FA is better than the performance of the other algorithms. Bhandari et al. (Bhandari et al., 2015b) proposed a variant of the cuckoo search (CS) algorithm for thresholding segmentation problem. In the study, Tsallis entropy was used as a fitness function and the proposed algorithm was applied on satellite and benchmark images. The performance of the proposed algorithm was compared with the performance of the several metaheuristic algorithms on different metrics. The authors stated that the proposed algorithm has better results than the other algorithms.

In this study, it is aimed to measure the success of thresholding methods by using the recently proposed MFO algorithm. For this purpose, six thresholding approaches (Otsu, Kapur, Renyi, Tsallis, MCE, Shannon) were used on 10 images with different features. The MFO algorithm was applied separately using each of these approaches as a fitness function. Seven different threshold levels were used for comprehensive analysis. In addition, three different comparison metrics (PSNR, SSIM, FSIM) were used to evaluate the results from different perspectives. The successful thresholding approach was determined by making a detailed analysis on the basis of threshold level and comparison metric.

THRESHOLDING PROBLEM

Thresholding is a very popular and simple method for an image segmentation problem. The thresholding method is generally applied on the grayscale images by using their histogram. If the threshold number is used as categorization criteria, thresholding transaction can be classified into two sections: bi-level and multi-level thresholding. In bi-level thresholding, only one threshold value divides the image into two classes. As a result of the bi-level image thresholding, the gray scale image is converted to a binary image that includes only 0 and 1 pixels. In gray scale image, the pixel values under threshold are marked as zero and others are assigned as one. On the other hand, in multi-level thresholding, the threshold number is greater than one. In this type of thresholding, an image that has multi classes is achieved as output image. Let's think that I is the image that will divided into m ($C_1, C_2 \dots C_m$) classes by using T ($T_1, T_2 \dots T_{m-1}$) threshold values. Equation (1) shows the separation of the image into m classes by using $m-1$ threshold values (Bhandari et al., 2015a, 2015b; Ishak, 2017; Karakoyun et al., 2017a; Karakoyun et al., 2021).

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \{g(x, y) \in I | 0 \leq g(x, y) \leq T_1 - 1\} \\
 C_2 &= \{g(x, y) \in I | t_1 \leq g(x, y) \leq T_2 - 1\} \\
 &\vdots \\
 C_i &= \{g(x, y) \in I | t_i \leq g(x, y) \leq T_{i+1} - 1\} \\
 &\vdots \\
 C_m &= \{g(x, y) \in I | T_{m-1} \leq g(x, y) \leq L\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

where L is the maximum pixel value of the gray scale image and generally is 256.

MOTH FLAME OPTIMIZATION

The MFO (Mirjalili, 2015) algorithm that is inspired by the nocturnal flight strategy of moths and proposed by Mirjalili. In the algorithm, moths have a specific flying mechanism which uses the moon light with a stable angle. The mechanism that they use for navigation is called as transverse orientation. This strategy provides an effective and comfort travelling in a long straight distance. But, the moths are affected from artificial lights and try to act similar with having an angle with this artificial light. The flying of the moths by keeping a constant angle between them and the light causes a spiral movement. In this case, it can be observed that the cross-direction strategy is only effective for distant lights such as moonlight. Figure 1 presents the spiral flying of the moths around the light (Karakoyun & Özkış, 2021; Yu Li et al., 2020; Mirjalili, 2015).

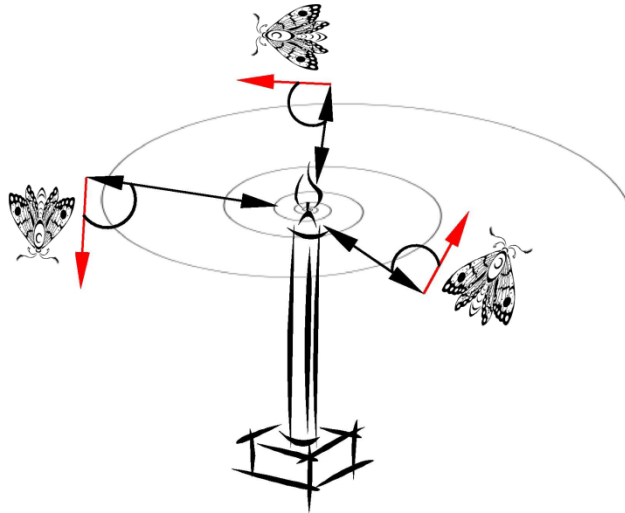


Figure 1. Spiral Flying of Moths Around the Light

Figure 1 clearly shows that the moths eventually close towards the light source. The MFO algorithm was mathematically modelled and developed by inspired the behavior of moths with the light source. Like other metaheuristic algorithms, the MFO is also a population based and iterative algorithm. The algorithm basically consists of moths and flames. While each moth in the population represents a possible solution, each variable that constitutes the position of the moth represents one dimension of the problem. Let's think that N is the population size and D is the dimension of the problem then the population of the moths can be represented with a matrix as follow:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{N1} & \cdots & m_{ND} \end{bmatrix} \quad (2)$$

here M represents the population of the moths. There is an array of the fitness values related with the positions. The array of the fitness values (OM) can be represented as follow:

$$OM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

The moths in population use an updating process to improve their position. In updating process each moth uses a reference flame. It is expected to avoid the local optima and to make an effective search by feeding from different flames in position update phase. The position of the flames has the same size as the moths and the flames have an

array of fitness values. The position and fitness values of the flames are represented in Eq. (4) and Eq. (5), respectively.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N1} & \cdots & f_{ND} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$OF = \begin{bmatrix} OF_1 \\ OF_2 \\ \vdots \\ OF_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

As mentioned above, the moths and flames are the same in terms of presentation and structure. The difference between them is the way they are treated within the population. The position of the moths is updated at each iteration, while the best positions ever found are selected as flames. The flames are selected at each iteration step from the best positions obtained in the previous iteration step. On the other hand, moths are assisted by a flame as a reference point during the position update process. Figure 2 shows the flame selection strategy of the MFO algorithm.

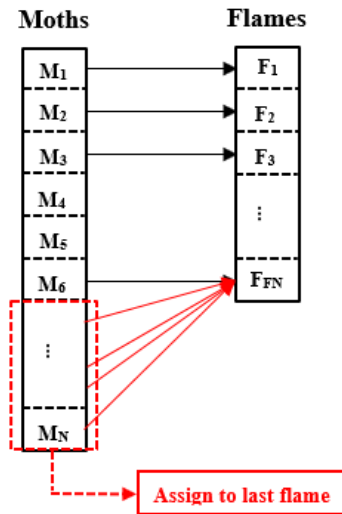


Figure 2. Reference Flame Selection for Moths

The mathematical model of the position update that inspired by Fig. 1 is given in Eq. (6).

$$M_i = D_i * e^{bt} * \cos(2\pi t) + F_j \quad (6)$$

$$D_i = |F_j - M_i| \quad (7)$$

Here $M_i = (m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iD})$ and $F_j = (f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jD})$ are the positions of the i th moth and j th flame respectively, D_i is the distance between i th moth and related j th flame and calculated by Eq. (7), t is a number generated randomly in $[-1, 1]$ and generated by using Eq. (8) and b is a constant value to determine the form of the logarithmic spiral.

$$t = (a - 1) * rand + 1 \quad (8)$$

$$a = -1 + k * \left(-\frac{1}{K}\right)$$

The current iteration number is k , and K is the maximum iteration number.

In the mechanism of the algorithm, the number of the flames is decreased for each iteration by using Eq. (9) as follow:

$$flame_number = round\left(N - k * \frac{N-k}{K}\right) \tag{9}$$

where N is the maximum flame number that is equal to population size at the beginning of the algorithm.

The MFO algorithm has a similar processing mechanism as other metaheuristic algorithms. The parameters of the algorithm must be set in first step. Then a random population is generated within the boundary of the solution space. For each moth (position) in population, fitness values are calculated and the flames are assigned. The main loop of algorithm is started. In this loop, for each moth the position update procedure works, the number of the flames is updated and best position is saved for each iteration step. The loop continues until the termination criterion is met (Karakoyun & Özkış, 2021; Mirjalili, 2015; Shehab et al., 2020). Figure 3 shows the main steps of the MFO algorithm.

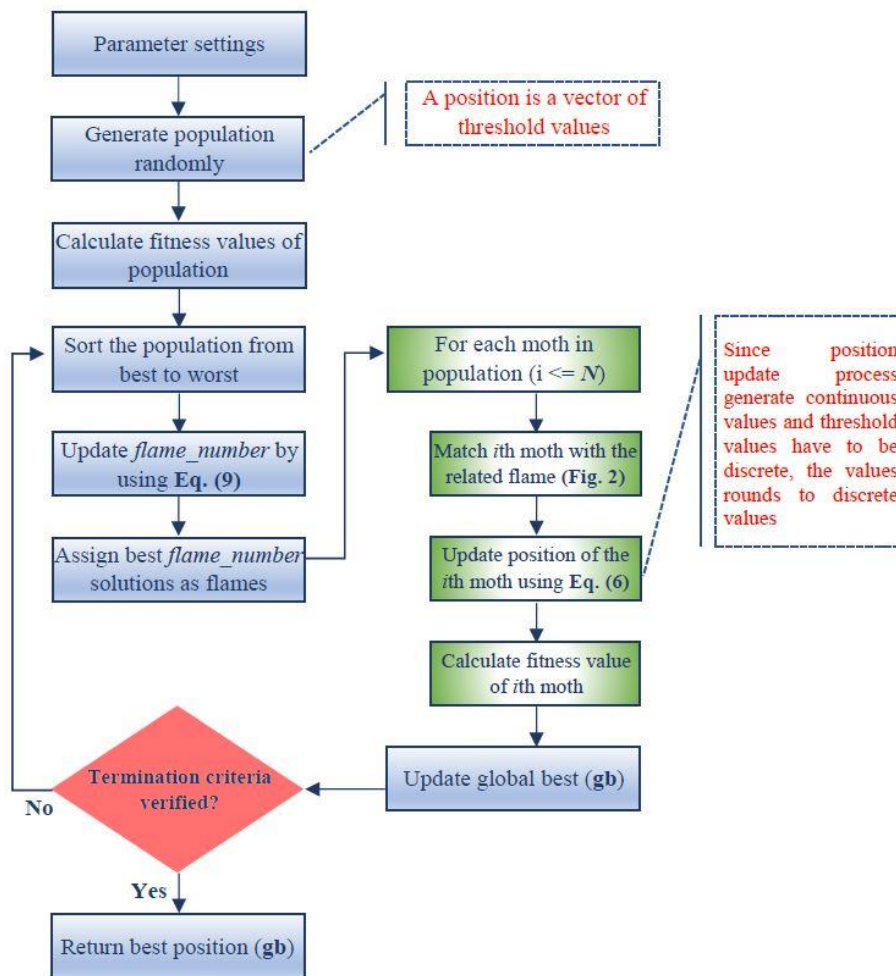


Figure 3. The Main Steps of the MFO Algorithm

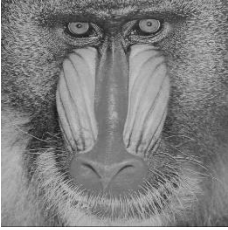







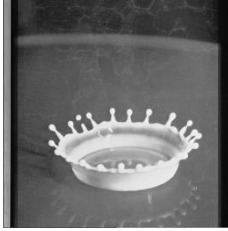

EXPERIMENTAL STUDY

In this section, firstly, the images handled for thresholding were presented. Then the thresholding methods were explained in a short view. Finally, experimental results were presented comparatively.

Dataset Images

In this paper, 10 well-known benchmark images which are mostly used for image segmentation in the literature were handled. The sizes of the images that are gray scale are different from each other; however, bit depth of all images is 8. For this reason, the value that each pixel in the images can take is between 0-255. The benchmark images are presented in Table 1.

Table 1. The Images Used for Thresholding Segmentation

Baboon (I ₁)	Barbara (I ₂)	Boats (I ₃)	Bridge (I ₄)	Camera (I ₅)
				
Columbia (I ₆)	Couple (I ₇)	Lena (I ₈)	Milkdrop (I ₉)	Peppers (I ₁₀)
				

Thresholding Methods

The thresholding is a simple and successful approach for image segmentation. There are many methods used in thresholding segmentation. These methods are used to measure how appropriate the chosen threshold value (or values) is. In this study, the selected algorithm was tested using the thresholding methods given below.

Otsu's Method

Otsu's (Otsu, 1979) method is a popular and useful approach for thresholding. This approach is used to calculate the variance within the pixel classes separated by the threshold values (Karakoyun et al., 2017a; Satapathy et al., 2018). The main purpose of the algorithms is to determine the threshold values that minimize the total variance within the class by using Otsu's within class variance which is presented in Eq. (10).

$$\sigma_w^2 = \sum_{j=1}^m w_j \sigma_j^2 \quad (10)$$

Here w_j and σ_j^2 are the gray level distribution and the variance of the j th class, respectively.

$$w_j = \sum_{i=T_{j-1}+1}^{T_j} P_i \quad (11)$$

$$\sigma_j^2 = \sum_{i=T_{j-1}+1}^{T_j} (i - u_j)^2 P_i / w_j \quad (12)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (13)$$

$$u_j = \sum_{i=T_{j-1}+1}^{T_j} i * P_i / w_j \quad (14)$$

P_i is the probability of the i th gray level and u_j is the mean value of the j th class. n_i is the number of pixels at i th gray level and N is number of the all pixels in image.

Kapur Entropy

Kapur entropy is another famous and simple method for thresholding. This approach works based on the entropy. The main purpose is to maximize the entropy of the separated regions by the threshold values. Assume that I is a grayscale image with N number of pixels and L ($0 < L < 255$) gray level. The number of the pixels at i th gray level is n_i and the probability of i th pixels in the image is $p_i = n_i / N$. Kapur method purposes to maximize total entropy given in Eq. (15) (Kapur et al., 1985; Karakoyun et al., 2021; Tuba et al., 2017).

$$f(T) = \sum_{i=0}^n H_i \quad (15)$$

The H_i entropies are calculated by the following equation:

$$\begin{aligned} H_0 &= - \sum_{i=0}^{T_0-1} \frac{p_i}{\omega_0} \ln \frac{p_i}{\omega_0}, \quad \omega_0 = \sum_{i=0}^{T_0-1} p_i \\ H_1 &= - \sum_{i=T_0}^{T_1-1} \frac{p_i}{\omega_1} \ln \frac{p_i}{\omega_1}, \quad \omega_1 = \sum_{i=T_0}^{T_1-1} p_i \\ &\vdots \\ H_n &= - \sum_{i=T_{n-1}}^{L-1} \frac{p_i}{\omega_n} \ln \frac{p_i}{\omega_n}, \quad \omega_n = \sum_{i=T_{n-1}}^{L-1} p_i \end{aligned} \quad (16)$$

Except the most commonly used Otsu and Kapur methods, other approaches used are Renyi (Sahoo et al., 1997), Tsallis (De Albuquerque et al., 2004), Minimum Cross Entropy (MCE) (Pal, 1996) and Shannon (Naidu et al., 2018; Shannon, 1948) approaches. Among these approaches, only the Otsu method is variance-based, while the rest are entropy-based. More details of other approaches can be found in reference studies.

Experimental Results

In the experiments, 10 benchmark images presented in Table 1 were used for the segmentation. MFO algorithm was applied on images by using six different thresholding methods as the objective function. For each method, algorithm was applied 20 times and average results of 20 runs were presented in result tables with three metrics. In this section, first, comparison metrics were introduced and then the experimental results were presented.

Comparison Metrics

In this study, to measure the quality of the segmented images three comparison metrics were used: Peak signal-to-noise ratio (PSNR), structural similarity index measure (SSIM) and featured similarity index measure (FSIM).

PSNR is the most famous metric to measure the quality of the segmentation process. It is used to calculate the rate between the maximum possible signal power and the power of the deflecting noise that affects the quality of its representation. Because of the signals having a very wide dynamic range the PSNR is usually calculated as the logarithm term of decibel scale. PSNR value depends on the mean squared error (MSE) between the original (or if there is ground truth image) and segmented image. So, a higher PSNR value is wanted and a smaller value means a bad segmentation result (Hore & Ziou, 2010; Sara et al., 2019). Equation (17) shows the PSNR value between f -grey scale image and g -segmented image.

$$PSNR = 10 \log_{10}(K^2 / MSE(f, g)) \quad (17)$$

$$MSE(f, g) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (f_{ij} - g_{ij})^2 \quad (18)$$

Here $m \times n$ is the size of the both f and g images, K is the maximum pixel value of the images and is 255 (since bit depth of image is 8).

SSIM is another popular metric to calculate the similarity between the source and destination image. The SSIM is evaluated by using three main elements named luminance, contrast and structure. The SSIM takes a value between 0 and 1 according to the similarity between images. A higher value for the metric is wanted that means a better quality of segmentation. The mathematical model of the SSIM can be expressed as follow (Brooks et al., 2008; Hore & Ziou, 2010; Sara et al., 2019; Wang et al., 2004):

$$SSIM(f, g) = [l(f, g)]^\alpha * [c(f, g)]^\beta * [s(f, g)]^\gamma \quad (19)$$

where l is the luminance that compares brightness between f and g images, c is the contrast that compares the difference between the brightest and darkest areas of the f and g images, s is the structure compares the luminance pattern of the f and g images, and α , β and γ are the constants numbers that have positive values. The luminance, contrast and structure between f and g images can be calculated by using Eq. (20).

$$l(f, g) = \frac{2 \mu_f \mu_g + C_1}{\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1}$$

$$c(f, g) = \frac{2 \sigma_f \sigma_g + C_2}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2} \quad (20)$$

$$s(f, g) = \frac{\sigma_{fg} + C_3}{\sigma_f \sigma_g + C_3}$$

Here μ_f and μ_g are the mean of images, σ_f and σ_g are standard deviation of the images, and σ_{fg} is the cross covariance of the f and g images.

FSIM is a popular metric that calculate the similarity between two images by mapping the features. The metric needs phase congruency (PC) and gradient magnitude (GM) of the images. PC points on the features of the image in the domain frequency and it is invariant to contrast. On the other hand, convolution masks are used to calculate the GM value of an image. For f and g images, PC_f and PC_g are the phase congruency maps, respectively and G_f and G_g are the magnitude gradient maps, respectively (Sara et al., 2019; Zhang et al., 2011). Then FSIM value between two images can be calculated by using Eq. (21).

$$FSIM(f, g) = [S_{PC}(f, g)]^\alpha * [S_G(f, g)]^\beta \quad (21)$$

$$S_{PC}(f, g) = \frac{2 PC_f PC_g + T_1}{PC_f^2 + PC_g^2 + T_1} \quad (22)$$

$$S_G(f, g) = \frac{2 G_f G_g + T_2}{G_f^2 + G_g^2 + T_2} \quad (23)$$

α and β are used to set the correlative importance of GM and PC features and used as $\alpha = \beta = 1$ based on the referenced work. T_1 and T_2 are positive constant values and used as 0.85 and 160 based on the referenced work. As a result, FSIM takes a value between 0 and 1. A higher value is wanted for a better segmentation result.

PSNR Results

PSNR is a metric that calculates the quality of the segmented image and a higher value is wanted for this metric. Table 2 shows the PSNR metric-based results of six thresholding methods. The MFO algorithm was applied on 10 images with seven threshold levels (2, 4, 6, 8, 10, 12, 15). In this case, a total of 70 cases emerged in the experimental studies. In these 70 cases, Otsu method had 68 best average results and MCE had 2 best average results. In addition to the numerical best cases, when the results are examined in detail, it can be said that the MCE and Renyi methods

are the most successful approaches after the Otsu method. However, Shannon entropy can be considered as the most unsuccessful approach according to PSNR metric-based results. On the other hand, Tsallis and Kapur took their place in the results of this metric with an average success.

Table 2. PSNR Metric-based Results of the Methods

Method	#TH	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
Otsu	2	25.62	22.33	24.67	21.47	24.40	23.51	22.80	24.27	22.27	22.45
	4	29.57	26.61	28.45	25.74	27.88	27.84	26.66	29.38	26.83	26.79
	6	32.13	29.16	31.13	28.59	30.73	30.71	29.61	32.28	30.15	29.73
	8	34.02	31.29	33.32	30.69	33.08	32.86	31.74	33.98	32.05	31.89
	10	35.59	32.83	35.11	32.16	34.69	34.62	33.38	35.50	33.81	33.40
	12	36.72	34.19	36.37	33.69	35.89	35.69	34.71	36.64	35.04	34.79
	15	38.38	35.93	37.79	35.41	37.37	37.43	36.26	38.13	36.57	36.45
Kapur	2	21.34	21.37	20.80	21.28	18.18	22.74	21.61	21.06	21.59	22.18
	4	26.38	26.35	24.71	25.38	26.93	24.85	25.41	24.59	24.98	25.06
	6	28.11	28.56	28.87	27.67	28.22	28.44	27.33	28.66	28.04	27.70
	8	30.14	30.12	30.83	29.34	30.78	30.22	29.79	30.61	30.25	30.32
	10	31.49	31.54	32.13	29.94	32.41	31.52	31.55	31.97	31.56	32.17
	12	32.93	32.99	33.41	30.69	33.74	33.00	32.86	33.08	32.91	33.36
	15	34.69	34.61	34.87	30.85	35.49	34.89	34.20	34.85	34.48	34.89
Renyi	2	25.50	22.06	24.48	21.42	23.18	23.39	22.69	24.24	22.07	21.83
	4	29.21	26.40	28.18	25.72	27.38	27.68	26.46	29.05	26.72	26.51
	6	31.85	28.98	31.04	28.44	30.60	30.58	29.35	31.77	29.79	29.57
	8	33.80	31.05	33.23	30.43	32.85	32.75	31.53	33.58	31.81	31.69
	10	35.43	32.73	34.93	32.15	34.35	34.20	33.09	35.15	33.58	33.29
	12	36.58	34.11	36.14	33.59	35.56	35.59	34.39	36.54	34.90	34.62
	15	37.96	35.78	37.69	35.27	37.04	36.60	35.79	37.86	36.44	36.31
Tsallis	2	22.16	20.39	21.03	19.50	16.78	20.80	19.92	21.90	18.71	19.62
	4	26.17	23.42	24.75	21.49	22.36	24.26	23.07	25.59	23.32	23.96
	6	27.08	25.60	21.17	15.68	25.55	26.23	22.06	27.81	24.76	22.12
	8	28.07	24.86	19.63	13.94	26.84	27.67	18.42	27.72	26.41	16.78
	10	29.00	23.32	18.38	13.71	27.82	28.68	16.48	29.49	27.79	16.07
	12	29.89	24.13	17.21	13.47	27.82	29.36	16.47	28.78	28.10	17.07
	15	30.22	20.35	18.89	13.51	30.35	29.80	15.86	30.15	29.76	19.27
MCE	2	25.49	22.08	24.01	21.07	23.79	23.04	22.46	24.13	21.98	22.08
	4	29.42	25.89	27.67	24.89	27.41	27.49	26.20	29.28	26.32	26.51
	6	31.94	28.68	30.26	27.91	29.95	30.44	29.23	32.00	29.51	28.98
	8	33.81	30.78	32.79	29.53	32.24	32.58	31.06	33.81	31.88	31.10
	10	35.32	32.43	34.50	31.47	34.09	34.26	32.96	35.45	33.51	32.99
	12	36.78	33.86	35.83	32.94	35.33	35.63	34.25	36.67	34.84	34.20
	15	38.15	35.44	37.51	34.90	36.95	37.30	35.94	38.05	36.45	35.97
Shannon	2	23.97	18.72	21.18	13.41	14.09	20.01	18.92	16.70	16.57	16.43
	4	24.38	18.77	22.78	13.46	20.74	19.60	18.92	16.66	16.50	17.92
	6	24.06	18.99	23.38	13.52	23.76	19.21	18.98	16.77	16.54	17.97
	8	24.22	19.18	23.20	13.53	25.03	19.13	19.03	17.46	16.56	19.69
	10	24.38	19.28	23.79	13.54	26.59	18.93	19.07	17.42	16.56	19.95
	12	24.73	19.11	24.00	13.54	26.34	18.88	19.08	18.69	16.63	20.35
	15	24.74	19.81	24.34	13.58	27.37	18.78	19.06	18.35	19.36	20.61

SSIM Results

This metric measures the quality of the segmented images based-on structural properties. A value between 0 and 1 is generated as a result of this metric and a higher value is wanted for a better segmentation result. As mentioned above, there are 70 cases of experiments that needed to be handled. Table 3 shows the average results of the methods based-on SSIM metric. According to these results, The Otsu method showed the best average results in 61 of the 70 cases, showing that it was the most successful approach in this metric as well. The success of the Otsu method was followed by MCE, which was successful in 44 of the 70 cases. The Renyi method, which achieved the best success average of

19, came in third place. When the results in Table 3 is examined in general, it is seen that Kapur and Tsallis approaches have achieved an average success, as in the PSNR metric. Shannon's entropy is also behind in this metric in terms of average success.

Table 3. SSIM Metric-based Results of the Methods

Method	#TH	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
Otsu	2	0.77	0.71	0.77	0.64	0.80	0.77	0.66	0.73	0.72	0.67
	4	0.87	0.80	0.84	0.79	0.85	0.83	0.76	0.81	0.76	0.73
	6	0.92	0.84	0.88	0.86	0.89	0.87	0.84	0.86	0.81	0.79
	8	0.94	0.87	0.90	0.90	0.91	0.90	0.87	0.88	0.84	0.83
	10	0.96	0.90	0.92	0.92	0.93	0.92	0.90	0.90	0.87	0.86
	12	0.97	0.91	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.89	0.89
	15	0.98	0.94	0.95	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.91	0.92
Kapur	2	0.62	0.68	0.68	0.62	0.68	0.75	0.62	0.70	0.72	0.65
	4	0.79	0.79	0.78	0.77	0.85	0.79	0.73	0.74	0.75	0.70
	6	0.83	0.83	0.85	0.83	0.87	0.84	0.77	0.80	0.77	0.75
	8	0.88	0.86	0.87	0.87	0.89	0.87	0.83	0.83	0.80	0.80
	10	0.90	0.88	0.89	0.88	0.90	0.88	0.86	0.85	0.82	0.83
	12	0.92	0.90	0.90	0.90	0.91	0.90	0.89	0.86	0.85	0.86
	15	0.94	0.92	0.92	0.90	0.93	0.92	0.91	0.89	0.87	0.89
Renyi	2	0.77	0.69	0.76	0.63	0.73	0.77	0.65	0.73	0.70	0.63
	4	0.86	0.79	0.82	0.79	0.84	0.83	0.75	0.80	0.76	0.71
	6	0.91	0.83	0.87	0.86	0.89	0.87	0.82	0.85	0.79	0.78
	8	0.94	0.87	0.90	0.89	0.91	0.90	0.86	0.87	0.83	0.82
	10	0.95	0.89	0.92	0.92	0.92	0.91	0.89	0.89	0.86	0.86
	12	0.96	0.91	0.93	0.94	0.93	0.93	0.91	0.91	0.88	0.88
	15	0.97	0.93	0.95	0.96	0.94	0.94	0.93	0.93	0.90	0.91
Tsallis	2	0.64	0.65	0.69	0.53	0.63	0.70	0.56	0.71	0.68	0.62
	4	0.78	0.73	0.78	0.62	0.77	0.77	0.67	0.76	0.73	0.69
	6	0.81	0.77	0.68	0.33	0.82	0.80	0.62	0.79	0.74	0.66
	8	0.83	0.74	0.63	0.24	0.85	0.83	0.50	0.80	0.76	0.57
	10	0.85	0.68	0.60	0.23	0.85	0.85	0.43	0.82	0.78	0.55
	12	0.87	0.71	0.58	0.22	0.86	0.86	0.43	0.81	0.78	0.57
	15	0.88	0.60	0.62	0.22	0.89	0.86	0.41	0.83	0.81	0.61
MCE	2	0.77	0.71	0.77	0.64	0.82	0.76	0.65	0.76	0.73	0.68
	4	0.87	0.78	0.83	0.78	0.86	0.83	0.75	0.81	0.77	0.74
	6	0.91	0.83	0.87	0.85	0.89	0.88	0.83	0.86	0.82	0.78
	8	0.93	0.87	0.90	0.89	0.91	0.90	0.86	0.88	0.84	0.82
	10	0.95	0.89	0.92	0.92	0.92	0.92	0.90	0.90	0.87	0.85
	12	0.96	0.91	0.93	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.89	0.88
	15	0.97	0.93	0.95	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.91	0.91
Shannon	2	0.71	0.59	0.69	0.22	0.50	0.70	0.54	0.62	0.66	0.57
	4	0.73	0.60	0.73	0.22	0.69	0.68	0.54	0.62	0.66	0.60
	6	0.72	0.60	0.76	0.22	0.76	0.66	0.55	0.62	0.66	0.60
	8	0.73	0.62	0.75	0.23	0.79	0.65	0.55	0.64	0.67	0.63
	10	0.73	0.62	0.77	0.23	0.82	0.64	0.56	0.63	0.66	0.64
	12	0.75	0.62	0.77	0.23	0.82	0.63	0.56	0.66	0.68	0.65
	15	0.75	0.64	0.78	0.23	0.84	0.63	0.56	0.65	0.72	0.66

FSIM Results

FSIM is last metric used in this work and calculates the similarity between source and destination images. For 70 cases, Otsu had 60 average best states, Renyi had 59 average best states and MCE had 42 average best states. On the other hand, Kapur entropy had 7 average best cases, where Tsallis and Shannon had no average best case in the experiments.

Table 4. FSIM Metric-based Results of the Methods

Method	#TH	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₉	I ₁₀
Otsu	2	0.89	0.80	0.83	0.78	0.79	0.81	0.77	0.80	0.76	0.75
	4	0.95	0.89	0.91	0.89	0.86	0.89	0.89	0.89	0.84	0.85
	6	0.97	0.93	0.95	0.94	0.90	0.93	0.94	0.94	0.89	0.91
	8	0.98	0.95	0.97	0.96	0.93	0.96	0.96	0.96	0.92	0.95
	10	0.99	0.96	0.98	0.97	0.95	0.97	0.97	0.97	0.94	0.96
	12	0.99	0.98	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.98	0.96	0.98
	15	1.00	0.98	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	0.97	0.98
Kapur	2	0.76	0.78	0.71	0.77	0.70	0.78	0.73	0.72	0.76	0.74
	4	0.91	0.89	0.85	0.90	0.85	0.85	0.86	0.79	0.82	0.81
	6	0.94	0.92	0.92	0.94	0.88	0.91	0.91	0.88	0.87	0.88
	8	0.97	0.94	0.94	0.96	0.92	0.93	0.95	0.92	0.90	0.93
	10	0.98	0.95	0.96	0.96	0.93	0.95	0.97	0.94	0.92	0.95
	12	0.98	0.97	0.97	0.97	0.95	0.96	0.98	0.95	0.94	0.97
	15	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98	0.98	0.97	0.96	0.98
Renyi	2	0.89	0.79	0.82	0.78	0.74	0.81	0.77	0.79	0.75	0.73
	4	0.96	0.89	0.91	0.90	0.85	0.89	0.88	0.89	0.84	0.85
	6	0.98	0.93	0.95	0.94	0.90	0.93	0.94	0.94	0.89	0.91
	8	0.99	0.95	0.97	0.96	0.93	0.96	0.96	0.96	0.92	0.95
	10	0.99	0.96	0.98	0.97	0.95	0.97	0.98	0.97	0.94	0.97
	12	0.99	0.98	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.98	0.96	0.98
	15	1.00	0.98	0.99	0.99	0.97	0.98	0.99	0.99	0.97	0.99
Tsallis	2	0.78	0.75	0.72	0.69	0.67	0.71	0.66	0.73	0.70	0.69
	4	0.90	0.82	0.84	0.76	0.77	0.82	0.80	0.81	0.79	0.79
	6	0.92	0.87	0.73	0.43	0.82	0.87	0.73	0.87	0.82	0.76
	8	0.94	0.84	0.68	0.33	0.86	0.90	0.57	0.86	0.85	0.63
	10	0.95	0.77	0.65	0.32	0.86	0.91	0.48	0.90	0.87	0.62
	12	0.96	0.80	0.61	0.30	0.87	0.92	0.49	0.89	0.87	0.64
	15	0.97	0.68	0.66	0.32	0.91	0.93	0.46	0.91	0.90	0.69
MCE	2	0.89	0.80	0.82	0.78	0.79	0.78	0.77	0.81	0.76	0.75
	4	0.95	0.88	0.90	0.88	0.87	0.88	0.88	0.88	0.84	0.85
	6	0.97	0.92	0.94	0.93	0.91	0.93	0.93	0.94	0.89	0.90
	8	0.98	0.95	0.96	0.95	0.93	0.95	0.96	0.96	0.92	0.93
	10	0.99	0.96	0.97	0.97	0.95	0.97	0.97	0.97	0.94	0.96
	12	0.99	0.97	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98	0.98	0.96	0.97
	15	1.00	0.98	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98
Shannon	2	0.84	0.69	0.73	0.28	0.58	0.69	0.62	0.61	0.70	0.62
	4	0.86	0.70	0.78	0.30	0.73	0.67	0.63	0.61	0.70	0.66
	6	0.85	0.71	0.80	0.32	0.78	0.65	0.63	0.61	0.70	0.65
	8	0.85	0.72	0.80	0.32	0.81	0.65	0.63	0.63	0.71	0.70
	10	0.86	0.73	0.81	0.33	0.84	0.65	0.64	0.63	0.70	0.71
	12	0.86	0.72	0.82	0.33	0.84	0.64	0.64	0.66	0.71	0.71
	15	0.86	0.74	0.83	0.34	0.86	0.64	0.64	0.65	0.75	0.72

Looking at the results in general, the Otsu method seems to be clearly successful in the PSNR metric. In addition, the MCE approach with Otsu in the SSIM metric draws attention in terms of success. The FSIM metric-based results show that the Otsu and Renyi methods achieve almost the same success. It is seen that another approach that draws attention in terms of success in this metric is MCE. The success of different approaches in the results obtained with different metrics shows how effective the selected metric is in measuring the segmented image quality. For this reason, the metric should be chosen according to which features are desired to be in the foreground in the segmented image. Table 5 shows a general review about results for three metrics. The average best number of 70 cases and the success rank of the methods are presented in Table 5.

Table 5. Average Best Number and Rank Values for Methods

	PSNR		SSIM		FSIM	
	#Best	Rank	#Best	Rank	#Best	Rank
Otsu	68	1	61	1	60	1
Kapur	0	3	0	4	7	4
Renyi	0	3	19	3	59	2
Tsallis	0	3	0	4	0	5
MCE	2	2	44	2	42	3
Shannon	0	3	0	4	0	5

DISCUSSION AND CONCLUSION

In this study, the MFO algorithm has been applied on 10 benchmark images which have different properties. The algorithm has been applied for seven different threshold levels. Six different threshold methods (Otsu, Kapur, Renyi, Tsallis, MCE and Shannon) have been used as the objective function. The performance of the thresholding methods have been compared with three different metrics (PSNR, SSIM and FSIM). According to the experimental results, it has been observed that the Otsu method is far more successful than other approaches. Especially in PSNR metric, Otsu method was quite successful than other approaches, while MCE approach increased its success in SSIM metric, Renyi approach came to the forefront together with Otsu in FSIM metric. Experimental results have shown that the selected thresholding method is directly effective in success. In addition, comparison metrics also reveal the measurement of success from different angles by handling segmented images with different features.

Considering the results, it is seen that the method used is quite effective in the segmentation process. In future studies, it can be investigated which thresholding approach is more suitable for which type of image by considering specific images. In addition, new approaches can be brought to the literature by being inspired by existing thresholding methods.

REFERENCES

- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., AbdelAziz, N. M., & Abouhawwash, M. (2022). HWOA: A hybrid whale optimization algorithm with a novel local minima avoidance method for multi-level thresholding color image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 190, 116145. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116145>
- Bhandari, A. K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2015a). Modified artificial bee colony based computationally efficient multilevel thresholding for satellite image segmentation using Kapur's, Otsu and Tsallis functions. *Expert Systems with Applications*, 42(3), 1573-1601. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.09.049>
- Bhandari, A. K., Kumar, A., & Singh, G. K. (2015b). Tsallis entropy based multilevel thresholding for colored satellite image segmentation using evolutionary algorithms. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 8707-8730. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.07.025>
- Brooks, A. C., Zhao, X., & Pappas, T. N. (2008). Structural similarity quality metrics in a coding context: exploring the space of realistic distortions. *IEEE Transactions on image processing*, 17(8), 1261-1273. <https://doi.org/10.1109/TIP.2008.926161>
- Cai, Y., Mi, S., Yan, J., Peng, H., Luo, X., Yang, Q., & Wang, J. (2022). An unsupervised segmentation method based on dynamic threshold neural P systems for color images. *Information Sciences*, 587, 473-484. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.12.058>
- Chen, Y., Wang, M., Heidari, A. A., Shi, B., Hu, Z., Zhang, Q., Chen, H., Mafarja, M., & Turabieh, H. (2022). Multi-threshold image segmentation using a multi-strategy shuffled frog leaping algorithm. *Expert Systems with Applications*, 194, 116511. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116511> <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116511>
- De Albuquerque, M. P., Esquef, I. A., Mello, A. R. G., & De Albuquerque, M. P. (2004). Image thresholding using Tsallis entropy. *Pattern Recognition Letters*, 25(9), 1059-1065. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.03.003>
- Günay, M., & Taze, M. (2022). Mikroskopik Görüntülerde Multipl Miyelom Plazma Hücrelerinin Tespiti. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2), 145-154. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1120829>

- Hore, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. Paper presented at the 2010 20th international conference on pattern recognition. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>
- Houssein, E. H., Helmy, B. E., Oliva, D., Jangir, P., Premkumar, M., Elngar, A. A., & Shaban, H. (2022). An efficient multi-thresholding based COVID-19 CT images segmentation approach using an improved equilibrium optimizer. *Biomedical Signal Processing and Control*, 73, 103401. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103401>
- Huang, C., Li, X., & Wen, Y. (2021). AN OTSU image segmentation based on fruitfly optimization algorithm. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 183-188. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.054>
- Ishak, A. B. (2017). A two-dimensional multilevel thresholding method for image segmentation. *Applied Soft Computing*, 52, 306-322. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.10.034>
- Kalyani, R., Sathya, P., & Sakthivel, V. (2020). Trading strategies for image segmentation using multilevel thresholding aided with minimum cross entropy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1327-1341. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.07.007>
- Kapur, J. N., Sahoo, P. K., & Wong, A. K. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics, and image processing*, 29(3), 273-285. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90125-2)
- Karakoyun, M., Baykan, N. A., & Hacibeyoglu, M. (2017a). Multi-level thresholding for image segmentation with swarm optimization algorithms. *International Research Journal of Electronics & Computer Engineering*, 3(3), 1. <https://doi.org/10.24178/irjece.2017.3.3.01>
- Karakoyun, M., Gülcü, Ş., & Kodaz, H. (2021). D-MOSG: Discrete multi-objective shuffled gray wolf optimizer for multi-level image thresholding. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(6), 1455-1466. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.03.011>
- Karakoyun, M., & Özkış, A. (2021). Transfer Fonksiyonları Kullanarak İkili Güve-Alev Optimizasyonu Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Performanslarının Karşılaştırılması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1-10.
- Karakoyun, M., Sağlam, A., Baykan, N. A., & Altun, A. A. (2017b). Non-locally color image segmentation for remote sensing images in different color spaces by using data-clustering methods. *image*, 10, 11.
- Koc, I., Baykan, O. K., & Babaoglu, I. (2018). Multilevel image thresholding selection based on grey wolf optimizer. *JOURNAL OF POLYTECHNIC-POLITEKNIK DERGISI*, 21(4), 841-847. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389613>
- Li, Y., Cao, G., Wang, T., Cui, Q., & Wang, B. (2020). A novel local region-based active contour model for image segmentation using Bayes theorem. *Information Sciences*, 506, 443-456. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.08.021>
- Li, Y., Zhu, X., & Liu, J. (2020). An improved moth-flame optimization algorithm for engineering problems. *Symmetry*, 12(8), 1234. <https://doi.org/10.3390/sym12081234>
- Ma, G., & Yue, X. (2022). An improved whale optimization algorithm based on multilevel threshold image segmentation using the Otsu method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 113, 104960. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104960>
- Mirjalili, S. (2015). Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-based systems*, 89, 228-249. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.07.006>
- Naidu, M., Kumar, P. R., & Chiranjeevi, K. (2018). Shannon and fuzzy entropy based evolutionary image thresholding for image segmentation. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1643-1655. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.024>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66.
- Pal, N. R. (1996). On minimum cross-entropy thresholding. *Pattern recognition*, 29(4), 575-580. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(95\)00111-5](https://doi.org/10.1016/0031-3203(95)00111-5)
- Priyadharsini, R., & Sharmila, T. S. (2019). Object detection in underwater acoustic images using edge based segmentation method. *Procedia Computer Science*, 165, 759-765. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.015>

- Raj, A., Gautam, G., Abdullah, S. N. H. S., Zaini, A. S., & Mukhopadhyay, S. (2019). Multi-level thresholding based on differential evolution and Tsallis Fuzzy entropy. *Image and Vision Computing*, 91, 103792. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2019.07.004>
- Ryalat, M. H., Dorgham, O., Tedmori, S., Al-Rahamneh, Z., Al-Najdawi, N., & Mirjalili, S. (2022). Harris hawks optimization for COVID-19 diagnosis based on multi-threshold image segmentation. *Neural Computing and Applications*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-08078-4>
- Sahoo, P., Wilkins, C., & Yeager, J. (1997). Threshold selection using Renyi's entropy. *Pattern recognition*, 30(1), 71-84. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00065-9)
- Sara, U., Akter, M., & Uddin, M. S. (2019). Image quality assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—a comparative study. *Journal of Computer and Communications*, 7(3), 8-18. <https://doi.org/10.4236/jcc.2019.73002>
- Satapathy, S. C., Sri Madhava Raja, N., Rajinikanth, V., Ashour, A. S., & Dey, N. (2018). Multi-level image thresholding using Otsu and chaotic bat algorithm. *Neural Computing and Applications*, 29(12), 1285-1307. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2645-5>
- Selçuk, T., Bilal, N., Sarıca, S., Akben, B., & Alkan, A. (2017). Ses Tellerinde Oluşan Nodüllere Ait Şekilsel Özelliklerin Görüntü İşleme Teknikleriyle Otomatik Olarak Belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 54-59. <https://doi.org/10.17780/ksujes.349448>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Shehab, M., Abualigah, L., Al Hamad, H., Alabool, H., Alshinwan, M., & Khasawneh, A. M. (2020). Moth-flame optimization algorithm: variants and applications. *Neural Computing and Applications*, 32(14), 9859-9884. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04570-6>
- Tuba, E., Alihodzic, A., & Tuba, M. (2017). Multilevel image thresholding using elephant herding optimization algorithm. Paper presented at the 2017 14th international conference on engineering of modern electric systems (EMES). <https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980424>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on image processing*, 13(4), 600-612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- Xing, Z., & He, Y. (2021). Many-objective multilevel thresholding image segmentation for infrared images of power equipment with boost marine predators algorithm. *Applied Soft Computing*, 113, 107905. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107905>
- Zhang, L., Zhang, L., Mou, X., & Zhang, D. (2011). FSIM: A feature similarity index for image quality assessment. *IEEE Transactions on image processing*, 20(8), 2378-2386. <https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2109730>
- Zhao, S., Wang, P., Heidari, A. A., Chen, H., Turabieh, H., Mafarja, M., & Li, C. (2021). Multilevel threshold image segmentation with diffusion association slime mould algorithm and Renyi's entropy for chronic obstructive pulmonary disease. *Computers in Biology and Medicine*, 134, 104427. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104427>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.12.2022
Kabul Tarihi : 24.01.2023

Received Date : 26.12.2022
Accepted Date : 24.01.2023

BİTLİS İLİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMASINDA YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ ÖNEMİ

THE IMPORTANCE OF RENEWABLE ENERGY RESOURCES IN THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF BITLIS PROVINCE

Sabir RÜSTEMLİ^{1*} (ORCID: 0000-0002-4957-1782)

*Behçet KOCAMAN*² (ORCID: 0000-0002-1432-0959)

^{1,2} Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Sabir RÜSTEMLİ, srustemli@beu.edu.tr

ÖZET

Enerji politikaları, sürdürülebilir kalkınma planlarının oluşturulmasında en önemli unsurlardan biridir. Ülkemizin ekonomik büyüme ve yaşam standartları açısından Dünya pazarında yer edinebilmesi için sürdürülebilir ve güvenilir enerji politikalarına gereksinim duyulmaktadır. Gelişen teknolojilere bağlı olarak enerji ihtiyacının her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle doğalgaz, petrol ve kömür gibi fosil kökenli yakıtlar her geçen yıl hızlı ve geri dönüşümü olmayacak şekilde tükeneceği yapılan tahminlerden anlaşılmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtların kontrolsüz bir şekilde kullanımına bağlı olarak birçok zehirli gazların yüksek oranda doğaya salındığı görülmektedir. Bundan dolayı atmosferde sera gazı oranının arttığı, buna bağlı olarak da ozon tabakasının incelendiği yapılan araştırmalardan anlaşılmaktadır. İnsan sağlığına ve doğaya zarar vermeden elektrik enerjisi ihtiyacının büyük bir bölümü yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak sağlanabilir. Yeryüzünde doğal olarak bulunan ve varlığını koruyan enerji kaynakları genel olarak hidrolik, güneş, rüzgar, biyoenerji, jeotermal ve deniz-okyanus kökenli enerjiler olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada, hidrolik, güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının Bitlis ilinin sürdürülebilir kalkınmasındaki önemi araştırılmış ve bu kaynakların geleceğine dair öneriler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir kalkınma, enerji, yenilenebilir enerji.

ABSTRACT

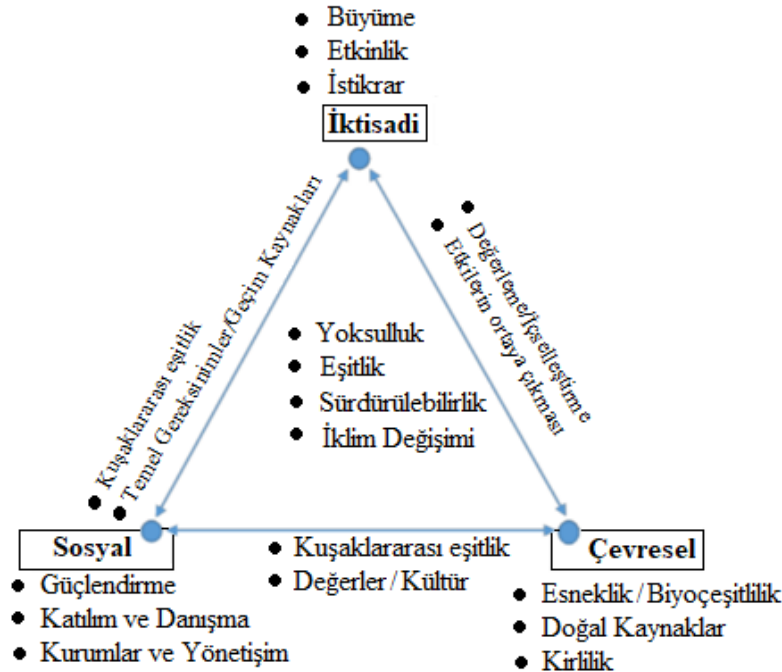
Energy policies are one of the most important elements in the creation of sustainable development plans. Sustainable and reliable energy policies are needed for our country to gain a place in the world market in terms of economic growth and living standards. Depending on the developing technologies, the need for energy is increasing day by day. For this reason, it is understood from the estimates that fossil fuels such as natural gas, oil and coal will be consumed rapidly and irreversibly every year. Due to the uncontrolled use of fossil fuels in electrical energy production, it is seen that many toxic gases are released into nature at a high rate. Therefore, it is understood from the researches that the rate of greenhouse gases in the atmosphere increases and accordingly the ozone layer becomes thinner. A large part of the electrical energy need can be provided by using renewable energy sources without harming human health and nature. The energy resources that are naturally present on the earth and that maintain their existence can be generally classified as hydraulic, solar, wind, bioenergy, geothermal and sea-ocean origin energies. In this study, the importance of renewable energy resources such as hydraulic, solar, wind in the sustainable development of Bitlis province has been investigated and suggestions for the future of these resources have been given.

Keywords: Sustainable development, energy, renewable energy

GİRİŞ

İnsanlığın en önemli yaşam kaynağı enerjidir. Yaşamak ve yaşamlarını sürdürmek için insanlar enerjinin her çeşidine muhtaçtırlar. Enerji ihtiyacı, teknolojinin gelişmesiyle her geçen gün artmaktadır. Kalkınma programlarının en önemli unsurlarından biri enerjidir. Sürdürülebilir kalkınma planlarının en önemli unsurlarından biri enerji politikalarıdır (Rüstemli & Dinçadam, 2008; Özbek, 2022). Dünya genelinde petrol ve doğalgaz rezervlerinin 50 yıl, kömür rezervlerinin ise 132 yıl içerisinde tükeneceği tahmin edilmektedir (Şeker, 2010; EÜAŞ, 2020). Toplumlarda artan enerji taleplerini karşılamak için ülkelerin düşük maliyetli, kaliteli ve verimli temiz enerji kaynakları oluşturmak için politikalar üretmesi gerekir (Esmer, 1996). Bu enerjilerin en önemlilerinden birinin elektrik enerjisi olması nedeniyle elektrik enerjisi olmayan bir hayat düşünülemez hale gelmiştir. Sanayinin gelişmesi ile birlikte başlayan ve günümüzde devam eden sürdürülebilir kalkınma kavramı öne çıkmıştır. Bir ülkenin ekonomik ve sosyal yönden gelişmesinin öngörüsünde ortak payda “sürdürülebilirlik” şeklinde belirlenmektedir (Rüstemli et al., 2016).

Sürdürülebilirlik (Sustainability) Latince bir kelime olup, anlamı “ayakta kalma” ve “devam etmek”tir. Sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesi için disiplinler ötesi bir yaklaşım ile oluşturulmuş sustainomics isminde yeni bir anlayışa ihtiyaç olduğu Munasinghe tarafından ortaya konulmuştur (Munasinghe, 2001). Munasinghe'nin önerdiği yaklaşıma göre sürdürülebilir kalkınma üçgeni Şekil 1’de verilmiştir (Munasinghe, 2009).

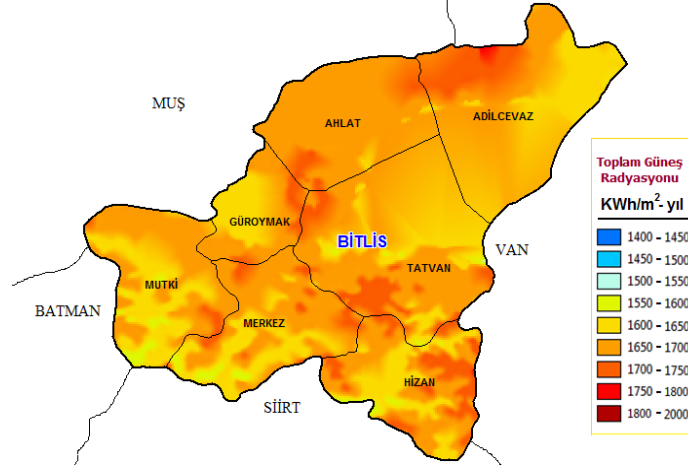


Şekil 1. Sürdürülebilir Kalkınma Üçgeni

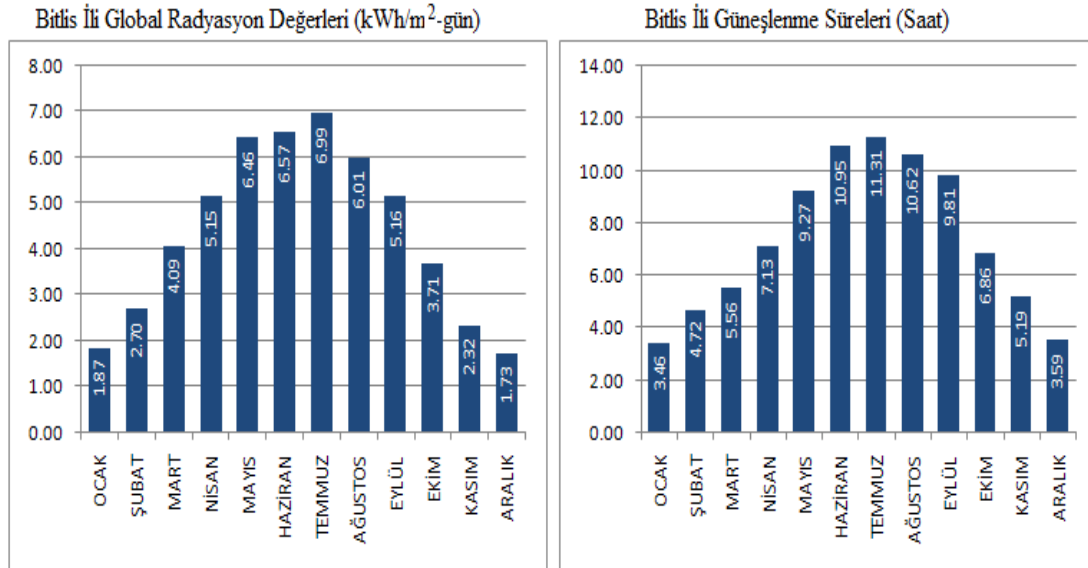
Küresel ısınma, iklim değişikliği, hava ve çevre kirliliği gibi olayların nedeni olarak fazla oranda gerçekleşen sera gazı salınımı gösterilebilir. Mevcut şartların iyileştirilmemesi ve herhangi bir önlemin alınmaması durumunda 2100 yılına kadar dünya sıcaklığının en az 2 °C artacağı tahmin edilmektedir. Bunun sonucunda da kutuplarda buzulların eriyeceği, yeryüzünün büyük bir bölümünün sular altında kalacağı, büyük afetlerin ve sağlık sorunlarının gerçekleşeceği vb gibi ciddi senaryolar ile dünyanın karşı karşıya kalacağı belirtilmektedir. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümünün karşılanmasında güneş, rüzgar, su, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması gerekmektedir. Bu enerji kaynakları, sanayinin ve yerel uygulamaların enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir rolü vardır. Ülkelerin sürdürülebilir kalkınmasında, yenilenebilir enerji stratejilerinin ve teknolojilerinin geliştirilmesiyle birlikte kullanılması oldukça önemlidir. Ülkemiz, yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli bakımından zengin bir ülke olup elektrik enerjisinin üretiminde ülkenin ihtiyaçlarını karşılayabilecek durumdadır (Emeksiz & Fındık, 2021). Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen elektrik enerjisi üretiminin ekonomik büyüme üzerinde olumlu etkisi olmaktadır (Destek & Sinha, 2020; Koyuncu, & Beşer, 2021). Yapılan çalışmada, Bitlis ilinin sürdürülebilir kalkınmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi araştırılmış ve bu kaynakların geleceğine dair önerilerde bulunulmuştur.

BİTLİS İLİ GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM POTANSİYELİ VE GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerinde Bitlis ilinin aylık küresel radyasyon ışınımı baz alınarak aylık ortalama radyasyon ışınımı $4.4 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ olarak hesaplanmıştır. İlimizin yıllık ortalama güneş radyasyonu ışınım değeri ise $1604.78 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ olarak hesaplanmıştır. Karaman ili için bu değer $1660 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$, Antalya için ise $1646 \text{ kWh/m}^2\text{-yıl}$ olarak belirlenmiştir (Rüstemli et al., 2016). Bitlis ilindeki global güneş radyasyon değerleri dağılımı, Şekil 2’de ve global güneş radyasyon değerleri ile güneşlenme süreleri ise Şekil 3’te verilmiştir (Dautov et al., 2017; Kocaman, 2018).



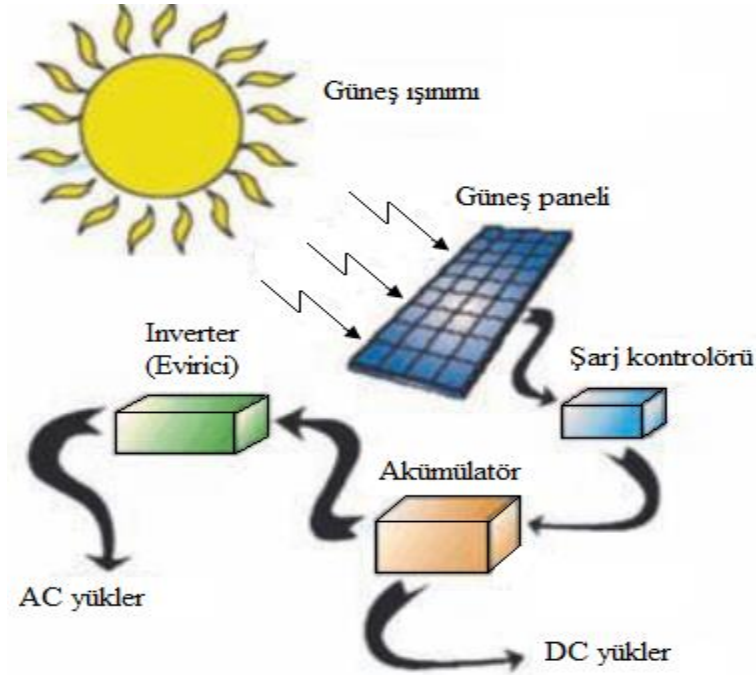
Şekil 2. Global Güneş Radyasyon Değerleri Dağılımı



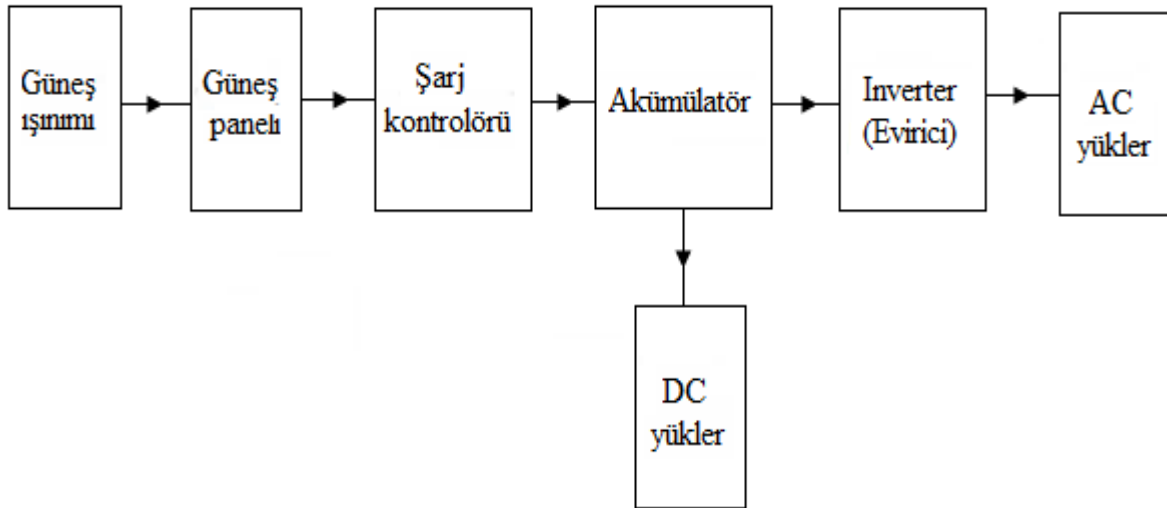
Şekil 3. Global Radyasyon Değerleri ile Güneşlenme Süreleri

Bitlis iline ait olan Şekil 2 ve Şekil 3’teki değerler incelendiğinde, ilin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir.

Güneş enerjisinden aktif ve pasif sistemler adında iki farklı çeşit olarak yararlanılmaktadır. Sıcak su üretiminde pasif sistemler kullanılırken, elektrik enerjisi üretiminde aktif sistemler kullanılmaktadır. Fotovoltaik paneller yardımıyla güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretilmektedir. Elektrik enerjisi ile ilgili uygulamalarda fotovoltaik paneller yararlanır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılan sistemin görünümü ve blok diyagramı Şekil 4’te verilmiştir (Rüstemli et al., 2016).



Şekil 4. a. Sistemin Görünümü



Şekil 4. b. Sistemin Blok Diyagramı

Şekil 4'te görüldüğü gibi, güneş ışınımı güneş panelleri sayesinde elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen elektrik enerjisi şarj kontrolörü ile akümülatörde depolanmaktadır. Depolanan elektrik enerjisi doğru akım (DC) yüklerle doğrudan verilmektedir. Alternatif akım (AC) yükler için ise önce DC gerilim, inverter (evirici) aracılığıyla AC gerilime dönüştürüldükten sonra kullanılmaktadır (Şahin et al., 2022).

Bitlis ilinde bulunan güneş enerjisi santralleri (GES)'nin kurulu güçleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de sıra numarası verilen santrallerin kWh cinsinden 2021 yılı için aylara göre toplam brüt üretimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Bitlis İlinde Bulunan GES'ler ve Kurulu Güçleri (MWe)

Sıra No	Santral Adı	Bulunduğu İl	Bulunduğu İlçe	Santral Sayısı	Kurulu Güç (MWe)
1	Adilcevaz Belediyesi	Bitlis	Adilcevaz	1	0,500
2	Ahlat Belediyesi	Bitlis	Ahlat	1	0,999
3	Savaş Aynı Sondaj İşlt.	Bitlis	Adilcevaz	1	0,750
4	Cevizlibağ Gıda İnş.San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Adilcevaz	1	0,750
5	Ferit Sevinç Enerji İnş. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
6	Turan Enerji İnş. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
7	Atilla Göl Enerji Üretimi İnş.İth. San ve Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Adilcevaz	1	0,990
8	EmirO3 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
9	Turaz Enerji İnş. San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
10	EmirO4 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
11	Mahmutoğulları Mühendislik Ltd. Şti.	Bitlis	Güroymak	1	0,250
12	EmirO5 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
13	EmirO6 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
14	Metalhas Enerji İnşaat Sanayi Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,990
15	Metalhas Enerji İnşaat Sanayi Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,999
16	Metalhas Enerji İnşaat Sanayi Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,900
17	Metalhas Enerji İnşaat Sanayi Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,999
18	Metalhas Enerji İnşaat Sanayi Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,999
19	EmirO2 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
20	Hanne Enerji Elk. Üretim San. ve Tic. A.Ş.	Bitlis	Tatvan	1	0,999
21	EmirO1 Güneş Elektrik Santral Yatırımları Ltd. Şti.	Bitlis	Adilcevaz	1	1,000
22	Turaz Enerji İnş. San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
23	Turaz Enerji İnş. San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
24	Saki GÜLTEPE	Bitlis	Ahlat	1	0,990
25	Turaz Enerji İnş. San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Tatvan	1	0,999
26	Zera GES Enerji Ticaret Limited Şirketi	Bitlis	Tatvan	1	0,999
27	Tatvan Belediyesi	Bitlis	Tatvan	1	1,000
28	Mrs Uğraşlar Enerji San. Tic. Ltd. Şti	Bitlis	Güroymak	1	0,475
29	Yükseller Paz. San. ve Tic. A.Ş.	Bitlis	Güroymak	1	0,250
30	Han Tekstil GES	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	0,400
31	Bitlis Belediyesi GES	Bitlis	Bitlis/Merkez	1	1,987
32	Güneş Park 1- GES	Bitlis	Tatvan	1	0,999
33	Güneş Park 2- GES	Bitlis	Tatvan	1	0,999
34	Dodan GES	Bitlis	Adilcevaz	1	0,150

Tablo 2. Bitlis İlindeki Tablo 1'deki GES'lerin Aylara Göre Santral Toplam Brüt Üretimi (kWh)

Santral	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
1	40552	52805	56692	75474	86397	90101	78914	83770	80765	65658	46029	37873	795030
2	98810	128652	131480	169674	178141	203429	173842	172866	162000	134564	116333	100119	1769910
3	96383	105390	112048	145044	166782	171322	168426	164141	158202	124215	95816	89419	1597188
4	96369	104740	111367	144084	165077	169450	166660	162579	156765	123672	95885	89010	1585658
5	92004	121257	117064	172159	208458	211659	205781	196291	188509	152082	109644	74258	1849166
6	105939	144892	137567	180780	237301	246675	241287	217433	201265	171349	125493	97291	2107272
7	96284	123729	114062	156875	188561	186556	193183	180347	179684	143476	107993	99477	1770227
8	102631	133079	136453	170276	201032	201101	208337	197169	191944	148731	104780	105087	1900620
9	110044	145476	140841	195017	240901	248948	243676	221840	201265	154622	116815	100340	2119785
10	93692	134798	138205	171287	201811	201261	208120	197847	191630	148607	105862	108277	1901397
11	12884	12250	27259	38714	44149	46728	37219	37681	40434	29834	18215	7249	352616
12	85455	132452	136898	171139	201747	200900	207978	197787	189091	184642	103638	101837	1913564
13	97107	134509	138550	171242	202187	201756	208442	197600	191035	148855	107243	112082	1910608
14	68146	100509	122544	161622	201482	207048	191635	184152	184160	141767	109615	83198	1755878
15	53874	79481	115629	164548	212091	222303	203975	193634	189611	144144	111694	68850	1759834
16	61093	80246	112403	159596	202550	214921	198067	186875	189611	140951	107876	70097	1724286
17	59900	65304	110472	156212	202296	222440	203926	189413	189611	147296	110467	70410	1727747
18	57738	97682	114306	166366	211162	221922	204059	180886	189611	141311	109640	72011	1766694
19	97093	132275	136546	170799	202341	201696	207236	197212	191339	148497	103438	101057	1889529
20	92126	120625	119155	175110	211804	214607	209958	199723	191595	154014	111418	75507	1875642
21	99900	133908	137584	170283	200502	199170	205178	193842	188432	147489	107186	112674	1896148
22	104846	97682	139321	193026	240172	247870	243153	218378	201265	154035	121711	98617	2060076
23	106163	140392	139126	192944	234603	244868	241328	217914	201265	173058	126123	96811	2114595
24	69056	122676	117258	173266	202745	196930	196217	189814	184612	145995	107872	82842	1789283
25	107900	141265	136494	189660	235817	243624	239068	151293	201265	122669	97800	67029	1933884
26	90611	118953	118414	173966	210129	214243	208738	198201	190309	152717	110090	74823	1861194
27	49946	68097	105672	151929	178859	177076	171820	151293	152599	122669	97800	67029	1494789
28	37741	59427	67800	81687	93742	95554	90348	86213	87730	70141	41122	24804	836309
29	11534	21825	26845	38466	43197	44718	36034	37181	36180	23809	16924	7032	343745
30	1184	633	802	40777	60175	60291	55232	45938	37049	26715	12327	2005	343128
31	110741	159248	188688	329864	355589	405651	408149	377568	372944	293974	210266	124715	3337397
32			20229	167073	240643	243819	234547	237201	228484	189211	135938	118457	1815602
33			16470	180742	247075	251087	241027	244152	234569	192078	133938	106939	1848077
34											4	9547	9551

Bitlis ilinde işletmede olan 34 adet GES'in 2021 yılı için toplam brüt üretimi 55.756.29,00 kWh olduğu ve bu değer önemli sayılabilecek bir değer olduğu görülmüştür.

BİTLİS İLİ HİDROLİK ENERJİSİ ÜRETİM POTANSİYELİ VE HİDROELEKTRİK ENERJİ SANTRALLERİ

Bitlis ili arazisinin yaklaşık olarak % 71'i dağlıktır. Deniz seviyesinden 1545 metre yükseklikte yer almaktadır. Hem rakım hem de eğimli arazi yapısı gereği Bitlis ilinde var olan; Bitlis çayı, Botan çayı, Karasu deresi, Ağkız dere4si, Oranz deresi, Garsay suyu, Hizan suyu, Güzeldere çayı ve Garzan çayı önemli bir hidroelektrik santral (HES) üretim potansiyeline sahiptir. Bitlis ilinde var olan Hidrolik Enerji Santralleri Tablo 5'te ve HES'in kWh cinsinden 2021 yılı aylara göre toplam brüt üretimi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Bitlis İlinde Bulunan HES'ler ve Kurulu Güçleri (MWe)

Sıra No	Santral Adı	Bulunduğu İl	Bulunduğu İlçe	Santral Sayısı	Kurulu Güç (MWe)
1	Adilcevaz HES	Bitlis	Adilcevaz	1	0,244+0,244
2	Ahlat HES	Bitlis	Ahlat	1	0,110+0,120
3	Akşar- Nazar HES	Bitlis	Hizan	1	2x11,78+1x6,68

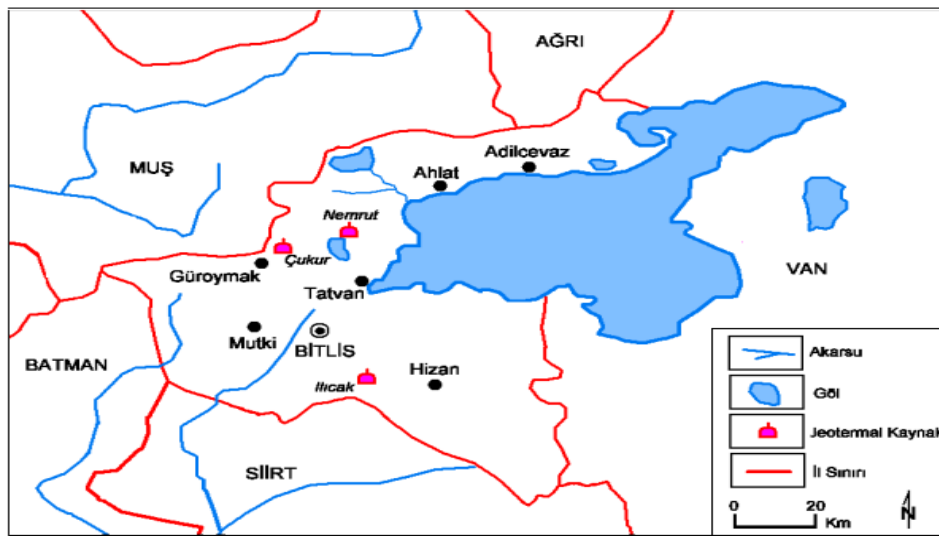
Tablo 6. Bitlis ilindeki Tablo 5'teki HES'in aylara göre santral toplam brüt üretimi (kWh)

Santral	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
1	26143,8	23773,7	26507,9	54588,2	23977,8	15266,2	16153,2	14260,7	9752,4	17486,3	20709,3	21848,4	270875,1
2	26143,8	23773,7	26507,9	54588,2	23977,8	15266,2	16153,2	14260,7	9752,4	17486,3	20709,3	21848,4	270875,1
3	26143,8	23773,7	26507,9	54588,2	23977,8	15266,2	16153,2	14260,7	9752,4	17486,3	20709,3	21848,4	270875,1

Bitlis ilinde işletmede olan 3 adet HES'in 2021 yılı için toplam brüt üretimi 556.345,90 kWh olduğu tespit edilmiştir.

BİTLİS İLİ JEOTERMAL ENERJİSİ ÜRETİM POTANSİYELİ VE JEOTERMAL ENERJİ SANTRALLERİ

Bitlis ili, Jeotermal su kaynakları bakımından çok zengin bir potansiyele sahiptir. Bitlis ilindeki mevcut jeotermal suların sıcaklığı 37,5-59,5 °C arasında değişmektedir. Bitlis ilindeki jeotermal kaynakların dağılımı Şekil 6'da verilmiştir (Elmastaş, 2008).



Şekil 6. Bitlis İlindeki Jeotermal Kaynakların Dağılımı

Ülkemizdeki jeotermal kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde, konutların ısıtılmasında, seraların ısıtılmasında, termal tesislerin ısıtılmasında vb. yerlerde yararlanılmaktadır. Bitlis ilinde var olan jeotermal kaynaklarından daha

çok kaplıca tesisleri olarak faydalanılmaktadır. Bitlis ilinin Güroymak, Tatvan ve Ahlat ilçelerinde jeotermal su kaynakları bulunmaktadır. Bitlis ilinin Tatvan ilçesinde bulunan Nemrut Gülsuhan kaplıcalarındaki sıcak su kuyusu 45 °C sıcaklığındadır. Bitlis il ve ilçelerindeki jeotermal su kaynaklarının daha derinliklerinde sıcak suyun 200 °C civarında olması tahmin edilmektedir. Bitlis ilindeki jeotermal su kaynaklarından elektrik enerjisi bugün için üretilmemektedir. Ancak on bin konutun jeotermal su kaynağından yararlanılarak ısıtılması yönünde projeler üzerinde çalışılmaktadır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzdeki çevre sorunları ile beraber sürdürülebilir kalkınma, dikkate alınması ve araştırılması gereken konulardan biri olmuştur. Çevre açısından bakıldığında, sürdürülebilirliğin sağlanması için fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynakları kullanmak çok önemlidir. Son yıllarda yenilenebilir olmayan kaynakların çevre ve insan sağlığı açısından meydana getirdiği olumsuzluklar hissedilir seviyededir. Bu nedenle çevreye uyumlu, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak sürdürülebilirliğin ortaya çıkmasında önemli bir yeri vardır.

Bitlis ilindeki rüzgar enerjisi potansiyelinin, güneş enerjisi potansiyeline göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bitlis ilinde 2021 yılında güneş enerjisinden toplam 55.756.29,00 kWh, hidrolik enerjisinden 556.345,90 kWh ve altı aylık rüzgar enerjisinden 4.143.772,00 kWh brüt üretim gerçekleşmiştir. Bunlarla birlikte Bitlis ilinde bulunan çöp gazı ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla faydalanılması sürdürülebilir kalkınma açısından önemlidir.

Elektrik enerjisine dayalı üretim politikaları oluşturulurken enerjiyle birlikte, ekonomi ve çevre unsurlarının arasında bulunan dengenin baz alınmalıdır. Bununla birlikte çevre faktörünün önemli bir faktör olarak bütün alan ve projelerde dikkate alınarak yapılması gerekmektedir.

Elektrik enerjisi üretim merkezlerindeki en önemli faktörlerden biri verimdir. Bu nedenle üretim kaybı ortaya çıkarabilecek arıza seviyelerinin Bitlis ilinde bulunan tüm santrallerde denetlenmesinin, yeterli ve verimli olmayan veya kapasitesinden daha düşük seviyede çalışan santraller belirlenip çözüm üretilmesi gerekir. Bunlarla birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları ile oluşturulan stratejiler ve enerjinin üretim aşamasındaki verimliliği arttırmak için ilgili kurum ve kuruluşlarla işbirliği içerisinde olmak gerekir.

Ülkemiz enerji talebini karşılamada büyük oranda dışa bağımlı olması nedeniyle enerji stratejilerinin temel hedeflerinden birinin kaynak çeşitlendirilmesi olmalıdır. Bu nedenle elektrik enerjisi üretiminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artırılması gerekmektedir. Ayrıca, sürdürülebilir kalkınma açısından sosyal ve çevresel etkileri dikkate alınarak enerjinin elde edilmesi sağlanmalıdır.

Doğru ve etkin politikalar üzerine çalışmalar yapıldığında elektrik enerjisi üretiminin dışa olan bağımlılığı ve bunun beraberinde getirdiği ekonomik yükümlülükler gelecek yıllarda azaltılabilir.

TEŞEKKÜR

Verilerin temininde destek sağlayan tüm kurum ve kuruluşlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Destek, M. A., & Sinha, A. (2020). Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: Evidence from organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*(242), 118537.

Elmastaş, N. (2008). Bitlis İli Jeotermal Su Kaynakları, *Doğru Coğrafya Dergisi*, 13(19), 89-104.

Emeksiz, C. & Fındık, M. M. (2021). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat Special Issue 2021 (HORA) , 155-164. DOI: 10.31590/ejosat.948729

Esmer, O. (1996). Enerji Politikaları, TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, 12-14 Kasım 1996, Ankara, s. 223-234.

EÜAŞ, (2020). Dünyada Enerji ve Elektrik Üretim Şirketlerinin Görünümü, Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu, Ankara, s 1-13.

- Kocaman B., (2018). Bitlis İlindeki Güneş ve Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Değerlendirilmesi, 1st International Engineering and Technology Symposium, 03-05 May, S. 566-570, Batman, Türkiye.
- Koyuncu, T. & Beşer, M. K. (2021). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Sağlanan Elektrik Enerjisi Üretimi Ve Ekonomik Büyüme İle İlişkisi: Yüksek Emisyon Etkili mi? . Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 1 (41) , 135-148. doi: 10.35343/kosbed.876445
- Munasinghe, M. (2001). Sustainable Development and Climate Change: Applying the sustainomics Transdisciplinary Meta-Framework, International Journal of Global Environmental Issues, 1(1), 13-55.
- Munasinghe M., Sustainable Development in Practice: Sustainomics Metodology and Applications; Cambridge University Press, Newyork, 2009.
- Polat Dautov Ç., Gazigil, L., Akdağ M., & Rüstemli S. (2017). Bitlis İli Ekonomik Kalkınmasında Sürdürülebilir Enerji kaynaklarının Önemi, Uluslararası Bölgesel Kalkınma Konferansı, Bildiriler Kitabı, s.88-102, 21-23 Eylül, Tunceli.
- Rüstemli, S., & Dinçadam, F. (2008). Dünyada ve Türkiye’de Enerjiye Genel bir Bakış, Enerji, Elektrik, Aydınlatma, Elektronik ve Otomasyon Mühendisliği Dergisi, 208, 160-165.
- Rüstemli, S., Dinçer, F., Çelik, M.& Cengiz, M. S. (2013). Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2 (2), s. 141-147. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bitlisfen/issue/3701/48984>
- Rüstemli, S., Polat Dautov, Ç., & Akdağ, M. (2016). Bitlis İli Elektrik Enerjisinin Dünü, Bugünü ve Yarını, BEÜ, Fen Bilimleri Dergisi, 5(2):172-185. doi:10.17798/bitlisfen.282250
- Rüstemli S., Polat Dautov Ç., & Akdağ M. (2016). Bitlis İli Elektrik Enerjisi Üretiminde Güneş Enerjisinin Mevcut Durumu ve Geleceği, UNİDAP Uluslararası Bölgesel Kalkınma Konferansı, Bildiriler Kitabı, s.258-270, 28-30 Eylül, Muş.
- Şahin, Z. R., Dinçer, F. & Yılmaz, A. S. (2022). 4 Kişilik Bir Ailenin Elektrik Enerjisi İhtiyacı İçin Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santrali Tasarımı ve Simülasyonu. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Uluslararası İleri Mühendislik Teknolojileri Sempozyumu2 (ISADET2) Özel Sayısı, 46-56. doi: 10.17780/ksujes.1163049
- Şeker, V. (2020). Türkiye’nin Elektrik Enerjisi Üretiminde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının ANP ile Modellenmesi ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 184s.
- Özbek, G. (2022). Hidroelektrik Santrallerinde Enerji Verimliliğine Türbinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis 146s.
- YEGM, (2012). Bitlis İli Rüzgar Kaynak Bilgileri, www.yegm.gov.tr/YEKrepa/BITLIS-REPA.pdf (10.08.2022)



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.01.2023
Kabul Tarihi : 15.05.2023

Received Date : 23.01.2023
Accepted Date : 15.05.2023

DERİN TRANSFORMATÖRLERDEN ÇİFT YÖNLÜ KODLAYICI TEMSİLLERİ VE DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ İLE TÜRKÇE FİLM YORUMLARI ÜZERİNE DUYGU ANALİZİ

SENTIMENT ANALYSIS ON TURKISH MOVIE REVIEWS WITH DEEP BIDIRECTIONAL ENCODER REPRESENTATIONS FROM TRANSFORMERS (BERT) AND SUPPORT VECTOR MACHINES

Hakan GÜNDÜZ^{1*} (ORCID: 0000-0003-2152-5490)

¹ Kocaeli Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan GÜNDÜZ, hakan.gunduz@kocaeli.edu.tr

ÖZET

Görüş madenciliği olarak da bilinen duygu analizi bir dizi kelimenin ardındaki görüşü belirlemenin yoludur. Duygu analizi, metinsel bir ifadede iletilen algıyı, düşünceleri ve duyguları daha iyi anlamak için kullanılır. Bu çalışmada Türkçe film sitesi beyazperde.com'dan derlenen film yorumları üzerinde duygu analizi yapılmıştır. Önerilen yöntem ön eğitilmiş BERTurk modelini temel almıştır. Yapılan ilk deneyde BERTurk modelinin sondan bir önceki dönüştürücü katmanından derin temsiller çıkarılmış ve bu temsiller Destek Vektör Makineleri (DVM) modeline girdi olarak verilmiştir. İkinci deneyde BERTurk üzerinde ince ayarlama yapılarak sınıflandırma gerçekleştirilirken, son deneyde ince ayarlı BERTurk modelinden ilk deneyde olduğu gibi derin temsiller çıkarılmış ve DVM ile sınıflandırma yapılmıştır. Yapılan deneylerde en yüksek doğruluk oranına 0.984 ile ince ayarlı BERTurk temsilleriyle ulaşılmıştır. İnce ayar işlemi sonunda elde edilen temsiller doğruluk oranında yaklaşık %10'luk artışa neden olurken, sınıflandırmada direkt olarak BERTurk yerine BERTurk'ten elde edilen temsiller ile DVM'nin birleşiminin kullanılması yaklaşık %5'lik doğruluk artışıyla sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Duygu analizi, film yorumları, BERT, BERTurk, derin temsiller

ABSTRACT

Sentiment analysis, also known as opinion mining, identifies the opinion behind a series of words. Sentiment analysis is used to understand better the perception, thoughts, and feelings conveyed in a textual expression. In this study, sentiment analysis was made on the movie reviews collected from the Turkish movie site beyazperde.com. The proposed method is based on the pre-trained BERTurk model. In the first experiment, deep representations were extracted from the penultimate transformer layer of the BERTurk model and given as input to the Support Vector Machines (SVM). In the second experiment, the classification was carried out by fine-tuning on BERTurk. In the last experiment, deep representations were extracted from the fine-tuned BERTurk model as in the first experiment and the classification with SVM was completed. Experiments have shown that fine-tuned BERTurk representations reach the highest accuracy with a rate of 0.984. While the representations obtained at the end of the fine-tuning process caused an increase of about 10% in the accuracy rate, the combination of the representations obtained from BERTurk with the SVM instead of using BERTurk directly in the classification resulted in an accuracy increase of about 5%.

Keywords: Sentiment analysis, movie reviews, BERT, BERTurk, deep representations

ToCite: GÜNDÜZ, H., (2023). DERİN TRANSFORMATÖRLERDEN ÇİFT YÖNLÜ KODLAYICI TEMSİLLERİ VE DESTEK VEKTÖR MAKİNELERİ İLE TÜRKÇE FİLM YORUMLARI ÜZERİNE DUYGU ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 542-549.

GİRİŞ

Web 2.0'ın ortaya çıkmasıyla birlikte Facebook, Twitter, LinkedIn, Instagram gibi çeşitli medyalar kişilerin farklı konularda yorumlarını, görüşlerini, duygularını ve yargılarını paylaşmalarına olanak tanımıştır. Bu platformlar twitler, bloglar ve gönderiler biçiminde büyük miktarda metinsel veri içermektedir. Yayımlanan bu metinsel veriler gerçekler ve görüşler olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır. Gerçekler, dünyadaki varlıklar ve olaylar hakkında kesin ifadelerdir. Görüşler ise öznel olmakla beraber kişilerin varlıklar ve olaylar hakkındaki duyguları veya algılarıdır (Yadollahi vd., 2017). Mevcut doğal dil işleme (ddi) araştırmalarının bir kısmı, gerçekleri analiz etmeye ve çıkarmaya (örneğin arama motorları) odaklanırken, web üzerinde yayınlanmış görüşlerin tespiti ve analizi konusunda da ilerleyen literatür mevcuttur (Ain vd., 2017). Görüş madenciliği olarak da adlandırılan duygu analizi bir dizi kelimenin ardındaki görüşü belirlemenin yoludur. Bu analiz, çevrimiçi bir ifadeyle iletilen algıyı, düşünceleri ve duyguları daha iyi anlamak için kullanılır. Bu görev, belirli konular hakkında kamuoyunun bir özetini verdiği için sosyal medyada son derece yararlıdır.

Bilgi teknolojisindeki gelişmeler ve geniş bant internet bağlantılarının yaygınlaşması dâhilinde insanlar çeşitli sosyal medya kaynaklarında ürünler, filmler ve daha pek çok şey hakkındaki fikir ve düşüncelerini paylaşabilmektedir. Duygu analizi, bireylerin ürün ve faaliyetler gibi çeşitli konular hakkındaki görüş, değerlendirme ve duygularını belirleme sürecidir. Duygu analizi, duygu durumunu ve kullanıcı tarafından oluşturulan verilerde bir duygunun varlığını belirler. Duygu analizi genellikle metinsel verilerde yapılırken, konuşma veya video kaydı ile ilgili analiz çalışmaları da vardır (Poria vd., 2017).

Bu çalışmada film incelemeleri üzerine bir duygu analizi çatısı oluşturulmuştur. Önerilen çatı "Bidirectional Encoder Representations from Transformers" olarak kısaltılan BERT modeline dayalıdır. BERT modeli olarak huggingface platformundan indirilen ön eğitilmiş "bert-base-turkish-cased (BERTurk)" seçilmiştir. Çalışmada kullanılan film incelemeleri "beyazperde.com" web sitesinden derlenmiştir ve yaklaşık 54000 adet film incelemesi metnini ve bu incelemelere ait değerlendirme puanlarını içermektedir. Değerlendirme puanları incelemelere atanan sınıf etiketlerini belirlemektedir. Yapılan ilk deneyde ön eğitilmiş BERTurk'un sondan bir önceki dönüştürücü katmanından çıkarılan temsiller Destek Vektör Makinesi (DVM) sınıflandırıcısına girdi olarak verilerek sınıflandırma gerçekleştirilmiştir. İkinci deneyde ön eğitilmiş BERTurk modeli veri örnekleriyle eğitilerek ince ayarlama işlemi yapılmış ve model direkt olarak sınıflandırmada kullanılmıştır. Son deneyde ise ince ayarlanmış BERTurk modelinin sondan bir önceki katmanından derin temsiller elde edilmiş ve bu temsiller ilk deneyde olduğu gibi DVM modeline girdi olarak verilmiştir. Eğitilen modellerin performans değerlendirmelerinde ise doğruluk, kesinlik, anma ve F-Ölçütü metrikleri kullanılmıştır.

Çalışmamızın geri kalan kısmı şu şekildedir: Bölüm 2, Türkçe film incelemeleri üzerine gerçekleştirilen duygu analizi çalışmalarını özetlemektedir. Kullanılan Yöntemler Bölüm 3'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bölüm 4'te ise alınan deneysel sonuçlara ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Duygu analizi alanındaki literatür çalışmaları ağırlıklı olarak İngilizce için olmakla birlikte, Türkçe duygu analizi çalışmaları son yıllarda artış göstermiştir (Gezici ve Yanıkoğlu, 2018; Çatal ve Nangir, 2017; Türkmenoğlu ve Tantuğ, 2014). Bu çalışmalarda sözlük tabanlı ve makine öğrenmesine tabanlı olmak üzere iki farklı yaklaşım kullanılmıştır (Türkmenoğlu ve Tantuğ, 2014). Örneğin Türkçe için makine öğrenmesi yöntemlerini temel alan ilk duygu analizi çalışması Eroğul tarafından gerçekleştirilmiştir (Eroğul, 2009). Bu çalışmada Beyazperde.com web sitesinden toplanan film yorumları üzerine doğal dil işleme teknikleri uygulanmış ve Destek Vektör Makineleri (DVM) ile %85'lik doğruluk oranına erişilmiştir.

Türkmenoğlu ve Tantuğ (2014) çalışmalarında iki farklı veri türüne hem sözlük tabanlı hem makine öğrenimi yöntemlerini uygulamıştır. Daha kısa ve yapılandırılmamış metinlere sahip Twitter verisi üzerindeki duygu analizi sözlük tabanlı yaklaşımla %75'lik doğruluk oranıyla sonuçlanmıştır. Aynı veri üzerinde DVM ile yapılan sınıflandırma sonucunda başarı oranı %85'e yükselmiştir. Kullanılan diğer veri türü olan film yorumları veri kümesi Twitter verilerine nazaran daha uzun ve nispeten yapılandırılmış metinlerden oluştuğundan DVM ile %89 doğruluk oranına erişilmiştir.

Nizam ve Akın (2014) çalışmalarında farklı gıda firmalarına ait Twitter verileri üzerinde duygu analizi gerçekleştirmiştir. Çalışmada veri örneklerine pozitif, negatif ve nötr olmak üzere çoklu sınıf etiketi ataması yapılmıştır. Ön işlenmiş twitler farklı yapay öğrenme modellerine girdi olarak verilirken, en yüksek sınıflandırma başarısına DVM'nin bir türevi olan Farklı Sıralı Minimal Optimizasyon (SMO) modeli ile erişilmiştir. Twitter verisinin kullanıldığı diğer bir duygu analizi çalışmasında ise sözlük tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada performans değerlendirmesi sınıf bazında yapılırken pozitif, negatif ve nötr etiketli sınıflar sırasıyla %72.7, % 70.31 ve % 73.16 doğruluk oranlarına sahip olmuştur.

Diğer bir duygu analizi çalışması Türkçe film yorumları üzerine Akgül vd. (2016) tarafından yapılmıştır. Çalışmada sözlüğe dayalı yaklaşım ve yapay öğrenme yöntemleri kullanılırken, model performansları F-Ölçütü metriği ile değerlendirilmiştir. Çalışmada yapay öğrenme yöntemlerinin sözlüğe dayalı yaklaşıma göre daha yüksek F-Ölçütü oranlarına sahip olduğu keşfedilirken, en yüksek performans sergileyen modelin %83'lük F-Ölçütü oranıyla DVM olduğu gözlemlenmiştir.

Son yıllarda literatürde BERT modelinin kullanıldığı Türkçe duygu analizi çalışmaları da bulunmaktadır. Açıkalin (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Türkçe film incelemeleri ve otel yorumları BERT modeli kullanılarak sınıflandırılmıştır. Kilimci (2020) ise çalışmasında derin öğrenme temelli finansal duygu tahmin sistemi önermiştir. Tahmin işlemine veri olarak bankacılık hisseleri ile ilgili twitler kullanılırken, derin öğrenme mimarileri olarak Evrişimsel Sinir Ağları, Uzun-Kısa Süreli Bellek, Özyineli Sinir Ağları ve BERT seçilmiştir. Elde edilen sınıflandırma performansları incelendiğinde, hisselerin büyük çoğunluğunda en yüksek doğruluk oranlarına BERT temsilleri ile erişildiği görülmüştür. BERT modelinin kullanıldığı diğer bir Türkçe duygu analizi çalışmasında ise veri kümesi olarak Türkçe twitler kullanılmıştır. Çalışmada twitlerdeki duyguların tespiti için BERT modeliyle farklı yapay öğrenme modelleri kıyaslanmış ve en yüksek doğruluğa %98,75 ile BERT'in eriştiği görülmüştür (Güven, 2021). Covid-19 pandemisi ile ilgili Instagram gönderileri üzerinde yapılan duygu analizi çalışmasında ise ön-eğitilmiş BERT modellerinin duyguların sınıflandırılmasında en yüksek F-ölçütü oranlarına sahip olduğu belirtilmiştir (Karayığit vd., 2022).

YÖNTEMLER

Bu bölümde çalışmada kullanılan BERT dil modeli ve Destek Vektör Makineleri sınıflandırıcısı hakkında özet bilgiler verilmiştir. Ayrıcı model performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan ölçütlerin detayları açıklanmıştır.

Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT)

Dönüştürücüden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) olarak kısaltılan BERT, dönüştürücü (transformer) mimarisine dayalı bir dil modelidir. Dil modelleme, basitçe bir metindeki eksik kelimeyi tahmin etme görevi olarak tanımlanır. Geleneksel dil modelleri bir sonraki kelimeyi kendinden önce gelen kelimeleri kullanarak (soldan sağa yaklaşımla) tahmin ederken, BERT mimarisi bu yaklaşımın aksine tahminde önceki ve sonraki kelimelerden yararlanır. Soldan sağa yaklaşım, özellikle metin üretilmesi gibi kelimelerin tek tek tahmin edildiği görevlerde başarıyla uygulanır. Ancak, cümle içinde rastgele bir kelime tahmin edildiğinde, BERT'i klasik yaklaşımlardan ayıran özellik rastgele kelimeyi maskeleyerek tahmin etmeye çalışmasıdır (Devlin vd., 2018).

BERT modelinden önce geliştirilen Word2Vec ve GloVe gibi kelime gömülmesi modelleri büyük ve etiketlenmemiş derlem ile eğitilmesine rağmen bu modeller birleşik kelimeleri ve olumsuzluk anlamlarını kotarma yeteneğine sahip değildir. Modellerin diğer bir eksikliği ise kelimelerin geçtiği bağlamı göz önünde bulundurmamasıdır (Jin vd., 2020). BERT modeli Word2Vec ve GloVe modellerinin bu dezavantajlarını derin öğrenme mimarilerini kullanarak giderir. BERT'in üzerine inşa edildiği dönüştürücü mimarisine kelimenin bağlamındaki diğer kelimeler göz önünde bulundurulur ve bağlamdaki kelimelere ağırlık mekanizması uygulanarak kelime temsilleri oluşturulur. Dönüştürücülerin uzun vadeli kelime bağımlılıklarını yüksek performansla tespit etme yeteneği, BERT modelinin dönüştürücü mimarisi üzerine inşa edilmesinin temel nedenidir. BERT, her biri 1024 gizli birimden oluşan 24 dönüştürücü bloğundan oluşur ve yaklaşık 340 milyon parametreye sahiptir.

Destek Vektör Makineleri (DVM)

Destek Vektör Makineleri (DVM), Vapnik tarafından geliştirilen, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan bir yapay öğrenme yöntemidir (Joachims, 1999). DVM, diğer yapay öğrenme yöntemlerine kıyasla doğrusal olmayan veri kümelerini modelleme başarısıyla ön plana çıkmaktadır. İkili sınıflandırma problemlerinde doğrusal yapıya sahip olmayan eğitim örnekleri, mevcut giriş uzayında bir doğruyla iki sınıfa ayrılamaz. Bu gibi durumlarda, DVM, mevcut uzayı doğrusal olmayan bir haritalama fonksiyonuyla eğitim örneklerinin doğrusal olarak ayrılacağı yüksek boyutlu bir öznitelik uzayına taşır. Haritalama işleminde kullanılan fonksiyonlar genellikle ikinci dereceden, kübik ve trigonometrik terimler içermektedir. Çekirdek fonksiyonları olarak adlandırılan bu fonksiyonlar ile ilk aşamada tüm eğitim örnekleri için fonksiyon değerleri hesaplanır. Sonraki aşamada ise yeni örnekler ile eğitim örnekleri arasındaki benzerlik değerleri hesaplanan çekirdek fonksiyon değerleri üzerinden kolayca bulunur. DVM'de yaygın olarak kullanılan çekirdekler doğrusal, polinom, sigmoid ve radyal tabanlı fonksiyonlardır (Gunduz, 2021).

Değerlendirme Ölçütleri

Çalışmada model performanslarını doğruluk, kesinlik, anma ve F-Ölçütü metrikleriyle değerlendirilmiştir. Sınıflandırma problemlerinde doğruluk oranından yaygın olarak yararlanır. Ancak dengesiz sınıf dağılımına sahip veri kümelerinin performans değerlendirmesinde doğruluk oranı yanıltıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için sınıf ayrılabilirliğinin modeller tarafından ne kadar iyi gerçekleştirilebildiğini gösteren F-Ölçütü'nden yararlanır (Gulsen vd., 2015). F-Ölçütü, karışıklık matrisi elemanları kullanılarak hesaplanır. Karışıklık matrisi ikili sınıflandırma problemlerinde sınıf bazında doğru ve yanlış sınıflandırılan örneklerin sayısını tutar ve doğru pozitif (dp), yanlış pozitif (yp), yanlış negatif (yn) ve doğru negatif (dn) olmak üzere 4 elemana sahiptir. Karışıklık matrisi temel alınarak kesinlik, anma ve F-Ölçütü metrikleri aşağıdaki şekilde hesaplanır (Catal vd., 2021):

$$\text{Kesinlik (K)} = \frac{dp}{dp + yp} \quad (1)$$

$$\text{Anma (A)} = \frac{dp}{dp + yn} \quad (2)$$

$$\text{F-Ölçütü} = \frac{2 * K * A}{(K + A)} \quad (3)$$

Eşitliklerde belirtildiği üzere, F-Ölçütü; anma ve kesinlik ölçütlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanır.

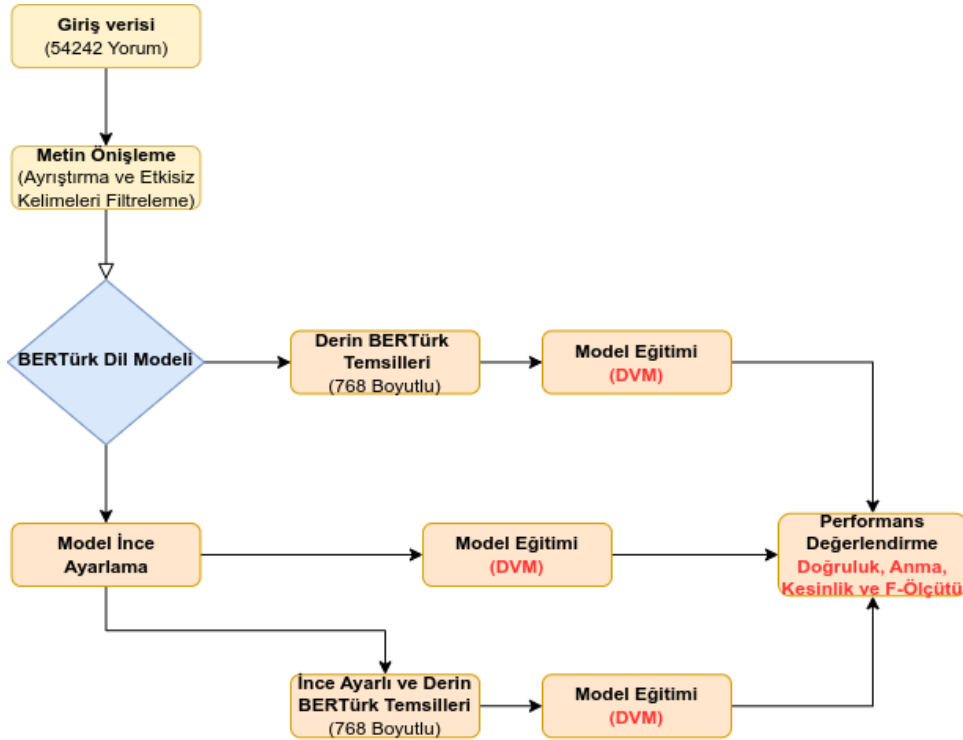
DENEYSEL SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan veri kümesi beyazperde.com isimli web sitesinden derlenmiştir. İlk olarak Türkmenoğlu ve Tantuğ (2014) 'un çalışmasında kullanılan veri kümesi 54242 adet örnekten oluşmaktadır. Örnekler yorum yapılan film adlarını, kullanıcıların filmlere yaptıkları yorumları ve filmlere verilen beğeni puanlarını içermektedir. Atanan değerlendirme puanları ölçeği 1 ile 5 arasındadır. Çalışmada filmlerin beğeni durumu tahmin edileceğinden filmlere atanan puanlar 2 sınıfa ayrılmıştır. İzleyici tarafından filme verilen puan 4'ün altında ise sınıf etiketi olarak 0 (beğenilmedi), 4 ve üzerinde ise etiket olarak 1 (beğenildi) atanmıştır. Etiket atama aşamasından sonra film yorumları üzerinde ön işleme gerçekleştirilmiştir. Ön işlemede karakter katarı olarak bulunan metinler kelimelere ayrıştırılmış (Tokenization) ve etkisiz kelimeler ihmal edilmiştir.

Sınıflandırma işleminde doğal dil işleme deposu **huggingface'den** indirilen "**bert-base-turkish-cased (BERTurk)**" modeli kullanılmıştır (Wolf vd., 2019). BERT modelinin temel versiyonu olan "bert-base-turkish-cased" her biri 768 adet gizli birime sahip 12 adet dönüştürücü bloğu içermektedir. Elde edilen model sınıflandırma görevinde kullanılacağından bu modelin son dönüştürücü katmanından sonra doğrusal bir katman daha eklenmiştir. BERTurk modeli OSCAR derlemi, Wikipedia metinleri ve Kemal Oflazer tarafından sağlanan özel bir derlem ile ön eğitilmiştir (BERTurk, 2019).

Kullanılacak modelin elde edilmesinden sonra veri kümesi örnekleri BERTurk modeli girdisi olarak biçimlendirilmiştir. Örneklerin biçimlendirilmesi için yine huggingface tarafından sağlanan **BertTokenizer** modülü

kullanılmıştır (Wolf vd., 2019). Bu modül ile veri örnekleri en fazla 64 token (kelime) içeren nitelik vektörlerine dönüştürülmüştür. Veri biçimlendirildikten sonra örneklerin %80'lik kısmı eğitim kümesi, geri kalan %20'lik kısmı ise test kümesi olarak belirlenmiştir. Önerilen sınıflandırma modellerine ait şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Önerilen Sınıflandırma Modellerine ait Şematik Gösterim

Yapılan ilk deneylerde ön eğitilmiş BERTürk modelinden derin öznitelik temsilleri çıkarılmıştır. Modelin son dönüştürücü katmanı sınıflandırma işleminin yapıldığı lineer katmanla benzerliğe sahip olduğundan derin temsiller BERTürk modelinin sondan ikinci (11.) dönüştürücü bloğunun çıkışından elde edilmiştir. Her veri örneği 64 token ile temsil edildiğinden, çıkarılan özniteliklerin boyutu her örnek için 64×768 olmuştur. Örnekleri tek boyutlu vektörlere indirgemek için ortalama havuzlama (average pooling) işlemi gerçekleştirilmiş ve her örnek 768 boyutlu vektörle temsil edilmiştir. Elde edilen vektörler son aşamada DVM modeline girdi olarak verilmiş ve sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Ön-Eğitilmiş BERT Temsilleriyle Alınan Sonuçlar

Nitelik Türü	Doğruluk	Anma	Kesinlik	F-Ölçütü
BERT Temsilleri (Ön eğitilmiş)	0,874	0,926	0,895	0,910

Gerçekleştirilen ikinci deneylerde, veri örnekleri ön eğitilmiş BERTürk modeline girdi olarak verilmiş ve ince ayarlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrılan eğitim kümesiyle BERTürk modelinin ince ayarlaması Tablo 2'de listelenen ağ parametreleri kullanılarak yapılmıştır. İnce ayarlama kullanılan parametrelerin belirlenmesinde ızgara arama yönteminden yararlanılmıştır.

Modelin ince ayarlaması tamamlandıktan sonra test kümesi örnekleriyle model başarımları değerlendirilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 3'te listelenmiştir.

İnce ayarlı modelle direkt sınıflandırma yapıldıktan sonra, en son aşamada bu modelden elde edilen derin özniteliklerle deneyler yapılmıştır. İlk deneyde olduğu gibi BERTürk'un sondan ikinci dönüştürücü katmanın (11.

dönüştürücü bloğun) çıkışından her örnek için 64*768 boyutlu derin temsiller elde edilmiştir. Ortalama havuzlama işlemi ile örnekler yine 768 boyutlu vektörlerle temsil edilmiştir. Oluşturulan eğitim kümesi örnekleriyle DVM sınıflandırıcısı eğitilirken, test kümesi örnekleriyle model performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 2. BERTurk Modelinin Ağ Parametreleri

Parametre	Değer
Yığın boyutu	32
Optimizasyon fonksiyonu	Adam
Öğrenme oranı	2e-5
İterasyon sayısı	20

Tablo 3. İnce Ayarlanmış BERT Temsilleriyle Alınan Sonuçlar

Nitelik Türü	Doğruluk	Anma	Kesinlik	F-Ölçütü
BERT Temsilleri (İnce ayarlı)	0,931	0,960	0,938	0,949

Tablo 4. İnce Ayarlanmış BERT Temsilleriyle Alınan Sonuçlar

Nitelik Türü	Doğruluk	Anma	Kesinlik	F-Ölçütü
BERT Temsilleri (İnce ayarlı ve derin öznitelikler)	0,984	0,989	0,981	0,985

Tablo 5. İnce Ayarlanmış BERT Temsili Modeline ait Karmaşıklık Matrisi

Tahmin/ Gerçek	0	1
0	25941	486
1	303	27512

Tüm deneylerin sonuçları incelendiğinde en yüksek sınıflandırma sonucuna ince ayarlı ve derin özniteliklerle ulaşıldığı görülmüştür. Bu modele ait karmaşıklık matrisi Tablo 5' te gösterilmiştir. İnce ayarlı derin temsillerle eğitilen modelle 0.984'lük doğruluk ve 0.981'lik F-Ölçütü oranlarına erişilmiştir.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Görüş madenciliği olarak da nitelendirilen duygu analizi bir dizi kelimenin ardındaki görüşü belirlemenin temel yoludur. Bu çalışmada ön eğitilmiş BERTurk modeli temel alınarak Türkçe film yorumları üzerinde duygu analizi yapılmıştır. En yüksek model performansına (0.984'lük doğruluk ve 0.981'lik F-Ölçütü) ince ayarlı derin temsillerle ulaşılrken, ince ayarlanmış bu temsiller sadece ön eğitilmiş BERT temsillerine göre doğruluk oranında yaklaşık %10'luk, F-Ölçütü oranında ise yaklaşık %7'lik performans artışına sebep olmuştur. İnce ayarlı BERT modeliyle doğrudan sınıflandırma yapıldığında ise doğruluk oranı 0.931 olmuştur. BERT'in dönüştürücü katmanlarından sonra lineer bir sınıflandırma katmanı kullanması doğrudan BERT temsilleriyle eğitilen modelin başarısının düşük kalmasında önemli rol oynamıştır. DVM'nin doğrusal olmayan verileri modellemedeki kabiliyeti, derin temsiller ile DVM modeli kombinasyonunun BERT'in doğrudan kullanımına göre daha yüksek başarı oranına sahip olmasının temel nedenidir.

Önceden belirtildiği üzere bu çalışmanın veri kümesinin ilk kullanıldığı çalışma Türkmenoğlu ve Tantuğ (2014)' tür. Bu çalışmada en yüksek doğruluk oranı TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) öznelikleri ve DVM modeliyle 0.89 olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmaya kıyasla doğruluk oranında yaklaşık %9'luk artış meydana gelmiştir. Artışın ön önemli sebebi BERT'in cümlelerdeki kelime bağlamlarını göz önünde bulundurarak derin temsiller oluşturmaktır. Çalışmada alınan sonuçlar yakın dönem Türkçe duygu analizi çalışmaları ile de kıyaslanmış ve deney sonuçlarının bu çalışmalardan daha yüksek doğruluk ve F-Ölçütü oranlarına eriştiği görülmüştür (Tablo 6).

Tablo 6. Yakın Dönem Türkçe Duygu Analizi Çalışmaları

Nitelik Türü	Doğruluk	F-Ölçütü
Polat ve Ağca (2022)	0,870	0,917
Şahinaslan vd. (2022)	0,656	0,654
Uca vd. (2022)	0,940	-
Sağbaş (2023)	0,943	0,942
*Bu Çalışma	0,984	0,981

İleri dönem çalışmalarında bu çalışmaya ek olarak elde edilen derin temsillerin topluluk öğrenme modellerine girdi olarak verilmesi ve bu modellerden nitelik önem puanlarının öğrenilmesi planlanmaktadır. Elde edilen nitelik puanları ile düşük puanlı nitelikler elimine edilecek ve sınıflandırma daha az boyutlu nitelik temsilleriyle yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- Ain, Q. T., Ali, M., Riaz, A., Noureen, A., Kamran, M., Hayat, B., & Rehman, A. (2017). Sentiment analysis using deep learning techniques: a review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(6).
- Akgül, E. S., Ertano, C., & Banu, D. İ. R. İ. (2016). Twitter verileri ile duygu analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 106-110.
- Catal, C., Gunduz, H., & Ozcan, A. (2021). Malware detection based on graph attention networks for intelligent transportation systems. *Electronics*, 10(20), 2534.
- Catal, C., & Nangir, M. (2017). A sentiment classification model based on multiple classifiers. *Applied Soft Computing*, 50, 135-141.
- Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2018). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*.
- Eroğul, U. (2009). Sentiment analysis in Turkish (Master's thesis). *Middle East Technical University, Ankara*.
- Gezici, G., & Yanıkoğlu, B. (2018). Sentiment analysis in Turkish. In *Turkish natural language processing* (pp. 255-271). Springer, Cham.
- Gulsen, E., Gunduz, H., Cataltepe, Z., & Serinol, L. (2015, May). Big data feature selection and projection for gender prediction based on user web behaviour. In *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1545-1548). IEEE.
- Gunduz, H. (2021). An efficient stock market prediction model using hybrid feature reduction method based on variational autoencoders and recursive feature elimination. *Financial Innovation*, 7(1), 1-24.
- Guyen, Z. A. (2021, September). Comparison of BERT models and machine learning methods for sentiment analysis on Turkish tweets. In *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 98-101). IEEE.
- Jin, D., Jin, Z., Zhou, J. T., & Szolovits, P. (2020, April). Is bert really robust? a strong baseline for natural language attack on text classification and entailment. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence* (Vol. 34, No. 05, pp. 8018-8025).
- Joachims, T. (1999). Making large-scale svm learning. *Practical Advances in Kernel Methods-Support Vector Learning*.

- Karayığit, H., Akdagli, A., & Acı, Ç. İ. (2022). BERT-based Transfer Learning Model for COVID-19 Sentiment Analysis on Turkish Instagram Comments. *Information Technology and Control*, 51(3), 409-428.
- Kilimci, Z. H. (2020). Financial sentiment analysis with Deep Ensemble Models (DEMs) for stock market prediction. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 635-650.
- Nizam, H., & Akın, S. S. (2014). Sosyal medyada makine öğrenmesi ile duygu analizinde dengeli ve dengesiz veri setlerinin performanslarının karşılaştırılması. *XIX. Türkiye'de İnternet Konferansı*, 1(6).
- Polat, H., & Ağca, P. (2022). Tripadvisor kullanıcılarının türkçe ve ingilizce yorumları kapsamında duygu analizi yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi. *Abant Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(2), 9
- Poria, S., Cambria, E., Hazarika, D., Majumder, N., Zadeh, A., & Morency, L. P. (2017, July). Context-dependent sentiment analysis in user-generated videos. In *Proceedings of the 55th annual meeting of the association for computational linguistics (volume 1: Long papers)* (pp. 873-883).
- Sağbaş, E. A. (2023). Filtre Tabanlı Öznitelik Seçim Yöntemleri Kullanılarak Metinlerde Duygu Sınıflandırması Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 239-250.
- Şahinaslan, Ö., Dalyan, H., & Şahinaslan, E. (2022). Naive bayes sınıflandırıcısı kullanılarak youtube verileri üzerinden çok dilli duygu analizi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 15(2), 221-22
- Türkmenoglu, C., & Tantug, A. C. (2014, June). Sentiment analysis in Turkish media. In *International Conference on Machine Learning (ICML)*.
- Uca, E., Yilmazer, S., Kizilhan, H., & Karaköse, M. (2022). Sağlık Alanındaki Etkileşimlerde Duygu Analizi Yaklaşımları ve Analizi. *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi* 1(1), 465-470,
- Yadollahi, A., Shahraki, A. G., & Zaiane, O. R. (2017). Current state of text sentiment analysis from opinion to emotion mining. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(2), 1-33.
- Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., Delangue, C., Moi, A., ... & Rush, A. M. (2019). Huggingface's transformers: State-of-the-art natural language processing. *arXiv preprint arXiv:1910.03771*.
- BERTurk (2019). <https://huggingface.co/dbmdz/bert-base-turkish-cased>, Erişilme tarihi: 19.10.2022.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.11.2022
Kabul Tarihi : 20.04.2023

Received Date : 30.11.2022
Accepted Date : 20.04.2023

KARMA TAKVİYELER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

FABRICATION AND PROPERTIES OF ALUMINIUM MATRIX HYBRID COMPOSITES REINFORCED WITH MIXED REINFORCEMENTS

Ramazan SANDAL¹ (ORCID: 0000-0003-1157-2306)
Metin KÖK² (ORCID:0000-0003-0411-5115)
Alaaddin GÜNDEŞ³ (ORCID:0000-0003-1888-4142)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 46100,
Kahramanmaraş, Türkiye

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, El Sanatları Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ramazan SANDAL, ra06ay@gmail.com

ÖZET

Alüminyum uygulama alanı olarak kullanılabilirlik kazandığı on dokuzuncu yüzyılın sonlarından itibaren birçok mühendislik uygulamasında hızla diğer malzemelerin yerini almaktadır. Talepler doğrultusunda uygulama alanları çeşitlilik göstermektedir. Gelişmiş özelliklere sahip malzemelere talep arttıkça araştırmalar yeni hibrit malzemelere yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada alüminyum matris malzemesi, vortex yöntemi ile SiC, Al₂O₃ ve Gr gibi karma takviyeler ile güçlendirilmiş ve hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen alüminyum matrisli hibrit kompozit numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda hibrit kompozitlerde takviye elemanlarının matris malzemesi tarafından yeteri kadar ıslatılabildiğini, arayüzey bağlanmalarının başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Takviye tozlarının matris içerisinde homojen olarak dağılım gösterdiğini mikroyapı fotoğrafları ortaya çıkarmıştır. Artan takviye oranları ile birlikte hibrit kompozit malzemelerin sertlik, eğme ve basma mukavemetlerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca takviye ağırlık fraksiyonunun artışı numunelerin deneysel ve teorik yoğunlukları ile yapı içerisindeki gözeneklilik oranlarını arttırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, alüminyum matrisli hibrit kompozit, silisyum karbür, alüminyum oksit, grafit.

ABSTRACT

Aluminum has been rapidly replacing other materials in many engineering applications since the end of the nineteenth century, when it became available as a field of application. The areas of application vary according to the demands. As the demand for materials with improved properties increases, research is focusing on new hybrid materials. In this study, hybrid composite materials were produced with aluminum matrix material reinforced with mixed reinforcements such as SiC, Al₂O₃ and Gr by vortex method. The mechanical and physical properties of the aluminum matrix hybrid composite samples were investigated. As a result of the examinations, it was concluded that the reinforcing elements in hybrid composites can be sufficiently wetted by the matrix material, and the interfacial bonding is successful. Microstructure photographs revealed that the reinforcement powders were homogeneously dispersed in the matrix. With increasing reinforcement ratios, the hardness, bending and compression strengths of hybrid composite materials increased. In addition, the increase in the reinforcing weight fraction increased the experimental and theoretical densities of the samples and the porosity rates within the structure.

Keywords: Aluminium, Aluminium matrix hybrid composite, Silicon carbide, Aluminium oxide.

ToCite: SANDAL, R., KÖK, M., & GÜNDEŞ, A., (2023). KARMA TAKVİYELER İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 550-561.

GİRİŞ

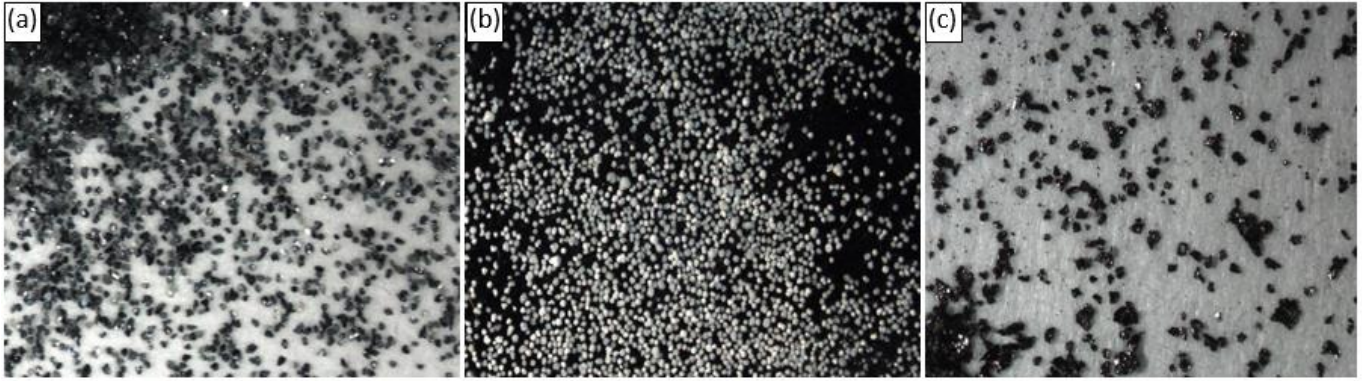
Kompozit malzemeler insan uygarlığı kadar eskidir. Genel olarak, herhangi bir kompozitte (a) matris ve (b) takviyede iki faz bulunur. Kompozitler, uygun şekilde düzenlenmiş, birbiri içinde çözünmeyen ve bileşen malzemelerin herhangi birinden daha üstün özelliklere sahip, en iyi özelliklerini yeni bir malzemede toplamak amacıyla iki veya daha fazla malzemenin (takviye elemanı ve matris malzemesi) birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir (Lubin, 2013; Safri vd., 2018; Garg vd., 2019; Ramanathan vd., 2019; Şimşek, 2021). Kompozitlerin amacı, birleştirilen malzemelerin zayıf yönlerini kapsayacak şekilde güçlü yönleri sahip yeni bir karma yapının oluşturulmasını sağlamaktır (Park & Seo, 2011). Kompozitler esas olarak; Sıvı hal üretim yöntemleri, Katı hal üretim yöntemleri, Yarı-katı hal üretim yöntemleri olmak üzere farklı metalürjik yollar ile üretilmektedirler (Akinwande vd., 2022). Kompozit bir malzeme, tek veya daha çok süreksiz fazın, sürekli bir formdaki faz içerisinde dağıtımının gerçekleşmesiyle üretilmektedir. Takviye elemanı olarak süreksiz faz, genellikle matris olarak sürekli fazdan gelişmiş tür özellikler gösterdiği için takviye veya kuvvetlendirici malzeme olarak bilinmektedir (Kalemtaş, 2014; Agarwal & Broutman, 1980). Metal matrisli kompozitler, metalik olmayan veya organik bileşiklerle güçlendirilmiş sünek metal ya da alaşım matrisinin bir kombinasyonudur (Ekka vd., 2014; Bulei vd., 2021). Metal matrisli kompozit malzemelerin özellikleri arasında Minimum termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenlik yer aldığı için, yüksek sıcaklık ortamlarında gelişmiş performans sergilerler (Hynes vd., 2022). Mevcut birkaç matris malzemesi arasında, alüminyum ve alaşımları kompozit üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun daha az ağırlık, ekonomik olarak uygulanabilirlik, farklı tekniklerle işlenmesinin kolay olması, yüksek mukavemet/ağırlık oranına ve korozyona karşı mükemmel dirence sahiplik gibi çekici özellikleri metal matrisli kompozitlerin matris malzemesi olarak kullanılmasında tercih nedenidir (Ramanathan vd., 2019; Rajan vd., 2021). Metal matrisli kompozitlerin fiziksel özellikleri, genellikle, takviye elemanlarının ilavesi ile iyileştirilmektedir. (Hull, 1981; Simith, 1996; Abdizadeh vd., 2008). Hibrit metal matrisli kompozitler, özellikleri iyileştirmek için birden fazla tipte takviyenin kullanıldığı ikinci nesil kompozitlerdir. Düşük sürtünme, düşük aşınma oranı ve mükemmel yapılaşma önleyici özellikler sergileyen metal matrisli kompozitleri sağlamaya çalışırken, alüminyum alaşımlarının grafit, diğer katı yağlayıcılar ve sert seramik parçacıklarla harmanlanması üzerinde durulur (Stojanaovic vd., 2016). Alüminyum hibrit kompozitler, ileri mühendislik uygulamalarının son taleplerini karşılama potansiyeline sahip, iki ya da daha fazla sayıda takviyelerin matris malzemesine ilave edilerek üretilen metal matrisli kompozitlerdir. Bu talepler, geliştirilmiş mekanik özellikler, geleneksel işleme tekniğine uygunluk ve alüminyum hibrit kompozitlerin üretim maliyetini düşürme olasılığı nedeniyle karşılanmaktadır (Bodunrin vd., 2015). Yüksek mekanik özellikler aynı zamanda, kompozitlerin maliyetini büyük ölçüde azalır. 1970'lerden beri, hibrit kompozitlerin araştırılması giderek daha fazla araştırmacıyı kendisine çekmiştir (Feng vd., 2008). Hibrit kompozit malzemeler, farklı takviye elemanlarının etkileşimiyle gelişmiş aşınma direnci, düşük termal genleşme, mekanik özelliklerin iyi olması gibi karakteristiklere sahip olduğu için tek tür takviyeye sahip kompozit malzemelere göre önemli derecede üstün özelliklere sahiptir (Avcı, 2019; Feng vd., 2008). Bu malzemelerin performansı, çoğunlukla, bazı proses parametreleri, takviye edici parçacıklarla ilişkili olduğundan, takviye malzemelerinin doğru kombinasyonunun seçilmesine bağlıdır. Alüminyum hibrit kompozitlerin tasarımında birkaç takviye edici partikül kombinasyonu kavramsallaştırılmıştır (Bodunrin vd., 2015). Hibrit kompozitlerin özelliklerinin geliştirilmesi ile ilgili yapılan araştırmaların bazıları şunlardır. (Biswal vd., 2022) matris malzemesi olarak alüminyum, Al_2O_3 ve WS_2 partikülleri ile takviye ederek alüminyum matrisli hibrit kompozitleri üretmişler ve kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelemişlerdir. Takviye eleman dağılımını uniform olarak gözlemişler ve artan takviye oranları ile sertliğin ve yoğunluğun arttığı sonucuna varmışlardır. (Gajalakshmi vd., 2022) çalışmalarında kompozit metodunu kullanarak AA6026 matris malzemesini %4 bakır kaplı karbon fiber (CF) ve %3 nanokil takviye elemanları ile güçlendirerek hibrit takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretmişlerdir. Bu üretilen kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. (Srinivasan, 2022) Al 7075 matrisli TiC, SiC ve grafit takviyeli hibrit kompozit üretimi ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Artan takviye fraksiyonu ile birlikte sertlik, darbe dayanımı ve çekme dayanımı artmış ancak %12 TiC fraksiyonu ile birlikte gözenek miktarı artması nedeniyle çekme dayanımının düşmüş olduğunu saptamışlardır. (Muzeer vd., 2022) karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6061 matris malzemesini, farkı hacim oranlarında ZrO_2 ve SiC partikülleri ile güçlendirerek hibrit kompozit malzeme üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerin gerçek ve teorik yoğunluk sonuçlarını karşılaştırmışlar ayrıca aşınma deneyine tabi tutmuşlardır. Hibrit kompozitlerin aşınma oranının, takviyesiz alüminyum alaşımlarından daha düşük olduğu, takviyelerin aşınma oranını azalttığı sonucuna varmışlardır. (Gopinath vd., 2020) hibrit kompozit malzeme üretimi araştırmalarında, 6061 alaşımını matris malzemesi olarak, takviye elemanı olarak ta BN (bor nitrid), Al_2O_3 ve grafit partiküllerini kullanmışlar ve yöntem olarak ise ergimiş karıştırma metodunu uygulamışlardır. Ürettikleri kompozitlerin mekanik, aşınma ve korozyon özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. BN ile Al_2O_3 takviye oranlarının artırılması ile kompozitlerin çekme mukavemetlerine artışın gözlemlendiği, ayrıca SEM ve EDS

incelemeleri ile mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. (Bommana vd., 2022), SiC ve B₄C partiküllerinin takviye edilmesiyle AA6061 esaslı hibrit kompozit üretiminde sert parçacıkların mukavemet ve uzama davranışına etkilerini araştırmışlardır. Hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini analiz etmek için sertlik ölçümü ve tek eksenli yüklenme metodunu tatbik etmişler ve takviye elemanlarının (AA6061) matris fazı içerisindeki dağılım oranını gözlemleyebilmek amacıyla OM, XRD ve SEM analizi yapmışlardır. Hibrit kompozitlerde sertlik, akma dayanımı (UTS) ve uzama gibi özelliklerde iyileşme meydana gelmiş olduğu sonucuna varmışlardır. (Christy vd., 2020) geri dönüşüm jant alüminyumun karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak, alümina ile takviye edilmesiyle sonucu kompozit malzeme üretimini araştırmışlardır. Üretimi gerçekleştirilen kompozit numunelerin mikroyapıları, sertlik değerleri, çekme mukavemetleri, basma mukavemetleri ve aşınma özellikleri analiz edilmiştir. XRD analizleri geri dönüşüm alüminyumda yeni bir faz oluşmadığını göstermiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan bu geri dönüşüm alüminyumdan kompozit üretimi ile elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmamızda, karıştırmalı döküm yöntemi (vortex) ile alüminyum matrisli partikül takviyeli hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Matris malzemesi farklı takviye partikülleri ile güçlendirilmiştir. Matris malzemesi olarak saflaştırılmış geri dönüşüm alüminyum, takviye elemanları olarak; SiC, Al₂O₃, ve Gr partikülleri kullanılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Malzeme seçimi

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak geri dönüşümden elde edilmiş 98,21 saflıkta hurda alüminyum kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak %99 saflıkta, sırasıyla 60 ,44, 44 µm ortalama boyutlarında ve 3.20, 3,95, 2.26 gr/cm³ yoğunluklarında SiC, Al₂O₃ ve Gr tozları kullanılmıştır. Bu takviye partiküllerinin mikroskop görüntüleri Şekil 1’de, matris malzemesi alüminyumun kimyasal bileşimi ise Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Takviye Elemanları; (a) SiC Tozlarının, (b) Al₂O₃ Tozlarının, (c) Gr Tozlarının Mikroskop Görüntüleri

Tablo 1. Matris Malzemesi Alüminyumun Kimyasal Bileşimi

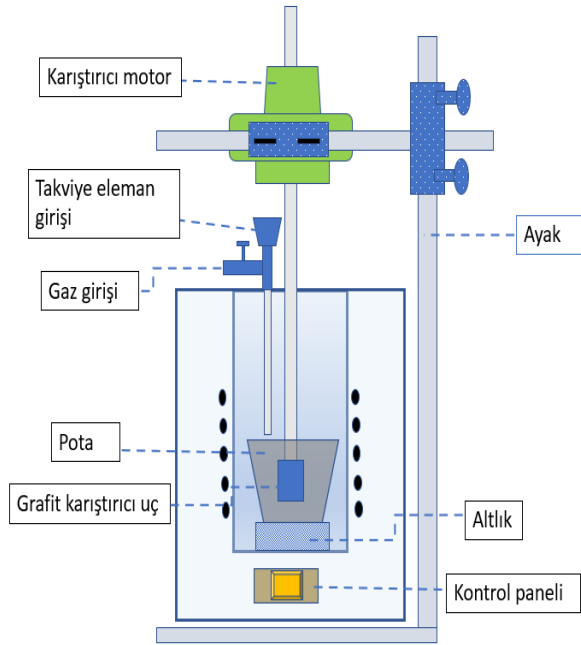
Al	Fe	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Ti	Sn	Cr	Pb
98,21	0,65	0,42	0,19	0,15	0,13	0,12	0,02	0,02	0,01	0,01

Metod

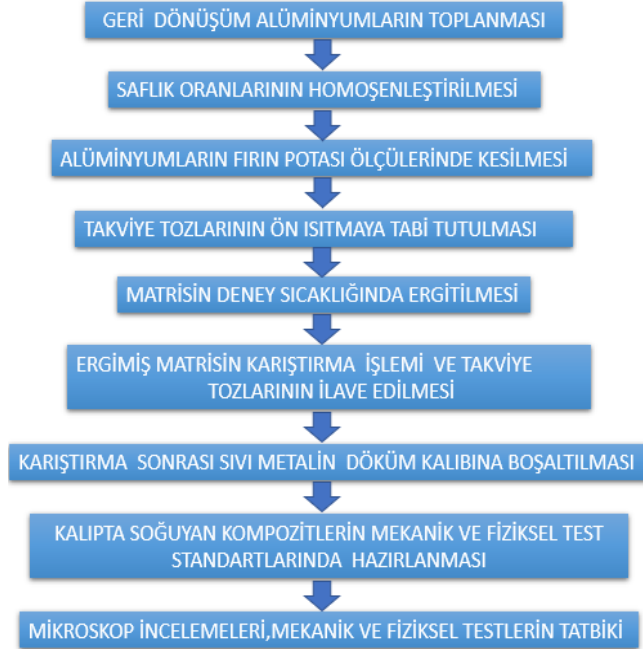
Hibrit kompozit numunelerin üretimi öncesi takviye tozlarına 400 °C’de 30 dakika süreyle ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu ön ısıtmanın amacı takviye elemanlarının rutubetten giderilmesi ve ıslatılabilme özelliklerinin artırılmasıdır. Üretim süresinde ergimiş metalin sıcaklığı 730 °C sabitlenmiştir. Alüminyum matris malzemesinin ergimesi sonrasında takviye tozlarının ilave edilmesinin hemen öncesinde takviye elemanları ile matris malzemesi arasında bağlanabilme özelliklerini geliştirmek amacıyla %2 oranında magnezyum parçalar sıvı metale eklenmiştir. Alüminyum matris malzemesinin grafit potada ergimesi ve deney sıcaklığına ulaşması sonrasında, ön ısıtmaya tabi tutulmuş takviye tozları; karıştırıcı ucun 700 dev/dak hız ile ergimiş metale daldırılmasıyla içerisinden azot gazı geçen bir boru vasıtası ile 5 gr/dak hızla, karıştırıcının ergimiş metalde oluşturduğu vortexin içine ilave edilmeye başlanmıştır. Takviye tozlarının eklenmesi sonrasında karışımın homojen olarak gerçekleşmesi için karıştırma işlemine 5 dakika süreyle devam edilmiştir. Böylece potanın dibine çökelmiş ya da sıvı metalin yüzeyinde bulunan takviye tozların matris malzemesine karışması sağlanmış olmaktadır. Karıştırma işlemi sona erdikten sonra karıştırıcı

ergimiş metalden çıkartılmış ve sıvı karışım kalıba boşaltılarak oda koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Hibrit kompozit numunelerin üretiminde kullanılan sistemin şematik gösterimi ve üretim akış şeması Şekil 2’de ve üretilen numune görüntüsü Şekil 3’de gösterilmiştir. Devam eden üretimlerle bütün kompozit numuneler bu şekilde elde edilmiştir. Hibrit kompozitlerin özelliklerindeki iyileştirmelerin kıyaslanabilmesi için matris malzemesi de aynı üretim şartlarında hazırlanmıştır. Takviye elemanlarından SiC tozları ağırlıkça %3-%6 olarak ve Al₂O₃ tozları %1-%2, Gr tozları ise %0,5 oranında ilave edilmiştir. Hibrit kompozit numune grupları Tablo 2’de gösterilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 2.(a) Hibrit Kompozit Numunelerin Üretiminde Kullanılan Sistem, (b) Üretim Akış Diyagramı



Şekil 3. Üretilen Numune Görüntüsü

Tablo 2. Hibrit Kompozit Numune Grupları

NUMARA	KOMPOZİT İÇERİĞİ
M1	Al matris
N1	%95,5 Al+ %3 SiC+%1 Al ₂ O ₃ +%0,5Gr
N2	%94,5 Al+ %3 SiC+%2 Al ₂ O ₃ +%0,5Gr
N3	%92,5 Al+ %6 SiC+%1 Al ₂ O ₃ +%0,5Gr
N4	%91,5 Al+ %6 SiC+%2 Al ₂ O ₃ +%0,5Gr

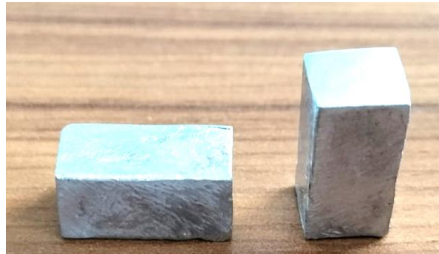
Üretimi gerçekleştirilen hibrit kompozit numuneler içerisinde takviye elemanlarının dağılımı, gözeneklilik, kümelenme, bağlanma gibi özelliklerini belirlemek için numunelerin mikroyapıları incelenmiş, XRD ve OM analizleri yapılmıştır. Optik mikroskop incelemesi için bakalite alınan numuneler, sırasıyla 150 -1000 aralığında grid zımparalar yardımıyla zımparalanmış, sonrasında elmas pasta içeriğine sahip keçeler ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Mikro yapı fotoğrafları Zeiss marka optik mikroskopta çekilmiştir. Numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre ağırlıklarının ve su içinde hacimlerinin belirlenmesi ile, teorik yoğunlukları karışım kuralına göre, kompozitlerin hesaplanan teorik ve deneysel yoğunluk farklarından içerdikleri gözeneklilik oranları ile hesap edilmiştir. Deneysel, teorik yoğunluk ve gözeneklilik hesaplamada kullanılan formüller, Denklem 1-3'de gösterilmiştir. Burada ρ ; yoğunluk, m ; kütle, W ; yüzde ağırlık olarak belirtilmiştir.

$$\rho_{Deneysel} = \left[\frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \right] \times \rho_{su} \quad [1]$$

$$\rho_{Teorik} = (\rho_{Al} \times W_{Al}) + (\rho_{SiC} \times W_{SiC}) + (\rho_{Al_2O_3} \times W_{Al_2O_3}) + (\rho_{Gr} \times W_{Gr}) \quad [2]$$

$$\% \text{ Gözeneklilik} = \left[1 - \frac{\rho_{Deneysel}}{\rho_{Teorik}} \right] \times 100 \quad [3]$$

Alüminyum hibrit kompozitlerin sertlik değerlerinin ölçülmesi Zwick marka mikro sertlik cihazında yapılmış ve sertlik değerleri HV olarak kaydedilmiştir. Hibrit kompozit numunelerin Üç Nokta Eğme testleri 100 kN kapasiteli, Zwick Roell Marka test cihazına monte edilen üç nokta eğme aparatları yardımıyla oda sıcaklığında 3 mm/dak hızında yapılmıştır. ASTM D790-10 standart boyutlarına göre numuneler 4x10x80 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Basma Testleri 100 kN'luk kapasitesi olan Zwick Roell Marka test cihazı ile oda sıcaklığı koşullarında 0,5 mm/dak hızında ASTM E9-09 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Bu standart ile hazırlanan basma numune görüntü Şekil 4'de gösterilmiştir. Her bir deney grubu için ortalaması alınmak üzere Sertlik, Eğme ve Basma Testleri için ayrı ayrı olmak üzere üçer adet deney numunesi test edilmiş ve bu deney numunelerinin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar ortaya konmuştur.



Şekil 4. Basma Testi Numune Görüntüsü

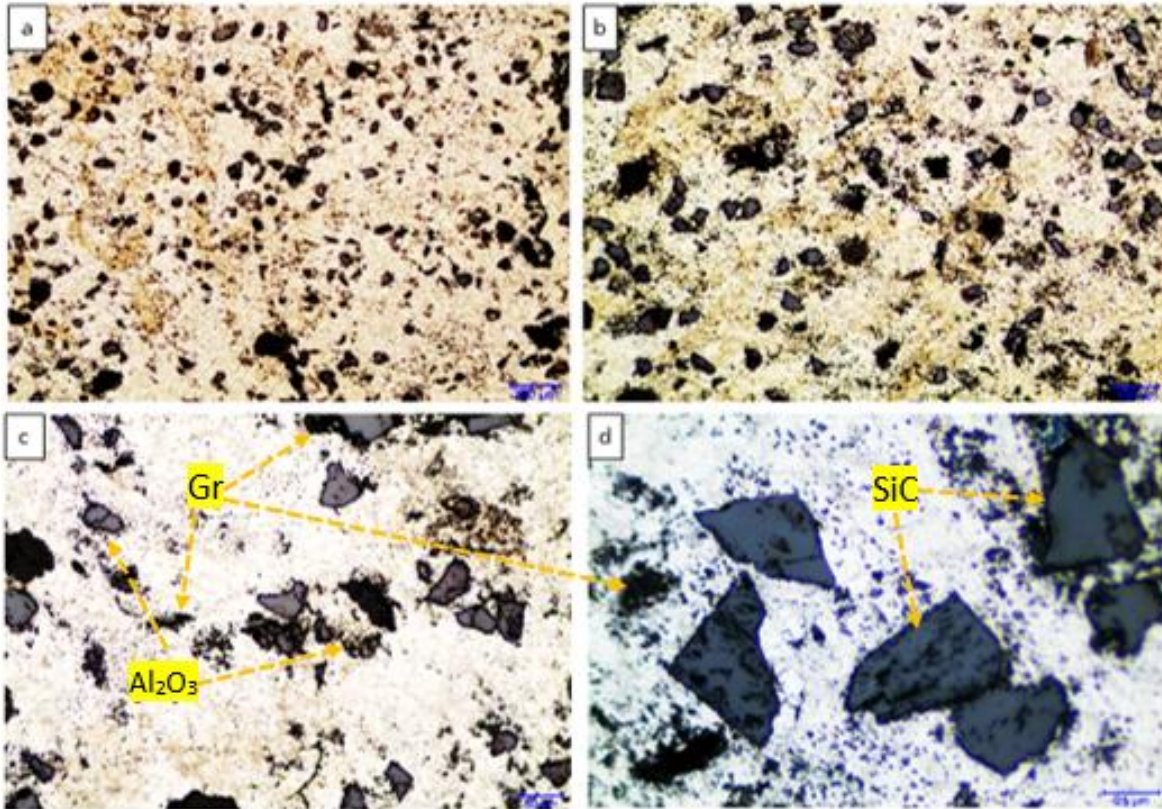
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, karıştırma döküm (Vortex) yöntemi ile karma takviyeler ile güçlendirilmiş Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozit numuneleri başarı ile üretilmiştir. Matris malzemesi (ana faz) olarak 98,21 saflıkta geri dönüşüm alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Takviye elemanlarının alüminyum matris malzemesine ilave edilmesi, mekanik özellikleri geliştirmiştir. Takviye elemanları matris fazı içerisindeki birtakım mikro mekanizmaları tetiklemekte ve kompozit malzemenin özelliklerinde iyileşme olmaktadır. Ayrıca ilave edilen takviye elemanları matrise göre daha sert yapıda olmaları nedeniyle uygulanan yüklere karşı direnç ortaya koymaktadırlar. Bu ortaya konan direnç mekanik özellikleri geliştirmektedir. Üretimi gerçekleştirilen herhangi bir kompozit malzemenin performansı çeşitli mekanik özelliklerin bilinmesi ile değerlendirilebilir. Her bir takviye elemanının matris malzemesine avantajları da dezavantajı da olabilmektedir. Hibrit kompozit malzeme üretimi sürecinde, özellikleri iyileştirilmek istenen alüminyum matrisine, takviye elemanları ilave edilmesiyle, mekanik özelliklerin, ilave edilen takviye fraksiyonuna ve üretim parametrelerinin değişimine bağlı olduğu belirlenmiştir. Numunelerin yoğunluk ve gözeneklilik oranlarını gösterimi Tablo 3'te gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere SiC ve Al₂O₃ takviyesinin ağırlıkça yüzde oranının artmasıyla birlikte teorik ve deneysel yoğunluk değerleri artmaktadır. Ayrıca gözeneklilik oranları bakımından da bu paralelliğin olduğu, artan takviye elemanı ile birlikte gözeneklilik oranlarının artmakta olduğu görülmüştür.

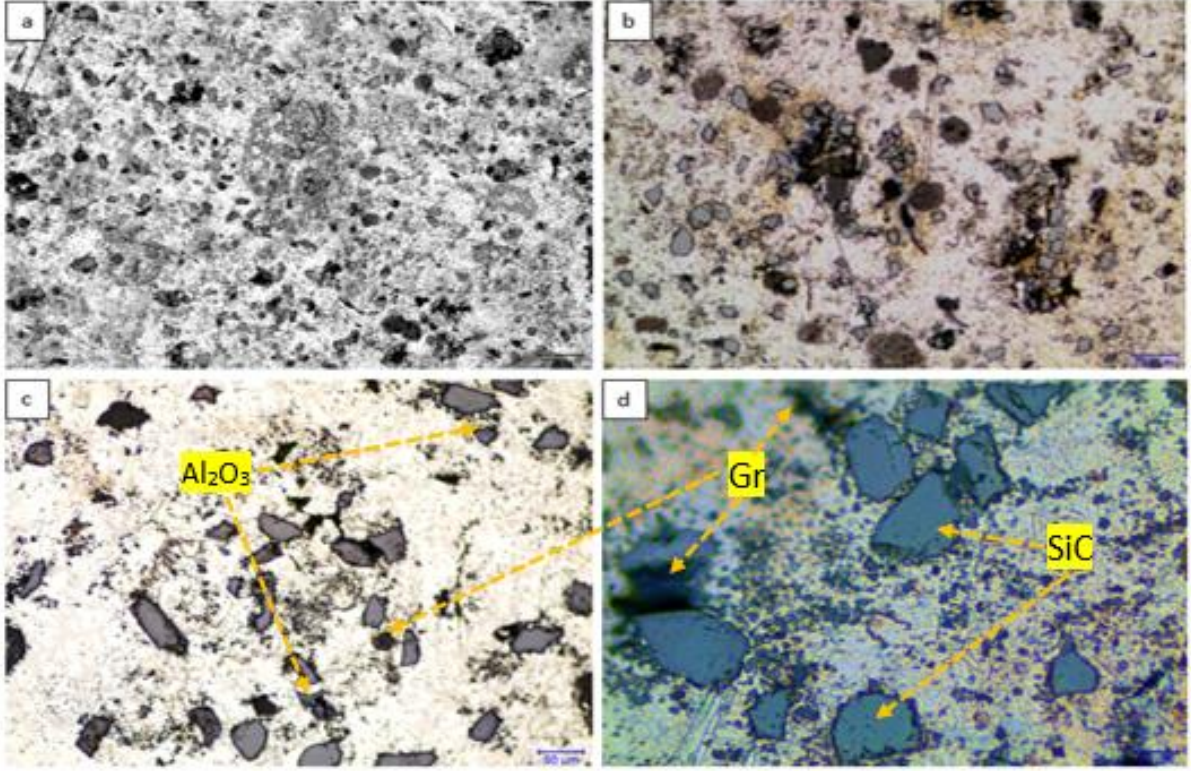
Tablo 3. Numunelerin Yoğunluk ve Gözeneklilik Oranları

NUMARA	GÖZENEKLİLİK %	DENEYSEL YOĞUNLUK (g/cm ³)	TEORİK YOĞUNLUK (g/cm ³)
M1	-	2,7	2,7
N1	3,81	2,62	2,724
N2	3,87	2,63	2,736
N3	3,98	2,63	2,739
N4	4,03	2,64	2,751

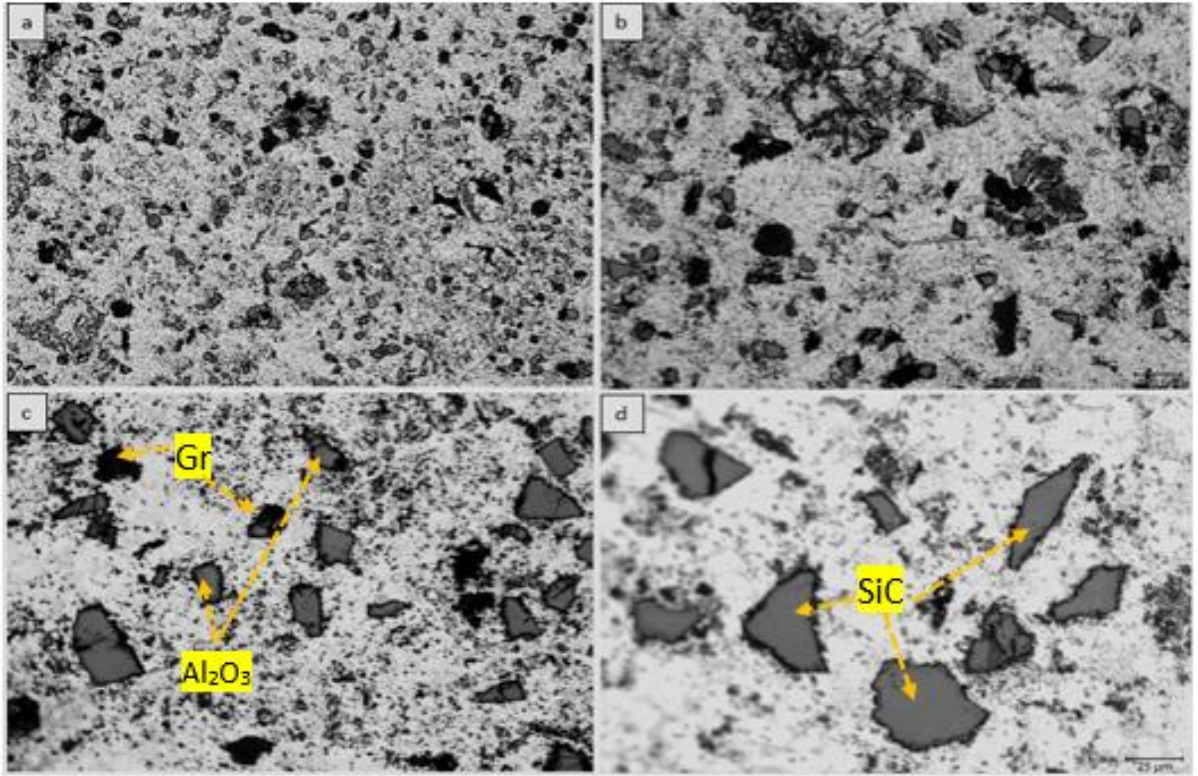
Takviye partiküllerin alüminyum matris içerisinde dağılımının homojen bir oranda olduğu mikroyapı incelemelerinde gözlenmiştir. Yapı içerisinde ayrıca hesap edilen gözeneklilik oranlarını destekler nitelikte mikroyapı görüntülerinde gözenek ve boşluk olarak gözenekliliklerin varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca matris malzemenin geri dönüşüm alüminyum olması nedeniyle mikroyapı görüntülerinde geri dönüşüm alüminyumun doğasına uygun olarak birtakım kırılıklar ve inklüzyonlar kendini göstermektedir. Geri dönüşüm alüminyumlardan kazanılan elementler, impüriteler, inklüzyonlar her zaman hurda alüminyumun içerisinde safsızlıklar olarak yer alırlar. Bu safsızlıkların varlığı mikroyapı görüntülerinde açık olarak görülmektedir. Hibrit kompozitlerin mikroyapı görüntüleri Şekil 5-8'de gösterilmiştir.



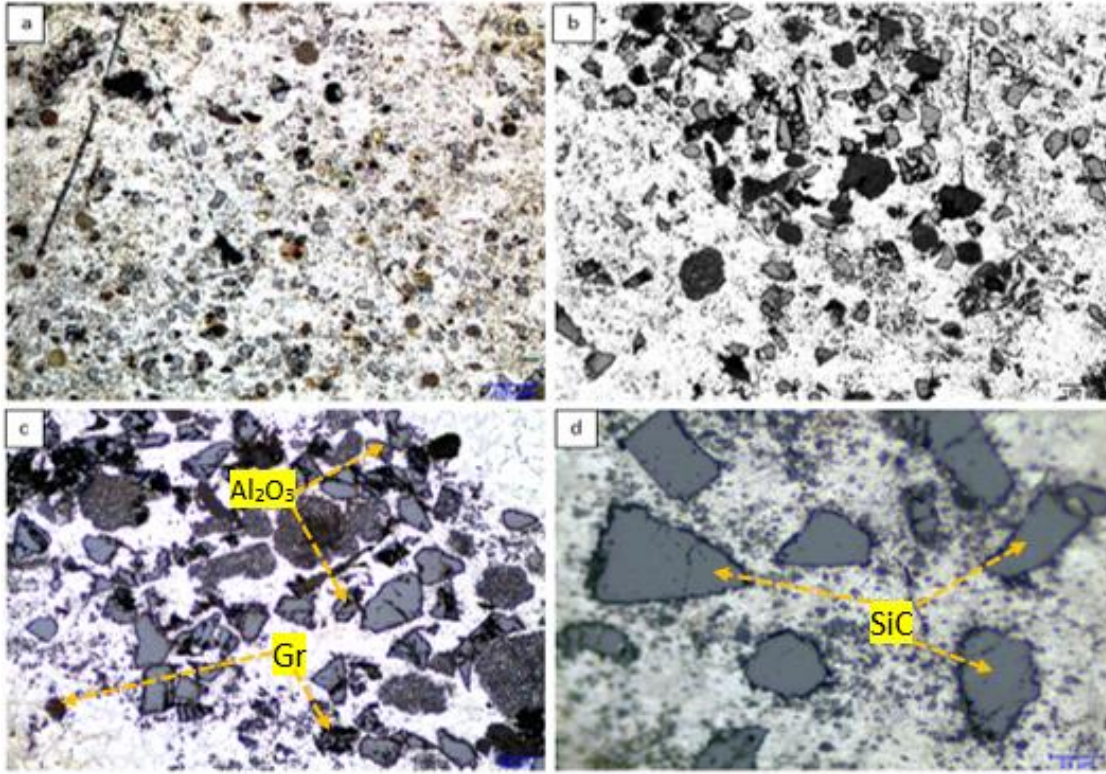
Şekil 5. N1 Kodlu Numunenin Optik Mikroskop ile Çekilmiş Mikroyapı Görüntüleri. a)5x Büyütme, b)10X Büyütme, c)20x Büyütme, d)50x Büyütme



Şekil 6. N2 Kodlu Numunenin Optik Mikroskop ile Çekilmiş Mikroyapı Görüntüleri. a)5x Büyütme, b)10X Büyütme, c)20x Büyütme, d)50x Büyütme

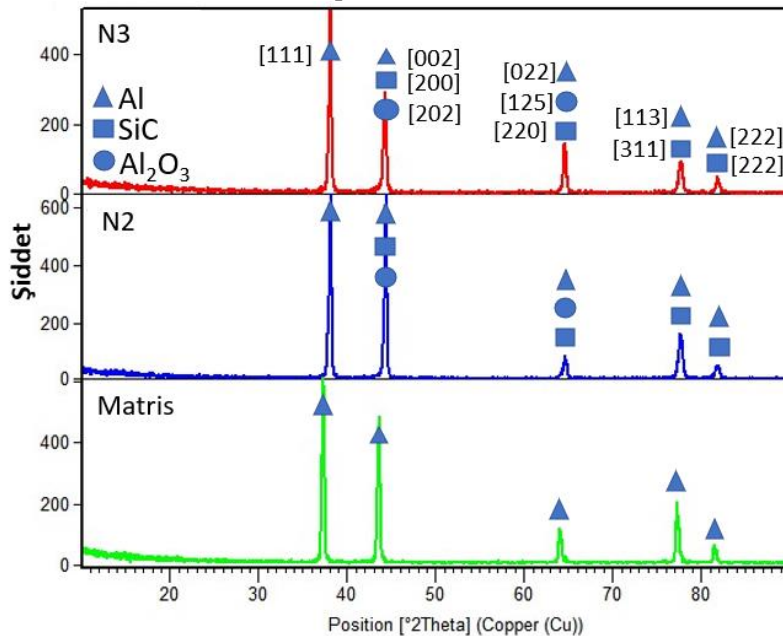


Şekil 7. N3 Kodlu Numunenin Optik Mikroskop İle Çekilmiş Mikroyapı Görüntüleri. a)5x Büyütme, b)10X Büyütme, c)20x Büyütme, d)50x Büyütme



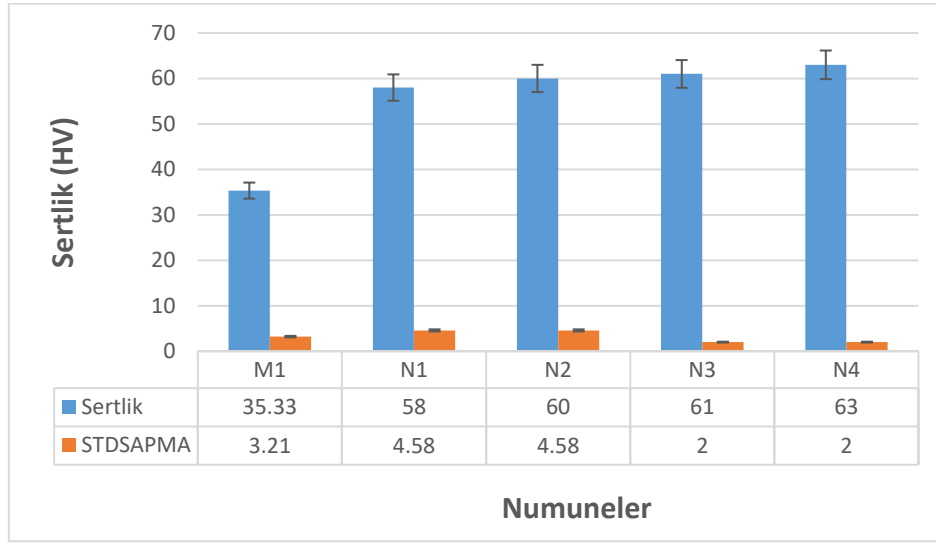
Şekil 8. N4 Kodlu Numunenin Optik Mikroskop ile Çekilmiş Mikroyapı Görüntüleri. a)5x Büyütme, b)10X Büyütme, c)20x Büyütme, d)50x Büyütme

Hibrit kompozit numunelerde takviye elemanlarının matris içerisindeki durumlarını ayrıca XRD analizi yardımı ile incelenmiştir. Numunelerin XRD analiz sonuçları, takviye elemanlarının indisleri Şekil 9’da gösterilmiştir. Alüminyumun matris metali olması nedeniyle XRD grafik sonuçlarındaki belirgin ve büyük piklerin alüminyum pikleri olduğu tespit edilmiştir. Grafik sonuçlarında; takviyelerin oluşturduğu pikler, matris pikleri ile çakışık pikler olarak okunmuştur. Bu çakışık olarak okunan matris ve takviye elemanlarının pikleri takviye elemanlarının matris içerisinde uniform halde dağılım gösterdiğini kanıtlamaktadır. High Score Plus yazılım programı aracılığıyla grafik sonuçları incelenmiş tek bir pik olarak gözükken piklerin gerçekte girişim yaparak ikili ve üçlü pik grafiği olarak kaydedildiği belirlenmiştir. Takviye elemanlarından olan grafitin yapısındaki karbon, yapı içerisinde tekli olarak, bileşik oluşturmadan sabit ve noktasal olarak küçük pikler olarak okunmuştur.



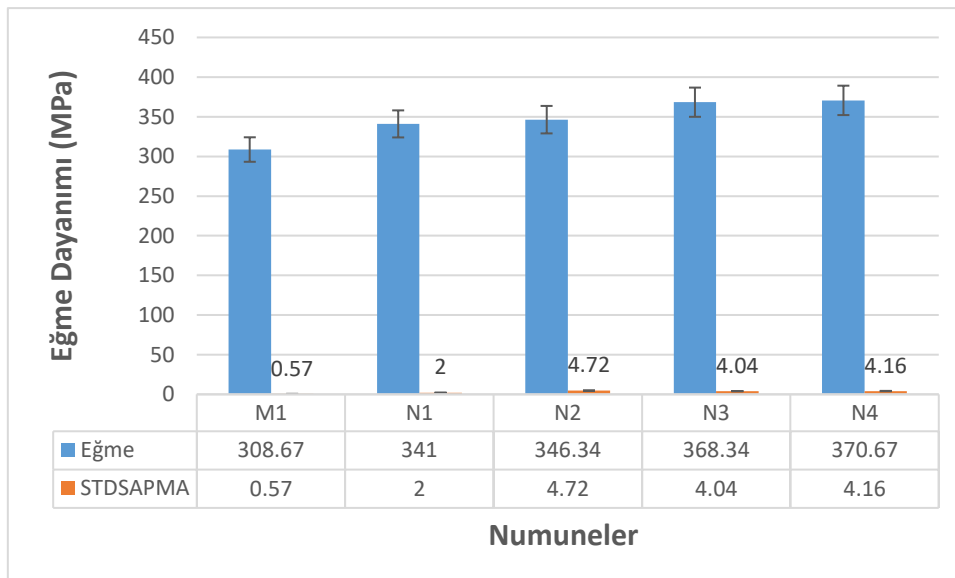
Şekil 9. Hibrit Kompozit Numunelerinin, XRD Analiz Sonuçları

Numunelerin sertlik testi sonuçları Şekil 10'da gösterilmektedir. Matris mazemesine göre takviyelendirilmiş hibrit kompozitlerin yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 10'dan anlaşılacağı üzere artan takviye oranlarına paralel olarak hibrit kompozitlerde sertlik değerlerinin artmakta olduğu sonucuna varılmıştır. Kompozit numunelerin sertlik değerlerindeki iyileşmenin nedeni olarak, partikül oranının ağırlıkça yüzde oranının artmasıyla alüminyum matris boyunca takviye elemanlarının homojen dağılımı gösterilebilir (Dinesh & Ravindran, 2016). Buna ilaveten, matris içerisinde partikül oranının artmasıyla matris ile takviye elemanları arasında meydana gelen ısı genleşme katsayısı farklılıklarından kaynaklanan kalıcı gerilmeler sertlik artışına yol açmaktadır. Ayrıca, takviye elemanlarının matrise göre yüksek sertlikte olması sertliği iyileştirmiştir. Artan takviye ağırlık fraksiyonları ile birlikte numunelerin sertlik değerlerindeki artış oranlarının birbirine yakın olmasının nedeni olarak ise takviye artış oranlarının SiC; %3-6 ve Al₂O₃; %1-2 olmasının, sertlik değerlerinin birbirlerine yakın çıkmasına neden olduğu değerlendirilmektedir.



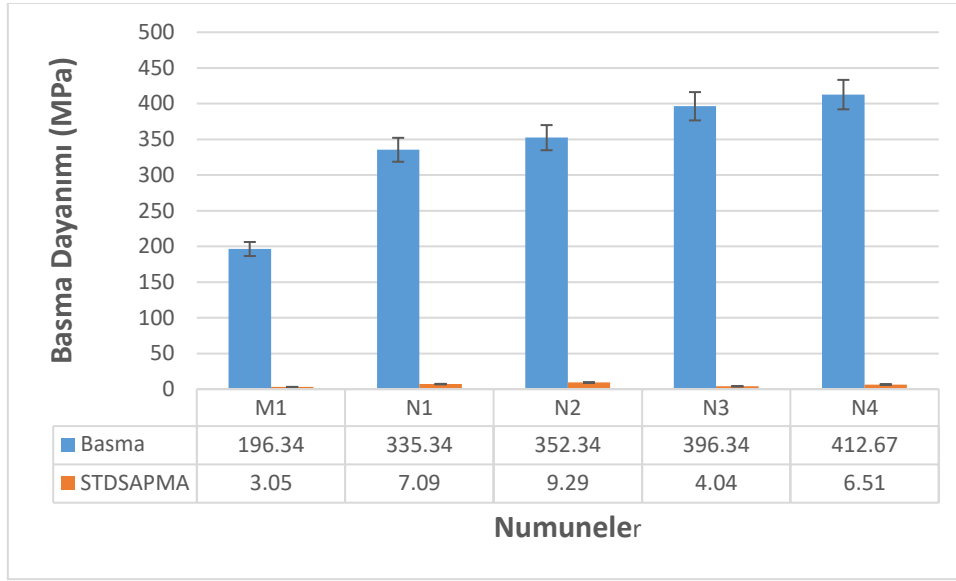
Şekil 10. Numunelerin Sertlik Testi Sonuçları

Partikül takviyeli kompozitlerin sertleşme mekanizmaları olarak, tane inceltme, aglomerasyonun önlenmesi, dislokasyon yığılması gibi faktör belirgin rol oynamaktadır (Boostani vd., 2016). Matris malzemesi dahil her bir numune için Üç Nokta Eğme Testi sonuçları Şekil 11'de gösterilmiştir. Artan takviye fraksiyonu ile birlikte aglomerasyonun azaldığı, dislokasyon yığılmasına yol açacak oranda takviyenin matris fazında bağlandığı ve takviye elemanlarının matris içerisinde miktarının artması sertlik, eğme mukavemeti gibi mekanik özellikleri arttırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 11. Numunelerin Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Alüminyum matris fazına farklı takviye elemanlarının ilave edilmesiyle üretilen hibrit kompozit numunelerinde takviye elemanları, matriste daha ince tanelerin oluşumuna yol açmış ve parçacıkların rastgele dağılması gerilmeler oluşturmuştur. Takviye elemanları, katılaşma sırasında alüminyum matrisinde heterojen katalizör görevi görmektedir. Yumuşak grafit parçacıklar yağlayıcı görevi görmekte ve arayüzey bağını güçlendirmektedir. Hibrit kompozit numuneleri güçlenen arayüzey bağları, eğilme mukavemetini arttırmaktadır (Bhasha & Balamurugan, 2021). Numunelerin basma testi sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. Matris mazemesine göre takviyelendirilerek güçlendirilmiş hibrit kompozitlerin basma mukavemet değerlerinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Karma takviyelerin ilave edilmesi üretilen kompozitlerin basma dayanımını arttırmıştır. Takviye elemanlarının matris fazına göre sert yapıda olması ve yük uygulandığında deforme olmaya karşı direnç göstermeleri eğilme ve basma dayanımını geliştirmiştir.



Şekil 12. Numunelerin Basma Testi Sonuçları

Hibrit kompozit üretimi kavramında iki ya da daha fazla takviye elemanının dahil edilmesi belirtilmektedir. Dahil edilen her takviye elde edilen kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmede yardımcı olmaktadır. Hibrit kompozit üretim kavramında iki ya da daha fazla takviye dahil edildiği için dahil edilen her takviye elde edilen kompozitin basma mukavemeti gibi mekanik özelliklerini iyileştirmede yardımcı olur

SONUÇLAR

Geri dönüşüm alüminyum ve karma takviyeli hibrit kompozit numuneler vortex yöntemi ile üretilmiş ve üretilen numunelerin mekanik özellikleri, yoğunlukları, gözeneklilik oranları incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- ❖ Artan takviye fraksiyonu ile birlikte numunelerin deneysel ve teorik yoğunlukları artmıştır. Bununla birlikte ilave edilen takviye tozlarının ağırlıkça artması yapı içerisindeki gözeneklilik oranlarını arttırmıştır.
- ❖ Optik mikroskop görüntüleri, takviye partiküllerinin homojen olarak dağıldığını, matris içerisindeki artan takviye oranlarıyla partiküllerin birbirlerine yaklaştığını ortaya koymuştur.
- ❖ Hibrit kompozit numunelerde takviye elemanlarının matris malzemesi tarafından yeteri kadar ıslatılabildiğini, arayüzey bağlanmalarının başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.
- ❖ Takviye elemanlarının matris fazı içerisinde yer almasının dislokasyonların hareket etmesine engel teşkil ettiği bununda gerilmelere yol açtığı, artan takviye elemanlarının oranının artmasıyla daha homojen bir dağılımın elde edildiği, aglomerasyonun azaldığı, dislokasyon yığılmasına yol açacak oranda takviyenin matris fazında bağlandığı ve sertlik değerlerinin iyileştiği, sonucuna varılmıştır.
- ❖ Takviye partiküllerinin ağırlık fraksiyonu arttıkça, çekirdeklenme bölgelerinin fazlaşmasına, tane yapısının incelerek çoğalmasına bununda basma mukavemetini arttırdığı bulgusuna ulaşılmıştır.
- ❖ Takviye elemanlarının alüminyum matris malzemesine ilave edilmesi, mekanik özellikleri geliştirmiştir. Takviye elemanları matris fazı içerisindeki birtakım mikro mekanizmaları tetiklemiş ve karma takviye elemanlarının ağırlıkça oranlarının artmasıyla birlikte numunelerin eğilme ve basma mukavemetleri artmıştır.

- ❖ Karma takviye elemanlarının matris fazı içerisinde yer almasının dislokasyonların hareket etmesine engel teşkil ettiği bunun ise gerilmelere yol açtığı tüm bunların sonucu olarak ta kompozit malzemelerin özelliklerinin iyileştiği sonucuna varılmıştır.
- ❖ XRD analiz sonuçlarında alüminyum matris malzemesi belirgin ve büyük pikler olarak okunmuştur. SiC ve Al₂O₃ takviye elemanları matris içerisine uniform dağılım gösterdiği için alüminyum piklerine çakışık, yapıcı girişim pikleri olarak tespit edilmiştir. Grafitin yapısındaki karbon, yapı içerisinde tekli ve noktasal olarak küçük pikler olarak okunmuştur.

KAYNAKLAR

- Abdizadeh, H., Baharvandi, H. R., & Moghaddam, K. S. (2008). Comparing the effect of processing temperature on microstructure and mechanical behavior of (ZrSiO₄ or TiB₂)/aluminum composites. *Materials Science and Engineering: A*, 498(1-2), 53-58.
- Agarwal, B.D. ve Broutman, L.J. (1980). *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, A.B.D.
- Akinwande, A. A., Adediran, A. A., Balogun, O. A., Yibowei, M. E., Barnabas, A. A., Talabi, H. K., & Olorunfemi, B. J. (2022). Optimization of selected casting parameters on the mechanical behaviour of Al 6061/glass powder composites. *Heliyon*, 8(5), e09350.
- Avcı U. (2019). Yeni Bir Yaklaşımla Partikül Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Hibrit Özellikli Tabakalı Kompozit Üretimi ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesinin İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi. Malatya.
- Bhasha, A. C., & Balamurugan, K. (2021). Studies on mechanical properties of Al6061/RHC/TiC hybrid composite. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(4), 405-415.
- Biswal, S. R., & Sahoo, S. (2022). Structural and mechanical properties of a novel Al-Al₂O₃-WS₂ hybrid composites. *Materials Letters*, 307, 131017.
- Bodunrin, M. O., Alaneme, K. K., & Chown, L. H. (2015). Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *Journal of materials research and technology*, 4(4), 434-445.
- Bommana, D., Dora, T., Senapati, N. P., & Kumar, A. S. (2022). Effect of 6 Wt.% Particle (B₄C+ SiC) Reinforcement on Mechanical Properties of AA6061 Aluminum Hybrid MMC. *Silicon*, 14(8), 4197-4206.
- Boostani, A. F., Tahamtan, S., Yazdani, S., Khosroshahi, R. A., Wei, D., Sahamirad, H., & Jiang, Z. Y. (2016). Graphene tweaking Hamaker constant of SiC nanoparticles: A new horizon to solve the conflict between strengthening and toughening. *Scripta Materialia*, 118, 65-69.
- Bulei, C., Kiss, I., & Alexa, V. (2021). Development of metal matrix composites using recycled secondary raw materials from aluminium wastes. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4143-4149.
- Christy, J. V., Arunachalam, R., Mourad, A. H. I., Krishnan, P. K., Piya, S., Al-Maharbi, M. (2020). Processing, Properties, And Microstructure Of Recycled Aluminum Alloy Composites Produced Through An Optimized Stir And Squeeze Casting Processes. *Journal Of Manufacturing Processes*, 59, 287-301.
- Dinesh, M., & Ravindran, R. (2016). Tensile and hardness behavior of aluminum 7075 and Zinc and Chromium metal matrix composite by Stir-Casting Route. *International Archive of applied Sciences and Technology*, 7, 39-46.
- Ekka, K.K., Chauhan S., Varun. R. (2014). Dry sliding wear characteristics of SiC and Al₂O₃ Eng; 40:571–81.
- Feng, Y. C., Geng L., Zheng P. Q., Zheng, Z. Z. and Wang, G. S. (2008), Fabrication and characteristic of Al-based hybrid composite reinforced with tungsten oxide particle and aluminum borate whisker by squeeze casting, *Material & Design*, 29, 2023–2026.
- Gajalakshmi, K., Senthilkumar, N., & Palanikumar, K. (2022). Experimental analysis and optimization on machining of coated carbon fiber and nanoclay reinforced aluminum hybrid composites. *Carbon Letters*, 32(3), 815-833.
- Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., & Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4924-4939.

- Gopinath, S., Prince, M., & Raghav, G. R. (2020). Enhancing The Mechanical, Wear And Corrosion Behaviour Of Stir Casted Aluminium 6061 Hybrid Composites Through The Incorporation Of Boron Nitride And Aluminium Oxide Particles. *Materials Research Express*, 7(1), 016582.
- Hull, D. (1981). *An Introduction to Composite Material*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., pp. 196–252.
- Hynes, N. R. J., Sankaranarayanan, R., Sujana, J. A. J., Krolczyk, G. M., & Ene, A. (2022). Decision tree approach based green flow-drilling of hybrid aluminium matrix composites using eco-friendly coolants. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 178-186.
- Kalemtaş, A. (2014). An overview of metal matrix composites. *Putech&Composites*, 22, 18-30.
- Lubin, G., 2013. "Handbook of composites." Springer Science & Business Media, New York. nanoparticulate aluminium matrix composite using Taguchi technique. *Arab J Sci*
- Muzeer, S., & Sivaganesan, S. (2022). Tribological behaviour of aluminium based hybrid metal matrix composites (Al6061/B4C/ZrO2/SiC). *Materials Today: Proceedings*, 56, 507-513.
- Park, S. J., & Seo, M. K. (2011). Types of composites. In *Interface science and technology* (Vol. 18, pp. 501-629). Elsevier.
- Rajan, T.P.D., Pillai R.M., Pai B.C. (1998). Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites. *J Mater Sci*;33:3491–503.
- Rajesh, G.L., Auradi V., Kori S.A. (2016) Mechanical behaviour and dry sliding wear properties of ceramic boron carbide particulate reinforced Al6061 matrix composites. *Trans Indian Ceram Soc* 75(2):112–119.
- Ramanathan, A., Krishnan, P. K., & Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting–Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing processes*, 42, 213-245.
- Reddy, M. P., Shakoor, R. A., Parande, G., Manakari, V., Ubaid, F., Mohamed, A. M. A., & Gupta, M. (2017). Enhanced performance of nano-sized SiC reinforced Al metal matrix nanocomposites synthesized through microwave sintering and hot extrusion techniques. *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(5), 606-614.
- Safri, S.N.A., Sultan M.T.H., Jawaid M., Jayakrishna K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: a review. *Composites Part B Eng* 133:112–21.
- Smith, W.F. (1996). *Principles of Materials & Engineering*, McGraw-Hill, New York,
- Srinivasan, R., Hariharan, K., Jeyanthan, S. A., Kamalesh, M., & Ali, I. (2022). Effect of addition of titanium carbide and graphite reinforcement on Al7075 hybrid metal matrix composites by gravity stir casting method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 86-93.
- Stojanović, B., Babić, M., Veličković, S., & Blagojević, J. (2016). Tribological behavior of aluminum hybrid composites studied by application of factorial techniques. *Tribology Transactions*, 59(3), 522-529.
- Şimşek, D. (2021). Mekanokimyasal Yöntemle Üretilen Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Yüksek Sıcaklıklardaki Tribolojik Davranışlarının Araştırılması. Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı. Doktora Tezi.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.11.2022
Kabul Tarihi : 23.01.2023

Received Date : 30.11.2022
Accepted Date : 23.01.2023

BALKAN ENDEMİK NEFROPATİSİ ETİYOLOJİSİNDE ARİSTOLOKOLİK ASİT ve LİNYİT HİPOTEZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION of ARISTOLOCHOLIC ACID and LIGNITE HYPOTHESES on the ETIOLOGY of BALKAN ENDEMIC NEPHROPATHY

Ayça DOĞRUL SELVER (ORCID: 0000-0002-9003-5439)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayça DOĞRUL SELVER, aycaselver@ksu.edu.tr

ÖZET

Balkan Endemik Nefropatisi (BEN), Balkanlar'da 1950'li yıllarda tanımlanmış, kronik bir böbrek rahatsızlığıdır. Bulgaristan, Romanya ve Sırbistan gibi ülkelerde Pliyosen yaşlı kömür yataklarının ve BEN'li alanların yayılımının aynı olması sebebiyle BEN etiyojisi için linyit etkisi öne sürülmüştür. Bu hipotez, kömür ile ilişkili olan yeraltı suyunun linyitleri yıkayarak yapılarındaki toksik organik maddeleri bünyesine aldığı, bu suyun arıtılmadan kullanılmasıyla BEN geliştiğini önerir. Sonraki çalışmalar, bu hipotezin zayıf yanlarını ortaya çıkarırken, nefrotoksik/kanserojenik bazı toksinlere (Aristolokolik Asit ve Okratoksin; AA ve OTA) çeşitli yollarla maruz kalınmasının BEN etiyojisinde önemli rol oynadığını ortaya çıkarmıştır.

Linyit hipotezini zayıflatan en önemli bulgu, Pliyosen linyit yataklarının bulunduğu diğer ülkelerde benzer böbrek rahatsızlıklarının görülmemesidir. Benzer şekilde, BEN etiyojisi sadece AA ve OTA'ya maruz kalmakla da açıklanamamıştır. Tek faktörlü etiyojiyi zayıflatan en temel noktalar şunlardır: BEN-endemik bölgelerde yaşayan tüm bölge sakinlerinin hastalanmaması, BEN hastası olan bir evdeki tüm aile bireylerinin hastalanmaması ve kadınların erkeklere oranla daha fazla hastalanması.

Sonuç olarak, yaygın olarak kabul edilen görüş, BEN gelişiminde çok faktörlü etiyojinin etkin olduğudur. Çok temel olarak, linyit kaynaklı PAH'ların veya fenollerin, antropojenik kökenli fitalatların ve AA'nın toksik etkilerinin birleşmesi ve genetik yatkınlık gibi sebeplerle hastalığın geliştiği kabul edilmektedir. Bu çalışmada, BEN hastalığı ile linyit ve aristolokolik asit arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmalar derlenmiştir.

Kelimeler: Balkan endemik nefropatisi, linyit yatakları, poliaromatik hidrokarbonlar, aristolokolik asit

ABSTRACT

Balkan Endemic Nephropathy (BEN) is a chronic kidney disease defined in the Balkans in the 1950s. When it was observed that the distribution of Pliocene coal beds and the areas with BEN was the same in Balkan countries, the lignite hypothesis was proposed for the etiology of BEN. This hypothesis proposes that groundwater washes the lignites and absorbs toxic organic substances which results in developing BEN if this water is used. Studies revealed the weaknesses of lignite hypothesis, and showed that exposure to Aristolocholic Acid and Ochratoxin (AA and OTA) may play a role in the etiology of BEN.

The absence of kidney disorders in other countries with Pliocene lignites is the most important finding that weakens the lignite hypothesis. Similarly, the etiology of BEN could not be explained by exposure to AA and OTA alone. The main weaknesses of single-factor etiology are: Not all residents living in BEN-endemic areas develop BEN; not all family members in a household with BEN develop BEN, and women are prone to develop BEN. In conclusion, multifactorial etiology is effective in the development of BEN. In this study, studies examining the relationship between BEN and the lignite and aristolocholic acid hypotheses were compiled.

ToCite: DOĞRUL SELVER, A., (2023). BALKAN ENDEMİK NEFROPATİSİ ETİYOLOJİSİNDE ARİSTOLOKOLİK ASİT VE LİNYİT HİPOTEZLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 562-572.

Keywords: Balkan Endemic Nephropathy, lignite beds, poliaromatic hydrocarbons, aristolocholic acid

GİRİŞ

Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO), etiyojisi (sebebi) bilinmeyen kronik böbrek hastalığı (chronic kidney disease of unknown etiology; CKDu) kapsamına aldığı pek çok hastalık Balkan Ülkeleri, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Tunus ve Sri Lanka gibi pek çok ülkede tanımlanmıştır. CKDu, Balkan Ülkeleri'nde Balkan Endemik Nefropatisi (BEN), Japonya'da *Itai-Itai* adını alırken, Orta Amerika Ülkeleri'nde Mesoamerican nephropathy ve Hindistan'da Uddanam nephropathy adını alır (Chandrajith vd., 2011; Ganguli, 2016; Wesseling vd., 2013). CKDu hastalıkları için kurşun, kadmiyum veya diğer ağır metallerle kirlenmiş tarım ürünlerinin kullanımı, toksinlere maruziyet, sigara kullanımı gibi farklı sebepler öne sürülmüşse de adından da anlaşılacağı gibi bu böbrek hastalıklarının sebebi kesin olarak belirlenememiştir.

BEN, 1956 yılında ilk olarak bir Bulgar nefrolog olan Yoto Tanchev tarafından tanımlanmıştır (Tanchev, Evstatiev, Dorosiev, Pencheva ve Tsvetkov, 1956) ve kronik böbrek yetmezliğine yol açan interstisyel nefrit olarak tanımlanır. İlk olarak Bosna Hersek, Bulgaristan, Hırvatistan, Romanya ve Sırbistan gibi Balkan ülkelerinde tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu kırsal bölgelerde tanımlanan BEN (Feder, Radovanovic ve Finkelman, 1991; Grollman ve Jelakovic, 2007; Maharaj, Orem, Tatu, Lerch ve Szilagyı, 2013; A. Pfohl-Leskowicz, Petkova-Bocharova, Chernozemsky ve Castegnaro, 2002), uzun yıllar bu bölgelerde, sınırlı kalmaya devam etmiştir. Pan-Endemik Nefropati (PEN) terimi ise Balkan ülkeleri dışında görülen ve linyit yatakları ile ilişkilendirilmiş BEN benzeri hastalıklar için ilk olarak Orem vd. (2007) tarafından önerilmiştir.

BEN'in başlangıcı ve hastalık tanısının konması arasında uzun bir süre olduğu için hastaların genellikle 50'li ve 60'lı yaşlarda tanı aldığı ve endemik bölgede en az 20 yıl geçirmiş olmaları halinde hastalandıkları belirlenmiştir (Karmaus vd., 2008; Orem, Feder ve Finkelman, 1999). Hastalığın en önemli belirtilerinin arasında şiddetli anemi, idrarda *beta 2-mikroglobulin yüksekliği*, total protein ve albümin atılımının artması, el ve ayak içlerinin kahverengimsi bakır renk alması olarak belirtilmektedir (Stefanović vd., 1991; Stefanović V, M, R ve P., 2003; Stiborová, Arlt ve Schmeiser, 2016). Ek olarak, kadavra üstünde yapılan çalışmada, diğer kronik böbrek rahatsızlıklarına kıyasla, BEN hastalarının böbrek ağırlıklarının önemli derecede ve simetrik olarak azaldığını belirtilmiştir (Stoyanov, Kobakova, Petkova, Dzhankov ve Popov, 2021).

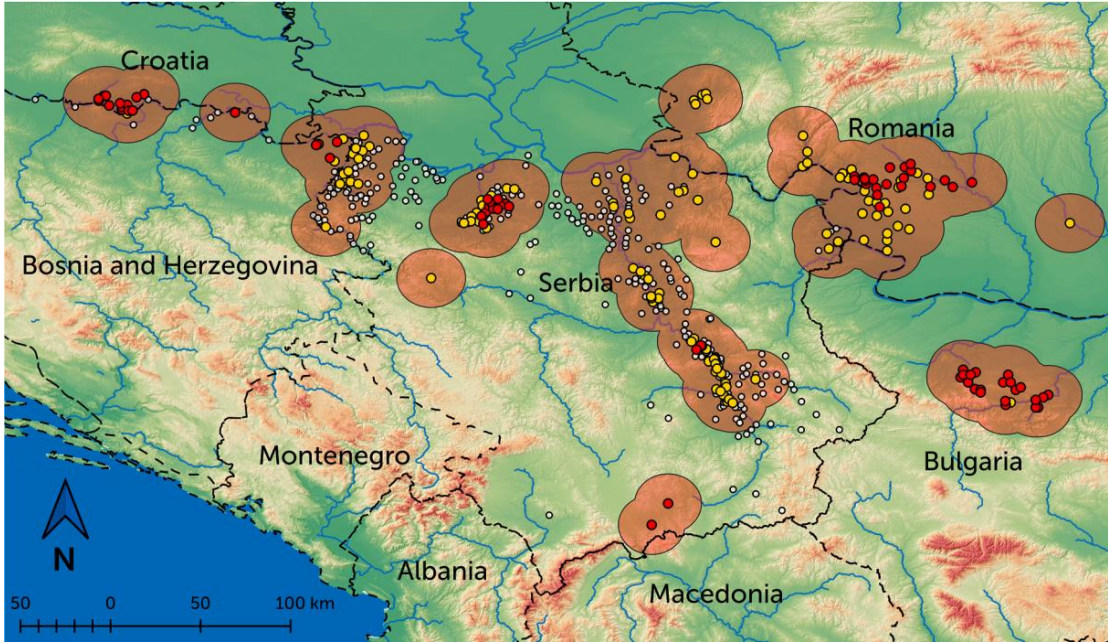
Hastalığın etiyojisi ile ilgili temel olarak üç farklı sebep öne sürülmüştür. Bunlar; (1) Fitotoksinler ve mikotoksinlerle kirlenmiş su ve besinlerin tüketimi (2) Linyit tabakalarından kaynaklı organik ve inorganik kirleticilerle kontamine olmuş yeraltı sularının kullanımı (3) Ağır metaller. Önerilen her bir hipotezin kendine özgü güçlü ve zayıf yönleri olması dolayısıyla BEN etiyojisi hala kesin olarak belirlenememiştir. Örneğin, BEN-endemik olan bir köyün tümünde hastalığın görülmemesi ve BEN'li bir hastanın bulunduğu bir hanedeki tüm bireylerin hastala, hem linyit etkisini hem de toksinlerin gıdalarla ve suyla alınması hipotezini çürütmektedir.

LİNYİT ve BEN İLİŞKİSİ

Balkan Ülkeleri'nde BEN rahatsızlığı tanımlandıktan yaklaşık 40 yıl sonra göze çarpan en önemli nokta, söz konusu BEN- endemik bölgelerin tamamında Pliyosen yaşlı linyitlerin olmasıydı (Feder vd., 1991; Şekil 1). Öncül çalışmalarda BEN'in coğrafi olarak kısıtlı bir alanda bulunması sebebiyle, linyit kaynaklı organik kirleticilerin (özellikle de poliaromatik hidrokarbonların (PAH)), yeraltı suyuna geçtiği ve bu suların artılmamış olarak kullanılmasının BEN'e sebep olduğu kabul görünürken, sonraki çalışmalar hastalığın etiyojisinde başka unsurların da etkin olduğu açıklanmıştır (Maharaj, 2014; Maharaj vd., 2013).

1991 yılında Yugoslavya'da yapılan çalışma, BEN ve linyitlerin ilişkili olabileceğini öneren ilk araştırmadır (Feder vd., 1991). Bu çalışmada BEN-endemik bölgelerde açılmış sığ su kuyularında linyitlerden kaynaklanan PAH ve aromatik aminler gibi suda çözünebilir organik kirleticiler bulunmuş ve buna dayanarak kömür kaynaklı bu kirleticilerin BEN oluşumunda doğrudan etkili olabileceği gibi sadece bir yan etken olarak rol oynayabileceği belirtilmiştir (Feder vd., 1991).

Daha sonraki çalışmada Orem v.d., önce Yugoslavya ve Bosna-Hersek'ten aldıkları kömür örneklerinde su ile yıkama deneyleri yapmış, ayrıca kuyu suyu örnekleri analiz edilmiştir (Orem vd., 1999). Ayrıca, Romanya'dan aldıkları kömür örneklerini metanol ile özütlemiş ve yine kuyu suyu örneklerini analiz etmiştir (Orem, Tatu, Feder, Finkelman ve Lerch, 2002). Bu iki çalışmanın sonunda kömürlerin su ve metanol ile özütlenmesiyle elde edilen ekstraktlardaki organik bileşiklerin aynısı su örneklerinde de bulunmuştur. Öte yandan, her ne kadar BEN- endemik bölgelerdeki sulara organik bileşiklerin konsantrasyonları endemik olmayan bölgelere oranla fazla olsa da, oldukça düşük (ppb, genellikle $<1\mu\text{g/L}$) seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular ışığında Pliyosen linyitlerinden kaynaklanan kirleticilerin BEN etiyojisinde tek önemli etken olduğunun tam bir kesinlikle belirtilmesinin mümkün olmadığı ve daha fazla çalışma gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 1. Doğu Avrupa'da BEN Görülen Lokasyonların Haritası (Lukinich-Gruia (2022)'den alınmıştır. Sarı Noktalar Endemik Lokasyonları, Kırmızı Noktalar Yakın Zamanda Endemik Olduğu Belirlenen Lokasyonları, Beyaz Noktalar Potansiyel Endemik Lokasyonları, Kahverengi Alanlar Endemik Alanları Temsil Etmektedir)

Balkan ülkeleri dışında düşük dereceli linyit tabakalarının bulunduğu lokasyonlarda gözlenen BEN benzeri böbrek rahatsızlıkları için Pan-endemik nefropati (PEN) terimi ilk olarak 2007 yılında kullanılmıştır (Orem vd., 2007; PEN terimi daha sonra Finkelman vd., (2021) tarafından Linyit-Su Sendromu olarak kullanılmıştır). Söz konusu bu çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri'nde (Wyoming ve Louisiana'daki linyit sahaları yakınlarından) ve Romanya'da BEN-endemik bölgelerden alınan linyit örneklerinin su ile ekstraksiyonu ve kuyu suyu örneklerinin Tangential Flow Ultrafiltration ile filtrelenmesi yoluyla organik bileşikler elde edilmiştir. Elde edilen bu bileşikler, böbrek hücrelerine verilmiş ve sonuçta böbrek hücrelerinin morfolojisinde değişiklikler ve hücrelerde çoğalma gibi etkiler gözlenmiştir (Orem vd., 2007).

Öte yandan, linyit ekstraktlarının kök hücrelerde değişime ve bozulmaya sebep olduğu fakat buna tam olarak hangi bileşiğin sebep olduğunun bilinemediği de belirtilmiştir (Suciu vd., 2005). Bu bulguya paralel olarak, linyitlerin su ile çözünebilen ekstraktlarının böbrek hücrelerindeki toksisitesi incelendiğinde, önceki çalışmalarda önemle üstünde durulan PAH'ların değil, fenolik bileşiklerin BEN gelişiminde daha önemli olabileceği açıklanmıştır (Ojeda, Ford, Gallucci, Ihnat ve Philp, 2019). Dolayısıyla gelinen son noktada PAH'ların BEN gelişiminde kesinlikle tek sorumlu bileşik grubu olmadığı açığa çıkmıştır.

Romanya'da BEN-endemik olan ve olmayan bölgelerde madenciler ve bölge sakinleri üzerinde yapılan epidemiyolojik çalışma Pliyosen linyit hipotezini desteklemeyen sonuçlar bulmuştur. Söz konusu çalışmada, kişiler geniş bir sağlık taramasından geçirilmiş, böbrek fonksiyon bozukluklarının belirlenmesi için Glomerüler filtrasyon hızı (GFR) testine tabii tutulmuştur. Çalışmanın sonuçları, BEN-endemik bölgedeki kişilerde GFR değerinin, kömür işletmelerinin uzun yıllar önce kapandığı veya olmadığı bölgedekilere kıyasla daha yüksek olduğunu yani böbrek fonksiyonlarının daha iyi olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca maden işçilerden sadece %0,19'unun diyalize

girdiği, diğer bölge sakinleri arasındaki diyaliz oranının ise %0,6 olduğu bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları, maden işçilerinin hem çalışma saatleri boyunca kömürlü formasyondan gelen suları tükettikleri hem de günün geri kalan saatlerinde evlerinde de bu birimlerden gelen suyu kullandıkları için normal kişilere kıyasla kömür kaynaklı (olası) toksik bileşiklere daha fazla maruz kaldıkları, bu nedenle böbrek fonksiyonlarının daha bozuk olabileceği ve BEN rahatsızlığının madenciler arasında daha yaygın olacağı hipotezini desteklememiştir. Kısaca yapılan bu çalışmada, BEN ve kömür tabakaları arasında herhangi bir ilişki bulunmamıştır (Gluhovschi vd., 2011).

Pliyosen linyitlerinden kaynaklanan toksik ve/veya kanserojenik bileşiklerin, BEN gelişimi ile doğrudan ilişkili olduğu kabulü, sadece linyit kaynaklı organik bileşiklerin değil, diğer yan etkenlerin de (toksinler gibi) önemli rol oynadığı görüşünün kuvvet kazanmasıyla zayıflamıştır (Maharaj, 2014; Maharaj vd., 2013). Pliyosen-linyit hipotezinin geçerliliğinin değerlendirildiği kapsamlı çalışmada, endemik bir köydeki tüm bireylerin ve hatta evlerdeki tüm bireylerin hastalanmıyor oluşu (Craciun ve Rosculescu, 1970), kadınların erkeklere oranla daha fazla hastalanması (Chernozemsky vd., 1977) ve linyit yataklarının yaygın olduğu Türkiye ve Yunanistan gibi bazı ülkelerde endemik nefropatinin raporlanmamış olması gibi tartışmalı pek çok nokta değerlendirilmiş ve sonuç olarak BEN gelişiminde çok faktörlü etiyojinin geçerli olduğu ileri sürülmüştür (Maharaj, 2014).

Sadece kömürlerde ve kömür ekstraktlarında değil, kuyu ve kaynak su örneklerinde yapılan çalışmalar da BEN etiyojisindeki çeşitliliği desteklemektedir. Örneğin, Bulgaristan'dan alınan 56 adet içme suyu örneğinde, BEN gelişiminde önemli rol oynadığı öne sürülen, PAH konsantrasyonlarının WHO'nun içme suyu kriterlerinden yüksek olmadığı ve BEN-endemik olan ve olmayan alanlardaki sularda önemli bir fark olmadığı bulunmuştur (Voice vd., 2006). Bu bulgularına, uygunluk derecesi düşük kömürlerdeki PAH konsantrasyonlarının daha düşük olmasına (Davidson, 1982) ve PAH'ların suda çözünürlüklerinin az olmasına (Schwarzenbach, Gschwend ve Imboden, 2003) dayanarak, BEN- endemik bölgeler ve linyit tabakaları arasında olduğu önerilen ilişkinin kesin olmadığını sonucuna varılmıştır (Voice vd., 2006).

Suyla ekstraksiyonu yapılan 2 farklı Bulgar linyit örneği, farklı yöntemlerle (GC-MS, FTIR ve XPS gibi) analiz edilmiş ve ekstraktlarda çevreye veya insan sağlığına toksik etkisi olan herhangi bir organik madde bulunamamıştır (Kosateva, Stefanova, Marinov, Czech, vd., 2017; Kosateva, Stefanova, Marinov ve Gonsalvesh, 2017). Bu bulgulara paralel olarak, Pliyosen linyitleri içeren Amynteo Havzası'ndan (Yunanistan) ve Türkiye'deki linyit rezervinin yaklaşık %50'sini içeren Afşin-Elbistan Havzası'ndan (Türkiye) alınan yeraltı suyu örneklerinin, BEN gelişiminde rol oynadığı öne sürülen hiçbir organik bileşik içermediği bulunmuş ve linyit tabakalarının yeraltı suyu kaynakları üstündeki etkisinin minimum olduğu belirtilmiştir (Doğrul Selver ve Uras, 2022a; Iordanidis, Schwarzbauer, Georgakopoulos ve van Lagen, 2012).

Kömür Kaynaklı Organik Bileşikler

Öncel çalışmalarda, BEN'e sebep olduğu öngörülen kömür kaynaklı organik bileşiklerden en önemlilerinin PAH'lar olduğu öne sürülmüş olsa da, gerek BEN-endemik bölgelerde gerekse linyit tabakalarının olduğu başka ülkelerde yapılan çalışmalar, yeraltı suyu örneklerinde ve/veya kömür ekstraktlarında PAH'ların bulunmayabileceğini göstermiştir (Doğrul Selver ve Uras, 2022b; Iordanidis vd., 2012; Kosateva, Stefanova, Marinov, Czech, vd., 2017; Kosateva, Stefanova, Marinov ve Gonsalvesh, 2017). Daha önce de değinildiği gibi, çalışmaların çoğu PAH'ların etkisine ağırlık verse de fenollerin ve hatta antropojenik kaynaklı fitalatların da etken olabileceği üstünde durulmuştur.

Önceki çalışmaların büyük bölümünde su örneklerinde ortak ve yaygın olarak bulunan bileşik fitalatlardır, belirlenen diğer organik bileşiklerin türü ise oldukça değişkenlik göstermektedir (Tablo 1). Tablo 1'de bazı çalışmalarda analiz edilen örnek türleri, ölçüm yapılırken kullanılan cihazın türü, bulunan organik bileşikler, varsa konsantrasyon bilgileri özetlenmiştir ve ilgili çalışmanın başlıca sonucuna kısaca değinilmiştir.

TOKSİNLER ve BEN İLİŞKİSİ

Aristolokolik Asit (AA), *Aristolochiaceae* (Lohusa otugiller) familyasına ait bitkilerde bulunan bir tür asittir. Kanserojenik ve nefrotoksik etkisi kesinleşene kadar özellikle zayıflama amaçlı satılan bitkisel haplarda yoğun olarak kullanılmış, 2009 yılında ise Uluslararası Kansere Araştırmaları Ajansı (IARC) tarafından 1. Grup kanserojenler listesine alınmıştır (Grosse vd., 2009) ve Avustralya, Almanya, Kanada ve İngiltere gibi pek çok ülkede kullanımı yasaklanmıştır.

AA'nın nefrotoksik ve kanserojenik etkisi ilk olarak 1967 yılında önerilmiş olsa da (Ivić, 1969) tekrar gündeme gelmesi 1993 yılında zayıflama hapları kullanan Belçikalı bir kadının böbrek rahatsızlığı ile olmuştur (Vanherweghem vd., 1993). İnsanların hangi yollarla AA'ya maruz kaldığına dair pek çok hipotez vardır ve bunların önemli bir kısmı Balkan Ülkeleri'nde yapılan çalışmalar sonucunda önerilmiştir. Bu hipotezlerden bazıları: (1) Tarım arazilerinde büyüyen lohusa otunun hasat ve öğütme aşamalarında buğdayı, mısırı kontamine etmesi ve bölge halkının AA ile kirlenmiş bu ürünleri kullanması (C. K. Chan vd., 2019; Ivić, 1969) (2) Lohusa otunun bozuşmasıyla AA'nın önce toprağa, sonra suya karışması, sığ yeraltı sularını kirletmesi ve bölge halkının bu suyu kullanması (Tung vd., 2020), (3) kirlenen suyu toprakta yetişen diğer bitkilerin bünyesine alması (4) çürüyen lohusa otunun havaya partikül olarak yayılması veya AA içeren bitkisel hapların üretiminde öğütme gibi işlemlerle salınan tozun solunum yoluyla alınması (Lukinich-Gruia vd., 2022; Pavlović vd., 2013; H. Yang vd., 2013; H. Y. Yang vd., 2014) olarak sayılabilir.

Bu konuda araştırmalar yapan Ivić vd.(1969) Hırvatistan'da hem arazi gözlemleri yapmış hem de laboratuvarında tavşan ve fareler üstünde çalışmıştır. Çalışmasında, AA içeren lohusa otunun özellikle buğday yetişen tarım arazilerinde yaygın olarak bulunduğunu, öğütme işlemi sırasında tohumlarının buğdayla karıştığını ve dolayısıyla da besin zincirine dâhil olduğunu gözlemiştir. Ayrıca yine aynı çalışmada, farelere lohusa otunun sıvı ekstraktının enjekte edildiği bölgede sarkom geliştiğini bulmuştur ve sonuçta lohusa otunun kanserojen olduğunu ve BEN etiyolojisinde rol oynadığını önermiştir.

Bu çalışmadan yaklaşık 35 yıl sonraki çalışmada, Hırvatistan'da 88 yetişkin ile detaylı bir anket yapılmıştır (Hranjec vd., 2005). Bunlardan 58'i diyaliz hastası (28 tanesi BEN kriterine uygun) ve 30'u endemik olmayan bölgedeki böbrek yetmezliği hastası olarak tanımlanmıştır. Çalışmaya katılan kişilerin güncel olarak kullandıkları su kaynağı aynı olsa da (şebeke suyu), 20-30 yıl önce farklı kaynaklar kullandıkları belirlenmiş, öte yandan bu suların da Halk Sağlığı birimince sürekli analiz edildiği ve herhangi bir toksik madde belirlenmediği, dolayısıyla kullanılan su kaynağının BEN üstünde etkili olmadığı sonucuna varılmıştır (Hranjec vd., 2005). Yine aynı çalışmada, BEN'li hastaların tarım arazilerinde lohusa otunu gözleme oranında eskiye göre önemli ölçüde düşüş olduğu saptanmış ve bu, herbisit kullanımının artışıyla bağlantılıdır. AA'nın diyet yoluyla alınmasının BEN gelişiminde etkin olabileceği ancak kesin sonuçlar için detaylı tıbbi çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir (Hranjec vd., 2005).

Suya karışan AA'nın bitkiler tarafından kökleriyle alımı ve bu bitkilerin insanlar tarafından tüketilmesi de olası bir AA alım yolu olarak önerilmiştir. Yapılan deneysel bir çalışmada, 48 saat boyunca AA solüsyonu verilen salatalık ve mısır bitkilerinin kökünde, yapraklarına kıyasla yüksek oranda AA bulunmuştur (Pavlović vd., 2013). Ayrıca, daha uzun süreli AA etkileşiminin bitkinin diğer kısımlarında da yüksek AA'ya neden olabileceği belirtilmiştir. Sırbistan'da yapılan bir başka çalışmada, aynı köyde lohusa otu bulunan ve bulunmayan iki farklı buğday tarlasından alınan buğday taneleri ve toprak örneklerinin AA konsantrasyonu analiz edilmiştir (Chan vd., 2016). Lohusa otu yetişen tarladan alınan buğdayın tanelerinde de toprak örneklerinde de önemli miktarda AA tespit edilirken; lohusa otu olmayan tarladan alınan buğday ve toprak örneklerinde AA konsantrasyonu çok daha düşük olduğu bulunmuştur (Chan vd., 2016). Söz konusu bu çalışma, ekinlerin yenilebilen kısımlarında ve toprakta AA varlığını konsantrasyon ölçerek somutlaştıran ilk çalışmadır.

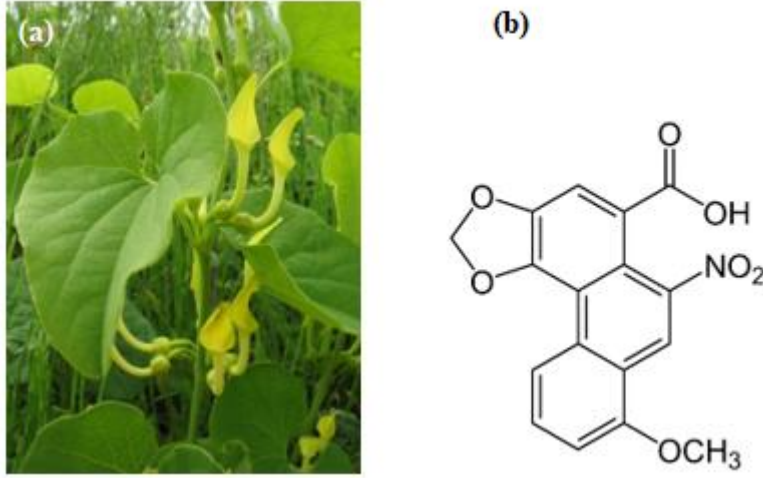
Öte yandan, bozuşan lohusa otunun önce toprağa sonra yeraltı suyuna karışarak bölge halkının kullanım suyunu AA ile kirlendiği ve bunun da BEN'e sebep olduğu hipotezini test etmek amacıyla, Sırbistan'daki yeraltı sularında AA konsantrasyonu analiz edilmiş ve AA'nın sudaki duraylılığı belirlenmeye çalışılmıştır (Tung vd., 2020). Analiz edilen 123 su örneğinin yaklaşık 80 tanesinin AA ile önemli ölçüde (ortalama 1-2 ng/L) kontamine olduğu tespit edilmiş ve AA ile kirlenmiş suyun kullanımının BEN gelişiminin önemli bir kaynağı olduğu literatürde ilk olarak kanıtlanmıştır (Tung vd., 2020).

Lohusa otunun çürümesi ile toprağa karışan AA'nın topraktaki davranışını kontrol eden ana unsurların toprak pH'ı ve iyonik kuvvet olduğu; yüksek alkali koşullarda AA'nın suyla taşınmasının kolay olduğu, düşük iyonik kuvvet olan ortamda ise AA hareketliliğinin maksimum olduğu belirlenmiştir (Tangtong, Qiao, Long ve Voice, 2020). BEN görülen alanlardaki pH değeri 8'in üstünde olduğu ve AA bu koşullarda suda kolayca çözünbildiğinden, AA'nın yeraltı suyu ile kolayca taşındığı önerilmiştir. Tüm bu verilere göre AA'nın, bitkilerin kökleriyle suyu aldığı toprak seviyesinde oldukça mobil olduğu ve bitkiler tarafında kolayca alındığı sonucunu göstermektedir (Tangtong vd., 2020)

Tablo 1. Seçili Bazı Yayınlarında Analiz Edilen Örnek Türleri, Örneklerde Bulunan Organik Bileşikler ve Ek Bilgiler

Referans Çalışma	Kullanılan malzeme (analiz yöntemi)	Bulunan organik bileşikler	Ek bilgiler (organik madde konsantrasyon bilgileri, inorganik madde bilgileri ve sonuçlar)
Orem vd. 1999	Kömür ekstraktı (su ile ekstraksiyon; ¹³ C NMR)	Alifatik ve aromatik asitler, polisakkaritler ve fenoller.	Pliyosen linyitlerindeki bazı organik maddeler su ile çözülebilir dolayısıyla içme suyunda bulunabilir.
	Su örnekleri (kuyu suyu; GC-MS)	Fenol, Naftalin, Florin, Fenantren, Florantin, Antrasin, Piren ve Fitalatlar (genellikle <1 ppb).	BEN-endemik olan ve olmayan bölgelerde antrasen ve piren bileşikleri benzer konsantrasyonlardayken, fitalatlar endemik bölge sularında endemik olmayan bölge sularına oranla 1.5-3 kat daha fazladır.
Orem vd. 2002	Kömür ekstraktı (metanol ile ekstraksiyon; GC-MS)	Alifatik (sikloalkanlar) ve aromatik (monoaromatik ve poliaromatik terpanlar, PAH'lar) bileşikler.	Endemik bölge linyitlerinde bulunan organik bileşik çeşitliliği endemik olmayan bölge linyitlerinden daha fazladır.
	Su örnekleri (kaynak suyu; GC-MS)	Oksijen ve azotlu fonksiyonel grupları olan alifatik ve aromatik bileşikler, fitalat bileşikler	BEN-endemik bölge sularında nitrat konsantrasyonu fazla, çinko konsantrasyonu düşük. Nitrat dışındaki inorganik parametreler, endemik olan ve olmayan bölgede benzer; olması gerektiğinden düşük veya yüksek değildir.
Voice vd. (2006)	Su örnekleri (kaynak suyu, kuyu ve çeşme suyu; GC-MS)	En yaygınları fenantren ve floranten olmak üzere floren, benzopiren, benzoperilen, benzofloranten ve antrasen bileşikler	<ul style="list-style-type: none"> • Fenantren, BEN'li bölge sularının %65'inde bulunur; konsantrasyon aralığı 30-669 ng/L. • Fenantren, BEN olmayan bölge sularının %70'inde bulunur; konsantrasyon aralığı 45-449 ng/L. ✓ Floranten, BEN'li bölge sularının %74'ünde bulunur; konsantrasyon aralığı: 4-27 ng/L ✓ Floranten, BEN olmayan bölge sularının %70'inde bulunur 4-49 ng/L
Maharaj vd. 2013	Kömür örnekleri (su ile yıkama deneyleri; GC-MS)	Alifatik, aromatik bileşikler (fitalat esterler), fenoller, fenantren, floranten ve lignin bozuşma ürünleri (ng/g ve µg/g konsantrasyon aralığı)	Endemik bölge Pliyosen linyitlerindeki organik madde çeşitliliği ve konsantrasyonu, endemik olmayan bölge linyitlerinden fazladır. Linyitlerden yeraltı suyuna organik madde geçişi mümkündür.
Iordanidis vd. 2016	Kuyu suları (GC-MS)	Fitalatlar, plastikleştiriciler (trimethylpentandiol diisobutyrate, triasetin, trietil fosfat gibi). PAH yok	Pliyosen linyitlerinden yeraltı suyuna organik madde geçişi minimum düzeydedir.
Doğrul Selver ve Uras 2022	Kuyu suları (GC-MS)	Fitalatlar, <i>n</i> -alkan ve <i>n</i> -alkenler. PAH yok	Linyitlerden yeraltı suyuna organik kirletici geçişi minimumdur.

Gerek bitkisel hapların üretimi sürecinde gerekse BEN görülen bölgelerdeki tarım alanlarındaki çapalama, biçme, hasat ve öğütme gibi işlemlerle havaya AA partiküllerinin dağılması ve bunun solunum yoluyla alınması da önemli bir AA kaynağıdır (Lukinich-Gruia vd., 2022). Kurak geçen yaz mevsiminde, tarlalarda çalışılması sonucu toprakta hâlihazırda bulunan AA'nın havaya yayıldığı ve bunun da solunum yoluyla alınmasının önemli bir AA kaynağı olduğu ileri sürülmüştür (Pavlović vd., 2013). Özellikle Tayvan gibi ülkelerde, AA'nın içeriğe dahil edildiği bitkisel hapların üretimindeki öğütme ve paketleme aşamalarında, önemli ölçüde partikül maddenin havaya yayıldığı ve dolayısıyla solunum yoluyla AA alınımının önemli bir kaynak olduğu belirlenmiş (H. Yang, Wang, Lo ve Chen, 2013; H. Y. Yang, Chen ve Wang, 2014)



Şekil 2. (a) Lohusa Otu ve **(b)** Aristolokolik Asit Molekülü

Lukinich-Gruia vd., (2022) tarafından AA'nın yayılma yollarının irdelendiği geniş kapsamlı derleme çalışmasında, AA'nın hava yoluyla yayılıp yayılmadığının anlaşılması için hava kalitesi izleminin yapılması gerektiği ve AA'nın yayılımının sınırlanması için Lohusa otugiller türü bitkilerin tarım alanlarındaki yayılımının, ekosistemi bozmayacak şekilde, engellenmesi gerektiğine vurgu yapılmıştır (Lukinich-Gruia vd., 2022).

Okratoksin A (OTA) ise *Aspergillus* ve *Penicilium* türü küfler tarafından üretilen bir mikotoksindir ve IARC'ın 2. Grup kanserojenler (potansiyel kanserojenik) listesinde yer almaktadır (Cancer, 1993). Mısır gevreği, kakao ürünleri, baharatlar ve kabuklu kuru yemişler gibi bitki temelli ürünlerde sıkça rastlanılan OTA'nın deney hayvanları ve çiftlik hayvanlarında böbrek patolojilerine sebep olduğu kanıtlanmış ve bazı çalışmalarda detaylı olarak ele alınmıştır (Krogh, Hald ve Pedersen, 1973; Annie Pfohl-Leszkowicz ve Manderville, 2007; Pohland, Nesheim ve Friedman, 1992). Her ne kadar bazı çalışmalarda OTA'nın BEN ile ilişkili olduğu öne sürülse de (A. Pfohl-Leszkowicz vd., 2002; Stefanovic, Toncheva ve Polenakovic, 2015) tam tersini destekleyen çok sayıda çalışma da mevcuttur (Bui-Klimke ve Wu, 2015; Mally vd., 2004; Turesky, 2005). Örneğin, Bulgaristan'da insanlarda görülen BEN ile yine Bulgaristan'da domuz ve tavuklarda görülen mycotoxic porcine nephropathy (MPN; mikotoksik domuz nefropatisi)'nin patolojik özelliklerinin birbirine çok benzer olduğu fakat Danimarka'da gözlenen MPN ile benzemediği bulunmuştur. Dolayısıyla, bu benzerlik ve farklılıkların sadece OTA'dan değil, OTA ile diğer toksinlerin olası etkileşiminden kaynaklanıyor olabileceği öngörülmüştür (Stoev, 1998; Stoev vd., 2012). Benzer şekilde, deney hayvanlarında yapılan bir çalışmada, OTA sebebiyle tümör gelişiminden söz edilemeyeceği belirtilmiştir. Bunlara paralel olarak, Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) ise 2006 yılında yayınladığı raporda, OTA'nın BEN gelişiminde rol oynadığına dair kesin bir kanıt bulunmadığını belirtmiş ve sonraki panel raporlarında da bu görüşü değiştirmemiştir (EFSA, 2006; EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2010).

Toksinlerin BEN ile olan ilişkisi bütün olarak değerlendirildiğinde AA'nın BEN gelişiminde daha etkili bir toksin olduğu görüşü yaygın olarak kabul görmektedir.

SONUÇLAR

Balkan Ülkeleri'nde 1950'li yıllarda tanımlanan BEN, WHO'nun 'etiyojisi bilinmeyen kronik böbrek rahatsızlıkları' gruplamasına dâhildir. Hastalık tanımlandıktan yaklaşık 40 yıl sonra BEN-endemik bölgelerin yayılımı ile bölgedeki Pliyosen yaşlı kömür tabakalarının yayılımının eşleştiğinin fark edilmiş ve hastalığın etiyojisi için "liniyit hipotezi" öne sürülmüştür. Bu hipotezde, liniyitlerin yapısında yer alan (toksik) organik maddelerin (başta PAH'lar olmak üzere) yeraltı suyuna geçtiği ve bu kontamine olmuş suyun (kirleticilerin konsantrasyonu düşük olmasına rağmen) arıtılmadan kullanılması sebebiyle BEN geliştiği önerilmiştir. BEN-endemik bölgelerden alınan sulardaki organik madde çeşitliliğinin ve konsantrasyonlarının endemik olmayan bölgeden alınanlardan fazla olması, hipotezin temel destekleyici bulgusu olsa da Pliyosen yaşlı liniyit yataklarının bulunduğu diğer ülkelerde (A.B.D. hariç) benzer böbrek rahatsızlıklarının yaygın olarak görülmemesi bu hipotezi zayıflatan en temel sebeplerden birisi olmuştur.

Eş zamanlı ilerleyen çalışmalarda, (potansiyel) nefrotoksik/kanserojenik bazı fitotoksinlerin (AA) ve mikotoksinlerin (OTA), özellikle de AA'nın, BEN etiolojisinde önemli rol oynadığı bulunmuştur. Balkan Ülkeleri'ndeki tarım arazilerinde sıklıkla görülen lohusa otu bitkisinden kaynaklanan AA, IARC tarafı kanserojenik bileşik olarak sınıflanmıştır. AA ile kontamine olmuş buğdayın tüketilmesi, AA ile kirlenmiş topraklarda yetişen bitkilerin AA'yı bünyesine alması ve bu bitkilerin hayvanlar ve insanlarca tüketilmesi ve AA'nın partiküller halinde havadan solunum yoluyla alınması en yaygın maruz kalma yolları olarak belirtilmiştir.

Sonuç olarak, BEN etiolojisi günümüzde hala kesin olarak belirlenememiş olsa da tek faktörlü etiyojoloji değil, çok faktörlü etiyojoloji yaygın olarak kabul görmektedir. Linyit kaynaklı PAH'ların ve fenollerin, antropojenik kökenli fitatların ve AA'nın etkilerinin birleşerek birbirlerinin toksisitesini artırabileceğinin altı çizilmiştir.

REFERANSLAR

Bui-Klimke, T. R. & Wu, F. (2015). Ochratoxin A and Human Health Risk: A Review of the Evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(13), 1860–1869. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.724480>.

Cancer, I. A. for R. on. (1993). Some naturally occurring substances: Food items and consti- tuents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon.

Chan, W., Pavlović, N. M., Li, W., Chan, C., Liu, J., Deng, K., Wang, Y., Milosavljević, B. & Kostić, E.N. (2016). Quantitation of Aristolochic Acids in Corn, Wheat Grain, and Soil Samples Collected in Serbia: Identifying a Novel Exposure Pathway in the Etiology of Balkan Endemic Nephropathy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(29), 5928–5934. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b02203>

Chandrajith, R., Nanayakkara, S., Itai, K., Aturaliya, T. N. C., Dissanayake, C. B., Abeysekera, T., Harada, K., Watanabe, T. & Koizumi, A. (2011). Chronic kidney diseases of uncertain etiology (CKDue) in Sri Lanka: geographic distribution and environmental implications. *Environmental geochemistry and health*, 33(3), 267–278. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9339-1>

Chernozemsky, I. N., Stoyanov, I. S., Petkova-Bocharova, T. K., Nicolov, I. G., Draganov, I. V., Stoichev, I. I., Tanchev, Y., Naidenov, D. & Kalcheva, N. D. (1977). Geographic correlation between the occurrence of endemic nephropathy and urinary tract tumours in vratza district, Bulgaria. *International Journal of Cancer*, 19(1), 1–11. <https://doi.org/10.1002/ijc.2910190102>

Craciun, E. C. & Rosculescu, I. (1970). On Danubian endemic familial nephropathy (Balkan nephropathy): Some problems. *The American Journal of Medicine*, 49(6), 774–779. [https://doi.org/10.1016/S0002-9343\(70\)80058-4](https://doi.org/10.1016/S0002-9343(70)80058-4)

Davidson, R. M. (1982). Molecular Structure of Coal. M. L. Gorbaty, J. W. Larsen & I. B. T.-C. S. WENDER (Ed.), (ss. 83–160). London: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-150701-5.50009-7>

Doğrul Selver, A. & Uras, Y. (2022a). Investigation of Organic and Inorganic Contaminants in Water Sources around Elbistan Lignite Beds. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 9(3), 347–358. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1152444>

Doğrul Selver, A. & Uras, Y. (2022b). Organic And Inorganic Contaminants In Water Sources Around Elbistan Basin. In *2nd International Symposium on Advanced Engineering Technologies* (pp. 41)

EFSA. (2006). Opinion of the Scientific Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the Commission related to ochratoxin A in food,. *The EFSA Journal* (C. 365).

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain. (2010). Statement on recent scientific information on the toxicity of Ochratoxin A. *EFSA Journal* (C. 8). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1626>

Feder, G., Radovanovic, Z. & Finkelman, R. B. (1991). Relationship between weathered coal deposits and the etiology of Balkan endemic nephropathy. *Kidney International*, 40, S9–S11.

- Ganguli, A. (2016). Uddanam Nephropathy/Regional Nephropathy in India: Preliminary Findings and a Plea for Further Research. *American journal of kidney diseases*. United States. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2016.04.012>
- Gluhovschi, G., Modalca, M., Mărgineanu, F., Velcirov, S., Gluhovschi, C., Bob, F., Petrica, L., Bozdog, G., Trandafirescu, v. & Gădălean, F. (2011). Epidemiological data regarding Balkan endemic nephropathy in relationship with the Pliocene coal etiological hypothesis. *Romanian journal of internal medicine: Revue roumaine de médecine interne*, 49(1), 11–24.
- Grollman, A. P. & Jelakovic, B. (2007). Role of Environmental Toxins in Endemic (Balkan) Nephropathy. *Journal of the American Society of Nephrology*, 18(11), 2817–2823. <https://doi.org/10.1681/ASN.2007050537>
- Grosse, Y., Baan, R., Straif, K., Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Galichet, L. & Cogliano, V. (2009). A review of human carcinogens-Part A: pharmaceuticals. *The lancet oncology*, 10(1), 13–14. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(08\)70286-9](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(08)70286-9)
- Hranjec, T., Kovač, A., Kos, J., Mao, W., J., J. C., Grollman, A. P. & Jelakovic, B. (2005). Endemic Nephropathy: the Case for Chronic Poisoning by Aristolochia. *Croatian Medical Journal*, 46(1), 116–125.
- Iordanidis, A., Schwarzbauer, J., Georgakopoulos, A. & van Lagen, B. (2012). Organic geochemistry of Amynteo lignite deposit, northern Greece: A Multi-analytical approach. *Geochemistry International*, 50(2), 159–178. <https://doi.org/10.1134/S0016702912020036>
- Ivić, M. (1969). Etiology of endemic nephropathy. *Lijecnicki Vjesnik*, 91(12), 1273–1281.
- Karmaus, W., Dimitrov, P., Simeonov, V., Tsoleva, S., Bonev, A. & Georgieva, R. (2008). Metals and kidney markers in adult offspring of endemic nephropathy patients and controls: A two-year follow-up study. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 7. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-11>
- Kosateva, A. D., Stefanova, M., Marinov, S., Czech, J., Carleer, R. & Yperman, J. (2017). Characterization of organic components in leachables from Bulgarian lignites by spectroscopy, chromatography and reductive pyrolysis. *International Journal of Coal Geology*, 183(June), 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.10.005>
- Kosateva, A. D., Stefanova, M., Marinov, S. P. & Gonsalvesh, L. (2017). Organic components in leachates from some Bulgarian lignites. *Bulgarian Chemical Communications*, 49(D), 25–29.
- Krogh, P., Hald, B. & Pedersen, E. J. (1973). Occurrence of ochratoxin A and citrinin in cereals associated with mycotoxic porcine nephropathy. *Acta Pathol Microbiol Scand B Microbiol Immunol.*, 81(6), 689–695. <https://doi.org/10.1111/j.1699-0463.1973.tb02261.x>
- Lukinich-Gruia, A. T., Nortier, J., Pavlović, N. M., Milovanović, D., Popović, M., Drăghia, L. P., Paunescu, V. & Tatu, C. A. (2022). Aristolochic acid I as an emerging biogenic contaminant involved in chronic kidney diseases: A comprehensive review on exposure pathways, environmental health issues and future challenges. *Chemosphere*, 297(February). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134111>
- Maharaj, S. V. M. (2014). Limitations and plausibility of the Pliocene lignite hypothesis in explaining the etiology of Balkan endemic nephropathy. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 20(1), 77–91. <https://doi.org/10.1179/2049396713Y.0000000046>
- Maharaj, S. V. M., Orem, W. H., Tatu, C. A., Lerch, H. E. & Szilagyi, D. N. (2013). Organic compounds in water extracts of coal: Links to Balkan endemic nephropathy. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10653-013-9515-1>
- Mally, A., Zepnik, H., Wanek, P., Eder, E., Dingley, K., Ihmels, H., Völkel, W. & Dekant, W. (2004). Ochratoxin A: Lack of Formation of Covalent DNA Adducts. *Chemical Research in Toxicology*, 17(2), 234–242. <https://doi.org/10.1021/tx034188m>

- Ojeda, A. S., Ford, S. D., Gallucci, R. M., Inhat, M. A. & Philp, R. P. (2019). Geochemical characterization and renal cell toxicity of water-soluble extracts from U.S. Gulf Coast lignite. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(2), 1037–1053. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0196-7>
- Orem, W. H., Feder, G. L. & Finkelman, R. B. (1999). A possible link between Balkan endemic nephropathy and the leaching of toxic organic compounds from Pliocene lignite by groundwater: Preliminary investigation. *International Journal of Coal Geology*, 40(2–3), 237–252. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00071-8)
- Orem, W. H., Tatu, C. A., Feder, G. L., Finkelman, R. B. & Lerch, H. E. (2002). Environment , geochemistry and the etiology of balkan endemic nephropathy : lessons from Romania. *Facta Universitatis, Medicine and Biology Series*, 9(1), 39–48.
- Orem, W. H., Tatu, C., Pavlovic, N., Bunnell, J., Lerch, H., Paunescu, V., Ordodi, V., Flores, D. Corum, M & Bates, A. (2007). Health effects of toxic organic substances from coal: Toward “panendemic” nephropathy. *Ambio*, 36(1), 98–102. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[98:heotos\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[98:heotos]2.0.co;2)
- Pavlović, N. M., Maksimović, V., Maksimović, J. D., Orem, W. H., Tatu, C. A., Lerch, H. E., Bunnell, J. E., Kostic, E.N., Szilagyí, D.N. & Paunescu, V. (2013). Possible health impacts of naturally occurring uptake of aristolochic acids by maize and cucumber roots: Links to the etiology of endemic (Balkan) nephropathy. *Environmental Geochemistry and Health*, 35(2), 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10653-012-9477-8>
- Pfohl-Leszkowicz, A., Petkova-Bocharova, T., Chernozemsky, I. N. & Castegnaro, M. (2002). Balkan endemic nephropathy and associated urinary tract tumours: A review on aetiological causes and the potential role of mycotoxins. *Food Additives and Contaminants*, 19(3), 282–302. <https://doi.org/10.1080/02652030110079815>
- Pfohl-Leszkowicz, Annie & Manderville, R. A. (2007). Ochratoxin A: An overview on toxicity and carcinogenicity in animals and humans. *Molecular Nutrition and Food Research*, 51(1), 61–99. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600137>
- Pohland, A. E., Nesheim, S. & Friedman, L. (1992). Ochratoxin A: A review (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 64(7), 1029–1046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac199264071029>
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M. & Imboden, D. M. (2003). *Environmental Organic Chemistry*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Stefanović, V., Mitić-Zlatković, M., Cukuranović, R., Miljković, P., Pavlović, N. M. & Vlahović, P. (1991). Beta 2-microglobulin in patients with Balkan nephropathy and in healthy members of their families. *Kidney Int Suppl.*, 34.
- Stefanovic, V., Toncheva, D. & Polenakovic, M. (2015). Balkan nephropathy. *Clinical Nephrology*, 83, 64–69. <https://doi.org/10.5414/CNP83S064>
- Stefanović V, M, M.-Z., R, C. & P., V. (2003). Increased urinary protein excretion in children from families with balkan endemic nephropathy. *Nephron Clin Pract.*, 95(4), 116–120. <https://doi.org/10.1159/000074836>.
- Stiborová, M., Arlt, V. M. & Schmeiser, H. H. (2016). Balkan endemic nephropathy: an update on its aetiology. *Archives of Toxicology*, 90(11), 2595–2615. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1819-3>
- Stoev, S. D. (1998). The role of ochratoxin A as a possible cause of Balkan endemic nephropathy and its risk evaluation. *Veterinary and Human Toxicology*, 40(6), 352–360.
- Stoev, S. D., Gundasheva, D., Zarkov, I., Mircheva, T., Zapryanova, D., Denev, S., Mitev, Y., Daskalov, H., dutton, M., Mwanza, M. & Schneider, Y. J. (2012). Experimental mycotoxic nephropathy in pigs provoked by a mouldy diet containing ochratoxin A and fumonisin B1. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 64(7–8), 733–741. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2011.01.008>
- Stoyanov, G. S., Kobakova, I., Petkova, L., Dzhankov, D. L. & Popov, H. (2021). Balkan Endemic Nephropathy: An

Autopsy Case Report. *Cureus*, (January). <https://doi.org/10.7759/cureus.12415>

Suciu, E. I., Ordodi, V., Szilagyi, D. N., Tatu, C., Orem, W. H., Lerch, H. E., Bunnell, J.E. & Paunescu, V. (2005). Balkan Endemic Nephropathy Etiology: a Link Between Geochemistry and Medicine. *Timisoara Medical Journal*, 55(3), 228–234.

Tanchev, Y., Evstatiev, T., Dorosiev, D., Pencheva, Z. & Tsvetkov, G. (1956). Study of nephritis in the District of Vratza. *Savremena Medicina*, 7(9), 14–29.

Tangtong, C., Qiao, L., Long, D. T. & Voice, T. C. (2020). Octanol–Water Partition Coefficients of Aristolochic Acids and Implications to the Etiology of Balkan Endemic Nephropathy. *Aquatic Geochemistry*, 26(3), 183–190. <https://doi.org/10.1007/s10498-019-09367-6>

Tung, K.-K., Chan, C.-K., Zhao, Y., Chan, K.-K. J., Liu, G., Pavlović, N. M. & Chan, W. (2020). Occurrence and Environmental Stability of Aristolochic Acids in Groundwater Collected from Serbia: Links to Human Exposure and Balkan Endemic Nephropathy. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 1554–1561. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05337>

Turesky, R. J. (2005). Perspective: Ochratoxin A Is Not a Genotoxic Carcinogen. *Chemical Research in Toxicology*, 18(7), 1082–1090. <https://doi.org/10.1021/tx050076e>

Vanherweghem, J.-L., Tielemans, C., Abramowicz, D., Depierreux, M., Vanhaelen-Fastre, R., Vanhaelen, M., Dratwa, M., Richard, C., Vandervelde, D., Verbeelen, D. & Jadoul, M. (1993). Rapidly progressive interstitial renal fibrosis in young women: association with slimming regimen including Chinese herbs. *The Lancet*, 341(8842), 387–391. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-6736\(93\)92984-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0140-6736(93)92984-2)

Voice, T. C., McElmurry, S. P., Long, D. T., Dimitrov, P., Ganev, V. S. & Peptropoulos, E. A. (2006). Evaluation of the hypothesis that Balkan endemic nephropathy is caused by drinking water exposure to contaminants leaching from Pliocene coal deposits. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 16(6), 515–524. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500489>

Wesseling, C., Crowe, J., Hogstedt, C., Jakobsson, K., Lucas, R. & Wegman, D. (2013). Mesoamerican Nephropathy: Report from the First International Research Workshop on MeN. (C. Wesseling, J. Crowe, C. Hogstedt, K. Jakobsson, R. Lucas & D. Wegman, Ed.).

Yang, H., Wang, J. D., Lo, T. C. & Chen, P. C. (2013). Occupational Exposure to Herbs Containing Aristolochic Acids Increases the Risk of Urothelial Carcinoma in Chinese Herbalists. *Journal of Urology*, 189(1), 48–52. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2012.08.090>

Yang, H. Y., Chen, P. C. & Wang, J. Der. (2014). Chinese herbs containing aristolochic acid associated with renal failure and urothelial carcinoma: A review from epidemiologic observations to causal inference. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2014/569325>