

GAZI
JOURNAL OF
ENGINEERING
SCIENCES



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

EDİTÖR / EDITOR - IN - CHIEF

İsmail ŞAHİN

Gazi University, Ankara, Turkey
e-mail: editorgjes@gmail.com

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Harun GÖKÇE

Gazi University
e-mail: harungokce@yahoo.ca

Volkan YILMAZ

Gazi University
e-mail: volkan@gazi.edu.tr

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Abdullah AKDOĞAN

Pamukkale University

Alper BÜYÜKKARAGÖZ

Gazi University

Amin MIRZAPOUR

Zanjan İslami Azad University

Ayhan AYTAÇ

National Defense University

Bülent ÖZKAN

Gazi University

Erdem CÜCE

Recep Tayyip Erdoğan University

Fecir DURAN

Gazi University

Fatih ŞAHİN

Gazi University

G. Serdar TOMBUL

ASELSAN

Halil KARAKOÇ

Hacettepe University

Hüseyin GÖKÇE

Çankırı Karatekin University

M. Hanefi CALP

Karadeniz Technical University

Mustafa BOZ

Karabük University

Mustafa GÜNAY

Karabük University

Serhat KARAP

TUBİTAK-SAGE

Tayfun MENLİK

Gazi University

Umit ATİLA

Gazi University

YAYIN DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

Adnan SÖZEN

Gazi University, Turkey

Andrew PINKERTON

Lancaster University, England

Bekir Sami YILBAŞ

King Fahd University, Sudia Arabia

Farzollah MIRZAPOUR

University of Zanjan, Iran

Herbert M. REYNOLDS

Michigan State University, USA

Majid MEGHDADI

University of Zanjan, Iran

Mustafa KURT

Gazi University, Turkey

Nowruz ALLAHVERDİ

Karatay University, Turkey

Reza Negarastani

RIETEX, England

Salman NISAR

National University of Sci. and Tech., Pakistan

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Jamal KHATIB

University of Wolverhampton, England

John KINUTHIA

University of South Wales, England

Jonathan C. BORG

University of Malta, Malta

Hossam KISHAWY

University of Ontario Technology, Canada

Kürşad SEZER

Gazi University, Turkey

Shahin JALILI

TebriZ University, Iran

Şakir TAŞDEMİR

Selçuk University, Turkey

Tahsin Tecelli ÖPÖZ

John Moores University, England

Yasir JOYA

GIK Institute, Pakistan

DİL EDITÖRLERİ / LANGUAGE EDITORS**Türkçe/Turkish:** V. Savaş YELOK (Hacı Bayram Veli University)**İngilizce/English:** H. Kürşad SEZER (Gazi University)**TEKNİK EDITÖR / TECHNICAL EDITOR****Neslihan TOP**

Gazi University

Nurullah YÜKSEL

Gazi University

e-mail: editorgjes@gmail.com**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

Abdulkadir KARACI

Adem ACIR

Ahmet DURGUTLU

Ahmet Murat PİNAR

Akın ÖZDEMİR

Alper Ergün

Barbaros ÇETİN

Biol KAYA

Canan KANDİLLİ

Danil PİMENOV

Engin GEDİK

Erman Kadir ÖZTEKİN

Ersin KAYA

Fatih Emre BORAN

Feyza YILDIRIM OKAY

Gazi Bilal YILDIZ

Gültekin UZUN

Hakan GÖKMEŞE

Hasan Fırat PULAT

Hasan KARABULUT

Hatice ÇITAKOĞLU

Hüseyin GÖKÇE

İlhan İLHAN

İlker KAZAZ

İsmail ALTIN

İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Kerem TAŞTAN

Kurtuluş BORAN

Mehmet ÖZKAYMAK

Muhammet DAMAR

Munish Kumar GUPTA

Murat YILMAZ

Mustafa Ergin ŞAHİN

Mustafa TANRIVERDİ

Nihat IŞIK

Nizamettin KAHRAMAN

Oguz UZOL

Okan OZGONENEL

Onur ALTUNTAŞ

Onur TAYLAN

Onuralp ULUER

Osman YILDIZ

Recep DEMİRSÖZ

Recep YURTAL

Sedat KORKMAZ

Sinan TOKLU

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İlker Ali ÖZKAN

Gazi Journal of Engineering Sciences has been published three issues per year

CORRESPONDENCE ADDRESS :

Gazi Akademik Yayıncılık
Mustafa Kemal Mah. 2118 Cad. No:4C/140 Çankaya/Ankara
Tel: +90-312-9113311 Fax: +90-312-9113312
e-mail: editorgjes@gmail.com

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Düşük Alaşımli Çeliklere Kaynakla Kaplama Yapılarak Balistik Özellik Kazandırılması <i>Improving Ballistic Properties of Low Alloy Steels by Surfacing Welding</i> Ugur OZDEMİR, Mustafa SOZERI, Tayfun FINDIK.....	168-177
Sosyal Medya Verileri ile Bir E-Ticaret Sitesinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi <i>Evaluation of an E-Commerce Site with Multi-Criteria Decision Making Methods with Social Media Data</i> Berk Can SAÇAN, Tamer EREN.....	178-188
Nesnelerin İnternetinde Derin Öğrenme Yöntemi Kullanılarak Düşmeye Bağlı Kazaların Tespiti <i>Detection of Fall-Related Accidents Using Deep Learning Method in the Internet of Things</i> Bekir AKSOY, Osamah Khaled Musleh SALMAN, Hamdi SAYIN, İrem SAYIN.....	189-200
Büyük Boyutlu Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri için Gelişmiş Ağaç-Tohum Algoritması <i>Advanced Tree-Seed Algorithm for Large Sized Job Shop Scheduling Problems</i> Mehmet Akif ŞAHMAN.....	201-214
Biyomedikal Uygulamalarında Kullanılan CoCrMo Alaşımının İşlenebilirliği: Kesici Takım Tipinin İncelenmesi <i>Machinability of CoCrMo Alloy Used in Biomedical Applications: Investigation of Cutting Tool Type</i> Büşra MUTLU, Rüstem BİNALI, Recep DEMİRSÖZ, Nafiz YAŞAR.....	215-227
Termoelektrik Buzdolabı Uygulamalarında Nanoakışkan Kullanımının Elektrik Tüketimi Üzerindeki Etkisi: Deneysel Bir Çalışma <i>The Effect of Nanofluid Usage on Electricity Consumption in Thermoelectric Refrigeration Application: An Experimental Study</i> Pinar Mert CUCE, Tamer GUCLU, Erdem CUCE.....	228-236
Türkiye Baz Metal Cevheri İhracatının Herfindahl Hirschman Yoğunlaşma Endeksi ile İncelenmesi <i>Analysis of Turkey's Base Metal Ore Exports by Herfindahl Hirschman Concentration Index</i> Mikail BAŞYİĞİT, Elif UZUN KART.....	237-246
Çoklu Ezme Yüzey Bitirme İşleminin AISI 8620 Sementasyon Çeliği Yüzey Özelliklerine Etkilerinin Karşılaştırılması İncelenmesi <i>Comparative Investigation of the Effects of Multiple Burnishing Surface Finishing on the Surface Properties of AISI 8620 Cementation Steel</i> Ece Ceren ULAŞ, Adnan AKKURT.....	247-256
Akım Verilerinin Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Tahmin Edilmesi <i>Estimating Streamflow Data with Machine Learning Techniques</i> Esra Aşlı ÇUBUKÇU, Vahdettin DEMİR, Mehmet Faik SEVİMLİ.....	257-272
Yenilenebilir Enerji Kaynağı ile Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretim Kombine Sistem Tasarımı ve Analizi <i>Design and Analysis of Hydrogen Production Combined System from Hydrogen Sulfide with Renewable Energy Source</i> Kemal GÖK, Adnan SÖZEN.....	273-291

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Tüm Yönleriyle Metaverse Çalışmaları, Teknolojileri ve Geleceği

All Aspects of Metaverse Studies, Technologies and Future

Osman GÜLER, Serkan SAVAŞ.....292-319

Isıtma Sistemlerinin Enerji Ekonomileri ve Karbon Salınım Potansiyellerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Karşılaştırılması

Energy Economy and Carbon Emission Potential Comparison of Heating Systems by using Multi-Criteria Decision Making Methods

Mirac OZTOK, Tayfun MENLİK.....320-335

Akışkanlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü Performansına İşlem Parametrelerinin Etkisinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi

Investigation of The Effect of Processing Parameters on Air Fluid Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance by Taguchi Method

Ramazan ÇAKIROĞLU, Abdusselam EKEN, Adem ACIR336-344

Dağıtık üretim sistemi içeren güç sistemlerinde AOA algoritması ile zehirli ve sera gaz emisyonlarının azaltımı: Kozaklı vaka çalışması

Reduction of emissions of toxic and greenhouse gases with AOA algorithm in power systems containing distributed generation system: Nevsehir-Kozaklı case study

Ozan AKDAĞ.....345-360

Karşıt Akışlı Ranque – Hilsch Vorteks Tüpünün Lineer Regresyon, Destek Vektör Makineleri ve Gauss Sürec Regresyonu Yöntemi ile Performans Analizi

Performance Analysis of Counterflow Ranque – Hilsch Vortex Tube with Linear Regression, Support Vector Machines and Gaussian Process Regression Method

Murat KORKMAZ, Ayhan DOĞAN, Volkan KIRMACI.....361-370

Hava Akışkanlı Bir Güneş Toplacında Türbülans Modellerinin ve Duvar Tabaka Ağ Yapısının Karşılaştırması

Comparison of Turbulence Models and Wall Layer Mesh in a Solar Air Heater

Özgür EROL.....371-384

Kaplama Öncesi Farklı Yüzey İşlemlerinin Grafen Oksit Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Korozyon Davranışına Etkileri

The Effects of Different Surface Treatments before Coating on Corrosion Behavior of Aluminum Alloy Coated with Graphene Oxide

Kubilay KARACIF, Duygu CANDEMİR.....385-392

P20S Plastik Kalıp Çeliğinin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Teorik Yorulma Ömrüne Etkisi

The Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Theoretical Fatigue Life in Milling of P20S Plastic Mold Steel

Barış ÖZLÜ.....393-405

COVID-19 Tespitinde Öğrenim Aktarımına CLAHE Tabanlı Geliştirme

CLAHE based Enhancement to Transfer Learning in COVID-19 Detection

Gokhan ALTAN, Süleyman Serhan NARLI.....406-416

MOF-303 - Aktif Karbon Karışımlarının Pasif Isı Yönetimi Uygulamaları için İncelenmesi

Investigation of MOF-303 – Active Carbon Mixtures for Passive Thermal Management Applications

Ahmet Alperen GÜNAY.....417-429

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Improving Ballistic Properties of Low Alloy Steels by Surfacing Welding

Ugur Ozdemir^a, Mustafa Sozeri^b, Tayfun Fındık^c

Submitted: 26.04.2022 Revised: 15.06.2022 Accepted: 27.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705019

ABSTRACT

Keywords: hardfacing, surfacing welding, ballistic, ballistic protection, hardness

^a Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0521-4617
e mail: uozdemir@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2494-3260

Technology Faculty,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering
06560 - ANKARA, Türkiye
Orcid: 0000-0003-2057-4864

*Corresponding author:
uozdemir@gazi.edu.tr

While many methods were used in the development of armor materials, welding was preferred in this study. Although welding is a process that mainly used for the purpose of joining two parts, it has become one of the methods that directly affect and improve the properties of the parts today. Surfacing is a type of welding method that covering surface of worn or produced metal parts with hardfacing electrodes to increase wear resistance, service life or other properties. In this study, the properties of S355JR low alloy steel plate were increased by hardfacing electrodes and its ballistic performance and hardness properties were investigated. Electric arc welding (SMAW) was done manually with a 4 mm diameter Fe-Cr-C based covered electrodes. Welding process was done in the form of double pass, by rotating 90 degrees between layers. The alloying elements contained in the hardfacing electrode have increased the hardness and ballistic properties of the material. For this reason, in this study, it is aimed to develop a replacement product for the armors used today while reducing weight, and to reuse the armor steels by using the specified welding consumable for repair purposes. After hardfacing, the hardness values increased approximately 8 times. In ballistic performance, it has absorbed the kinetic energy of the bullet at 820 m/s, which is suitable for protection at NATO STANAG III, EN 1522 FB7, VPAM 9 levels.

Düşük Alaşımli Çeliklere Kaynakla Kaplama Yapılarak Balistik Özellik Kazandırılması

ÖZ

Zırh malzemelerinin geliştirilme sinde birçok yöntem kullanılırken, bu çalışmada kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Kaynak yöntemi, esas olarak iki parçayı birleştirme amacıyla kullanılsa da günümüzde sadece birleştirme yöntemi olmaktan çıkmış parça özelliklerini direkt etkileyen yöntemler arasına girmiştir. Kaplama kaynağı, sert dolgu elektrotları ile aşınmış ya da üretilen metal parçaların yüzeyinin kaplanarak aşınma dayanımı, çalışma ömrü ya da diğer özellikleri artırılması suretiyle uygulanan bir yöntemdir. Bu çalışmada, S355JR düşük alaşımli çelik plakanın özellikleri geliştirilerek balistik performansı ve sertlik özellikleri incelenmiştir. S355JR plakanın özelliklerini geliştirmek için elektrik ark kaynağı ile kaplama işlemi uygulanmıştır. Elektrik ark kaynağı, 4 mm çapında Fe-Cr-C esaslı örtülü elektrot ile elle yapılmıştır. Kaynak işlemi çift paso şeklinde yapılmış, pasolar arası 90 derece döndürülerek yapılmıştır. Elektrik ark kaynağında elektrot elementleri malzemenin mekanik özelliklerini artırmıştır. Bu nedenle bu çalışmada ağırlık düşürülürken günümüzde kullanılan zırhlara hem ikame ürün geliştirilmek istenmiş hem de zırhlar isabet aldıktan sonra tamiri mümkün olmadığı için tamir amaçlı bu elektrotlardan yararlanılarak tekrar kullanılması hedeflenmiştir. Sert dolgu kaplama sonrası, kaynak bölgesinin sertlik değeri yaklaşık 8 kat artış göstermiştir. Yapılan balistik testte ise, numune NATO STANAG III, EN 1522 FB7, VPAM 9 seviyelerinde korumaya uygun olduğu 810 m/s hızdaki mermi kinetik enerjisini absorbe etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sert dolgu, kaplama kaynağı, balistik, balistik koruma, sertlik

1. Giriş (Introduction)

İnsanlar günümüze kadar malzemeleri çeşitli biçimlerde kendi hayatlarını kolaylaştırmak üzere kullanmışlar ve bunları çeşitlendirmişlerdir. Özellikle silahlanmanın arttığı dönemden itibaren savunma amaçlı üretilen malzeme sayısından ciddi bir artış olmuştur. Savunma amacıyla kullanılan malzemelere zırh malzemeleri denilmiştir. Zırh malzemeleri pek çok malzemedan yapılsa da araçlarda yoğun olarak zırh çelikleri kullanılmaktadır. Zırh çelikleri düşük karbon değerine sahiptir. Karbon değerinin % 0.3'ten düşük olması ve sıcak haddeleme sonrası yapılan ısıl işleme oluşan martenzit fazından dolayı yüksek sertlik ve darbe dayanımı ile beraber iyi kaynaklanabilirlik sergilemektedir [1]. Kaynakla birleştirilen zırh çeliklerinde, birleştirme bölgesinde mukavemet düşüşleri ve balistik performansında azalmalar yaşanmaktadır. Zırh malzemelerinde koruyuculuk seviyesi zırhın kullanım alanıyla beraber hangi mermi tipine karşı direnç gösterdiğiyle alakalıdır. Bunlar; NIJ (National Institute of Justice), NATO STANAG (Standardization Agreements) ve European Standard (ISO EN) şeklinde sıralanabilir. NIJ standartları koruma seviyeleri III ve IV 7,62x51 mm AP mermiye karşı direnç göstermektedir [2]. Cronin, Kinsley ve Allen zırh üretimindeki ilk etkeni malzeme seçimi olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bunu da genellikle, normleştirilmiş şekilde bazı zırh malzemelerinin performanslarının karşılaştırılarak seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [3]. Son yıllarda yaygınlaşan yöntemlerden birisi de sert dolgu kaynak sarf malzemeleri ile kaplama yapmaktır. Kaynak esas olarak iki malzemenin birleştirmesine dayansa da kaynak elektrotunun özellikleri sadece kaynak bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Amaç malzemenin yüke ve aşınmaya maruz kaldığı bölgelerin kaynak elektrotları ile kaplanarak mekanik özelliklerini geliştirerek malzemenin servis ömrünü uzatmaktır [4-7].

Elektrik ark kaynağı, diğer kaynak yöntemlerine göre müdahalesi daha kolay bir yöntemdir. Oluşturulan elektrotların kimyasal bileşimi istenilen ölçülerde ayarlanabilir ve istenilen özellikler malzemeye aktarılır. Bir elektrotun verimliliği, örtüde kullanılan metal tozlarının oranının yükseltilmesiyle önemli ölçüde geliştirilebilir [8,9]. Verimlilik arttıkça kaynakla malzeme üretme süreci kaplama kaynağıyla ileri bir boyuta taşınmıştır. Kaplama kaynağı, bakım sırasında veya yeni ekipman imalatı sırasında temas halinde olan yüzeylerin korozyona dayanıklı, aşınma ve diğer özelliklerini geliştirmek için sert dolgu elektrotları ile kaynaklanması işlemidir. Bu işlem, tarım, madencilik, çelik, kağıt, gıda işleme ve kimya dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde uygulanmaktadır [10-12]. Sert dolgu ile yapılan çalışmalar aşınma üzerine yoğunlaşmış durumdadır. Liu ve arkadaşları düşük karbonlu çelik plaka üzerine sert dolgu kaplaması uygulamış ve oluşan karbürlerin östenit fazından sertliklerinin yüksek olduğunu ve karbürlerin aşınma direncini artırdığını söylemişlerdir [13]. Bendikiene ve arkadaşları S355 çelik plakası üzerine Cr_3C_2 yapısı oluşturarak Ni ile pekiştirmek amacıyla çeşitli kaynak yöntemleri ile yapıyı oluşturmuşlar. Sonuç olarak Cr_3C_2 yapısı kaynak yöntemine bağlı olarak sertlikte 1.2-2.8 kat artış sağlamıştır [14]. Kumar ve Shanmugam Inconel 625 ile Ni, Mo, Cr ve Nb elementleri ile kaynak kaplaması elde etmişlerdir. Sonuçta esas malzemedan sert kaplamaya doğru sertlik artışını gözlemlemişlerdir [15]. Farklı malzemeler ve farklı tekniklerle yapılan sert dolgu kaplamasından yapılan çalışmalar gösteriyor ki sertlik artışı ile mekanik özellikler artmıştır. Sertlik artışı yapıda oluşan karbürlerden meydana gelmiştir [16,17]. Carrington ve arkadaşları ve Pawar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada oluşan MC, M_7C_3 , M_3C_2 , $M_{23}C_6$ karbür yapılarının malzemelerin mekanik özelliklerini artırdığını gözlemlemişlerdir [18,19]. Balakrishnan ve arkadaşları AISI 4340 ıslah çeliğinin üzerine östenitik paslanmaz çelik ve FeCr alaşımlı sert dolgu elektrotları ile iki sıra kaplama yaparak balistik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Östenitik paslanmaz çelik katmanı ana malzemeyle olan kimyasal seyrelmeyi %67'ye kadar tölere etmesi ve kaynak bölgesinin tokluğunu artırması sebebiyle yararlı bulunmuştur [20].

Bu çalışmalardan yola çıkarak sert dolgu elektrotları aşınma, sertlik ve korozyon gibi alanlarda sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Ancak yapılan araştırmalarda balistik alanında araştırmaların çok az olması nedeniyle bu alanda çalışma gereksinimi duyulmuştur. Daha önceki çalışmalarda kaynak ağzı açılarak sert dolgu alaşımlarının balistik performansı incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, sadece birleştirme amacıyla değil aynı zamanda sert dolgu elektrotları ile balistik zırh malzemeleri üretilmesi ve tamir amacıyla kullanılabilmesini sağlamaktır. Çünkü zırhlarda isabet aldıktan sonra tekrar kullanılmamaktadır. Aynı zamanda zırhlar için bir diğer önemli parametre ağırlıktır, mümkün olan en düşük ağırlıkta koruyucu seviyeye göre maksimum fayda sağlanmalıdır. 7.62x51 mm AP (armor piercing) merminin test koşullarına göre 820 ± 10 m/s hızda durdurmasını sağlanması amacıyla çift pasolu sert dolgu elektrotu ile S355JR kaplanmış ve test edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada sert dolgunun uygulanacağı düşük alaşımlı çelik altlık S355JR'nin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Elle elektrik ark kaynağında S355JR çelik plaka üzerine yapılacak olan sert dolgu elektrotunun kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir.

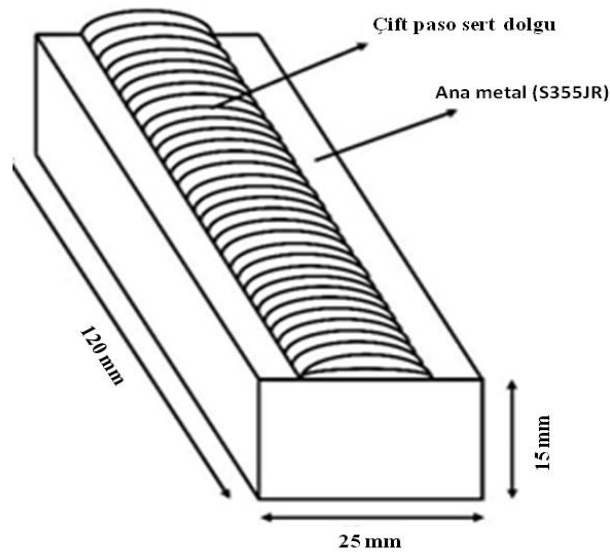
Tablo 1. S355JR malzemenin ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of S355JR material %wt.)

Çelik Adı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
S355JR	0.11	0.15	0.64	0.02	0.03	0.21	0.07	0.08	Kalan

Tablo 2. Sert dolgu elektrotunun ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of the hardfacing electrode %wt.)

Elektrot Kodu	Sınıfı (EN/ISO)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
Fe 14	EN 14700: E Fe 14	4.03	1.65	0.60	29.04	0.23	Kalan

Mikroyapı ve sertlik analizleri için önce 120x25x15 mm S355JR çelik parça kaynaklanmıştır. Elektrik ark kaynağı ile çelik parça üzerine çift paso sert dolgu kaplama yapılmıştır. Şekil 1'de malzemenin kaynaklama işleminin şematik gösterimi yer almaktadır. Dolgu işlemi Ø4.0 mm. Fe 14 elektrot ile 150 A akımda, 27 V voltajda ve 3.5 mm/s hızda yapılmıştır. Kaynak işlemi sonrası malzemeye herhangi bir işlem uygulanmamıştır.

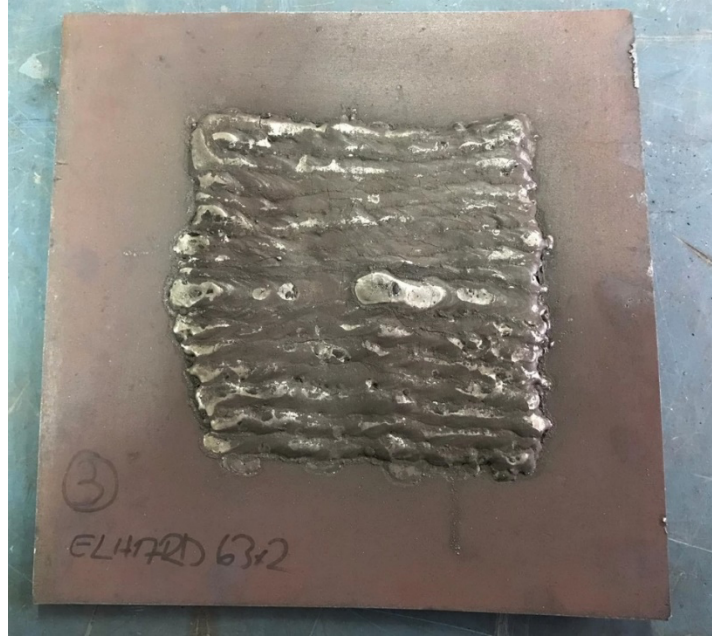


Şekil 1. Kaynaklanan numunenin şematik gösterimi (Schematic illustration of the welded sample)

Kaynaklanan malzemeden mikroyapı ve sertlik için numune alınmıştır. Malzeme tel erozyon (Wire EDM) yöntemi ile kesilmiş ve bakalite alındıktan sonra zımparalama ve 1 µm'ye kadar elmas süspansiyonda parlatılmıştır. SEM analizleri için dağlama işlemi Aqua Regia 3:1 oranında çözeltisi (1) kullanılmış, optik mikroskop incelemeleri için ise Oksalik asit ile elektrolitik dağlama yapılmıştır.

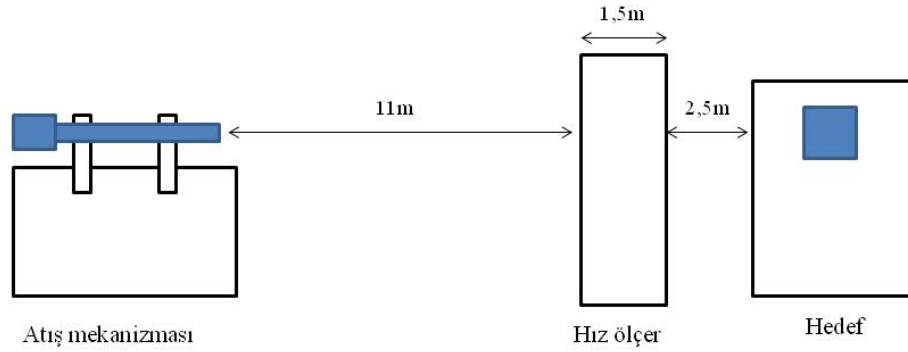


Mikroyapı incelemelerinde Jeol JSM 6060LV SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve Leica DM4000 optik mikroskop kullanılmıştır. Sertlik testleri HRC ve HV olmak üzere iki tipte uygulanmıştır. Enine kesit alınmış sertlik numuneleri üzerinde, en üst kaynak pasosundan esas metale doğru 0,5 mm aralıklarla HV1 sertlik ölçümleri yapılmıştır. Balistik test için ise, 300x300 mm boyutunda S355JR plakanın merkezine 100x120 mm boyutunda sert dolgu elektrotu ile kaplama uygulanmıştır. Balistik test için ortası sert dolgu ile kaplanmış S355JR plaka Şekil 2'de verilmiştir. Yüksek ısı girdisi nedeniyle ana malzemede oluşacak çarpılmayı en aza indirmek için pasolararası sıcaklık 250 °C'nin altında tutulmuştur.



Şekil 2. Balistik test için ortası 2 kat sert dolgu elektrodu ile kaplanmış S355JR plaka (S355JR plate surfaced with 2 layers of hardfacing electrodes in the middle for ballistic testing)

Balistik testin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. Numuneye 3 atış gerçekleştirilmiştir. Hedef noktalar arası mesafe 5-6 mm arasındadır. Mermi tipi, çelik bilyalı 7,62x51 mm M61 tipi AP zırh delici mermidir. Hedef mekanizmadan 15 m uzaklıkta olup, hedefin 2,5 m önünde merminin hızını ölçen düzenek yerleştirilmiştir. Kafes biçimindeki bu yapı, merminin kafese giriş ve çıkışı arasındaki mesafeyi kat ettiği süreyi tayin ederek mermi hızını hesaplamaktadır. Balistik testte ortam sıcaklığı 21 °C ve ortamın nemi %48 olarak ölçülmüştür.

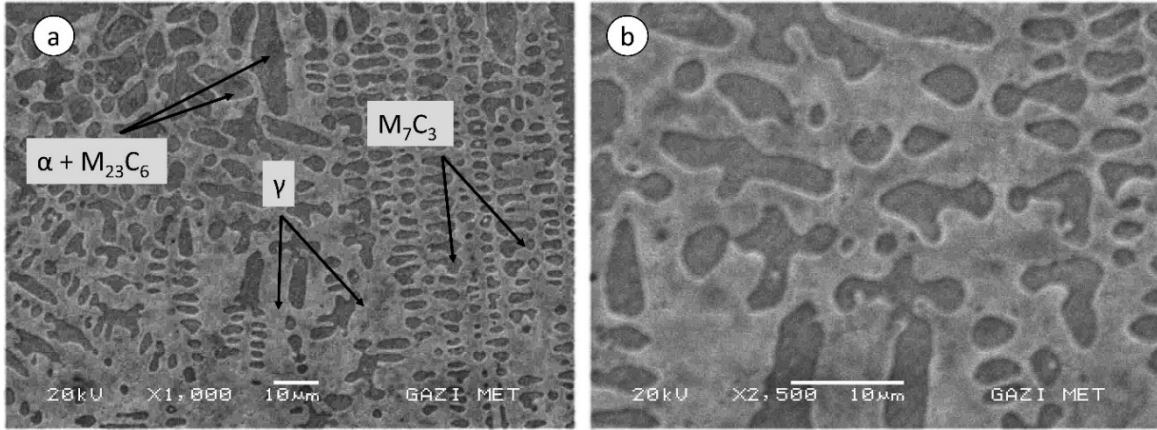


Şekil 3. Balistik test şematik gösterimi (Schematic illustration of ballistic testing)

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

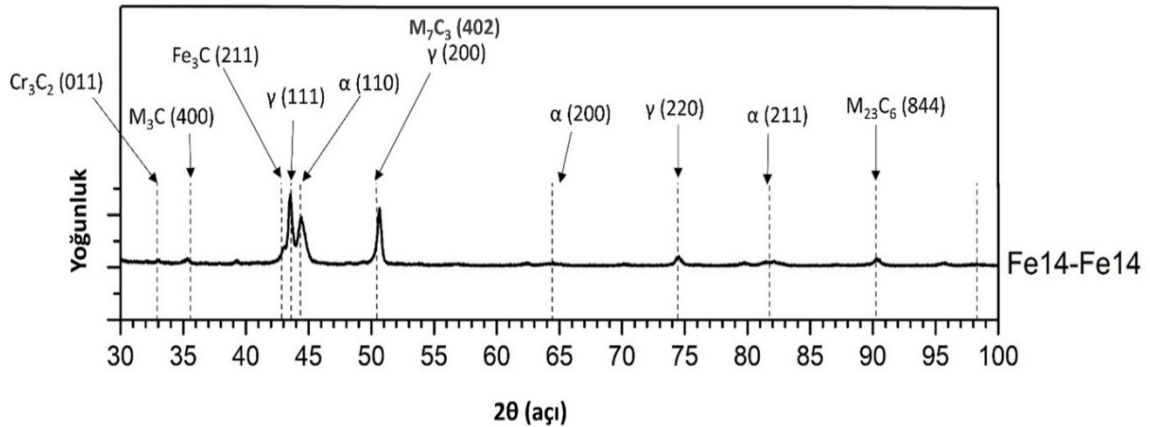
3.1. Mikroyapı görüntüleri (Microstructure images)

Fe14 kodlu elektrot içeriğinde krom ve karbon elementinden dolayı yapı hiper ötektiktir. Fe14 elektrotun yapısında %4,03 C bulunduğu için yapıda zengin karbür içeriğine rastlanmaktadır. Oluşan Fe₃C yapıları birincil karbürleri oluştururken α fazına dağılmış şekilde ikincil M₇C₃ karbürleri görülmüştür. M₂₃C₆ karbürleri ikincil karbür olarak M₇C₃ yapısından sonra oluşmuşlardır. Mikroyapıda dentritik yapı oluşumları gözükmemektedir.



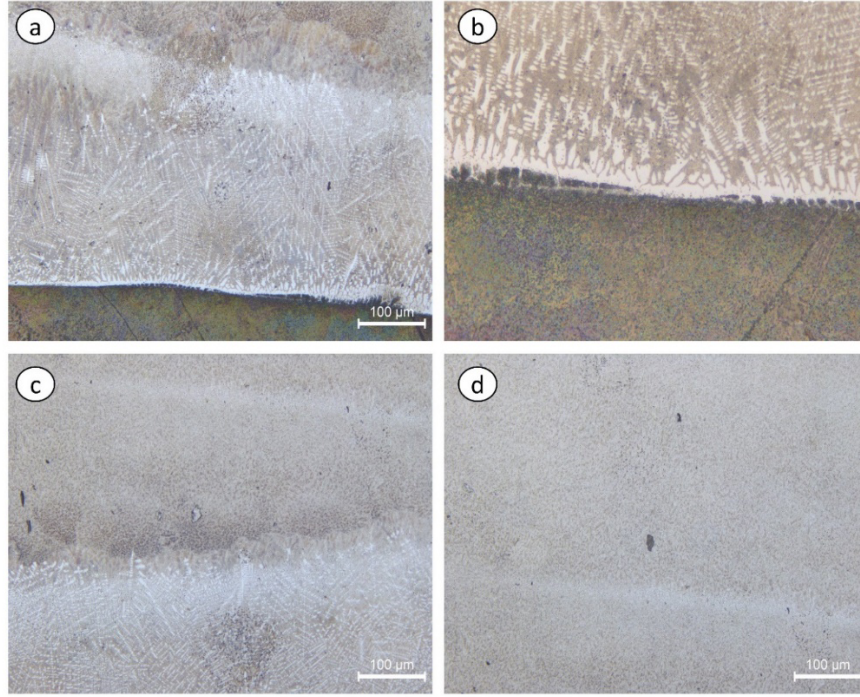
Şekil 4. Fe14 sert dolgusu ile yapılan kaplama kaynağına ait mikroyapı görüntüleri a) X1000 b) X2500 (Microstructure images of the surfacing weld made with Fe14 hardfacing a) X1000 b) X2500)

Soğuma diyagramında Fe-Cr-C sıvısı monotektik reaksiyon ile $L \rightarrow L_1 + M_7C_3$ dönüşür. Devam eden ötektik reaksiyonda $L_1 \rightarrow \gamma + M_7C_3$ ve karbürlerin büyümesi östenit fazıyla engellenir. Bu dönüşüm sonrası östenit fazı bu sıcaklıkta kararsızdır. Oda sıcaklığına kadar soğuduğunda α , karbür ve γ fazı bulunur [21]. FeCrC yapıları tipik olarak sert dolguda %8-35 Cr ve %2-5 C içeriğine sahiptirler. %0-20 Cr içerikli bileşikler ötektikaltı, %20-24 Cr ötektik ve %24 üzeri Cr içerikli yapılar ötektiküstü olarak tanımlanır [22]. Yapının ötektiküstü olması ile beraber yapıda birincil ve ikincil oluşan karbürlerden bahsedilebilir. Yapıda oluşan M_3C karbürleri varken Cr oranı artarsa $M_{23}C_6$ karbür oluşumunu tetikler ve yapıda $M_{23}C_6$ karbürleri gözükür. M_3C karbürlerinin oluşması için gereken kimyasal kompozisyon oranı maksimum %10 Cr ve %4 C olmalıdır [23]. $M_{23}C_6$ karbürleri ana faz içinde dağılmış halde bulunur. $M_{23}C_6$ yapısı elektrotun kimyasal bileşimi göz önüne alındığında $(Cr, Fe)_{23}C_6$ bileşimlerinde bulunduğu düşünülmekte, diğer çalışmalar tarafından bu öngörü desteklenmiştir [24,25]. Mikroyapıda bulunan fazları tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır. Şekil 5' de numuneye ait XRD analizi yer almaktadır. Tamamlanan dönüşüm sonrası yapıda görülen karbür yapıları M_7C_3 ve $M_{23}C_6$; fazlar ise, östenit ve ferrittir.



Şekil 5. Fe14 - Fe14 kaynak metalinin XRD analizi (XRD analysis of Fe14 - Fe14 weld metal)

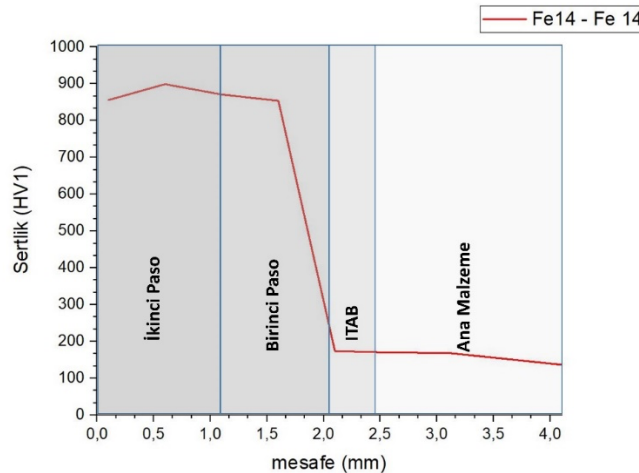
Şekil 6' da numuneye ait mikroyapılar verilmiştir. Numunede kaynaklı birleştirmeye bağlı dentritik oluşumlar gözlemlenmektedir. Ana metalden uzayan beyaz bölgeler östenit fazıdır (Şekil 6.b). İki paso arası arayüzey oluşumu aynı elektrot olmasına rağmen gözlemlenmiştir. İlk pasoda ana metale geçişler olduğu ve ikinci pasoda beraber yapının ötektiküstü olduğu karbürlerin yapı içerisinde dağıldığı Şekil 6' da ikinci pasoda görülmüştür. Ayrıca oluşan karbürlerin M_7C_3 yoğunlukta olduğu XRD sonuçları ile Şekil 5'de vurgulanmıştır.



Şekil 6. Fe14 – Fe14 kaynaklı numunesine ait mikroyapı görüntüleri a) çift paso beraber görünüşü b) ilk paso c) ara-yüzey d) ikinci paso (Microstructure images of Fe14 – Fe14 welded sample a) double-pass view b) first pass c) interface d) second pass)

3.2. Sertlik (Hardness)

Çalışmada kullanılan S355JR ana malzemenin sertlik değeri 130HV ölçülmüştür. Fe14 kodlu elektrot ile yapılan kaplama bölgesinden alınan sertlik değerlerinde ilk paso için 60,8 HRC ve ikinci paso için 62,5 HRC ölçülmüştür. Malzemenin en sert bölgeleri üst katman olurken sertlik düşüşü ana malzemeye doğru devam etmektedir. İlk pasonun ana malzemeyi de ergitmesiyle oluşan kimyasal seyrelme, sertliğin ilk pasoda düşük çıkmasına yol açmıştır. İlk pasonun üzerine atılan ikinci pasoda ana malzeme ile olan metalürjik etkileşim ve buna bağlı olarak seyrelmenin de azalmasıyla sertlik değeri yükselmiştir. Özellikle ısının tesiri altında kalan bölgede sertlik düşüşü bariz bir şekilde gözlemlenmektedir. Malzemenin HV sertlik değeri Şekil 7’de verilmiştir. HV sertlik değeri 840 ile 900 HV arasında ölçülmüştür. HRC ile kıyaslama yapıldığında yaklaşık olarak 62,5 HRC sertlik değeri yaklaşık 810 HV sertlik değerine karşılık gelmektedir. Alınan sertlik değerindeki fark mikrosertlik ölçüm ucunun karbüre denk gelmesine bağlıdır. Birinci pasodaki sertlik ikinci pasoya göre daha düşüktür. Bu sertlik farkı, numune yüzeyinde ikinci bir ITAB bölgesi oluşmasından ve birinci pasoda elektrotun kimyasal bileşimindeki elementler ana metale ve ITAB’ a difüze olmasından dolayı gerçekleşmiştir (Şekil 6). Kaplama kaynağı sonrası yüzey sertlik değeri, S355JR malzemeye göre yaklaşık 8 kat artış göstermiştir.

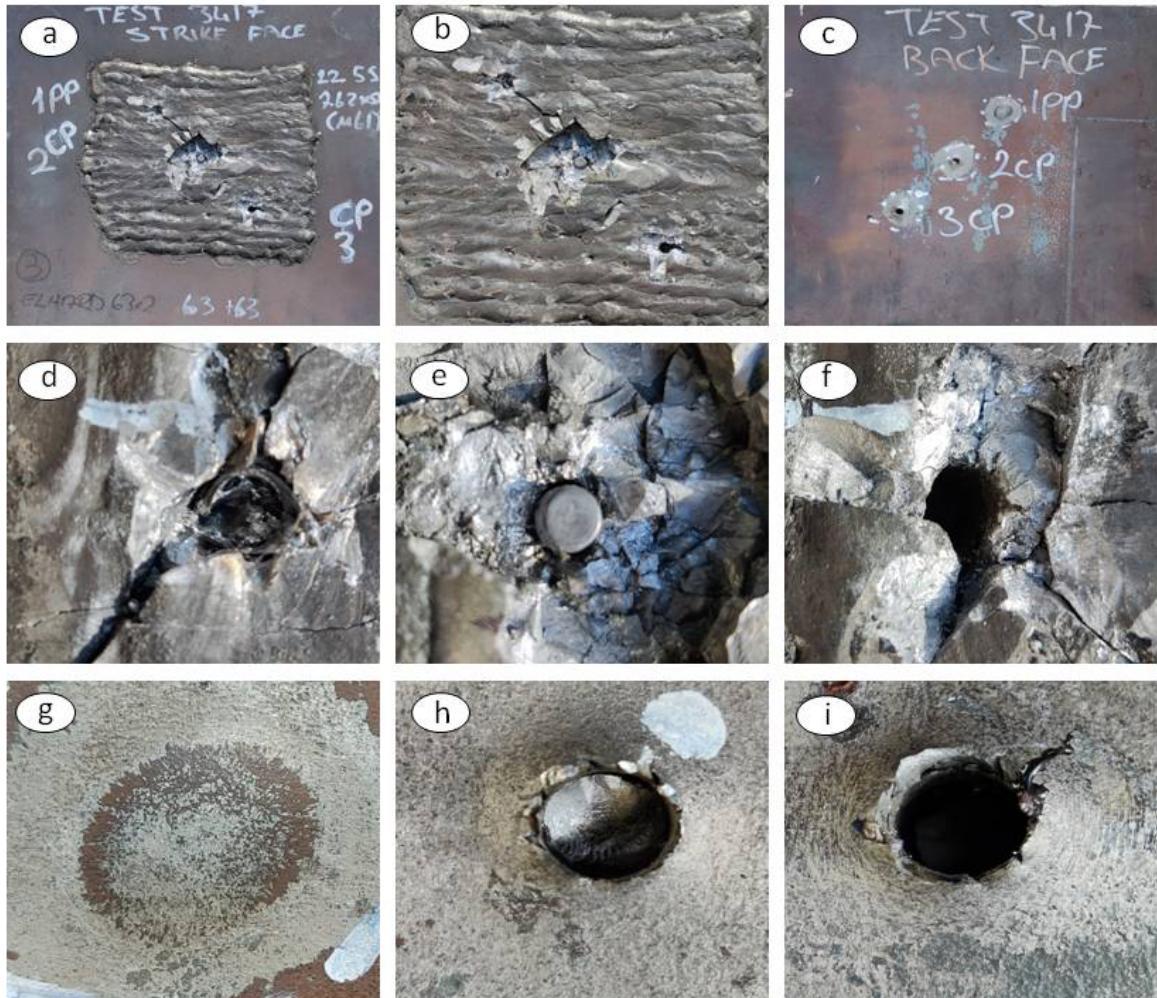


Şekil 7. İki kat Fe14 elektrot ile kaplanmış S355JR çeliğin kesit alanından alınan sertlik grafiği (Hardness graph from the cross-sectional area of S355JR steel surfaced with two layers of Fe14 electrodes)

Sertlik malzemenin soğuma sırasındaki hiperötektik reaksiyonlarla beraber oluşan metal karbürleriyle artmaktadır. Das ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FeCrC tipi elektrotların bu çalışmada kullanılan elektrot ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Sertlik artışının kromlu karbür yapılarından ve yapıda oluşan martenzitten kaynaklandığını söylemişlerdir. Sonuç olarak yapının sertlik artışının 5-6 kat artış gösterdiği sonucuna varılmıştır [26]. Karbürlü yapı çeşitleri (MC, M3C, M7C3 ve M23C6) soğuma çeşitlerine göre oluşsa da hepsi malzemenin sertlik değerini artırıcı etki ettiğini vurgulanmıştır [26-28].

3.3. Balistik test (Ballistic test)

Şekil 8'da Fe14 çift paso kaplama kaynağına ait balistik sonuçlar verilmiştir. Çift paso kaplama kaynağında 1.mermi 800 m/s, 2. mermi 844 m/s ve 3. mermi 822 m/s hızlarında atılmıştır. Birinci ve ikinci mermi arası mesafe 55 mm ve ikinci ve üçüncü mermi arası mesafe 63 mm olarak ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü mermiler yapıyı deforme edip geçerken 1. mermiyi yapı içerisinde kaldığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 6'de e-h fotoğraflarına bakılarak 2.merminin oluşturduğu ön ve arka yüzey görüntüsünde çekirdeğin yapı içerisinde kaldığı ancak yapının arka yüzeyinden delindiği görülebilir. Birinci mermideki deformasyon minimum seviyede iken, özellikle ikinci mermide kaynak bölgesindeki çatlaklar ilerlemiş ve yapıdan kopmalar ve ayrılmalar meydana gelmiştir (Şekil 8-e).



Şekil 8. Fe14-Fe14 kaplanmış test numunesinin balistik test sonuçları a) malzemenin ön görünüşü b) kaynak bölgesi görünümü c) arka yüzey görünümü d-e-f) sırasıyla 1,2 ve 3. Merminin ön yüzeyde yaptığı etkiler g,h,i) sırasıyla 1,2 ve 3.merminin arka yüzeyde yaptığı etkiler (Ballistic test results of the Fe14-Fe14 surfaced test sample a) front view of the material b) weld zone view c) back surface view d-e-f) the effects of the 1st, 2nd and 3rd bullets on the front surface, respectively g,h,i) the effects of the 1st, 2nd and 3rd bullets on the rear surface, respectively)

European Standard, EN 1522 FB7, VPAM 9 ve NATO STANAG seviye III 7,62x51 mm AP mermilere göre düzenlenmiş balistik testtir. Testte kullanılan çelik bilyalı 7, 62x51 mm M61 tipi AP mermi yukarıda verilen hızlarda atılmıştır. Standartlara göz atıldığında mermi hızının ± 820 m/s olması gerekmektedir [29]. Yukarıda verilen değerler temel alındığında ortalama 810 m/s hızda kinetik enerjisi absorbe

edebildiği söylenebilir ve bu seviye için koruyuculuk özelliğini sağladığı söylenebilir. ARMOX ve RAMOR serisi zırhlar bu koruma seviyesi için kullanılmaktadır. ARMOX için bu seviyelerde korumada minimum kalınlık; ARMOX 500 14,5 mm, ARMOX 600 12 mm ve ARMOX Advanced 10 mm' dir. RAMOR için FB7 seviyesinde korumada kalınlık; RAMOR 500 14,5 mm ve RAMOR 550 13 mm' dir [30].

Balistik malzemelerde koruyuculuk merminin kinetik enerjisinin sönmelenmesi ile bulunur. Mermi ilk hızından kinetik enerji hesaplanır. Plakaya merminin ilk çarptığı hızın kinetik enerjisi sıfırlanıncaya kadar devam eder. Kinetik enerji (2) formülü ile hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

Merminin 800 m/s hızdaki kinetik enerjisi 3104×10^3 joule hesaplanmıştır. Son durumdaki kinetik enerjiyi başlangıçtaki kinetik enerjiden çıkararak deformasyon enerjisi bulunur. Bu hızdaki deformasyon enerjisi kinetik enerjisine eşittir. Mermi plakada kaldığı için son hızı 0 m/s' dir. 820 m/s hızındaki merminin plakaya ilk çarptığı hız sonucu plakadan ayrılmalar ve kopmalar meydana gelir. Bu durumda merminin kinetik enerjisi bağlı deformasyonu (4) formüle göre hesaplanır.

$$Vr = \frac{MV}{M+m} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{[(m/M+m)]Mv^2}{2} \quad (4)$$

$$\frac{M_0V_0^2}{2} = \frac{(M_{rp}+m)V_r^2}{2} + \frac{(M_0-M_{rp})V_0^2}{2} + E_f + W_s \quad (5)$$

M_0 : Merminin çarpışma öncesi kütlesi,

M_{rp} : Merminin çarpışma sonrası kütlesi,

m : Plaktan kopan parçanın kütlesi,

V_r : Merminin ve plaktan kopan parçanın ağırlık merkezlerinin çarpışma sonrasındaki hızları,

I : Plaktaki kayma gerilmelerinden dolayı plağa aktarılan impuls,

E_f : Serbest m kütlesi ve mermi çarpışmasından oluşan elastoplastik deformasyon enerjisi,

W_s : m kütlesinin plak tarafından sınırlandırılması halinde ortaya çıkan elastoplastik deformasyon enerjisidir.

820 m/s hızla giden merminin kinetik enerjisi 3261×10^3 jouledir. Elastoplastik deformasyon enerjisi 3257×10^3 tür. Arada kalan enerji 4×10^3 joule ise, parçadan kopan kütlenin ve merminin son kütlesinin kinetik enerjisi toplamıdır. Senthil ve arkadaşları alaşımız çeliklerin 7.62 mm. AP mermi karşısındaki balistik performansını deneysel ve numerik olarak inceledikleri çalışmalarında, dik açıyla ve 820 m/s hızla hedefe gelen merminin plakayı delerek, deneysel ve numerik olarak sırasıyla 661 m/s ve 658 m/s kalıntı hızla hedeften ayrıldığını belirtmişlerdir [31,32]. Bu çalışmada kullanılan elektrot ile yapılan sert dolgu kaynağının, yapı çeliğinin balistik özelliğini oldukça artırdığı görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Suggestions)

- 1) Fe14 sert dolgu elektrotu S355JR gibi düşük alaşımız çeliklere uygulandığında mekanik özelliklerini geliştirir.
- 2) Fe14 sert dolgu elektrotu ile yapılan çalışmada, mikroyapıda karbürlerin ortaya çıktığı ve bu karbürlerin yapıda sertlik artışı meydana getirdiği gözlenmiştir. Sertlik değeri, S355JR plakanın sertlik değerinin yaklaşık 8 katına çıkmıştır.
- 3) Fe14 sert dolgu elektrotu ile kaplanan S355JR çeliği 10 mm kalınlık ile muadillerinden daha düşük kalınlıkta balistik teste tabii tutulmuştur ve muadillerine benzer performans göstermiştir.
- 4) Fe14 sert dolgu elektrotu EN 1522 FB7, VPAM 9 ve NATO STANAG III seviye test için uygun bulunmuş ve 800-820 m/s hız aralığında merminin kinetik enerjisini absorbe edebileceği görülmüştür.
- 5) Fe14 sert dolgu elektrotu ile yapı çelikleri kaplanarak yüksek balistik dayanım elde edilebilir. Ayrıca

zırh çelikleri de bu alışımdaki elektrotlar ile tamir edilebilir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAP) Birimi tarafından 6381 nolu proje koduyla desteklenmiştir. Destekleri için Gazi Üniversitesi BAP birimine, kaynak sarf malzemeleri için Gedik Kaynak'a ve balistik testler için CES Kompozit'e teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] I. G. Crouch, Ed., *Armour Steels: The Science of Armour Materials*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. (Editor). doi:10.1016/B978-0-08-100704-4.00002-5
- [2] X. Chen, Ed., *Failure mechanisms and engineering of ballistic materials: Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection*. Glossop: Woodhead Publishing, 2016. (Editor). doi:10.1016/B978-1-78242-461-1.00009-1
- [3] A. Bhatnagar, Ed., *Lightweight Ballistic Composites: Testing of armor systems*, 2nd Edition, Duxford: Woodhead Publishing, 2016, pp. 311-326. (Editor). doi:10.1016/B978-0-08-100406-7.00010-6
- [4] R. Singh, *Applied Welding Engineering: Processes, Codes, and Standards*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. doi:10.1016/B978-0-12-391916-8.00015-7
- [5] O. Ivanov, P. Prysyazhnyuk, L. Shlapak, S. Marynenko, L. Bodrova and H. Kramar, "Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current," *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 223-230, February 2022. doi:10.1016/j.prostr.2022.01.028
- [6] S. Balaguru, M. Abid and M. Gupta, "Investigations on different hardfacing processes for High temperature applications of Ni-Cr-B-Si alloy hardfaced on austenitic stainless steel components," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 10062-10072, September–October 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.010
- [7] Y. Wu, T. Schmitt, E. Bousser, F. Khelfaoui, V. Najarian, J.E. Klemberg-Sapieha and M. Brochu, "Effects of interfacial microstructure on mechanical properties of Stellite-hardfaced coating during long-term aging," *Surface and Coatings Technology*, vol. 398, 125989, September 2020. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125989
- [8] D.Sun, Y. Zhang, Y. Liu, X. Gu and H. Li, "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes," *Materials & Design*, vol. 109, pp. 596-608, November 2016. doi:10.1016/j.matdes.2016.07.076
- [9] K. Weman, *Welding Processes Handbook: Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes*. 2nd Edition, Cambridge: Woodhead Publishing, 2012, pp. 151-156. doi:10.1533/9780857095183.151
- [10] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gómez, "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits," *Tribology International*, vol. 42, no. 5, pp. 745-749, May 2009. doi:10.1016/j.triboint.2008.10.012
- [11] H. Rojacz, C. Katsich, M. Kirchgaßner, R. Kirchmayer, E. Badisch, "Impact-abrasive wear of martensitic steels and complex iron-based hardfacing alloys," *Wear*, vol. 492-493, 204183, March 2022. doi:10.1016/j.wear.2021.204183
- [12] V.E. Buchanan, "Solidification and microstructural characterisation of iron–chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying," *Surface & Coatings Technology*, vol. 203, no. 23, pp. 3638-3646. August 2009. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.05.051
- [13] S. Liu, Z. Shi, X. Xing, X. Ren, Y. Zhou and Q. Yang, "Effect of Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy," *Materials Today Communications*, vol. 24, 101232, September 2020. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101232
- [14] R. Bendikiene, A. Ciuplys, R. Sertvytis, A. Surzhenkov, D. Tkachivskyi, M. Viljus, R. Traksmas, M. Antonov and P. Kulu, "Wear behaviour of Cr₃C₂-Ni cermet reinforced hardfacings," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7068-7078. 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.042
- [15] N.P. Kumar, and N.S. Shanmugam, "Some studies on nickel based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process," *Wear*, vol. 456-457, 203394, September 2020. doi:10.1016/j.wear.2020.203394
- [16] J. Gramajo, A. Gualco and H. Svoboda, "Study of the welding procedure in nanostructured super-hard Fe- (Cr, Mo, W) - (C, B) hardfacing," *International Journal Refractory Metals Hard Materials*, vol. 88, 105178, April 2020. doi:10.1016/j.ijrmhm.2020.105178

- [17] J. Gou, Y. Wang, Y. Zhang, C. Wang and G. Wang, "Dry sliding wear behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloy modified with nano-CeO₂ and its mechanisms of modification," *Wear*, vol. 484-485, 203756, November 2021. doi:10.1016/j.wear.2021.203756
- [18] S. Pawara, A.K. Jhab, and G. Mukhopadhyaya, "Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys," *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 78, pp. 288-295, January 2019. doi:10.1016/j.ijrmhm.2018.10.014
- [19] M.J. Carrington, D.G. McCartney, P.H. Shipway and D.A. Stewart, "Microstructure formation in the powder HIPed hardfacing alloy Tristelle 5183 (Fe-21%Cr-10%Ni-7.5%Nb-5%Si-2%C in wt%)," *Materials Characterization*, vol. 184, 111688, February 2022. doi:10.1016/j.matchar.2021.111688
- [20] M. Balakrishnan, V. Balasubramanian and G.M. Reddy, "Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel welds," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 59-68, 2013. doi:10.1016/j.matdes.2012.06.010
- [21] V.E. Buchanan, "Solidification and microstructural characterisation of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying," *Surface & Coatings Technology*, vol. 203, no. 23, pp. 3638-3646, August 2009. doi:10.1016/j.surfcoat.2009.05.051
- [22] A. Jilleh, N. Babu, V. Thota, A. Anis, M.K. Harun and M.K. Talari, "Microstructural and wear investigation of high chromium white cast iron hardfacing alloys deposited on carbon steel," *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. doi:10.1016/j.jallcom.2020.157472
- [23] C.-M. Lin, C.-M. Chang, J.-H. Chen, C.-C. Hsieh, and W. Wu, "Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding (GTAW)," *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 7, pp. 2590-2596, December 2010. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.10.004
- [24] H.-H. Lu et al., "The effects of martensitic transformation and (Fe, Cr)₂₃C₆ precipitation on the properties of transformable ferritic stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 754, pp. 502-511, April 2019. doi:10.1016/j.msea.2019.03.110
- [25] C.-M. Lin, C.-M. Chang, J.-H. Chen, and W. Wu, "Hardness, toughness and cracking systems of primary (Cr,Fe)₂₃C₆ and (Cr,Fe)₇C₃ carbides in high-carbon Cr-based alloys by indentation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 18-19, pp. 5038-5043, July 2010. doi:10.1016/j.msea.2010.04.073
- [26] B. Das, K. Sawrav, S.B. Singh, and P.P. Bandyopadhyay, "Tribological behaviour of the hardfacing alloys utilised to fabricate the wear parts of an excavator bucket," *Transactions of the IMF*, vol. 99, no. 3, pp. 153-161, January 2018. doi:10.1080/00202967.2021.1861854
- [27] J. Lentz, A. Röttger and W. Theisen, "Hardness and modulus of Fe₂B, Fe₃(C,B), and Fe₂₃(C,B)₆ borides and carboborides in the Fe-C-B system," *Materials Characterization*, vol. 135, pp.192-202, January 2018. doi:10.1016/j.matchar.2017.11.012
- [28] Gorunov, A.I., "Investigation of M₇C₃, M₂₃C₆ and M₃C carbides synthesized on austenitic stainless steel and carbon fibers using laser metal deposition," *Surface and Coatings Technology*, vol. 401, 126294, January 2018. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126294
- [29] G. İ. Ögünç, "The importance of national ballistic resistant equipment standards and national ballistic test centre," *Güvenlik Bilimleri Dergisi IDEF Özel Sayı*, pp. 95-120, April 2019, doi:10.28956/gbd.551767
- [30] SSAB, "Ramor protection steels," *ssab.com*, 2016 [Online]. Available: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/armox/702-en-ssab--ramor---protection-steels.pdf>. [Accessed: June 17, 2022]
- [31] K. Senthil, M. Iqbal, and N.K. Gupta, "Ballistic resistance of mild steel plates of various thicknesses against 7.62 AP projectiles," *International Journal of Protective Structures*, vol. 8, 2017. doi:10.1177/2041419617700007
- [32] M.A. Iqbal, K. Senthil, P. Bhargava and N.K. Gupta, "The characterization and ballistic evaluation of mild steel," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 78, pp. 98-113, 2015. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.12.006.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Evaluation of an E-Commerce Site with Multi-Criteria Decision Making Methods with Social Media Data

Berk Can Saçan^{a,*}, Tamer Eren^b

Submitted: 22.06.2021 Revised: 09.08.2021 Accepted: 15.01.2022 doi:10.30855/gmbd.0705002

ABSTRACT

Evaluation of an E-Commerce Site with Multi-Criteria Decision Making Methods with Social Media Data Social media has reached 4.14 billion users in 2021. This number continues to increase every day. Digital platforms that users use for many purposes such as information acquisition, communication, entertainment are defined as a whole. Current and potential customers of the target audience of businesses spend a lot of time on these platforms. For this reason, it has become a necessity for businesses to show a presence on social media. Currently, it has become impossible for businesses that do not have a presence on social media to grow and compete in the market. In this study, user shares and services of an e-commerce site on social media were evaluated. For this purpose, four alternative service categories were identified by analyzing user shares. Five main and eleven sub-criteria were identified that were effective in evaluating these categories. Determined criterion weights analytical network process method was used. Alternative rankings were obtained using the PROMETHEE solution with determined criterion weights. Current, practical, and using a large pool of data, this study contributes to the literature in evaluating e-commerce sites.

Keywords: Digital marketing, Social media, Multi-criteria decision making

^{a,*} Kırıkkale University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
71451 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5942-3356
e mail: berksacan@outlook.com

^b Kırıkkale University,
Engineering Faculty,
Dept. of Industrial Engineering
71451 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5282-3138
e mail: tamereren@gmail.com

*Corresponding author:
berksacan@outlook.com

Sosyal Medya Verileri ile Bir E-Ticaret Sitesinin Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi

ÖZ

Sosyal medya, 2021 yılında 4,14 milyar kullanıcı sayısına ulaşmıştır. Bu sayı her geçen gün artarak devam etmekte. Kullanıcıların bilgi edinme, iletişim, eğlence gibi birçok amaçla kullandıkları dijital platformlar bütünü olarak tanımlanmaktadır. İşletmelerin hedef kitlelerinin, mevcut ve potansiyel müşterileri bu platformlarda oldukça fazla zaman geçirmektedir. Bu nedenle işletmeler için sosyal medyada varlık göstermek bir zorunluluk haline gelmiştir. Günümüzde sosyal medyada varlık göstermeyen işletmelerin büyümesi ve pazarda rekabet etmesi olanaksız hale gelmiştir. Bu çalışmada bir e-ticaret sitesinin, sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları ile hizmetlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla kullanıcı paylaşımları analiz edilerek dört alternatif hizmet kategorileri belirlenmiştir. Bu kategorilerin değerlendirilmesinde etkili olan beş ana ve on bir alt kriter belirlenmiştir. Belirlenen kriter ağırlıkları Analitik Ağ Prosesi yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen kriter ağırlıkları ile PROMETHEE çözümü kullanılarak alternatif sıralamaları elde edilmiştir. Güncel, pratikte uygulanan ve büyük bir veri havuzundan yararlanılarak yapılan bu çalışma, e-ticaret sitelerinin değerlendirilmesinde literatüre katkı sağlar niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Dijital pazarlama, Sosyal medya, Çok ölçütlü karar verme

1. Giriş (Introduction)

Sosyal medya, kullanıcıların eğlence, bilgi, iletişim, iş edinme, çevrim içi alışveriş gibi birçok amaçla kullandıkları dijital platformlar bütünü olarak tanımlanmaktadır. İnsanlar sosyal medya platformlarını aktif şekilde kullandıkça, hedef kitleleri ve potansiyel müşterileri bu platformlarda bulunan firmalar için sosyal medyada varlık göstermek zorunlu hale gelmiştir. 2021 yılı sosyal medya istatistiklerine bakıldığında dünya çapında 4,14 milyar sosyal medya kullanıcısı bulunmaktadır. Bu kullanıcıların 2,14 milyarı Facebook, 1,16 milyarı Instagram, 2 milyarı YouTube ve 353 milyonu Twitter kullanıcılarıdır. Bu sayıların bu seviyelere ulaşmasındaki etkenlerden birisi de kuşkusuz dünyayı etkisi altına alan koronavirüs salgını olmuştur. Bu süreçte insanların evlerinde virüsten korundukları ve normal yaşamlarından farklı bir süreç geçirdikleri için sosyal medya kullanım oranı oldukça artmıştır. Yine bu süreçte insanlar internet ve sosyal medyayı günlük ihtiyaçlarını, ev alışverişlerini, kişisel ihtiyaçlarını ve aradıkları her türlü ürünü satın almakta kullanmışlardır. Çevrim içi alışveriş siteleri bu süreçte ciddi anlamda büyüme yaşamıştır. Bu siteler, kullanıcılar ile doğru zamanda, doğru sosyal medya platformları üzerinde ve kullanıcıların isteklerini anlayarak, doğru ürünleri sunabilmek için büyük çalışmalar gerçekleştirmektedirler. Bu çalışmada bir çevrim içi ilan ve alışveriş sitesinin, sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları ile kategorizasyonu yapılarak ürün ve hizmetlerinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Kullanıcı paylaşımları, bu paylaşımların kategori ve duygu analizi, paylaşımların istatistiksel verileri bir yazılım şirketinden temin edilmiştir. Elde edilen istatistiksel veriler doğrultusunda, kullanıcıların hakkında en çok paylaşım yaptıkları 4 kategori alternatif olarak belirlenmiştir. Bu kategoriler kurumsal, mobil uygulama, ilanlar ve üyelik işlemleri olarak belirlenmiştir. Bu kategorilere ait 1 Haziran 2020 ve 31 Aralık 2020 tarih aralığına ait veriler analiz edilerek kategorilere ayrılmıştır. Her bir kategorinin paylaşım yapıldığı sosyal medya platformlarının dağılımları, duygu analizleri, özel kategori dağılımları belirlenerek çalışma için hedeflenen veriler elde edilmiştir.

Ele alınan çalışmada uzman görüşleri ve sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları analiz edilerek, bu paylaşımların yer aldığı 4 ana kategori alternatifler olarak belirlenmiştir. Bu alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılmak için sistem ara yüzünde bulunan ve firmanın önem verdiği 5 ana kriter belirlenmiştir. Bu 5 ana kritere ek olarak alternatiflerin değerlendirmesinde önem verilen ve anlamlı verilerin elde edildiği 11 alt kriter ele alınmıştır. Çalışmada bu alternatiflerin önem sıralamalarının elde edilmesi için 2 farklı Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi (ÇKVV) kullanılmıştır. Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında Analitik Ağ Prosesi (ANP) yöntemi kullanılırken, belirlenen alternatiflerin sıralamalarının elde edilmesi için PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. ANP yöntemi kullanım kolaylığı ve birçok farklı problem tipinde uygulanabildiği için tercih edilmiştir. PROMETHEE yöntemi ise bir sıralama algoritması olduğu için ve ele alınan çalışmada alternatiflerin önem sıralamalarının belirlenmesinin hedeflendiği için tercih edilmiştir. ÇÖKVV yöntemlerinin çözümünde Super Decision ve Visual PROMETHEE paket programları kullanılmıştır ve sistem görüntüleri uygulama bölümünde yer almaktadır. Çalışmanın yapıldığı e-ticaret sitesinin analizi yapılan verilerden faydalandığı ve bu analizler doğrultusunda hizmetlerinde iyileştirmeler yapıldığı bilinmektedir. Güncel, pratikte uygulanan ve büyük bir veri havuzundan yararlanılarak yapılan bu çalışma, e-ticaret sitelerinin değerlendirilmesinde literatüre katkı sağlar niteliktedir.

Çalışma planında ikinci bölümde literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir, üçüncü bölümde uygulamada kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde uygulama kısmı yer almaktadır. Altıncı bölümde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. Literatürde Yapılan Çalışmalar (Studies in the Literature)

Saçan ve Eren [1] ele aldıkları çalışmada, dijital pazarlama strateji seçimi problemini ele almışlardır. Uygulama yeri olarak bir tekstil firması seçilmiş ve belirlenen dijital pazarlama stratejileri arasından firma için en uygun olanının seçilmesi hedeflenmiştir. Alternatifler arasında sosyal medya platformlarının yayınlanan reklamlarında yer aldığı yedi adet alternatif belirlenmiştir. Çalışmada kriter ağırlıkları ANP yöntemi ile elde edildikten sonra PROMETHEE yöntemi ile alternatif sıralamaları elde edilmiştir. Sonuç olarak firmanın sosyal medya reklam çalışmalarına yatırım yapması belirlenmiştir. Saçan ve Eren [2] yaptıkları çalışmada bankacılık sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın reklam platformu seçimi problemini ele almışlardır. Çalışmada firmanın ürünleri arasında yer alan bir kredi kartının reklam çalışmaları için hesaplarının bulunduğu 4 sosyal medya platformu alternatif olarak belirlenmiştir. Çözüm aşamasında 4 farklı ÇÖKVV yöntemi ile 2 farklı çözüm elde

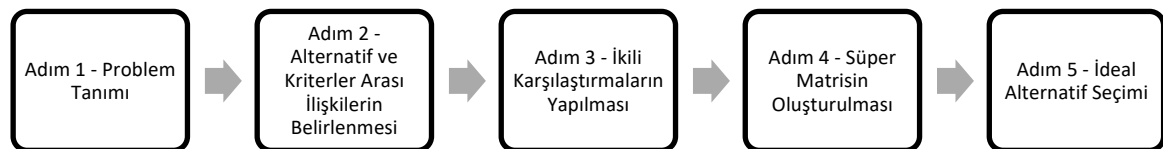
edilmiştir. Çözüm sonucunda yatırım yapılacak sosyal medya platformlarının öncelik sıralamaları elde edilmiştir. Hedef kitlenin daha aktif olarak kullandığı Instagram'ın her iki çözümde de ilk sırada yer alması çözümün tutarlı olduğunu göstermiştir. Barutçu ve Tomuş [3] tarafından yapılan çalışmada sosyal medya pazarlaması uygulamalarının etkinliğinin ölçümünü yapmışlardır. Firmalar ve gelecekte yapılacak olan çalışmalar için verimli bir sosyal medya pazarlamasında olması gerekenler ve sürdürülebilir bir sosyal medya pazarlaması için neler yapılabileceği ortaya konmuştur. Keskin ve Kurtuldu [4] yaptıkları çalışmada üniversite öğrencilerinin dijital pazarlama uygulamalarına yatkınlıklarını ölçümlemişlerdir. Yapılan anket çalışması ile öğrencilerin sosyal medya kullanım oranları ve dijital pazarlama araçlarına yatkınlık düzeyleri elde edilmiştir. Alan vd. [5] ele aldıkları çalışmada dijital pazarlama araçları ve sosyal medya pazarlaması kavramını incelemişlerdir. Sosyal medya platformlarında müşteri ilişkileri incelenirken, dijital pazarlama ve sosyal medyanın avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Her iki kavramın işletme ve müşteriler açısından nasıl karşılandığı belirlenmiştir. Çelik [6] yaptığı çalışmada çeşitli kaynaklardan gerekli literatür taramasını yaparak, belirli sosyal medya platformlarını ve pazarlama iletişimi kavramlarından reklam ve halkla ilişkiler öğelerini incelemiştir. Sonuç olarak sosyal medya araçlarının ve kullanıcılarının pazarlama kavramı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Kılınc [7] tarafından yapılan çalışmada ise sosyal medyanın günümüzdeki yeri ve önemi incelenmiştir. Çalışmada en çok kullanılan sosyal medya platformları tespit edilirken bazı global şirketlerin sosyal medya çalışmaları ele alınmıştır. Yalçınkaya [8] Türkiye'deki siyasi partilerin sosyal medya kullanım oranlarını analiz etmiştir. Siyasi partilerin sosyal medya platformlarında ki etkinlik düzeylerini inceleyerek, bu partilerin hangi platformlarda daha aktif olarak bulunduğunu ortaya koymuştur. Çalışma sosyal medya ve siyasi partileri bir arada inceleyerek yenilikçi bir bakış açısı sağlamıştır. Oralhan [9] sosyal medya platformlarının değerlendirilmesinde etkili olan kriterleri Bulanık DEMATEL yöntemi ile analiz etmiştir. Sosyal medya platformu seçimi problemini bir telekomünikasyon şirketinde uygulayarak, ideal platformun seçimini gerçekleştirmiştir. Telekomünikasyon şirketinde uygulanması açısından ve platform seçiminde değerlendirilen kriterlerin bu şirkete göre seçilmiş olması çalışmanın özgün taraflarından olmuştur. Mukul vd. [10] alternatif dijital pazarlama teknolojilerinin seçimini AHP ve COPRAS yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Yapay zekâ, büyük veri gibi alternatifleri 3 kriter ve 9 alt kriter ile değerlendirerek, ideal dijital pazarlama teknolojisi seçimini yapmışlardır. Ele alınan alternatifler son zamanlarda en çok bahsedilen teknolojiler ve her sektöre uygulanabilir olması açısından bu çalışmayı güncel bir çalışma olarak literatüre kazandırmıştır. Bu çalışmada ise bir e-ticaret sitesinin sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları ile ÇÖKV yöntemlerinden faydalanılarak hizmet yelpazesi değerlendirilmiştir. Yedi aylık 81 bin 684 veri analiz edilerek, kullanıcıların e-ticaret sitesinden talep, şikâyet ve önerileri güncel olarak takip edilmiştir. Bu amaç kapsamında hakkında en çok paylaşım yapılan 4 ana kategori belirlenmiştir. Bu ana kategorilerin değerlendirilmesinde etkili olan 5 ana kriter ve 11 alt kriter belirlenmiştir. Bu kriterler belirlenirken uzman görüşlerinden yararlanılmıştır. Literatürde bir e-ticaret sitesinin sosyal medyada kullanıcı paylaşımlarının yer aldığı güncel, firma tarafından kullanılan ve veri sayısının fazla olduğu bir çalışma saptanamamıştır. Çalışma bu yönden literatüre katkı sağlar niteliktedir.

3. Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri (Multi-Criteria Decision Making)

Bu bölümde çalışmada kullanılan ANP ve PROMETHEE yöntemleri açıklanmıştır. Çalışmada ANP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları PROMETHEE yönteminde kullanılarak çözüm elde edilmiştir.

3.1. Analitik ağ prosesi (ANP) (Analytical network process)

Analitik Ağ Prosesi (ANP) Thomas L. Satty tarafından geliştirilmiştir. ANP AHP yönteminin genelleştirilmiş bir halidir. Karar verme aşamasında kriterler arasındaki ilişkileri dikkate alarak problemin tek yöne bağlı kalmasını ortadan kaldıran bir yöntemdir. ANP yönteminin aşamaları Şekil 1'de yer aldığı gibidir [11].



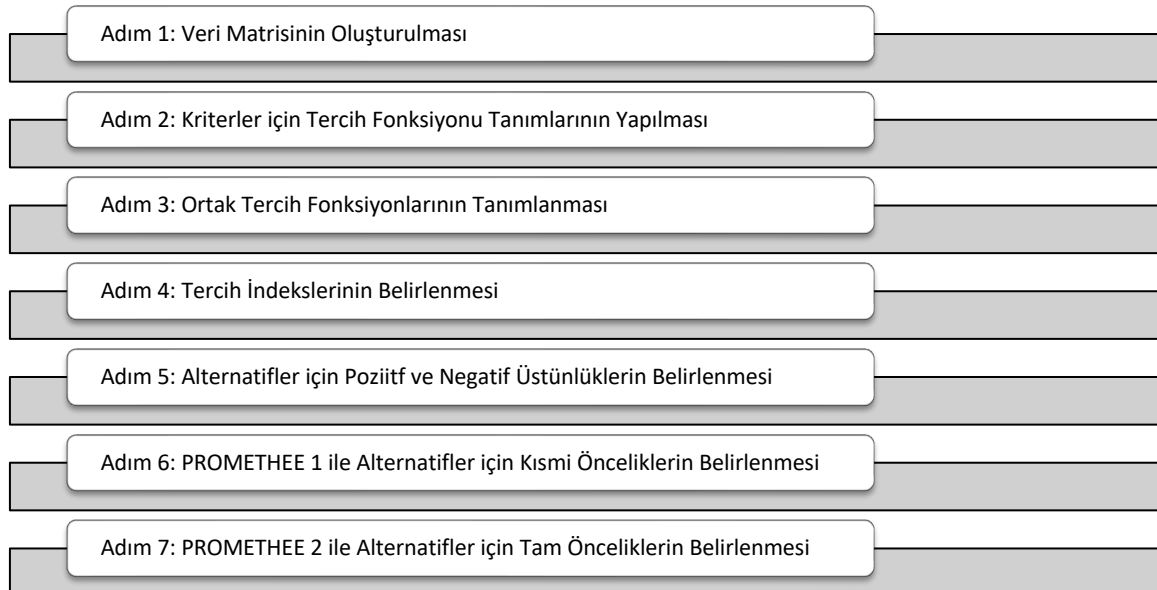
Şekil 1. ANP yöntemi adımları (ANP method steps)

3.2. PROMETHEE yöntemi (PROMETHEE method)

PROMETHEE yöntemi Jean-Pierre Brans tarafından 1982 yılında geliştirilmiştir. PROMETHEE yöntemi kriterlere en uygun alternatifin seçilmesi için tasarlanmış bir ÇÖKVV yöntemidir. PROMETHEE tercih fonksiyonları Şekil 2'de, aşamaları ise Şekil 3'te yer almaktadır [12], [13]. Çok ölçütlü karar verme yöntemleri enerji sektörü [14, 15], sağlık sektörü [16, 17] ve ulaşım sektörü [18] gibi birçok alanda tercih edilmektedir.

Tip	Parametreler	Fonksiyon	Grafik, $p(x)$
Birinci Tip (olagan)	-	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$	
İkinci Tip (U-tipi)	l	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ 1, & x > l \end{cases}$	
Üçüncü Tip (V-tipi)	m	$p(x) = \begin{cases} x/m, & x \leq m \\ 1, & x \geq m \end{cases}$	
Dördüncü Tip (Seviyeli)	q, p	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq q \\ 1/2, & q < x \leq q+p \\ 1, & x > q+p \end{cases}$	
Beşinci Tip (Linear)	s, r	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s \\ (x-s)/r, & s < x \leq s+r \\ 1, & x \geq s+r \end{cases}$	
Altıncı Tip (Gaussian)	σ	$p(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1 - e^{-x^2/2\sigma^2}, & x \geq 0 \end{cases}$	

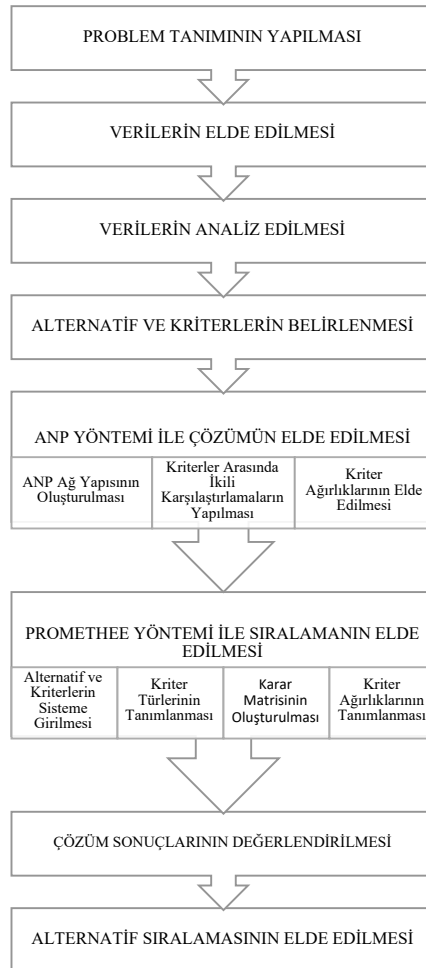
Şekil 2. PROMETHEE tercih fonksiyonları (PROMETHEE preference functions)



Şekil 3. PROMETHEE yöntemi adımları (PROMETHEE method steps)

4. Uygulama (Application)

Ele alınan problemin akış şeması Şekil 4'te yer aldığı gibidir.



Şekil 4. Problem akış şeması (Problem flow chart)

4.1. Problem tanımı (Problem definition)

Online ilan verilebilen ve aynı zamanda alışveriş imkânı sunan bir e-ticaret sitesinin, sosyal medyada yer alan kullanıcı şikâyet, beğeni, öneri, soru ve diğer paylaşımlarının kategorizasyonunun yapılarak bu e-ticaret sitesinin hizmet yelpazesinin değerlendirilmesi. Verilen hizmet doğrultusunda, konut ilanları, vasıta ilanları, hayvan sahiplendirme, tadilat ustası hizmetleri gibi birçok ilan türünün sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları yer almaktadır. Çalışmada verilerin elde edildiği yazılım şirketinin, sistem ara yüzünde yer alan kategori ağaçlarının kullanıcı paylaşımları analiz edilerek, önem sıralarının elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma da belirlenen kriter ağırlıklarının hesaplanmasında ANP yöntemi kullanırken ilan türlerinin önem sıralamasının elde edilmesinde PROMETHEE yöntemi kullanılacaktır.

4.2. Verilerin elde edilmesi (Obtaining the data)

Çalışmanın uygulandığı e-ticaret sitesinin kullanıcı paylaşımlarının yer aldığı, analizlerinin yapıldığı ve raporlanma süreçlerinin yapıldığı bir yazılım firmasından elde edilmiştir. Yazılım firmasında veriler günlük olarak analiz edilmekle birlikte saatlik, günlük, haftalık ve aylık raporlamalarının yapılması, sosyal medyada yer alan kritik süreçlerin yönetilmesi gibi birçok hizmet sunmaktadır. Çalışmanın uygulandığı e-ticaret sitesinin analiz edilen ve kategorizasyonu yapılan 7 aylık verisi kullanılmıştır. Bu veriler; Twitter, Facebook, Instagram, YouTube, Şikâyet Siteleri, Forum, Blog, Sözlük, AppStore, Vole, VKontakte, Web haber siteleri gibi birçok kaynaktan elde edilmiştir. Veriler sistem ara yüzünde yer alan 11 ana kategori ve 46 özel kategori kullanılarak kategorizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan

çalışmada bu 11 ana kategori içerisinde paylaşım oranı en çok olan 4 ana kategori kullanılmıştır. Sistemde analizi yapılan verilerin, duygu analizi dağılımları, kaynak dağılım oranları, özel kategori oranları gibi veriler kullanılmıştır.

Table 1. Alternatifler (Alternatives)

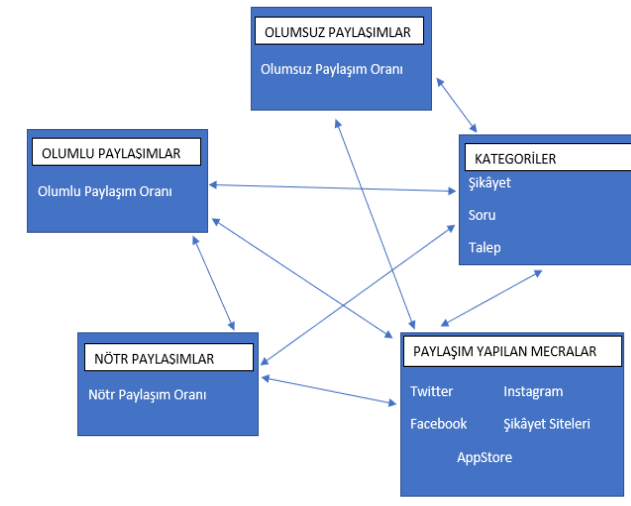
Alternatif	Açıklama
Kurumsal	Bu kategoride yer alan paylaşımlar, e-ticaret sitesinin kurumsal kimliğine yönelik olan paylaşımlardır. Herhangi bir hizmet yelpazesine yönelik değil, direk olarak e-ticaret sitesinin isminin geçtiği, borsa, haber, şikâyet ve sponsorluk gibi paylaşımlardır.
İlanlar	E-ticaret sitesinin hizmetleri arasında yer alan, vasıta, emlak, hayvan sahiplendirme, tadilat ustaları gibi birçok ilan paylaşımlarının yer aldığı kategoridir. İlanlar kategorisi altında, vasıta, emlak, şikâyet, öneri, talep, soru birçok özel kategori kullanılmaktadır.
Mobil Uygulama	Çalışmanın yapıldığı e-ticaret sitesinin hizmet verdiği müşterileri tarafından kullanılan mobil uygulaması hakkında yapılan paylaşımları içermektedir. Soru, öneri, şikâyet gibi birçok özel kategorinin yer aldığı bu kategori, en çok kullanılan kategorilerden birisidir.
Üyelik	E-ticaret sitesine üye olan kullanıcıların, üyelikte yaşadıkları problemleri, önerileri, talepleri gibi birçok paylaşımın yer aldığı kategoridir. En çok olumsuz paylaşımın yer aldığı kategoriler arasında yer almaktadır.

Table 2. Kriterler (Criteria)

Ana Kriter	Alt Kriter	Tanım
Olumlu Paylaşımlar	Olumlu Paylaşım Oranı (OPO)	Kullanıcılar tarafından yapılan paylaşımların, e-ticaret sitesinin veya bir hizmetinin beğenilmesi, tavsiye edilmesidir. Yapılan paylaşımın olumlu olarak değerlendirilir.
	Olumsuz Paylaşım Oranı (OSPO)	Kullanıcılar tarafından yapılan paylaşımların, e-ticaret sitesinin veya bir hizmetinin beğenilmemesi, mağduriyet yaratması veya şikâyet edilmesidir. Yapılan paylaşım olumsuz olarak değerlendirilir.
Nötr Paylaşımlar	Nötr Paylaşım Oranı (NPO)	Yapılan paylaşımlar arasında, haber, borsa, bahsetme gibi bilgilendirme içeren ve e-ticaret sitesinin isminin geçtiği, herhangi bir duygu durumu olmayan paylaşımlardır.
	Twitter (TW)	Twitter üzerinden yapılan paylaşımları içermektedir.
	AppStore (AS)	AppStore üzerinden yapılan paylaşımları içermektedir.
	Facebook (FB)	Facebook üzerinden yapılan paylaşımları içermektedir.
	Instagram (IG)	Instagram üzerinden yapılan paylaşımları içermektedir.
Paylaşım Yapılan Mecralar	Şikâyet Siteleri (ŞS)	Şikâyet Siteleri üzerinden yapılan paylaşımları içermektedir.
	Şikâyet (ŞK)	Kullanıcıların yaşadıkları mağduriyet, ücretlerin eleştirilmesi ve problemlerini dile getirdikleri paylaşımları içermektedir.
	Talep (TP)	Kullanıcılar tarafından istenilen mobil uygulama, ilan türleri, web sitesi gibi birçok konudaki taleplerini içeren paylaşımlardır.
Kategoriler	Soru (SR)	Kullanıcıların e-ticaret sitesi hakkında bilmedikleri, yapamadıkları noktaları bildirdikleri paylaşımlardır.

4.4. ANP yöntemi ile çözümün elde edilmesi (Obtaining the solution with the ANP method)

Adım 1 - ANP ağ yapısının oluşturulması: ANP yöntemi hesaplamalarında Super Decision paket programı tercih edilmiştir. Super Decision programı ile oluşturulan ağ yapısı Şekil 5'te yer almaktadır. Hesaplamalar oluşturulan ağ yapısı doğrultusunda hesaplanmıştır.



Şekil 5. ANP ağ yapısı (ANP network structure)

Adım 2 – Kriterler arasında ikili karşılaştırmaların yapılması: Super Decision programında ağ yapısı hazırlandıktan sonra, kriterler arasında içsel ve dışsal karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken kriter bazlı olarak değerlendirme yapılmıştır. Şekil 6’te yapılan karşılaştırmalar yer almaktadır.

Comparisons wrt "Olumlu Paylaşım Oranı" node in "PAYLAŞIM YAPILAN MECRALAR"
AppStore is extremely more important than Facebook

1.	AppStore	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Facebook
2.	AppStore	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Instagram
3.	AppStore	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Twitter
4.	AppStore	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Şikâyet Siteleri~
5.	Facebook	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Instagram
6.	Facebook	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Twitter
7.	Facebook	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Şikâyet Siteleri~
8.	Instagram	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Twitter
9.	Instagram	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Şikâyet Siteleri~
10.	Twitter	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Şikâyet Siteleri~

Şekil 6. Kriterler arası ikili karşılaştırmalar (Pairwise comparisons between criteria)

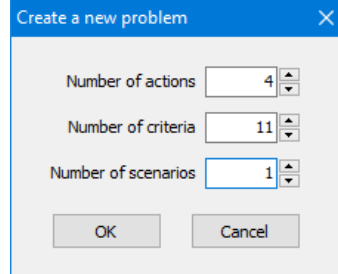
Adım 3 – Kriter ağırlıklarının elde edilmesi: Ağ yapısı oluşturulup ikili karşılaştırmalar yapıldıktan sonra Super Decision paket programı çalıştırılarak kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Kriter ağırlıkları Tablo 3’te yer almaktadır.

Table 3. Kriter ağırlıkları (Criterion weights)

Ana Kriter	Alt Kriter	Ağırlık
Olumlu Paylaşım	Olumlu Paylaşım Oranı (OPO)	0.141133
Olumsuz Paylaşım	Olumsuz Paylaşım Oranı (OSPO)	0.163417
Nötr Paylaşım	Nötr Paylaşım Oranı (NPO)	0.163417
Paylaşım Yapılan Mecralar	Twitter (TW)	0.129786
	AppStore (AS)	0.078041
	Facebook (FB)	0.029678
	Instagram (IG)	0.014659
	Şikâyet Siteleri (ŞS)	0.045887
Kategoriler	Şikâyet (ŞK)	0.066852
	Talep (TP)	0.116249
	Soru (SR)	0.050882

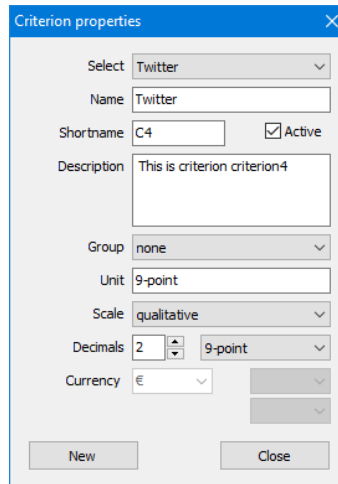
4.5. PROMETHEE yöntemi ile sıralamaların elde edilmesi (Rankings are obtained with the PROMETHEE method)

Adım 1 – Alternatif ve kriterlerin sisteme girilmesi: Çalışmada PROMETHEE yönteminin çözümünde Visual PROMETHEE paket programı kullanılmıştır. Programın ilk adımı olarak alternatif ve kriterler sisteme dahil edilmiştir.



Şekil 7. Alternatif ve kriterlerin sisteme girilmesi (A Entering alternatives and criteria into the system)

Adım 2 – Kriter türlerinin tanımlanması: Bu adımda kriter özellikleri sisteme dahil edilir. Kriter ismi, skalası ve değerlendirme ölçeği tanımlanmaktadır. Sistemde 3 adet değerlendirme ölçeği yer almaktadır. Bunlar; Nitel (Qualitative), Nümerik (Numerical) ve Parasal (Currency) ölçekleridir. Çalışmada alternatiflere göre kriterler değerlendirilirken Qualitative skalası içerisinde yer alan 1 – 9 puan ölçeği kullanılmıştır.



Şekil 8. Kriter özelliklerinin tanımlanması (Defining criteria properties)

Adım 3 – Kriter ağırlıkları ve fonksiyon tiplerinin atanması: ANP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları Visual PROMETHEE programına dahil edilir. Paket program içerisinde 6 tip fonksiyon tipi yer almaktadır. Bu fonksiyonlardan üçüncü ve beşinci tip tercih fonksiyonları fiyat, güç, maliyet gibi nicel veriler için kullanılmaktadır. Nitel kararlar için ikinci ve dördüncü tip tercih fonksiyonları kullanılmaktadır. Evet/hayır kararlarında ise birinci tip tercih fonksiyonu kullanılmaktadır. Çalışmada parasal ve sayısal bir değer yer almadığı için U tipi tercih fonksiyonu seçilmiştir.

Preferences					
Min/Max	max	min	min	max	max
Weight	0,14	0,16	0,16	0,13	0,08
Preference Fn.	U-shape	U-shape	U-shape	U-shape	U-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

Şekil 9. Kriter ağırlıkları ve fonksiyon tiplerinin atanması (Assigning criterion weights and function types)

Adım 4 – Karar matrisinin oluşturulması: Dördüncü adımda karar matrisi verileri sisteme dahil edilir.

Karar matrisinin satırlarında seçilmek istenen alternatifler yer alırken, sütunlarında ise alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan kriterler yer almaktadır.

Evaluations										
<input checked="" type="checkbox"/>	Kurumsal	<input type="checkbox"/>	A-G	G	VG	A-G	VB-B	VG	A-G	VG
<input checked="" type="checkbox"/>	İlanlar	<input type="checkbox"/>	B	VG	A	VG	VB-B	A-G	VG	A-G
<input checked="" type="checkbox"/>	Mobil Uygulama	<input type="checkbox"/>	VG	B	A-G	G-VG	VG	VB	VB	VB
<input checked="" type="checkbox"/>	Üyelik	<input type="checkbox"/>	VB-B	VB-B	B	G	VB	VB	VB	A

Şekil 10. Karar matrisi (Decision matrix)

4.6. Alternatif sıralamasının elde edilmesi (Obtain alternative rank)

Son adım olarak Visual PROMETHEE programı çalıştırılarak alternatiflerin önem sıralaması elde edilmektedir. Ele alınan çalışmada e-ticaret sitesinin mobil uygulaması hakkında paylaşılan iletilerin önem derecesinin diğer paylaşımlardan daha önemli olduğu belirlenmiştir. Çözüm sonucunda elde edilen alternatif sıralaması Şekil 11’de yer almaktadır.

Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Mobil Uygulama	<input type="checkbox"/>	0,3378	0,5333	0,1955
2	Üyelik	<input type="checkbox"/>	0,2354	0,4436	0,2082
3	İlanlar	<input type="checkbox"/>	-0,1056	0,3022	0,4077
4	Kurumsal	<input type="checkbox"/>	-0,4677	0,1880	0,6557

Şekil 11. Alternatif sıralamaları (Alternative rankings)

4.7. Çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi (Evaluation of solution results)

Ele alınan çalışmada bir e-ticaret sitesinin hizmet yelpazesinin ÇÖKVV yöntemleri ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. ANP yöntemi ile kriter ağırlıkları elde edildikten sonra PROMETHEE yöntemi ile alternatif sıralamaları belirlenmiştir. Sosyal medya dünya çapında çok sayıda insan tarafından kullanılmaktadır. İnsanların bir birleri üzerinde olan etkileri düşünülecek olursa firmalar için sosyal medyaya kulak vermemek çok büyük bir hata olacaktır. Çalışma E-ticaret sitelerinin değerlendirilmesinde, sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları ile analiz etmesi açısından gelecek çalışmalar için bir referans niteliğindedir. Ele alınan çalışmada kullanıcıların sosyal medyada paylaşımlarda buldukları 4 ana kategori 11 kriter ile değerlendirilmiş ve analiz edilmiştir. Çözüm sonucunda e-ticaret sitesinin mobil uygulama hizmeti alternatifler arasında ilk sırada yer almıştır. E-ticaret sitesinin öncelikli yatırım ve iyileştirme yapacağı hizmetin mobil uygulama olması gerektiği tespit edilmiştir. Üyelik ile ilgili yaşanan problemler ve önerilerin geliştirilerek çözüme kavuşturulması ikinci sırada yer almaktadır. İlan hizmeti veren bu e-ticaret sitesinin, ilanlar kategorisinde yapması gereken iyileştirmeler ise üçüncü derecede önemli görülmüştür. Kurumsal kimliğe yönelik olan paylaşımların önem derecesi dördüncü sırada yer alırken, e-ticaret sitesinin marka imajı oluşturmak ve müşteri memnuniyetini sağlaması bir diğer tespittir.

5. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Yapılan çalışma kapsamında bir e-ticaret sitesinin sosyal medyada yer alan kullanıcı paylaşımları ile kategorilerinin değerlendirilmesi problemi ele alınmıştır. Gerekli literatür taraması yapılmış, kullanıcı paylaşımlarının yer aldığı 2020 yılının son 7 ayını içeren 81 bin 684 veri analiz edilmiştir. Literatür taraması, veri analizleri ve uzman görüşleri doğrultusunda 4 alternatif, 5 kriter ve 11 alt kriter belirlenmiştir. Belirlenen bu alternatifler e-ticaret sitesinin analizi sırasında kullanılan kategorilerden en çok verinin bulunduğu ve anlamlı sonuçların çıkması için belirlenen kurumsal, mobil uygulama, ilan ve üyelik olarak ele alınmıştır. Bu alternatiflerin değerlendirilmesinde, veri analizinde kullanılan, duygu tonları (olumlu, olumsuz ve nötr), paylaşım yapılan sosyal medya platformları ve kullanılan özel

kategoriler ele alınmıştır. Belirlenen kriterler ANP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen ağırlıkların, PROMETHEE yönteminde kullanımı ile alternatif sıralamaları elde edilmiştir. Sonuç olarak e-ticaret sitesinin mobil uygulamasının kullanıcılar açısından daha önemli olduğu saptanmıştır. Bu doğrultuda mobil uygulama ile ilgili kullanıcılar tarafından yapılan şikâyetler, öneriler ve talepler doğrultusunda iyileştirmeler yapılması önerilmektedir. Kullanıcıların üyelik işlemlerinde yaşadıkları problemler ve talepleri mobil uygulamada yapılacak olan iyileştirmelerin ardından ikinci sırada yer almaktadır. E-ticaret sitesinde verilen ilanlar hakkındaki paylaşımların önem derecesi üçüncü sırada yer alırken e-ticaret sitesinin kurumsal kimliğine yönelik paylaşımların dördüncü sırada yer almıştır. Sonuç olarak e-ticaret sitesi, mobil uygulamasında yapacağı güncelleme ve iyileştirmelerden sonra üyelik işlemleri ile ilgili şikâyet, talep ve önerileri incelemelidir. Kullanıcılar tarafından verilen ilanlarda yapacağı fiyat indirimleri ve çeşitli kampanyalar ile bu kategorinin önemli derecede iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalar için farklı ürün yelpazesine sahip e-ticaret sitelerinde farklı ÇÖKVV yöntemleri ile uygulama yapılması önerilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] B. C. Saçan ve T. Eren, "Dijital pazarlama strateji seçimi: SWOT analizi ve çok ölçütlü karar verme yöntemleri," *Politeknik Dergisi*, Erken görünüm. 2021.
- [2] B. C. Saçan ve T. Eren, "Sosyal medya reklam platformu seçimi: çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile bir uygulama," *Journal of Turkish Operations Management*, c. 5, s. 2, ss. 721-738, 2021.
- [3] S. Barutçu ve M. Tomaş, "Sürdürülebilir sosyal medya pazarlaması ve sosyal medya pazarlaması etkinliğinin ölçümü," *İnternet Uygulamaları Ve Yönetimi Dergisi*, c. 4, s. 1, ss. 5-24, 2013. doi:10.5505/iuyd.2013.69188
- [4] H. D. Keskin ve H. S. Kurtuldu, "Üniversite öğrencilerinin dijital pazarlamaya yatkınlık düzeylerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma," *Global Journal of Economics and Business Studies*, c. 7, s. 14, ss. 117-128, 2018.
- [5] K. A. Alan, T. E. Kabadayı ve T. Erişke, "İletişimin yeni yüzü: dijital pazarlama ve sosyal medya pazarlaması," *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, c. 17, s. 66, ss. 493-504, 2018. doi:10.17755/esosder.334699
- [6] S. Çelik, "Sosyal medyanın pazarlama iletişimine etkileri," *Erciyes İletişim Dergisi*, c. 3, s. 3, ss. 28-42, 2014. doi:10.17680/akademia.v3i3.1005000199
- [7] M. Kılınc, "Araştırma şirketlerinin sosyal medya kullanımı," *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, c. 12, s. 1, ss. 9-20, 2020.
- [8] N. Yalçınkaya, "Türkiye'deki siyasi partilerin dijital pazarlama kanallarını kullanımı," *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, cilt 25, sayı 1, ss. 200-216, 2018. doi:10.18657/yonveek.399687
- [9] B. Oralhan, "Sosyal medya platformu seçimini etkileyen kriter ağırlıklarının bulanık dematel yöntemiyle belirlenmesi," *İbad Sosyal Bilimler Dergisi*, Özel Sayı, ss. 408-420, 2019. doi:10.21733/ibad.615528
- [10] E. Mukul, G. Büyükoçkan and M. Güler, "Evaluation of digital marketing technologies with mcdm methods," *In Proceedings 6th International Conference on New Ideas in Management, Economics and Accounting*, 19-21 April, France, Paris.
- [11] T.L. Saaty, "Fundamentals of the analytic network process," *In Proceedings of the 5th international symposium on the analytic hierarchy process*, vol. 12, no. 14, 1999. doi:10.1007/s11518-006-0158-y
- [12] M. Taş, Ş. N. Özlemiş, M. Hamurcu ve T. Eren, "Ankara'da AHP ve PROMETHEE yaklaşımıyla monoray hat tipinin belirlenmesi," *Ekonomi İşletme Siyaset ve Uluslararası İlişkiler Dergisi*, c. 3, s. 1, ss. 65-89, 2017.
- [13] B. Uslu, Ş. Gür, T. Eren ve E. C. Özcan, "Çok kriterli karar verme yöntemleri ile bulut hizmet sağlayıcı sıralaması," *Pamukkale İşletme ve Bilişim Yönetimi Dergisi*, c. 6, s. 1, ss. 20-34, 2019.
- [14] E. C. Özcan, R. Yumuşak and T. Eren, "Risk based maintenance in the hydroelectric power plants," *Energies*, vol. 12, no. 8, pp. 1502-1523, 2019. doi:10.3390/en12081502
- [15] R. Yumuşak, E. C. Özcan, T. Danişan ve T. Eren, "AHP TOPSIS-tam sayılı programlama entegrasyonu ile hidroelektrik santrallarda bakım strateji optimizasyonu," *Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi*, 10-12 Mayıs, Şanlıurfa, ss. 80-84.
- [16] E. C. Özcan, T. Danişan, R. Yumuşak, Ş. Gür and T. Eren, "Goal programming approach for the radiology technician scheduling problem," *Sigma Journal of Engineering and Natural Science*, vol. 37, no. 4, pp. 1411-1420, 2019.
- [17] S. Yapıcı, R. Yumuşak ve T. Eren, "Çok kriterli karar verme yöntemleri ile medikal depo yeri seçimi," *Trakya Üniversitesi*

İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, c. 9, s. 2, ss. 203-221, 2020.

[18] M. Hamurcu, H. M. Alağaç and T. Eren, "Selection of rail system projects with analytic hierarchy process and goal programming," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 291 – 302, 2017.

[19] J. P. Brans, P. Vincke and B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method," *European Journal of Operational Research*, vol. 24, no. 2, pp. 228- 238, 1986. doi:10.1016/0377-2217(86)90044-5

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Detection of Fall-Related Accidents Using Deep Learning Method in the Internet of Things

Bekir Aksoy^{a,*}, Osamah Khaled Musleh Salman^b, Hamdi Sayın^c, İrem Sayın^d

Submitted: 26.08.2021 Revised: 18.01.2022 Accepted: 20.01.2022 doi:10.30855/gmbd.0705003

ABSTRACT

Nowadays, with the increase in the number of employees in the enterprises and the proportional workload, different occupational accidents frequently occur. Examples of this are slippery floors, falling materials, harmful substances/gas leaks, improper use of protective clothing and equipment or not using them at all. Identifying these dangers and taking the necessary precautions are very important for both worker safety and employers. The most common accident among these dangerous situations is the accidents that occur as a result of slipping or falling. Such accidents are usually caused by a foreign liquid/substance on the work surface, the worker's inability to balance himself, or surface inequalities. With this study, an IoT and 1D CNN deep learning-based system has been developed to detect accidents such as falling, slipping and balance disorders to inform relevant health institutions. The developed 1D CNN-based system detected work accidents caused by falls with 100% accuracy. With the results obtained from this study, it is aimed to make improvements for the prevention of these accidents.

Keywords: Deep Learning, Internet of Things, Sensors, Fall detection

^{a, *} Isparta University of Applied Sciences University, Technology Faculty, Dept. of Mechatronics Engineering 32300 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8052-9411
e mail: bekiraksoy@isparta.edu.tr

^b Isparta University of Applied Sciences University, Technology Faculty, Dept. of Mechatronics Engineering 32300 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0001-6526-4793

^c Isparta University of Applied Sciences University, Technology Faculty, Dept. of Mechatronics Engineering 32300 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0826-8517

^d Isparta University of Applied Sciences University, Technology Faculty, Dept. of Mechatronics Engineering 32300 - Isparta, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0627-8308

*Corresponding author:
bekiraksoy@isparta.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Derin Öğrenme, Nesnelerin İnterneti, Sensörler, Düşme Tespiti

Nesnelerin İnternetinde Derin Öğrenme Yöntemi Kullanılarak Düşmeye Bağlı Kazaların Tespiti

ÖZ

Günümüzde işletmelerde çalışanların sayısının ve bununla orantılı olarak iş yükünün artması ile birlikte sıklıkla farklı iş kazaları meydana gelmektedir. Buna örnek olarak kaygan zeminler, düşen malzemeler, zararlı maddeler/gaz kaçakları, koruyucu giysi ve ekipmanların uygunsuz kullanılması veya hiç kullanılmaması bu iş kazalarına gösterilebilir. Bu tehlikelerin belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınması hem işçi güvenliği hem de işveren açısından oldukça önemlidir. Bu tehlikeli durumlar arasında en sık karşılaşılan kaza, kayma veya düşme sonucu meydana gelen kazalardır. Bu tür kazalara genellikle çalışma yüzeyindeki yabancı bir sıvı/madde, işçinin kendi dengesini kuramaması veya yüzey eşitsizlikleri gibi problemlerden kaynaklanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma ile düşme, kayma ve denge bozukluklarını gibi kazaların tespiti ve ilgili sağlık kuruluşlarına bilgi verilmesi için IoT ve 1D CNN derin öğrenme tabanlı bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen 1D CNN tabanlı sistem düşme kaynaklı iş kazalarını %100 doğruluk oranında tespit etmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçlar ile bu kazaların önlenmesine yönelik iyileştirmeler yapılması hedeflenmektedir.

1. Introduction

Workplace is a broad definition and covers a wide area from factories, construction sites to home environments. Dynamism is very high among the workplaces, especially in crowded and large workplaces such as factories and construction sites. These workplaces are areas that are very likely to have occupational accidents due to their dynamic structure. Occupational accidents are incidents that cause physical and mental damage in workplaces or places other than the workplace where the employee has gone due to their work [1,2]. In the past years, it has been revealed that work and workplace safety is very important in reducing occupational accidents and conducting a successful business [3]. The workplaces contain different hazards due to their many features such as constantly operating machines, variable physical barriers and hazardous chemicals. In Turkey, a total of 384 262 work related accidents occurred in 2020 and 1231 employees lost their lives as a result of these accidents [1]. The high numbers of occupational accidents show how important it is to prevent those accidents.

There are different accidents that occur as a result of different reasons in the workplaces. Some examples of these types of accidents are: work tools coming out of control, explosion or slipping of the materials in the work environment, injuries caused by the fall of the employees, etc. Among the workplace accidents, the one of the most common injuries are those that are related to the fall. In Turkey, during 2020, as a result of the explosion and breaking of the materials in the workplace 28.165 workers, as a result of the vehicles being out of control 54.217 workers were injured and the number of workers injured due to falling was 53.948 [1].

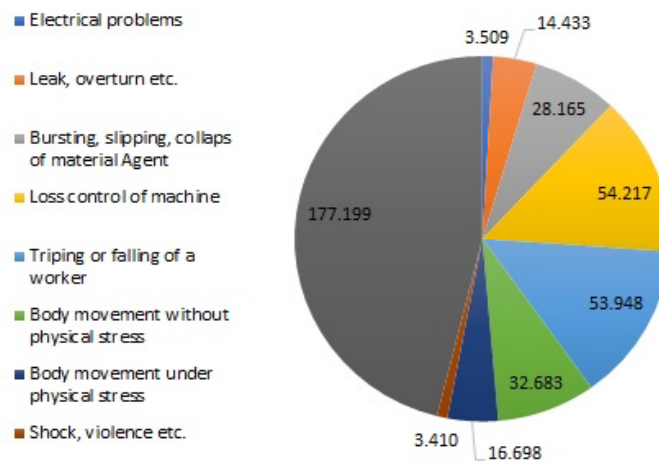


Figure 1. Occupational accidents in 2020 [1]

In Figure 1, the number of occupational accidents that occurred in 2020 and the reasons are given. As it can be seen in Figure 1, it is very important to determine the fall-related work accidents, which constitute the majority of injuries. The World Health Organization (WHO) defines fall as an event that causes a person coming to rest inadvertently on the ground or some lower level [4]. In Turkey in 2020, 215 out of 53.948 accidents due to falling resulted in the death of worker.

It is very important to react quickly to accidents caused by a fall as well as to identify these accidents. The faster the response to such accidents, the more the amount of deaths and permanent injuries caused by the accident will be reduced. It is difficult for employers with large numbers of employees to quickly find out that their workers have had an accident. For this purpose, Internet of Things (IoT), which emerged with the spread of technology and internet in the past years and shed light on the solutions of many problems, has been an important milestone in overcoming these difficulties [5].

IoT aims to enable sensors, people and environments to communicate and to make these tools a part of the internet environment [6,7]. The increasing use of the Internet with the spread of mobile devices has increased the popularity of IoT. Parallel to this the use of IoT in controlling industrial companies' working processes such as production, distribution, and transportation has also become widespread [8]. In addition to these areas of use in industry, IoT has begun to take its place in occupational safety as well [9, 10].

When the literature is analyzed, it is seen that many different methods are used for fall prediction. Kianoush et al. In their study, they developed a device-free prediction system using radio frequency (RF) signals to perform a fall prediction and to determine the location of the fallen person [11]. In the system, the returns of the RF signals that are continuously emitted to the environment are processed with the Hidden Markov model and prediction is performed. With their work, they achieved an accuracy of 98%. Hayat and Shan, on the other hand, made a fall prediction system by using an accelerometer [12]. The system created in the study sends a signal to the receiving side for help as a result of the acceleration values measured with the sensor exceed the determined threshold value. Lee et al. In their study, they preferred to use mobile phone instead of using an external sensor [13]. In the study, mobile phones were preferred due to their widespread use and they developed a special Android program for fall detection. They used SVM (Sum Vector Magnitude) for estimation and generally achieved an accuracy of 90%. In a different study made for iron workers, Kanghyeok et al. collected the data with wearable inertial measurement units (WIMU) and processed using the one-class support vector machine (OCSVM) algorithm [14]. As a result of the study, an accuracy of 87.5% was achieved.

2. Materials And Method

2.1. Materials

In the study, Arduino Micro development board and ATmega32U4 microcontroller were used. 6-axis MPU6050 accelerometer was used for acceleration measurement and Neo 6M GPS module was used for navigating the workers. The communication of the developed mobile system provided with the ESP8266 ESP-01 Wi-Fi module. In the study, the values taken from the accelerometer were first recorded on the SD card using the SD card module to create the data set. After that the recorded data are classified using the 1D CNN model.

2.1.1. MPU6050 accelerometer

MPU6050 is a 6-axis motion tracking device that combines 3-axis accelerometer and 3-axis gyroscope. In addition to these features, it has built-in Digital Motion Processor (DMP) [15]. MPU6050's gyroscope full-scale range is ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/sec (dps), and accelerometer full scale range is $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$. In Figure 2, the orientation and polarity of rotation of the MPU6050 can be seen.

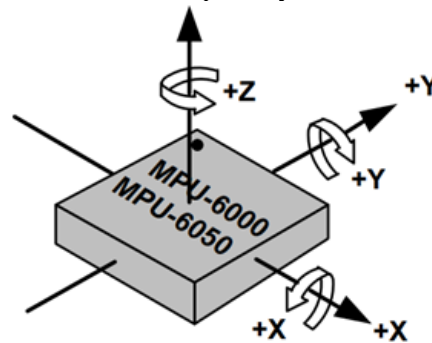


Figure 2. Orientation and polarity of rotation [15]

Communication is provided by Inter-Integrated Circuit (I2C-bus) protocol. Due to its small size and low energy requirement, the MPU6050 is often preferred in works such as wearable sensor and self-balancing robot [16-20].

2.1.2. Neo 6M GPS module

Neo 6M is an affordable GPS module with a size of 16 x 12.2 x 2.4 mm. Thanks to the acquisition engine with a 2 million correlator, the Neo 6M can make very large parallel time/frequency space searches [21].

2.1.3. ESP8266 ESP-01 Wi-Fi module

ESP8266 is a Wi-Fi module with integrated TCP / IP protocol stack and Wi-Fi Direct (P2P) support that

helps systems communicate over the internet. With its affordable price, easy usage, small size and low (3.3V) energy requirement, it is a frequently used module in IoT applications. In this study, ESP-01 Wi-Fi module is preferred from ESP8266 types in order to take advantage of IoT features.

2.1.4. Dataset

The data used for the study were collected using the MPU6055 sensor and SD card. The waist area, which is the closest to the center of gravity in the human body and is minimally affected by hand and leg movements, has been chosen as the sensor location [22]. The location of the sensor on the body is shown in Figure 3.

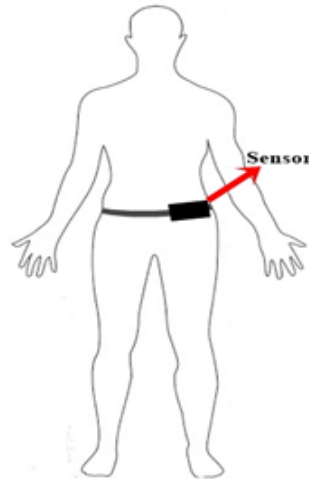


Figure 3. Placement of the sensor

Four different types of data were collected from five different people as falling forward, backward, right and left to cover all kinds of falling data. Only accelerometer data was collected from the MPU6055 sensor, and the resultant acceleration value was calculated using the values of the X, Y and Z axis collected from sensor and Equation 1. Sample of resultant accelerations calculated for walking, hanging and falling are shown in Figure 4. With this developed system, 50 data can be collected per second. Sample data was converted into signal form by taking 2-second resultant acceleration values.

$$R_{acc} = \sqrt{AccX^2 + AccY^2 + AccZ^2} \quad (1)$$

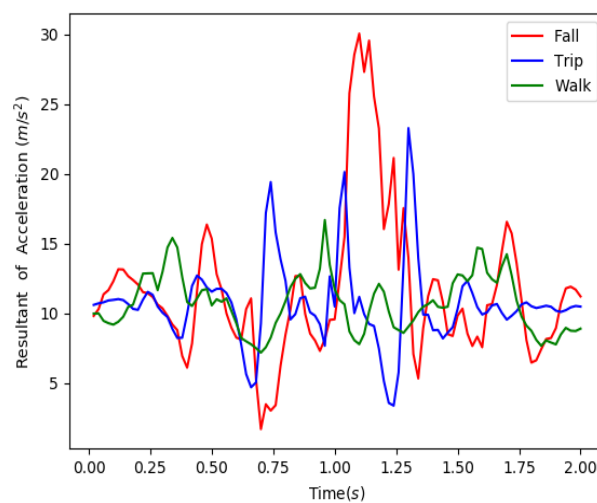


Figure 4. Sample resultant acceleration data

A total of 523 acceleration signals were used, including 132 falls, 98 trips and 293 walks. The distribution of signal data is given in Table 1.

Table 1. Distribution of the data used in the study (Çalışmada kullanılan verilerin dağılımı)

Data	Fall	Trip	Normal	Total
Train	96(%73)	67 (%68)	233(%79)	396
Valid	16(%12)	11(%12)	40(%13)	67
Test	20(%15)	20(%20)	20(%7)	60
Total	132	98	293	523

2.1.4. One-Dimensional convolutional neural network (1D CNN)

Convolutional neural network (CNN) is a method of deep learning that is frequently used in academic studies. There are different types of CNN models such as one-dimensional CNN (1D CNN), two-dimensional CNN (2D CNN) and three-dimensional CNN (3D CNN). 1D CNN is used on sequential data such as time series, 2D CNN in image processing studies, and 3D CNN on video and MR images [23].

The main difference between 1D CNN and 2D CNN is the size of the input variables. Because 1D CNN performs array operations instead of matrix operations, the computational complexity of 1D CNN is very low. For this reason, 1D CNN is frequently used in low-cost and real-time calculations [24]. Since the data used in 1D CNN is one-dimensional, the applied filter only shifts in one direction (Figure 5).

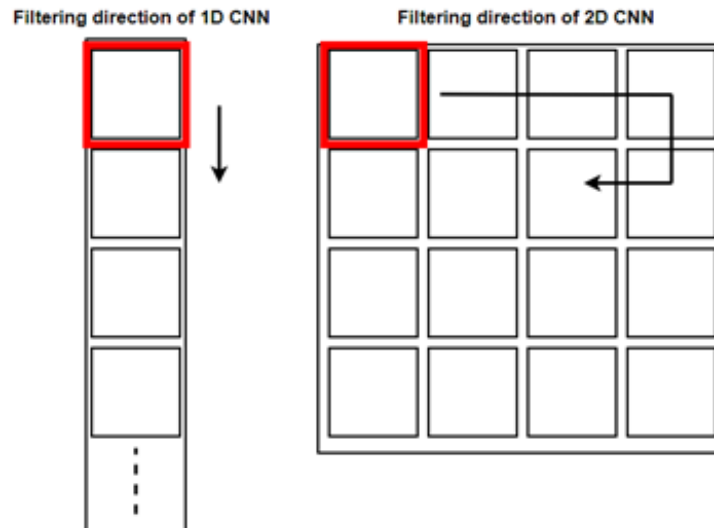


Figure 5. Filtering direction of 1D CNN and 2D CNN

In this study, 1D CNN method was used to evaluate and classify the data due to the type and properties of the data.

2.2. Method

Work flow diagram of the study is given in Figure 6. When Figure 6 is examined, it is seen that the study consists of two parts. In the first part, the data obtained from the MPU6050 accelerometer is modeled using the 1D CNN deep learning method. In the second part, the data from the accelerometer sensor is sent to a developed mobile application using the real time IoT method.

To carry out 1D CNN deep learning method; In the first stage, the data was recorded on the SD card using the MPU6050 acceleration sensor. In the second stage, which is the data preprocessing stage, normalization, loss data analysis and labeling operations are performed on the data and the data is prepared for the training process. In the third stage, a deep learning model was prepared by making use of 1D CNN layers. In Figure 7, the structure of the prepared deep learning model is given. When Figure 7 is examined, it is seen that the created model consists of 18 layers. In the input layer, an acceleration signal with a 100x1 size is given as input. The second and third layers of the model are convolutional layers, and the data are converted to 100x32 size by performing feature extraction. The fourth layer is one-dimensional maxpooling layer and the data is reduced to 50x32 size. The fifth and sixth layers are convolutional layers and feature extraction was performed on the data. The seventh

layer is the maxpooling layer and the data size has been reduced to 25x32. The eighth layer, the convolutional layer, was used for feature extraction on 25x32 size data. At the output of this layer, the data size has been converted to 25x64. The ninth layer is the batch normalization layer, and the normalization process was performed by centering and re-scaling the data in a certain range. In the tenth layer, the convolutional layer, feature extraction was performed over 25x64 size data. The eleventh layer is the batch normalization layer, and the normalization process was performed by centering and re-scaling the data in a certain range. The twelfth layer is the convolutional layer, which is used for feature extraction on the batch normalized data. In the thirteenth layer which is the maxpooling layer, the data was reduced to 12x64 size. In the fourteenth layer, flatten layer, the data has been converted into one-dimensional data. This layer was used to prepare data for the neural network. At this layer data of 768 size was obtained as an output. In the thirteenth layer, which is the Fully Connected layer, training process continued with 128 neurons with 768 data obtained. In the fifteenth layer, dropout layer, 60% of the neurons are ignored during training to prevent overfitting. In the fully connected layer, the sixteenth layer, the training process continues with 32 neurons. In the seventeenth layer, which is the dropout layer, 50% of the neurons are ignored to prevent overfitting. The last layer, the fully connected layer, is the output layer. In this layer, the classification process is carried out. In the designed 1D CNN model, the training process of the model was carried out in the next stage. During the training, every epoch result was validated with validation data set. Training continued until the desired result was achieved. The model obtained was tested with the test data and the accuracy of the model was evaluated. As seen in Figure 8, in the second stage of the study, the data from the sensors were sent to the mobile application using the real time IoT method. First, the IP address, resultant acceleration signal and GPS coordinate data from the sensors are synchronously sent to the PC using localhost. From the data sent to the PC, the resultant acceleration data is passed through the created 1D CNN model and the estimation process is performed. A warning message is sent to the mobile application if the output from the 1D CNN model is fall or trip. In the mobile application, information about the IP number of the person, GPS location coordinates and acceleration of fall or trip are displayed.

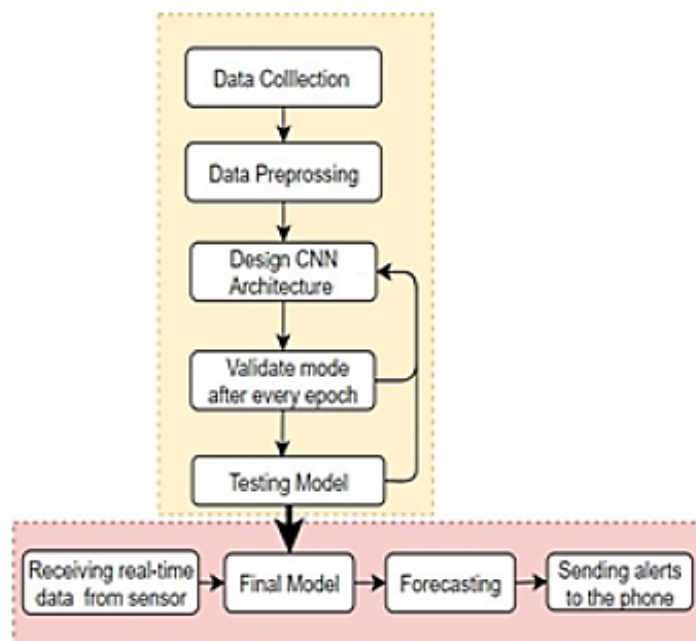


Figure 6. Work Flow Diagram

Table 2 presents the hyperparameters of the 1D CNN model created in the study. The learning rate was changed between 0.00001 and 0.1 and the learning rate value was selected in the area where the loss values decreased. The optimization method was chosen as Adam. Output activation function was preferred as Softmax due to conducting classification process. Epoch and batch sizes were determined by trial and error. In order to prevent excessive learning in the study, both fold cross-validation and validation of the model were validated with the dataset in the training phase. After the training, it was tested with the test data set. The trained model showed high performance on both validation and test datasets.

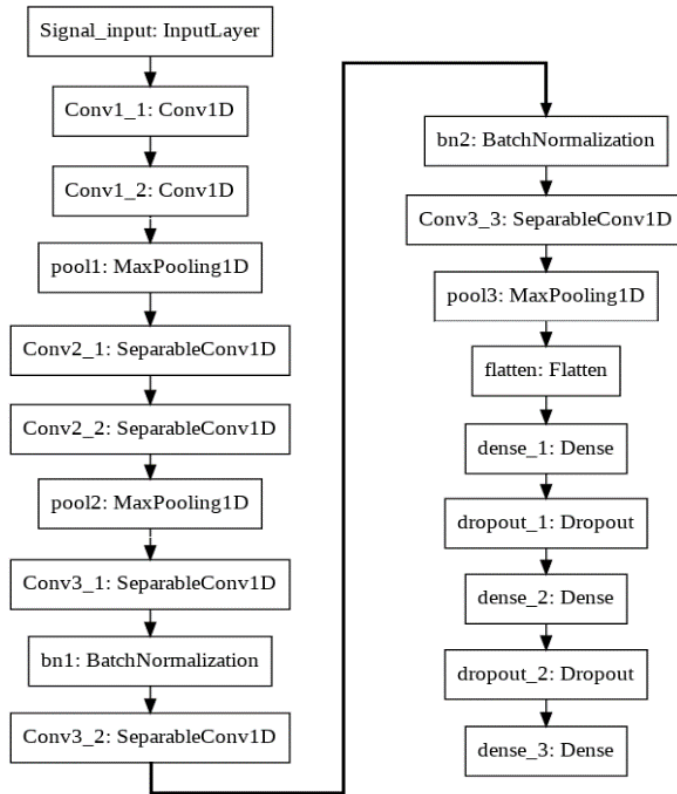


Figure 7. 1D CNN model used in this study

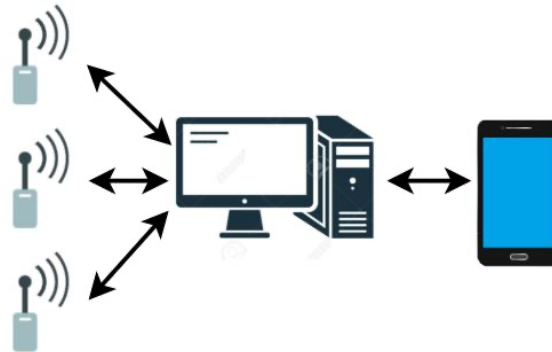


Figure 8. IoT architecture used in the study

Table 2. Hyperparameters of 1D CNN model

Hyperparameters	value
Learning rate	0.0001
Optimization method	adam
Input vector size	100
Output activation function	Softmax
Epochs	50
Batch size	16
Number of classes	3

3. Research Findings

In the study, the data received from the MPU6050 acceleration sensor is divided into three classes as walking, hanging and falling. In order to prevent overfitting of the 1D CNN model trained in the study, K-Fold cross-validation was used during the training phase. 76% of the data collected in the study was used as training, 13% as validation, and 11% as testing. The test dataset was never included in the

model during the training process of the model, and the validation dataset was used to evaluate the model at each epoch. The accuracy of the model performed well on both the validation dataset and the test dataset. In addition, the model was evaluated using different performance evaluation criteria such as sensitivity, specificity, F1 score, AUC and ROC curve of the obtained model. 1D CNN deep learning model was created for classification. The Confusion matrix of the test data is given in Figure 9. When the confusion matrix is analyzed, it is seen that the 1D CNN model estimates falls, trips and walks with 100% accuracy using 60 tests data. The 100% accuracy rate obtained from the confusion matrix indicates that the created 1D CNN model was successful.



Figure 9. Confusion matrix of test data (Test verilerine ait karmaşıklı matrisi)

The results obtained according to ROC, AUC, Sensitivity, Specificity, Accuracy and F-Score performance evaluation criteria of the 1D CNN model created are given in Table 3.

Table 3. Results of 1D CNN model according to Performance Evaluation Criteria

AUC	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Accuracy (%)	F Score
1.0	100	100	100	1.0

When Table 3 is examined, it is seen that the model works with 100% accuracy according to AUC, Sensitivity, Specificity, Accuracy and F Score performance evaluation criteria. Sensitivity, Specificity and F1 Score values given in Table 3 are the weighted average of all classes. The ROC curve of the 1D CNN model used in this study is plotted in Figure 10. When the curve is examined, it is seen that the ROC curve is almost the same as an ideal ROC curve. The fact that the ROC curve is very close to an ideal ROC curve indicates that the model is a successful model.

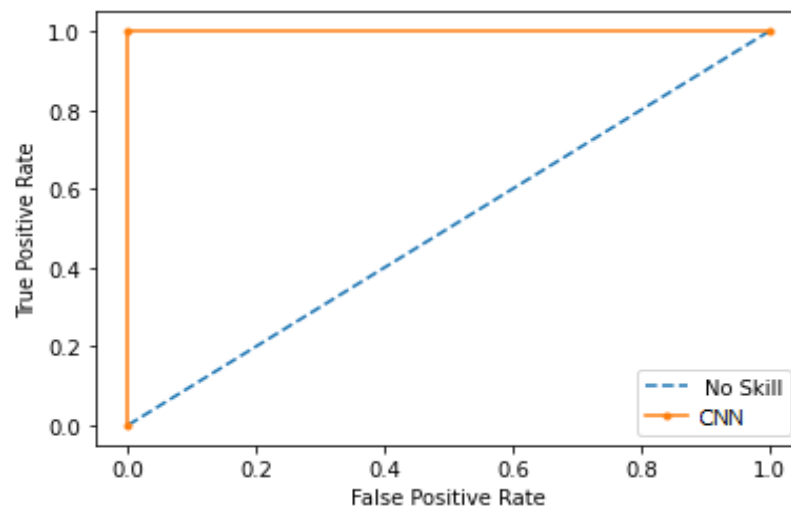


Figure 10. ROC curve of 1D CNN model

In Figure 11, the accuracy and loss values that occur during the training of the 1D CNN network used in the study are given. When the figure is examined, it is seen that the accuracy value of the model is constantly increasing and the loss value is constantly decreasing. This shows that the model is working correctly and there is no overfitting condition.

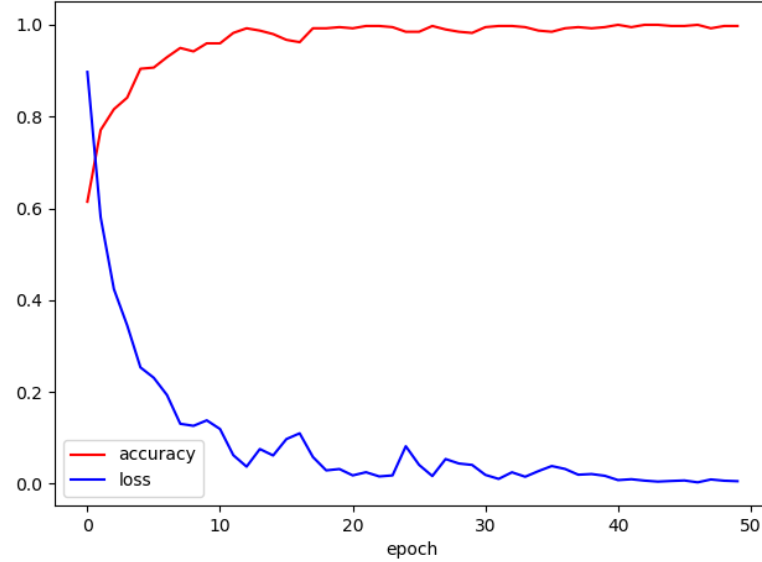


Figure 11. 1D CNN model training loss and accuracy

In the second stage of the study, the data received from the MPU6050 accelerometer was transferred to the PC via localhost. With the software developed in the Python programming language, the data received from the sensors are passed through the created 1D CNN network and classified as fall, trip or walk. When a fall or trip class result was detected, a warning message was sent to the mobile application containing GPS and IP address. In Figure 12, an example of the communication between mobile application and the sensor with the help of the PC is given.

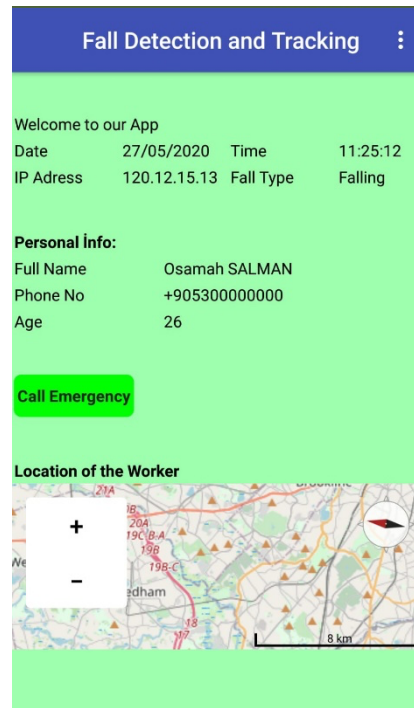


Figure 12. Sensor - Mobile application communication

When Figure 12 is examined, the data received from the sensor is sent to the mobile application after being classified using the 1D CNN model on the PC. As shown in the figure, Date, Time, IP address and

Fall Type variables are given in the upper region of the mobile application. In the middle part of the application, personal data of the person to which the sensor is connected is given. When the fall type feature comes to a value belonging to Fall or Trip class, the mobile application gives a warning message in the form of Call Emergency. At the bottom of the mobile application, the GPS coordinate information of the person to which the Sensor is connected is shown on the map. Using this map information, the location of the person can be determined.

4. Discussion

As a result of this study, the estimation and reporting of the accidents that occurred as a result of falling in the business areas was realized. The 1D CNN model created showed a 100% success in the fall and trip prediction. According to the results of the estimation, if the employee experiences an accident due to a fall, this information can be successfully transferred to the created mobile application over the internet.

With this study, it is aimed to reduce the permanent injuries and deaths that may occur by providing early detection and rapid reporting of accidents caused by a fall. The low false positive value obtained in this study supports its active use by increasing the confidence in the warning system. Systems with a high number of false positives in industrial use cause the system not to be taken seriously and even shut down afterwards.

The high accuracy rate obtained in this study reveals the success of the system. However, no matter how good the system is, unexpected situations may occur during the use of the system in real scenarios. Dynamic feature of the working environments may affect the accuracy rate. Examples of such things are the wearable sensor system being worn incorrectly by the employee, the diversity of people working in the workplace (height, weight, age, etc.), or connection problems that could interfere the communication of the system. The developed system detects the falls after they occur and can be used to respond quickly to the accident. Even if it is not possible to predict and completely prevent the accident before it happens, physical improvements can be made by tracking trips and falls from the same places.

In addition to these, collecting different data for different study areas and training the model with these data will increase the usage area of the model. Although the obtained 100% accuracy rate seems successful, it is estimated that this rate will decrease with the increase in the number and variety of data.

5. Conclusion

With the rapid advancement of technology, the use of software technologies and mobile devices are increasing. Artificial intelligence software has an important place among these software technologies. One of the important uses of artificial intelligence is occupational accidents. One of the most important points for security in industrial workplaces is to quickly locate the person who has an occupational accident. For this reason, fast and accurate detection of accidents caused by falls is very important. In this study, using the 1DCNN deep learning technique, a deep learning model for fall, trip and walk prediction was designed using the data obtained from the MPU6055 acceleration sensor. The results of the designed model are given below.

- In this study, the fall, trip and walking classification with the data collected from the MPU6050 accelerometer was classified using 1D CNN with 100% accuracy.
- The trained model was tested with 60 test data including fall, trip and walk, and the results were shown on the confusion matrix.
- The trained model was evaluated according to AUC, Sensitivity, Specificity, Accuracy and F Score performance evaluation criteria. All performance evaluation criteria yielded 100% accuracy.

In the second phase of the study, the data read from the accelerometer and GPS sensors were sent to the PC every 4 seconds synchronously. Since the acceleration data sent to the PC were taken in 2-second periods during the training, the classification process was performed by dividing the 4-second data into two parts and passing it through the one-dimensional CNN model. The following results were sent to the mobile application when a crash or fall was detected as a result of the classification process.

- Sensor IP address
- GPS coordinate information
- Fall type
- Employee identification information

In the study, artificial intelligence methods were used to detect occupational accidents caused by falls with the data obtained from the acceleration sensor. The artificial intelligence model has achieved a very successful result with 100% accuracy in detecting occupational accidents due to falls. The method used in the study is not only limited to accidents due to falls in the workplaces, but can also be used in rapid intervention to the accident in areas such as homes, hospitals and elderly nursing homes for the detection of falls.

In the future studies, dataset can be strengthened by collecting data from more diverse group of people for the development of this system. In addition, actions such as jumping, picking up objects, sitting may be confused with falling can be added to the dataset. To prevent communication problems, much stronger Wi-Fi modules can be preferred.

Ethics Approval

The study was carried out with the ethical approval of the Ethics Committee of Isparta University of Applied Sciences, with the decision dated 16.11.2020 and numbered 35/05.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] SGK, "SGK İstatistik Yıllıkları", [sgk.gov.tr](http://www.sgk.gov.tr), SGK 2009, 01.01.2020. [Online]. Available: http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari. [Accessed: Dec. 30, 2021].
- [2] A. Palali and J.C. van Ours, "Workplace accidents and workplace safety: on under-reporting and temporary jobs," *Labour*, vol. 31, no. 1, pp. 1-14, 2017. doi:10.1111/labr.12088
- [3] K. Jilcha, D. Kitaw and B. Beshah, "Workplace innovation influence on occupational safety and health," *African Journal of Science Technology Innovation and Development*, vol. 8, no. 1, pp. 33-42, 2016. doi:10.1080/20421338.2015.1128044
- [4] Who.int. "Falls", who.int, falls, 16.01.2018. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>. [Accessed: June 03, 2020].
- [5] I. Tcareenko, T. Nguyen Gia, A.M. Rahmani, T. Westerlund, P. Liljeberg and H. Tenhunen, "Energy-efficient IoT-enabled fall detection system with messenger-based notification," *Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol. 192, pp. 19-26, 2017. doi:10.1007/978-3-319-58877-3_3
- [6] A.V. Dastjerdi and R. Buyya, "Fog computing: helping the internet of things realize its potential," *Computer*, vol. 49, no. 8, pp. 112-116, 2016. doi:10.1109/mc.2016.245
- [7] B. Duman, and K. Özsoy, "Endüstri 4.0 perspektifinde akıllı tarım", *In Proc. of the 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry, April 2019, Antalya, Türkiye, pp. 540-555.*
- [8] L.W.F. Chaves and Z. Nochta, "Breakthrough towards the internet of things," *Unique Radio Innovation for the 21st Century*, Berlin, Germany, Ranasinghe, Q. Sheng, S. Zeadally, Eds, Berlin: Springer, 2010. doi:10.1007/978-3-642-03462-6_2
- [9] J. Lee and M.H. Kim, "Work type classification of gas safety workers and interaction function design for IoT-based app development," *Journal of the Korea Convergence Society*, vol. 8, no. 5, pp. 45-52, 2017. doi:10.15207/JKCS.2017.8.5.045
- [10] Z. Yinghua, F. Guanghua, Z. Zhigang, H. Zhian, L. Hongchen and Y. Jixing, "Discussion on application of IoT technology in coal mine safety supervision," *Procedia Engineering*, vol. 43, pp. 233-237, 2012. doi:10.1016/j.proeng.2012.08.040
- [11] S. Kianoush, S. Savazzi, F. Vicentini, V. Rampa and M. Giussani, "Device-free RF human body fall detection and localization in industrial workplaces," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 351-362, 2017. doi:10.1109/jiot.2016.2624800

- [12] A. Hayat and M. Shan, "Fall detection system for labour safety," *In Proc. of the 2018 International Conference on Engineering, ICE 2018, London, United Kingdom, July 4-6, 2018 Applied Sciences, and Technology, IEEE, 2018*, pp. 1-4. doi:10.1109/iceast.2018.8434476
- [13] D. Lee, J.Y. Lee, K.D. Jung. "The design of the Fall detection algorithm using the smartphone accelerometer sensor," *International Journal of Advanced Culture Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 54-62, 2017. doi:10.17703/IJACT.2017.5.2.54
- [14] K.Yang, C.R. Ahn, M.C. Vuran, S.S. Aria. "Semi-supervised near-miss fall detection for ironworkers with a wearable inertial measurement unit," *Automation in Construction*, vol. 68, pp.194-202, 2016. doi:10.1016/j.autcon.2016.04.007
- [15] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 MPU-6000/MPU-6050, "Product Specification", invensense.tdk.com, 01.01.2013. [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. [Accessed May 31, 2020].
- [16] P. Zhang and Z. Liu, "Gesture recognition method based on inertial sensor MPU6050," *Transducer and Microsystem Technologies*, vol. 37, no. 1, pp. 46-53, 2018.
- [17] D.A. Fitriani, W. Andhyka and D. Risqiwati, "Design of monitoring system step walking with MPU6050 sensor based android," *Journal of Informatics, Network, and Computer Science*, vol. 1, no. 1, pp. 1, 2017. doi:10.21070/joincs.v1i1.799
- [18] A. Yudhana, J. Rahmawan and C.U.P. Negara. "Flex sensors and MPU6050 sensors responses on smart glove for sign language translation," *Materials Science and Engineering*, vol. 403, no. 1, pp. 12-32, 2018. doi:10.1088/1757-899x/403/1/012032
- [19] Y. Chakravarthy, K. Sowjanya, A. Srinath and R.P. Paladugu, "Determination of angle measurement using mems based sensor MPU6050 in the development process of a prosthetic leg," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 116, no. 5, pp. 57-61, 2017. doi: 10.14419/ijet.v7i2.7.11430
- [20] J. Han, X. Li and Q. Qin. "Design of two-wheeled self-balancing robot based on sensor fusion algorithm," *International Journal of Automation Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 216-221, 2014. doi:10.20965/ijat.2014.p0216
- [21] U-blox. "NEO-6 u-Blox 6 GPS Modules", u-blox.com, 05.04.2011. [Online]. Available: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). [Accessed May 31, 2020].
- [22] H. Gjoreski, M. Lustrek and M. Gams, "Accelerometer placement for posture recognition and fall detection," *In Proc. of the 2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments, Nottingham, United Kingdom, July 25-28, 2011, IEEE, 2011*. pp. 47-54. doi:10.1109/ie.2011.11
- [23] W. Wang, M. Zhu, J. Wang, X. Zeng and Z. Yang, "End-to-end encrypted traffic classification with one-dimensional convolution neural networks," *In Proc. of the 2017 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics, ISI 2017, Beijing, China, July 22-24, 2017, IEEE, 2017*. pp. 43-48. doi:10.1109/isi.2017.8004872
- [24] S. Kiranyaz, O. Avci, O. Abdeljaber, T. Ince, M. Gabbouj and D.J. Inman. "1D convolutional neural networks and applications: a survey," *Mechanical Systems And Signal Processing*, vol. 151, no. 107398, 2021. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107398

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Advanced Tree-Seed Algorithm for Large Sized Job Shop Scheduling Problems

Mehmet Akif Şahman^{*a}

Submitted: 28.02.2022 Revised: 28.03.2022 Accepted: 12.04.2022 doi:10.30855/gmbd.0705004

ABSTRACT

Keywords: Tree-Seed Algorithm
Job Shop Scheduling Problems
Meta-Heuristic Algorithms
Mutation Operators

^{a*} Selcuk University,
Technology Faculty,
Dept. of Electrical and Electronics Eng.
42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1718-3777
e mail: asahman@selcuk.edu.tr

*Corresponding author:
asahman@selcuk.edu.tr

Globalizing economies force manufacturing companies to develop themselves and take new measures. Correct planning of the production process is vital in order to increase the competitiveness of companies. For this reason, the Job shop Scheduling Problem (JSP) has a great role in the planning of production in companies. In JSPs, the determined jobs in the manufacturing companies must be run in the correct order on existing and suitable machines. Planning to complete the work in the company in the shortest possible time on the smachines and in the order, is a combinatorial difficult optimization problem. Both exact methods and meta-heuristic approaches are used in solving JSPs, which is an NP-hard optimization problem. Depending on the number of jobs and machines in the companies, the size of this optimization problem changes. In JSPs where the number of jobs and machines is high, precise methods may be insufficient to produce solutions in operational time. Therefore, meta-heuristic algorithms are frequently used in solving JSPs. In this work, the exploration and exploitation capabilities in the Tree Seed Algorithm (TSA) are enhanced with the swap, symmetry, and shift mutation operators. The proposed new TSA (Advanced TSA-ATSA) algorithm is compared on large-sized JSPs with meta-heuristic algorithms which are well known in the literature. The proposed ATSA has shown promising performance in experimental studies.

Büyük Boyutlu Atölye Tipi Çizelgeleme Problemleri için Gelişmiş Ağaç-Tohum Algoritması

ÖZ

Küreselleşen ekonomiler, imalatçı firmaların kendilerini geliştirmeye ve yeni önlemler almaya zorlamaktadır. Üretim sürecinin doğru bir şekilde planlanması firmaların rekabet edebilme gücünü arttırmak için hayattır. Bu nedenle firmalardaki üretimin planlanmasında Atölye tipi Çizelgeleme Probleminin (AÇP) büyük rolü vardır. AÇP'de, üretici firmalardaki belirlenen işlerin mevcut ve uygun makinelerde doğru sırada çalıştırılması gerekmektedir. Firmadaki işlerin belirlenen makinelerde ve sırada mümkün olan en kısa sürede tamamlanması için hazırlanan planlama ise kombinatoriyal zorlu bir optimizasyon problemidir. NP-Zor bir optimizasyon problemi olan AÇP'lerinin çözümünde hem kesin metotlar hem de meta-sezgisel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Firmalardaki iş ve makine sayılarına bağlı olarak, bu optimizasyon probleminin boyutu değişmektedir. Yüksek sayısaki iş ve makine sayısına sahip AÇP'lerde, kesin metotlar operasyonel zamanda çözüm üretmekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, AÇP'lerinin çözümünde meta-sezgisel algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Ağaç Tohum Algoritması'ndaki (ATA) keşif ve sömürü yetenekleri, takas, simetri ve kaydırma mutasyon operatörleri ile geliştirilmiştir. Önerilen yeni ATA (Gelişmiş ATA-GATA) algoritması, büyük boyutlu AÇP'ler literatürde iyi bilinen meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Önerilen GATA, deneysel çalışmalarda umut verici bir performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağaç-
Tohum Algoritması
Atölye Tipi Çizelgeleme Problemi
Meta-Sezgisel Algoritmalar
Mutasyon Operatörleri

1. Introduction

In recent years, there has been a compelling development in production manufacturing due to reasons such as technological innovations in the industrial field, increase in demand, and commercial globalization. Manufacturing enterprises must be able to contend with problems such as on-time delivery, rapid response to product changes, and multiple product options to survive in the marketplace [1]. Therefore, enterprises require transparency over production scheduling. This is a process that can only be achieved with realistic and effective scheduling. Due to the realities of the current situation, the Job shop Scheduling Problem (JSP) which is the core of job planning in manufacturing is of great practical importance [2].

Due to the discrete and combinatorial nature of JSP, is an NP-HARD optimization problem [3]. Exact deterministic methods that produce precise results are suggested for solving NP-HARD problems such as JSP. However, even if these methods benefit from today's technological developments, they cannot produce results in a reasonable time in solving large-sized discrete problems [4]. Even a small increase in the size of an NP-Hard optimization problem such as JSP provides an exponential increase in computation time. For this reason, meta-heuristic algorithms that can reach the near-optimum in a reasonable computation time are used, even if they do not guarantee the optimum.

Meta-heuristic algorithms are artificial intelligence-based approaches that are generally inspired by intelligent behaviours in nature and model these behaviours. One of the best known of these meta-heuristic algorithms is the particle swarm optimization algorithm proposed by Kennedy and Eberhart [5]. The population-based PSO algorithm is inspired by the foraging strategies of fish and bird flocks in nature. It has been preferred in many optimization studies because it is easily adaptable and has few design parameters [6-9]. Inspired by the nectar and pollen search approach of honey bees in nature, the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm proposed by Karaboga is one of the well-known meta-heuristic algorithms [10]. The ABC algorithm is preferred by researchers because of its success in local and global search and its ability to resist problems such as local optima [11-15]. The grey wolf optimizer (GWO) proposed by Mirjalili et al. [16], especially due to its hierarchy in social status and modeling of its hunting strategies, has been used by researchers in solving optimization problems in recent years [17-19]. Inspired by the random distribution and growth of trees and their seeds in nature, the Tree-Seed Algorithm (TSA) that is population based was proposed by Kiran for the solution of continuous optimization problems [20]. TSA is a preferred meta-heuristic algorithm in optimization problems due to its exploration and exploitation capacity, its ability to converge to the optimum, and its avoidance of computational complexity.

Different meta-heuristic algorithms have been studied to improve the solution quality of the JSP problem. Song et al. [21] used the PSO and Simulated Annealing algorithm(SA) as a hybrid (HPSOSA) to solve JSP problems. Pongchairerks and Kachitvichyanukul [22] proposed a new approach for JSPs by hybridizing the variable neighborhood search algorithm with the PSO algorithm. In their other studies, Pongchairrks and Kachitvichyanukul obtained more effective results by suggesting the combination of parameter tuning PSO (PT-PSO) and JSP-PSO algorithms suggested for JSPs [23]. Sha and Hsu [24] adapted the update processes of the continuous PSO for discrete optimization problems and produced effective results for large-sized JSPs by making use of the tabu search algorithm. Du and Liu [25] proposed the Improved ABC (IABC) algorithm by adding together the mutation operator to the ABC algorithm. Jiang and Zhang [26] have studied JSPs and flexible JSPs to demonstrate the success of the GWO algorithm in solving combinatorial problems. Jiang [27] proposed a new discretization approach to solve JSPs using the GWO algorithm working in the continuous search space, increased the diversity of the initial population, and hybridized the variable neighbourhood search algorithm with GWO and used it in solving JSPs. There are other meta-heuristic algorithms used in the literature for JSPs [28-30].

According to the literature search, the performance of the TSA algorithm in both small-sized and large-sized JSPs has not been carried out before. Apart from that, due to the structure of the TSA algorithm, since the objective function is run more than once during the seed production process, an experimental study based on iteration would not be fair, so in this study, the results are discussed according to the number of function evaluations (FEs). In the seed generation process in the TSA approach, a new approach called Advanced TSA (ATSA) has been proposed by including swap, symmetry, and shift

mutation operators. By testing JSPs on well-known and frequently used meta-heuristic (PSO, ABC, and GWO) algorithms in the literature, comparisons were made with the ATSA proposed in this study, on solution quality and solution time.

The remainder of the study is organized as follows. Problem definition and encoding scheme are given in Section 2. TSA algorithm and new proposed ATSA approach are given Section 3 and 4, respectively. Section 5 gives the experimental studies. Conclusion and future works are presented in section 6.

2. Problem Definition and Encoding Scheme

JSP is known as NP-Hard, which has n jobs and m machines to process these jobs and is a difficult optimization problem to solve. In JSP, the number of probable solutions can be calculated as $n!^m$ depending on the number of jobs (n) and machines (m). Thus, a very small change in the number of jobs or machines will cause an exponential increase in the number of possible solutions. There are some presuppositions stated below in JSP. In JSP problems, there are n sets of jobs $J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ and m sets of machines $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_m\}$. Each job has a fixed set of operations $O_{ij} = \{O_{i1}, O_{i2}, O_{i3}, \dots, O_{im}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$) on which certain machine it will work in which order and for which time. It is assumed that the processes of a job can run on only one machine at a time in the specified order, the specified machine order is not able to change, and there will be no interruptions or waiting during the process. The total number of operations in JSP is $n \times m$. Each operation has makespan described as $C_{ij} = \{C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, \dots, C_{im}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$). As shown in Eq.1 below, the makespan (C_{max}) which is taken as the objective function is the total unit time between the completion of the first operation and the completion of the last operation [26].

$$\min C_{max} = \min \max C_{im} \quad (i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

Meta-heuristic algorithms are often proposed to solve continuous optimization problems. However, JSPs is a discrete optimization problem. Therefore, there is a need for an encoding scheme that transforms the meta-heuristic algorithms used in this study from continuous search space to discrete search space. Bean [31] suggested the random-key encoding scheme (RK) that is often used in JSPs. The following Eq.2 is used to convert the continuous values to the order of operations.

$$\vec{S} = (\tau_l \bmod n) + 1, l = 1, 2, \dots, n \times m \quad (2)$$

Where, \vec{S} is the vector showing the implementation order of the operations of the jobs, τ_l is integer sequence of the operation of the l th job, n is the number of jobs and m is the number of machines. Let us suppose, we have two jobs and three machines as shown in Table 1.

Job	Machine			Processing Order
	1	2	3	
1	8	6	3	{1,3,2}
2	4	10	8	{2,1,3}

For the 2-job and 3-machine JSP given in Table 1, the continuous data of $\{-2.1, 4.5, 4.9, 1.2, -4.3, 3.8\}$ in the range of -5 to 5 are randomly generated respectively. First of all, these continuous data are ordered from smallest to largest, and the sequence numbers are placed in the position where they are located, like $\{2, 5, 6, 3, 1, 4\}$. Then this ordering is converted into the order of operations of things as $\{1, 2, 1, 2, 2, 1\}$ using Eq.2. This sequencing shows the order of operations of the jobs in the JSP problem as $\{O_{1,1}, O_{2,1}, O_{2,1}, O_{2,2}, O_{2,3}, O_{1,3}\}$ (Table 2). For example, $O_{2,3}$ indicates that the 2nd job here will be processed on the 3rd machine.

	-2.1	4.5	4.9	1.2	-4.3	3.8
Real Values	-2.1	4.5	4.9	1.2	-4.3	3.8
Integer Series (φ)	2	5	6	3	1	4
Job Indexes	1	2	1	2	2	1
Operation Sequence	$O_{1,1}$	$O_{2,1}$	$O_{1,2}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	$O_{1,3}$

When the operations specified in Table 2 are run according to the given order, the Gantt chart becomes as in Figure 1 below. As can be seen in the Gantt chart, the last completed operation is the 3rd operation of the 2nd job ($O_{2,3}$) and makespan (C_{max}) is 24 units of time.

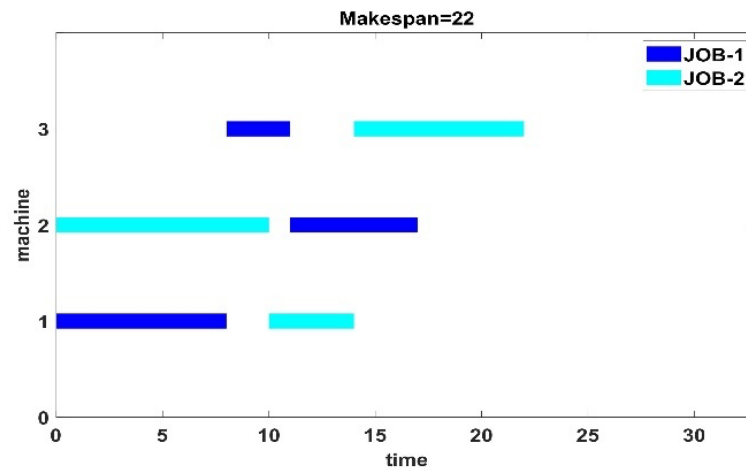


Figure 1. Gantt scheme of the example

3. Tree-Seed Algorithm

The TSA proposed by Kiran [20] has been used to solve continuous optimization problems by modeling the natural process of trees and seeds [32-35]. In population-based TSA, trees disperse their own seeds in random locations [36-38]. Those that grew up from these seeds that spread in nature and are of better quality than the tree from which they spread continue to live.

TSA uses location information of trees and seeds. The area in which they spread in nature corresponds to the search space in optimization problems. The exploration and exploitation process is carried out both by making use of randomly selected neighbor solutions and by using the search tendency (st) parameter in the TSA approach. How many seeds will be produced in the seed production process depends on the NS (number of seed) parameter.

Algorithm 1. Pseudo code of the TSA for JSP

```

1  Define parameters ( $N, ST, MaxFEs$ )
2  Initialize population for  $N$  trees randomly, % $N$  is pop. size
3  Use encoding scheme for each tree (RK)
4  Evaluate objective function,  $FEs=N$ 
5  while  $FEs < maxFEs$ 
6     for  $i=1$  to  $N$  //seed mechanism
7        Determine NS, Select  $r$  (random neighbor tree)
8     for  $j=1$  to NS
9        for  $k=1$  to  $D$ 
10       if  $rand < ST$  use Eq.3
11          Check the min and max boundaries of seed
12       else use Eq.4
13          Check the min and max boundaries of seed
14       end if
15     end for
16   end for
17   Use RK for each seeds
18   Evaluate seed,  $FEs=FEs+NS$ 
19   Determine best seed
20   if best seed  $<$  tree, change tree with best seed
21   end for
22   Store the best solution so far
23   end while

```

Output : Best Solution (min obj. func. value)

Figure 2. Pseudo code of the TSA algorithm

The NS parameter is randomly determined to be between 10% and 25% of the total tree population. In the TSA algorithm, two equations (Eq.3 and Eq.4) are used in the seed generation process.

$$\overrightarrow{Seed} = \overrightarrow{Tree} + \vec{r} \cdot (\overrightarrow{Best} - \overrightarrow{Tree}_r) \quad (3)$$

$$\overrightarrow{Seed} = \overrightarrow{Tree} + \vec{r} \cdot (\overrightarrow{Tree} - \overrightarrow{Tree}_r) \quad (4)$$

where, \overrightarrow{Seed} is the position vector of the seeds to be produced, \overrightarrow{Tree} is the position vector of the tree from which seed will be produced. \overrightarrow{Best} is the position vector of the tree for the best solution, \overrightarrow{Tree}_r is the position vector of the relevant parameters of the trees that will be randomly selected up to the number of parameters. \vec{r} is a vector of randomly selected values in the range of $[-1,1]$. The st parameter is decisive in the selection of the equation to be preferred in seed production. If the st parameter is less than the randomly selected value in the range of $[0,1]$, Eq.3 is used, otherwise Eq.4 is used. Pseudo code of the TSA is given as follows in Figure 2.

4. Advanced Tree-Seed Algorithm

In the exploration and exploitation process of the TSA approach in the solution space, both the position information of the randomly selected trees and the position information of the best solution is used. In this study, the seed production process of TSA is tried to be improved. In the seed generation process, three different mutation operators are used, except for the position information of the random neighbor and best tree. These mutation operators (swap, symmetry, and shift mutation operators) are presented as follows.

- **Swap operator:** One of the most used mutation operators is the swap operator. The swap operator is used to exchange values at two randomly ($r1=3, r2=6$) determined positions (Figure 3).

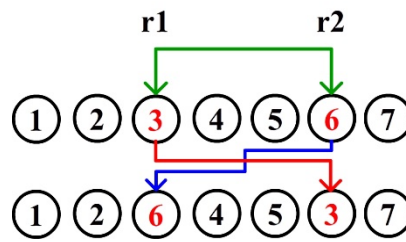


Figure 3. Swap Operation

- **Symmetry operator:** The symmetry operator works with two parameters. The first parameter ($r1=4$) is the position to get symmetry in the given vector, and the second parameter ($r2=2$) is how many values will be symmetrical (Figure 4).

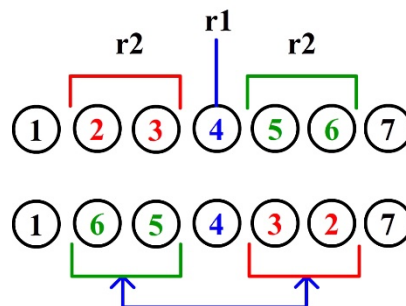


Figure 4. Symmetry Operation

- **Shift operator:** In this mutation operator, the value at the parameter ($r1=2$) position with determined is placed at the position of the second parameter ($r2=5$) value. Intermediate values are shifted one left.

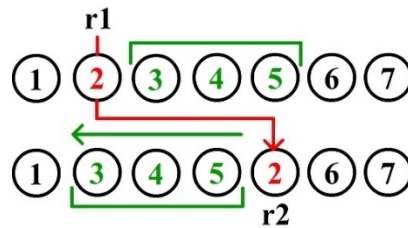


Figure 5. Shift Operation

After the operators (Swap, Symmetry, and Shift) given above are included in the seed generation process of the TSA algorithm, the pseudo-code of the new seed generation process of the ATSA approach proposed in this study is given in the figure below. Except for the seed mechanism of the ATSA approach, the parts are the same as for the TSA. Therefore, these sections are not shown in the pseudocode.

Algorithm 2. Pseudo code of seed mechanism

```

1  while FEs < maxFEs
2    for i=1 to N //seed mechanism
3      Determine NS, Select r (random neighbor tree)
4      for j=1 to NS
5        if rand<0.5
6          if rand<ST
7            Use swap operator for best tree, use RK
8            Evaluate, FEs=FEs+1
9          else
10           Use Symmetry operator for rth neighbor(Sy)
11           Use Shift operator for best tree (Sh)
12           Use RK, and Evaluate for Sy and Sh, FEs=FEs+2
13           Select the best seed between Sy and Sh
14         end if
15       else
16         if rand<0.75 use Eq.3
17           Check the min and max boundaries of seeds
18           Use RK and Evaluate, FEs=FEs+1
19         else use Eq.4
20           Check the min and max boundaries of seed
21           Use RK and Evaluate, FEs=FEs+1
22         end if
23       end if
24     end for
25     Determine best seed
26     if best seed < tree , change tree with best seed
27   end for
28   Store the best solution so far
29 end while

```

Output : Best Solution (min obj. func. value)

Figure 6. Pseudo code of seed mechanism

5. Experimental Studies

In this study, 40 benchmark problems proposed by Taillard [39] for different shop scheduling problems have been used. While choosing the benchmark problems, attention has been paid to the fact that they were in groups of five and different sizes.

The size of the smallest benchmark problem is 225 ($n=15$, $m=15$) while the size of the largest dimension problem is 2000 ($n=100$, $m=20$). Thus, the performance of meta-heuristic algorithms can be evaluated on benchmark problems of different sizes (Table 3)

The parameter values of the metaheuristic algorithms (PSO, TSA, ABC, GWO, and ATSA proposed in this study) used in the study are given in Table 4.

Table 3. Benchmark problem set

Name	Jobs x Machines	Dimension	Name	Jobs xMachines	Dimension
ta01	15×15	225	ta41	30×20	600
ta02	15×15	225	ta42	30×20	600
ta03	15×15	225	ta43	30×20	600
ta04	15×15	225	ta44	30×20	600
ta05	15×15	225	ta45	30×20	600
ta11	20×15	300	ta51	50×15	750
ta12	20×15	300	ta52	50×15	750
ta13	20×15	300	ta53	50×15	750
ta14	20×15	300	ta54	50×15	750
ta15	20×15	300	ta55	50×15	750
ta21	20×20	400	ta61	50×20	1000
ta22	20×20	400	ta62	50×20	1000
ta23	20×20	400	ta63	50×20	1000
ta24	20×20	400	ta64	50×20	1000
ta25	20×20	400	ta65	50×20	1000
ta31	30×15	450	ta71	100×20	2000
ta32	30×15	450	ta72	100×20	2000
ta33	30×15	450	ta73	100×20	2000
ta34	30×15	450	ta74	100×20	2000
ta35	30×15	450	ta75	100×20	2000

Table 4. Peculiar parameters of algorithms

Parameters	Algorithms				
	PSO	TSA	ABC	GWO	ATSA
Population Size (N)	40	40	40	40	40
Dimension Size (D)	n x m	n x m	n x m	n x m	n x m
dmin ,dmax	-5, 5	-5, 5	-5, 5	-5, 5	-5, 5
Max_FEs	D*1000	D*1000	D*1000	D*1000	D*1000
C1	2	NA	NA	NA	NA
C2	2	NA	NA	NA	NA
maxLimit	NA	NA	40	NA	NA
L	NA	N*0.1	NA	NA	N*0.1
U	NA	N*0.25	NA	NA	N*0.25
ST	NA	0.2	NA	NA	0.2
\bar{a}	NA	NA	NA	2 to 0	NA

PSO, TSA, ABC, and GWO algorithms have been re-coded in order to carry out experimental studies. These algorithms are meta-heuristic algorithms suggested to work in continuous search space and to solve continuous problems. In order to use these algorithms in discrete optimization problems (JSP), RK encoding scheme is used. Algorithms evaluated in experimental studies were run 20 times under the same conditions and the results were saved. For each benchmark problem, the mean (Mean), standard deviation (Std), median value (Med), best-worst solution(min-max) (Table 5), and elapsed time (Table 6) of the results of 20 runs were presented.

The environment in which the experimental studies are carried out on notebook PC with an Intel Core i7 machine, CPU 2.6 GHz, 16 GB of RAM, Windows 10 (64) system, and MATLAB® software. In Table 5, the average of the results obtained from all benchmark problems of the relevant algorithms are given in the AVG line, and the number of winners in the comparison of the statistical values of the algorithms are given as Winner/Total (W/T).

When the results of 20 studies of algorithms are examined in Table 5, it is seen that the ATSA approach proposed in this study outperforms the average, median, minimum, and maximum values for all benchmarking problems. According to the average results of the comparison problems, the closest result to the ATSA approach was obtained from the PSO algorithm, and the result obtained from the PSO algorithm was improved by 12.04% with ATSA. The worst result was obtained from the TSA algorithm, and the result was improved by 30.33% compared between the ATSA and TSA algorithms. According to these results, the ATSA proposed in the study performed better than the original TSA algorithm.

Table 5. Obtained results of the algorithms

Problem	PSO				TSA				ABC				GWO				ATSA			
	Mean	Med	Min	Max	Mean	Med	Min	Max	Mean	Med	Min	Max	Mean	Med	Min	Max	Mean	Med	Min	Max
ta01	1519.20	1518.5	1468	1569	1724.55	1725.5	1651	1776	1680.25	1682	1636	1749	1732.00	1742.5	1641	1769	1444.8	1445	1347	1517
ta02	1540.25	1547.5	1465	1601	1725.60	1736.5	1645	1772	1679.70	1679	1623	1763	1745.10	1744	1712	1786	1435	1421	1374	1543
ta03	1553.05	1544.5	1494	1626	1736.70	1737.5	1709	1766	1670.40	1671	1591	1731	1714.10	1728	1623	1764	1430.6	1433.5	1353	1504
ta04	1630.10	1631	1567	1705	1716.35	1724.5	1651	1747	1659.50	1667.5	1574	1711	1713.30	1722	1634	1754	1438.1	1432.5	1366	1600
ta05	1589.55	1593.5	1531	1644	1736.60	1738.5	1672	1781	1694.25	1708.5	1620	1759	1734.55	1739.5	1624	1798	1448.5	1448	1344	1535
ta11	1880.10	1875.5	1778	1950	2091.70	2098	2017	2136	2035.00	2036	1971	2115	2083.50	2091	1996	2134	1663.7	1661.5	1581	1731
ta12	1870.35	1864	1831	1932	2104.95	2105.5	2009	2169	2065.20	2082	1974	2125	2113.95	2106.5	2055	2177	1685.6	1678.5	1566	1851
ta13	1871.50	1864.5	1798	1947	2060.50	2069	1986	2101	2005.10	2010.5	1951	2068	2063.15	2069.5	1991	2108	1638.8	1647.5	1517	1756
ta14	1768.55	1765.5	1718	1827	2000.05	1999	1918	2044	1948.20	1944.5	1895	2012	1997.80	1998.5	1928	2040	1589.9	1579.5	1518	1719
ta15	1843.10	1833.5	1769	1989	2079.90	2080	1969	2127	2020.65	2026	1955	2070	2072.85	2083	1990	2118	1685	1676	1607	1792
ta21	2156.30	2173.5	2091	2212	2553.15	2550	2507	2601	2482.15	2490	2403	2548	2534.15	2530	2492	2572	1990.6	1985.5	1919	2109
ta22	2162.05	2155.5	2072	2266	2526.95	2527.5	2473	2565	2434.35	2447.5	2313	2497	2521.75	2521	2470	2570	1944.3	1924	1843	2050
ta23	2083.30	2076.5	2027	2157	2476.85	2481	2422	2511	2389.20	2391	2280	2472	2466.15	2471	2391	2496	1902.1	1906	1791	2012
ta24	2142.80	2153	2074	2205	2520.80	2524.5	2457	2566	2461.25	2465.5	2392	2508	2515.55	2509.5	2464	2577	1994.2	2005.5	1872	2124
ta25	2139.65	2144.5	2081	2178	2477.75	2484	2406	2523	2430.45	2437	2342	2488	2485.70	2492.5	2435	2521	1934.3	1935	1825	2090
ta31	2365.10	2359.5	2273	2491	2794.75	2801.5	2696	2854	2705.80	2712	2584	2788	2792.70	2806	2683	2846	2152.9	2151.5	2050	2255
ta32	2567.65	2592.5	2411	2665	2908.25	2926.5	2785	2961	2833.95	2849	2725	2903	2918.00	2926	2854	2974	2242.8	2245.5	2153	2337
ta33	2490.90	2491	2412	2590	2916.10	2920	2873	2951	2843.25	2848.5	2783	2899	2909.45	2910	2853	2957	2250.9	2238.5	2154	2352
ta34	2473.95	2483.5	2344	2581	2868.40	2868	2803	2916	2776.10	2783	2698	2842	2830.30	2843.5	2727	2897	2234.5	2219.5	2171	2373
ta35	2532.15	2526.5	2449	2633	2867.95	2878.5	2785	2910	2800.40	2813	2740	2858	2872.90	2882	2786	2930	2351.7	2347.5	2214	2562
ta41	2841.20	2822.5	2741	2966	3402.60	3412	3304	3477	3327.20	3335	3195	3390	3405.40	3407.5	3338	3443	2571.9	2587	2395	2657
ta42	2868.70	2863	2758	2985	3317.20	3323	3239	3373	3233.65	3234.5	3144	3352	3343.05	3341	3281	3387	2520.4	2504	2361	2689
ta43	2801.60	2783	2707	2919	3260.90	3258.5	3216	3302	3191.45	3193.5	3041	3263	3262.90	3263	3150	3332	2424.7	2404.5	2312	2717
ta44	2891.15	2889.5	2778	3006	3392.90	3392.5	3345	3445	3304.70	3310.5	3207	3376	3394.20	3398.5	3330	3441	2544.5	2532.5	2382	2678
ta45	2857.00	2846.5	2772	2966	3356.35	3358	3303	3404	3275.20	3281.5	3127	3354	3345.20	3356	3183	3417	2484.9	2482.5	2366	2576
ta51	3793.75	3761.5	3703	3996	4288.05	4298.5	4222	4340	4186.00	4201	3992	4251	4294.65	4302	4186	4374	3337.2	3331	3243	3524
ta52	3741.85	3716.5	3613	3896	4221.90	4234	4100	4279	4140.35	4157	4036	4192	4224.55	4215.5	4159	4292	3371.4	3360	3235	3563
ta53	3410.65	3371	3285	3632	4051.95	4055	4000	4111	3937.85	3954	3815	3999	4048.25	4059	3944	4109	3136.2	3122.5	3023	3290
ta54	3475.65	3440.5	3381	3689	4088.15	4084.5	4022	4144	4001.45	4004	3905	4090	4095.55	4096.5	4038	4162	3206.9	3206	3056	3308
ta55	3719.10	3698.5	3573	3868	4187.90	4196.5	4036	4251	4106.05	4114	3997	4172	4185.60	4205.5	4049	4263	3261.3	3264	3145	3418
ta61	4064.60	4061	3910	4220	4801.55	4807.5	4735	4861	4683.70	4695	4530	4796	4799.65	4802.5	4711	4856	3521.7	3527	3385	3684
ta62	4150.40	4126	4039	4385	4899.75	4899	4836	4941	4814.30	4811.5	4716	4925	4904.10	4913.5	4734	4974	3548	3563.5	3365	3625
ta63	3818.20	3802	3653	4103	4604.80	4607.5	4508	4667	4502.65	4510.5	4394	4585	4567.15	4578.5	4369	4640	3322.3	3321.5	3212	3530
ta64	3718.65	3722.5	3600	3817	4519.65	4528.5	4418	4615	4420.40	4407.5	4303	4539	4542.15	4551	4464	4627	3333.8	3342.5	3239	3523
ta65	3852.25	3855	3732	3966	4666.30	4665	4609	4706	4577.05	4585	4475	4649	4662.15	4659.5	4567	4757	3371.9	3367	3277	3548
ta71	7187.45	7189.5	6915	7345	8371.05	8389.5	8209	8424	8260.55	8280	8034	8363	8347.00	8365	8188	8456	6441	6448.5	6255	6614
ta72	6768.15	6781	6396	6966	7984.40	7990	7878	8053	7829.20	7825.5	7698	7919	7986.30	8000.5	7853	8062	5910.9	5918	5680	6052
ta73	7112.05	7118	6905	7323	8326.20	8335	8227	8405	8196.85	8200	7942	8391	8303.25	8317.5	8188	8405	6527	6521	6324	6792
ta74	6689.95	6730	6290	6950	8076.15	8093.5	7949	8172	7982.35	8005.5	7822	8071	8108.80	8107.5	7997	8223	5987.3	6013	5797	6108
ta75	7308.95	7306.5	7019	7533	8281.00	8281.5	8165	8371	8117.60	8137	7978	8212	8288.60	8300	8181	8343	6293.1	6282	6056	6592
AVG	3181.27	3176.95	3060.58	3307.48	3699.67	3704.63	3618.88	3752.95	3617.59	3624.65	3510.03	3694.88	3698.14	3703.90	3606.48	3758.78	2839.35	2836.99	2716.83	2982.50
W/T	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	0/48	48/48	48/48	48/48	48/48

When the elapsed times (sec) of the algorithms are analyzed separately, it is seen in Table 6 that ATSA achieved effective results for benchmark problems in a shorter time than other meta-heuristic algorithms.

Table 6. Elapsed time(s) of the algorithms in JSPs

Problem	PSO	TSA	ABC	GWO	ATSA	Problem	PSO	TSA	ABC	GWO	ATSA
ta01	10.62	9.84	7.25	14.28	5.59	ta41	67.06	63.02	40.79	93.19	32.37
ta02	10.64	9.95	7.14	14.87	5.51	ta42	67.08	62.40	40.74	92.40	34.45
ta03	10.59	9.87	7.12	14.76	5.54	ta43	67.16	62.55	40.71	91.00	34.54
ta04	10.65	9.91	7.06	14.64	5.71	ta44	67.06	62.42	40.72	91.90	32.63
ta05	10.46	9.90	7.05	14.62	5.59	ta45	67.84	62.48	40.58	91.14	33.24
ta11	17.90	16.86	11.69	25.15	8.77	ta51	98.47	94.81	61.21	150.96	51.02
ta12	17.75	16.77	11.65	25.07	8.98	ta52	98.19	93.78	61.20	165.25	51.52
ta13	17.84	16.75	11.59	24.98	8.81	ta53	98.43	93.89	61.20	173.27	51.64
ta14	17.76	16.76	11.59	24.92	8.87	ta54	101.13	93.77	61.07	174.05	53.39
ta15	17.77	16.68	11.62	24.93	8.70	ta55	106.27	97.66	60.97	177.39	51.02
ta21	30.49	28.92	19.40	43.32	14.89	ta61	200.46	185.20	105.87	331.11	90.07
ta22	30.81	28.99	19.33	43.38	14.85	ta62	205.70	197.31	105.95	333.13	90.83
ta23	30.68	28.90	19.34	43.10	14.91	ta63	203.71	197.84	105.96	300.66	88.11
ta24	30.55	28.84	19.33	43.05	14.89	ta64	206.30	197.79	108.91	302.13	88.06
ta25	30.74	28.81	19.35	42.90	15.22	ta65	214.24	201.86	111.61	298.76	88.02
ta31	38.32	35.79	23.76	53.82	19.00	ta71	788.35	713.20	395.36	1086.65	323.21
ta32	38.61	35.80	23.77	53.39	18.93	ta72	707.66	623.32	397.00	1021.44	322.50
ta33	38.17	35.66	23.72	53.22	18.91	ta73	710.71	594.60	414.71	854.60	336.77
ta34	38.24	35.74	23.71	53.25	18.90	ta74	709.07	594.44	392.64	843.49	326.04
ta35	38.25	35.71	23.63	53.19	18.77	ta75	613.23	593.48	367.95	848.01	317.04
AVG	24,34	22,82	15,45	34,04	12,07	AVG	269,91	244,29	150,76	376,03	124,82

Since 40 benchmark problems are considered in this study and convergence graphs for all of them cannot be given, the first 4 benchmark problems were chosen to show the convergence of meta-heuristic algorithms. The convergence graphs of the algorithms are given in Figure 7.

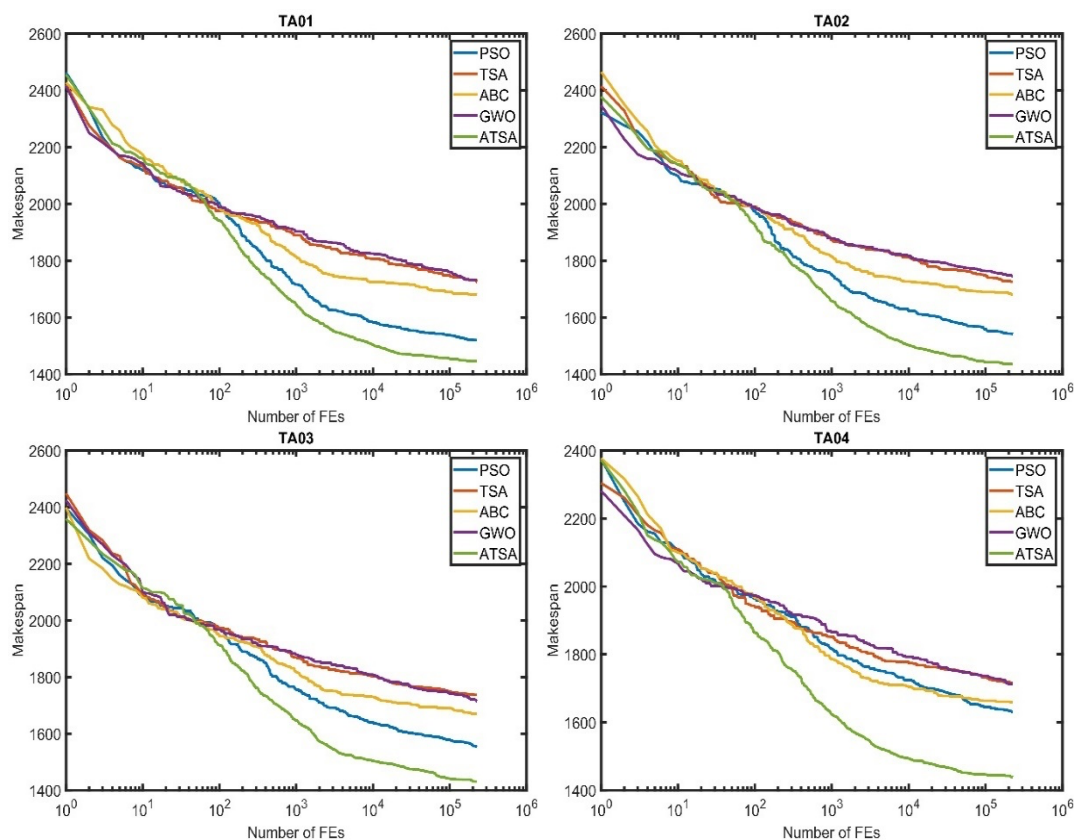


Figure 7. Convergence graphs of the algorithms in ta01-ta04

According to the convergence graphs, it is seen that the TSA and GWO algorithms converge very slowly and are insufficient to increase the solution quality. The closest convergence to the ATSA approach was obtained from the PSO algorithm. In all of the convergence graphs in Figure 7, it appears that the ATSA

approach converges slowly at the first stage but continues to converge until the given number of FEs is completed.

Also, the Gantt chart of all algorithms belonging to the ta01 benchmark problem is given in Figure 8. Looking at the Gantt charts, it is seen that other algorithms cannot efficiently place the operations of the jobs and therefore the time lost increases. Such a situation causes other algorithms to increase the completion time.

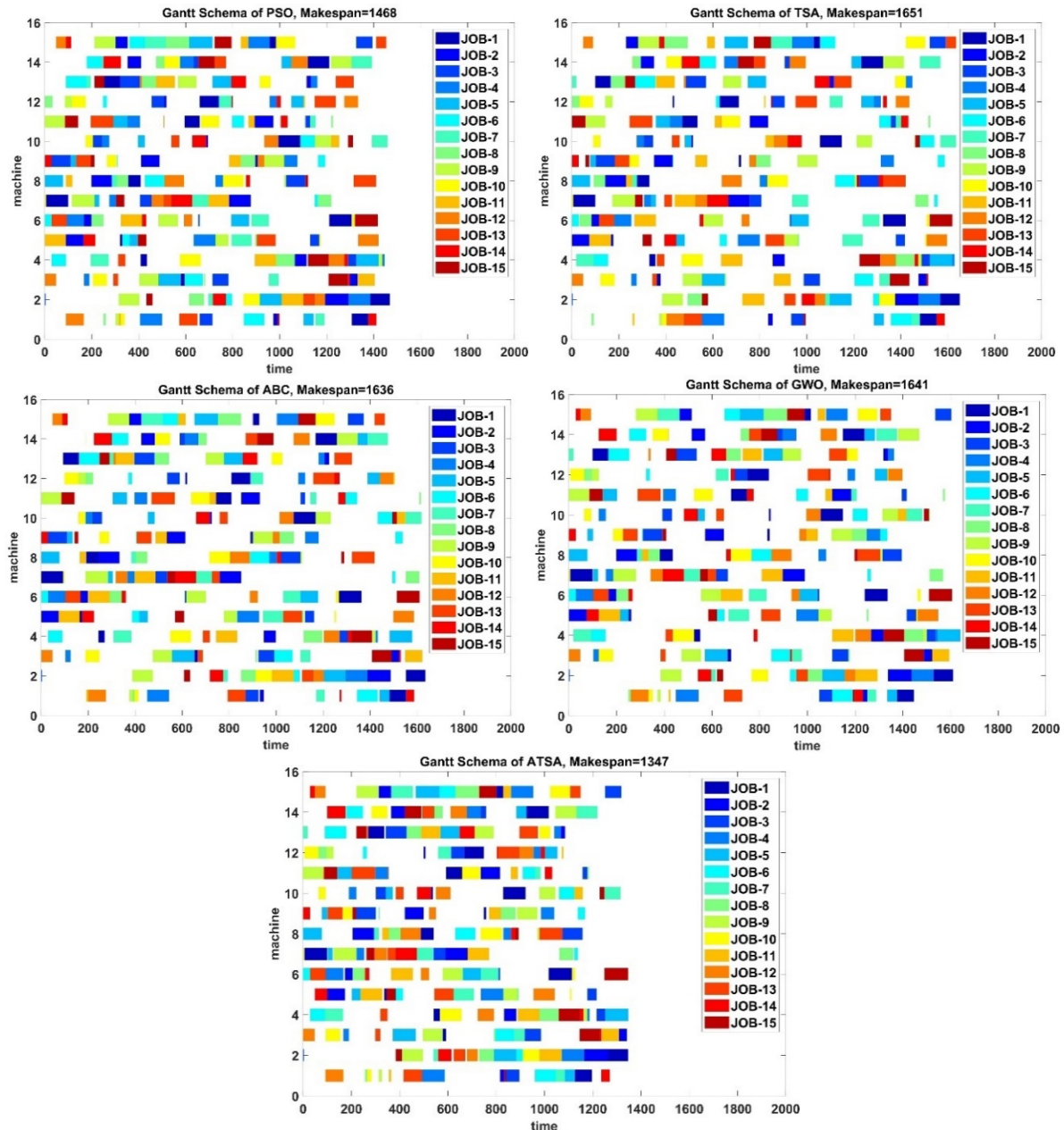


Figure 8. Gantt schemas of the algorithms for ta01

Two nonparametric statistical tests (Wilcoxon signed rank [40] and Friedman's test [41]) are used to evaluate the performances of the algorithms in this study.

Wilcoxon signed-rank test with a significance level of %5 is performed between ATSA and other algorithms and it is seen that ATSA produced remarkable results for all benchmark problems with other algorithms. With Friedman's test, the results obtained by the algorithms in the benchmark problems are statistically ranked (Table 7).

Table 7. Friedman's rank test of all algorithms

Problem	PSO	TSA	ABC	GWO	ATSA	Problem	PSO	TSA	ABC	GWO	ATSA
ta01	1.90	4.30	3.30	4.40	1.10	ta41	2.00	4.40	3.10	4.50	1.00
ta02	1.95	4.20	3.20	4.60	1.05	ta42	2.00	4.25	3.15	4.60	1.00
ta03	2.00	4.60	3.23	4.18	1.00	ta43	2.00	4.40	3.15	4.45	1.00
ta04	2.25	4.40	2.95	4.40	1.00	ta44	2.00	4.55	3.00	4.45	1.00
ta05	2.00	4.20	3.58	4.23	1.00	ta45	2.00	4.40	3.25	4.35	1.00
ta11	2.00	4.45	3.35	4.20	1.00	ta51	2.00	4.48	3.18	4.35	1.00
ta12	2.00	4.15	3.50	4.35	1.00	ta52	2.00	4.45	3.10	4.45	1.00
ta13	2.00	4.38	3.23	4.40	1.00	ta53	2.00	4.50	3.05	4.45	1.00
ta14	2.00	4.50	3.30	4.20	1.00	ta54	2.00	4.45	3.10	4.45	1.00
ta15	2.05	4.50	3.15	4.30	1.00	ta55	2.00	4.45	3.25	4.30	1.00
ta21	2.00	4.53	3.15	4.33	1.00	ta61	2.00	4.45	3.20	4.35	1.00
ta22	2.00	4.50	3.00	4.50	1.00	ta62	2.00	4.30	3.20	4.50	1.00
ta23	2.00	4.55	3.05	4.40	1.00	ta63	2.00	4.70	3.10	4.20	1.00
ta24	2.00	4.50	3.10	4.40	1.00	ta64	2.00	4.38	3.05	4.58	1.00
ta25	2.00	4.25	3.35	4.40	1.00	ta65	2.00	4.50	3.20	4.30	1.00
ta31	2.00	4.48	3.15	4.38	1.00	ta71	2.00	4.45	3.35	4.20	1.00
ta32	2.00	4.45	3.30	4.25	1.00	ta72	2.00	4.35	3.10	4.55	1.00
ta33	2.00	4.60	3.05	4.35	1.00	ta73	2.00	4.45	3.30	4.25	1.00
ta34	2.00	4.70	3.25	4.05	1.00	ta74	2.00	4.10	3.25	4.65	1.00
ta35	2.00	4.50	3.15	4.35	1.00	ta75	2.00	4.45	3.05	4.50	1.00

According to Friedman's test, it is seen that the best ranking value is obtained with the ATSA approach (Figure 9).

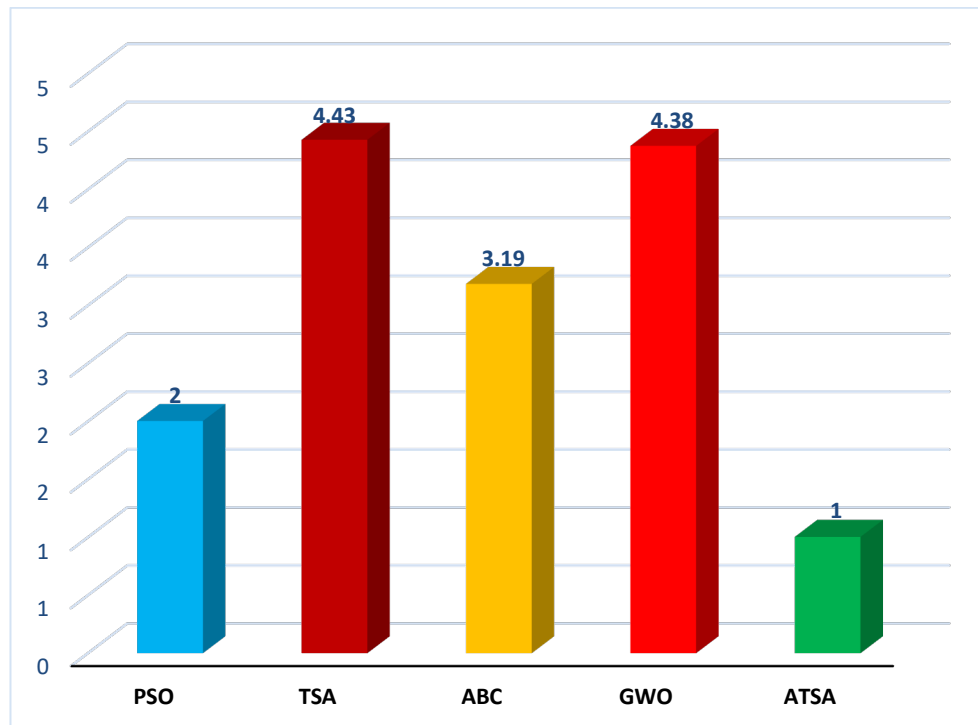


Figure 9. Average of Friedman's rank test results

By the Wilcoxon signed-rank test, it is desired to check whether the ATSA approach proposed in this study produces considerable results compared to other algorithms (Table 8). In Table 8, the (+) value shows that the null hypothesis is rejected, and (-) the null hypothesis is not rejected at the determined significance level.

Table 8. Wilcoxon sign test results

Problem	PSO		TSA		ABC		GWO		ATSA	
ta01	0.0001	(+)	0.8832	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta02	0.0001	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta03	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta04	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta05	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta11	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta12	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta13	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta14	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta15	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8832	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta21	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8820	(+)	1	(-)
ta22	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8832	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta23	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8832	(+)	1	(-)
ta24	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta25	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta31	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8832	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta32	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta33	0.8832	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta34	0.8858	(+)	0.8832	(+)	0.8858	(+)	0.8807	(+)	1	(-)
ta35	0.8832	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta41	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta42	0.8832	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta43	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8832	(+)	1	(-)
ta44	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta45	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta51	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta52	0.8832	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta53	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta54	0.8832	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta55	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta61	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta62	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta63	0.8832	(+)	0.8832	(+)	0.8845	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta64	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta65	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8820	(+)	1	(-)
ta71	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta72	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	1	(-)
ta73	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta74	0.8858	(+)	0.8845	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)
ta75	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8858	(+)	0.8845	(+)	1	(-)

6. Conclusion and Future Works

In this study, the ATSA approach, which is an improved version of the TSA algorithm, is proposed. In the ATSA approach, three different mutation operators are gradually included in the seed generation mechanism of the basic TSA algorithm. To demonstrate the success of the ATSA approach, trials have been carried out on large-sized JSP problems.

For these experimental studies, 40 different and large-sized JSP benchmarks were selected. In experimental studies, basic versions of well-known meta-heuristic algorithms (PSO, ABC, and GWO) are discussed along with the TSA algorithm in the literature. The runtime environment (computer in use, experimental work done on the same software-MATLAB, etc.), run conditions (number of FEs, number of populations, etc.) were kept the same so that all metaheuristics were evaluated fairly. The results of the experimental studies and statistical approaches were evaluated in detail. It has been observed that the ATSA proposed in this study provides a statistically significant improvement over both the TSA algorithm and the meta-heuristic algorithms well known in the literature. In addition, the

elapsed time by the ATSA algorithm in generating results has been significantly reduced compared to other meta-heuristic algorithms.

In future studies, new approaches can be suggested to improve the performance of JSPs by the discrete TSA algorithm, or other state-of-the-art algorithms which can run in the discrete search space.

Conflict Of Interest Statement

No conflict of interest was declared by the author.

References

- [1] H. Mousavipoor, H. Farughi, and F. Ahmadizar, "Job shop scheduling problem based on learning effects, flexible maintenance activities and transportation times," *Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 107-119, 2019.
- [2] Y. Yu, "A Research Review on Job Shop Scheduling Problem," in *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 253: EDP Sciences, p. 02024, doi:10.1051/e3sconf/202125302024
- [3] M. R. Garey, D. S. Johnson, and R. Sethi, "The complexity of flowshop and jobshop scheduling," *Mathematics of operations research*, vol. 1, no. 2, pp. 117-129, 1976, doi:10.1287/moor.1.2.117
- [4] R. Buddala and S. S. Mahapatra, "An integrated approach for scheduling flexible job-shop using teaching-learning-based optimization method," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 15, no. 1, pp. 181-192, 2019, doi:10.1007/s40092-018-0280-8
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, 1995, vol. 4: IEEE, pp. 1942-1948, doi:10.1109/ICNN.1995.488968
- [6] Y. Fan, P. Wang, A. A. Heidari, H. Chen, and M. Mafarja, "Random reselection particle swarm optimization for optimal design of solar photovoltaic modules," *Energy*, vol. 239, p. 121865, 2022, doi:10.1016/j.energy.2021.121865
- [7] L. Zhang, C. P. Lim, Y. Yu, and M. Jiang, "Sound classification using evolving ensemble models and Particle Swarm Optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 116, p. 108322, 2022, doi:10.1016/j.asoc.2021.108322
- [8] N. Karasekreter, M. A. Şahman, F. Başçiftçi, and U. Fidan, "PSO-based clustering for the optimization of energy consumption in wireless sensor network," *Emerging Materials Research*, vol. 9, no. 3, pp. 776-783, 2020, doi:10.1680/jemmr.20.00107
- [9] M. A. Şahman, A. A. Altun, and A. O. Dündar, "A new MILP model proposal in feed formulation and using a hybrid-linear binary PSO (H-LBP) approach for alternative solutions," *Neural Computing and Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 537-552, 2018, doi:10.1007/s00521-016-2467-5
- [10] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," vol. 200, pp. 1-10, 2005.
- [11] T. Ye, W. Wang, H. Wang, Z. Cui, Y. Wang, J. Zhao and M. Hu, "Artificial bee colony algorithm with efficient search strategy based on random neighborhood structure," *Knowledge-Based Systems*, vol. 241, p. 108306, 2022, doi:10.1016/j.knosys.2022.108306
- [12] G. Yavuz, B. Durmuş, and D. Aydın, "Artificial Bee Colony Algorithm with Distant Savants for constrained optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 116, p. 108343, 2022, doi:10.1016/j.asoc.2021.108343
- [13] M. S. Kiran, "The continuous artificial bee colony algorithm for binary optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 33, pp. 15-23, 2015, doi:10.1016/j.asoc.2015.04.007
- [14] M. S. Kiran, H. Hakli, M. Gunduz, and H. Uguz, "Artificial bee colony algorithm with variable search strategy for continuous optimization," *Information Sciences*, vol. 300, pp. 140-157, 2015, doi:10.1016/j.ins.2014.12.043
- [15] E. Kaya, S. A. Uymaz, and B. Kocer, "Boosting galactic swarm optimization with ABC," *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 10, no. 9, pp. 2401-2419, 2019, doi:10.1007/s13042-018-0878-6
- [16] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
- [17] J. Adhikary and S. Acharyya, "Randomized Balanced Grey Wolf Optimizer (RBGWO) for solving real life optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 117, p. 108429, 2022, doi:10.1016/j.asoc.2022.108429
- [18] L. Yin and Z. Sun, "Distributed multi-objective grey wolf optimizer for distributed multi-objective economic dispatch of multi-area interconnected power systems," *Applied Soft Computing*, vol. 117, p. 108345, 2022, doi:10.1016/j.asoc.2021.108345
- [19] K. Tütüncü, M. A. Şahman, and E. Tuşat, "A hybrid binary grey wolf optimizer for selection and reduction of reference points with extreme learning machine approach on local GNSS/leveling geoid determination," *Applied Soft Computing*, vol. 108, p. 107444, 2021, doi:10.1016/j.asoc.2021.107444

- [20] M. S. Kiran, "TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 19, pp. 6686-6698, 2015, doi:10.1016/j.eswa.2015.04.055
- [21] X. Song, Y. Cao, and C. Chang, "A hybrid Algorithm of PSO and SA for Solving JSP," in *2008 Fifth international conference on fuzzy systems and knowledge discovery*, 2008, vol. 1: IEEE, pp. 111-115, doi:10.1109/FSKD.2008.430
- [22] P. Pongchairerks and V. Kachitvichyanukul, "A comparison between algorithms VNS with PSO and VNS without PSO for job-shop scheduling problems," *International Journal of Computational Science*, vol. 1, no. 2, pp. 179-191, 2007.
- [23] P. Pongchairerks and V. Kachitvichyanukul, "A two-level particle swarm optimisation algorithm on job-shop scheduling problems," *International Journal of Operational Research*, vol. 4, no. 4, pp. 390-411, 2009.
- [24] D. Sha and C.-Y. Hsu, "A hybrid particle swarm optimization for job shop scheduling problem," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 791-808, 2006, doi:10.1016/j.cie.2006.09.002
- [25] B. Z. Yao, C. Y. Yang, J. J. Hu, G. D. Yin, and B. Yu, "An improved artificial bee colony algorithm for job shop problem," in *Applied Mechanics and Materials*, 2010, vol. 26: Trans Tech Publ, pp. 657-660, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.26-28.657
- [26] T. Jiang and C. Zhang, "Application of grey wolf optimization for solving combinatorial problems: job shop and flexible job shop scheduling cases," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 26231-26240, 2018, doi:10.1109/ACCESS.2018.2833552
- [27] T. Jiang, "A hybrid grey wolf optimization for job shop scheduling problem," *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, vol. 17, no. 03, p. 1850016, 2018, doi:10.1142/S1469026818500165
- [28] H. Xiong, S. Shi, D. Ren, and J. Hu, "A survey of job shop scheduling problem: the types and models," *Computers & Operations Research*, vol. 142, p. 105731, 2022, doi:10.1016/j.cor.2022.105731
- [29] D. Yang, M. Wu, D. Li, Y. Xu, X. Zhou, and Z. Yang, "Dynamic opposite learning enhanced dragonfly algorithm for solving large-scale flexible job shop scheduling problem," *Knowledge-Based Systems*, vol. 238, p. 107815, 2022, doi:10.1016/j.knosys.2021.107815
- [30] Y. Sun, J.-S. Pan, P. Hu, and S.-C. Chu, "Enhanced Equilibrium Optimizer algorithm applied in job shop scheduling problem," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 33, pp. 1-27, 2022, doi:10.1007/s10845-021-01899-5
- [31] J. C. Bean, "Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization," *ORSA journal on computing*, vol. 6, no. 2, pp. 154-160, 1994, doi:doi.org/10.1287/ijoc.6.2.154
- [32] J. Jiang, R. Han, X. Meng, and K. Li, "TSASC: tree-seed algorithm with sine-cosine enhancement for continuous optimization problems," *Soft Computing*, vol. 24, pp. 18627-18646, 2020, doi:10.1007/s00500-020-05099-w
- [33] J. Jiang, M. Xu, X. Meng, and K. Li, "STSA: A sine Tree-Seed Algorithm for complex continuous optimization problems," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 537, p. 122802, 2020, doi:10.1016/j.physa.2019.122802
- [34] A. C. Cinar, "Training Feed-Forward Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Networks with a Tree-Seed Algorithm," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, no. 12, pp. 10915-10938, 2020, doi:10.1007/s13369-020-04872-1
- [35] A. C. Cinar, H. Iscan, and M. S. Kiran, "Tree-Seed algorithm for large-scale binary optimization," *KnE Social Sciences*, vol. 2017, pp. 48-64, 2018, doi:10.18502/kss.v3i1.1396
- [36] M. A. Sahman and A. C. Cinar, "Binary tree-seed algorithms with S-shaped and V-shaped transfer functions," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 111-117, 2019, doi:10.18201/ijisae.2019253192
- [37] A. C. Cinar and M. S. Kiran, "Similarity and logic gate-based tree-seed algorithms for binary optimization," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 115, pp. 631-646, 2018, doi:10.1016/j.cie.2017.12.009
- [38] A. C. Cinar, S. Korkmaz, and M. S. Kiran, "A discrete tree-seed algorithm for solving symmetric traveling salesman problem," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 879-890, 2020, doi:10.1016/j.jestch.2019.11.005
- [39] E. Taillard, "Benchmarks for basic scheduling problems," *European Journal Of Operational Research*, vol. 64, no. 2, pp. 278-285, 1993, doi:10.1016/0377-2217(93)90182-M
- [40] F. Wilcoxon, "Individual comparisons by ranking methods," in *Breakthroughs in statistics*: Springer, 1992, pp. 196-202.
- [41] M. Friedman, "A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 11, no. 1, pp. 86-92, 1940.



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Machinability of CoCrMo Alloy Used in Biomedical Applications: Investigation of Cutting Tool Type

Büşra Mutlu^a, Rüstem Binali^{*b}, Recep Demirsöz^c, Nafiz Yaşar^d

Submitted: 10.03.2022 Revised: 05.04.2022 Accepted: 09.05.2022 doi:10.30855/gmbd.0705005

ABSTRACT

Keywords: CoCrMo, Turning, Machining, ANOVA, Regression Analysis

^a Karabuk University,
Institute of Graduate Programs
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0003-1122-7254

^{b,*} Selcuk University,
Technology Faculty,
Dept. of Mechanical Engineering
42075 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0775-3817
e mail: rustem.binali@selcuk.edu.tr

^c Karabuk University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering,
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0674-4572

^d Karabuk University,
Yenice Vocational High School,
78050 - Karabük, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1427-1384

*Corresponding author:
rustem.binali@selcuk.edu.tr

It was discovered that the machinability of CoCrMo material, which is extensively utilized in the health-care business as an implant material, may be improved through research. Three distinct cutting tools and three different cutting speeds were employed in the dry machining experiment, with three different feed rates being used in combination with three different cutting speeds (DCMT from two different firms and DCGT inserts). Cutting tools with a wide range of mechanical qualities based on hardness and toughness are available on the market today. Throughout machining, the output of a machine is defined as the average of surface roughness (Ra) and cutting temperature (T), which is estimated as the result of an experimental research conducted during the machining process. The signal-to-noise ratio (S / N) recorded during the testing was used to evaluate the results of the tests. When determining the effect of variables on Ra and T, it was determined that the Analysis of Variance (ANOVA) technique would be used. With a precision ratio of %61,4 in the analysis of variance, the feed rate was shown to be the most effective factor on Ra, while the cutting speed was found to be the most effective factor on cutting temperature (%63,9). The smallest Ra values were identified when machining at the fastest possible cutting speed and feed rate, whilst the smallest T values were obtained when machining at the slowest possible cutting speed and feed rate, respectively.

Biyomedikal Uygulamalarında Kullanılan CoCrMo Alaşımının İşlenebilirliği: Kesici Takım Tipinin İncelenmesi

ÖZ

Sağlık sektöründe implant malzemesi olarak yaygın olarak kullanılan CoCrMo malzemesinin işlenebilirliğinin araştırma yoluyla geliştirilebileceği keşfedilmiştir. Üç farklı kesme hızı (iki farklı firmadan DCMT ve DCGT kesici uçlar) ile birlikte üç farklı ilerleme hızının kullanıldığı kuru işleme deneyinde üç farklı kesme takımı ve üç farklı kesme hızı kullanıldı. Bugün piyasada sertlik ve tokluğa dayalı çok çeşitli mekanik niteliklere sahip kesici takımlar mevcuttur. Talaşlı imalat boyunca, bir tezgahın çıktısı, işleme prosesi sırasında yürütülen deneysel bir araştırma sonucunda tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme sıcaklığının (T) ortalaması olarak tanımlanır. Testlerin sonuçlarını değerlendirmek için test sırasında kaydedilen sinyal-gürültü oranı (S/N) kullanılmıştır. Değişkenlerin Ra ve T üzerindeki etkisi belirlenirken Varyans Analizi (ANOVA) tekniğinin kullanılacağı belirlenmiştir. Varyans analizinde %61,4 katkı oranı ile Ra üzerinde en etkili faktör ilerleme oranı gösterilirken, kesme sıcaklığı üzerinde en etkili faktör kesme hızı (%63,9) olarak bulunmuştur. En küçük Ra değerleri, mümkün olan en hızlı kesme hızı ve ilerleme hızında belirlenirken, en küçük T değerleri, mümkün olan en düşük kesme hızı ve ilerleme hızında işleme yapıldığında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CoCrMo, Tornalama, İşleme, ANOVA, Regresyon Analizi

1. Introduction

CoCrMo-based alloys used as prosthesis and implant materials are among the most important biomaterials used in medical applications [1]. Cobalt is used as an alloying element in many fields. Cobalt alloys are generally used between 650-1150 ° C. Cobalt alloys are similar in chemical structure to the stainless steel group [2]. Cobalt alloys have been used medically in dental implants obtained by the first casting method. Co-Cr consists of 65% of these alloys. Cr increases the corrosion resistance by forming protecting oxide layers on the surfaces of the alloy while Molybdenum enhances the mechanical behavior by supporting a thin structure [3,4].

CoCrMo alloys are used in the production of the hip, knee, elbow prostheses and bone plates, screws, and rods where the loading is high owing to their excellent corrosion and abrasion resistance, superior mechanical properties, and also in the production of air-jet engines, gas turbines and turbochargers, etc. due to their re-sistance to heat. By providing the surface roughness in the desired range of values, it increases the fatigue, fracture and corrosion resistance of the material as well as providing a better appearance. Today, surface roughness is one of the most significant factors in products processed by machining [5,6]. The range of surface roughness relates to the final product function where it will be used. In machining, the material structure, pro-cessing conditions and method are factors that affect the surface roughness [7–10]. Briefly, it can be described the surface roughness as fluctuations on the surface of a machined part. As the fluctuation on the surface de-creases, the surface quality of the part increases inversely [11–15]. Most of the energy required for chip removal turns into heat at the cutting edge of the cutting tool. A small portion of this heat is transferred from the cutting tool to the uncut workpiece and this process affects the surface integrity of the machined surface. Most of the heat transmitted to the workpiece remains in the chip [16] and this process causes an increase in temperature in the regions close to the cutting tool tip [12,17–19]. Some studies on the machining of CoCrMo alloys are summarized below. Bahçe et al. aimed to improve the surface integrity by using the turning and grinding of CoCrMo alloy which is a tibial component in a knee prosthesis. Comparing to the traditional turning and turning-grinding method, the surface roughness values after polishing gave similar results for the two meth-ods. They found that in the turning-grinding method, there was approximately a 64% reduction in mi-cropores/cracks and a relatively 31% reduction in microhardness [20]. Bordin et al. performed a turning pro-cess on CoCrMo alloys produced by Electron Beam Melting (EBM) method and casting method under mineral oil and water emulsion lubrication conditions using TiAlN coated tungsten carbide cutting tip. They made tool wear, surface roughness and microstructure material analysis on these alloys. They reported that CoCrMo alloy produced with EBM as a result of turning processes is more difficult to process than cast CoCrMo alloy due to its more abrasive microstructure [21]. Bruschi et al. I studied the machining properties of CoCrMo alloy (ASTM F1537). They carried out the experiments in different parameters of cutting speed and feed amounts in wet (lubricant) conditions. They investigated tool wear, surfaces integrity, microhardness and microstructure properties. According to the testing, cutting speed has no impact on the hardness of the machined surface but feed rate has an impact on tool wear and tool wear [22]. Karpuschewski et al. investigated the machinability of CoCrMo alloy during the turning process without coolant lubricant using three different ceramic cutting tools with different cutting edges. They observed that the tool life is better when the chamfer angle is small and the rake angle is large in cutting tools with two different chamfer angles and rake angle [23]. Shokrani et al. investigated tool wear and surface roughness in the machining of Co-Cr alloys in cryogenic cooling (-197 °C) environment. As a result of the experiments, it was observed that cryogenic cooling is better than Minimum Quantity Lubrication (MQL) based on the surface quality. They also observed minimum crater wear on cutting tools used in the cryogenic process [24]. Pawade et al. evaluated the cutting force components generated from the precision turning of CoCrMo alloy using different cutting parameters in different environments. They discovered that the feed force in dry machining is less than other forces, but the primary cutting force in wet machining is bigger than the other force components, according to their findings. The researchers also tested other types of cutting tools for surface integrity. They found that CBN cutting tools produced superior surface quality when compared to ceramic, carbide, and diamond cutting tools [25]. Dijmarescu et al. developed a model that demonstrates the relationship between cutting parameters (F_p , F_f and F_c) for the dry turning process of CoCrMo alloy. They emphasized that the model is acceptable since the deviation is 1.179% [26]. Karpuschewski et al. investigated the tool life, process forces and surface integrity of CoCr alloy using different cooling systems with ceramic insert. In the experiments, they performed processing experiments using dry and compressed air and three different cooling oils (kozla oil, emulsion and MQL). The minimum surface layer was formed by full jet cooled

emulsion and dry processing. In addition, they reported that low strength and low wear were caused by the MQL method [27].

When machining CoCrMo alloys under different cutting conditions, according to literature research, the surface quality and cutting forces have been taken into consideration, which is a good thing. However, in the machining of CoCrMo alloys, the cutting temperatures that have the greatest impact on tool wear have not been very noticeable. As a result, the objective of this work was to experimentally investigate the surface quality and cutting temperature of CoCrMo-based alloys that are utilized as prosthetic and implant materials.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The commercial CoCrMo alloy, which is widely used in knee implants and produced by casting method by Pasific medical, was used as a workpiece in turning experiments. No heat treatment has been applied to the workpiece. An original knee implant used in surgical operations was used as a workpiece material in this study as shown in Fig.1a.

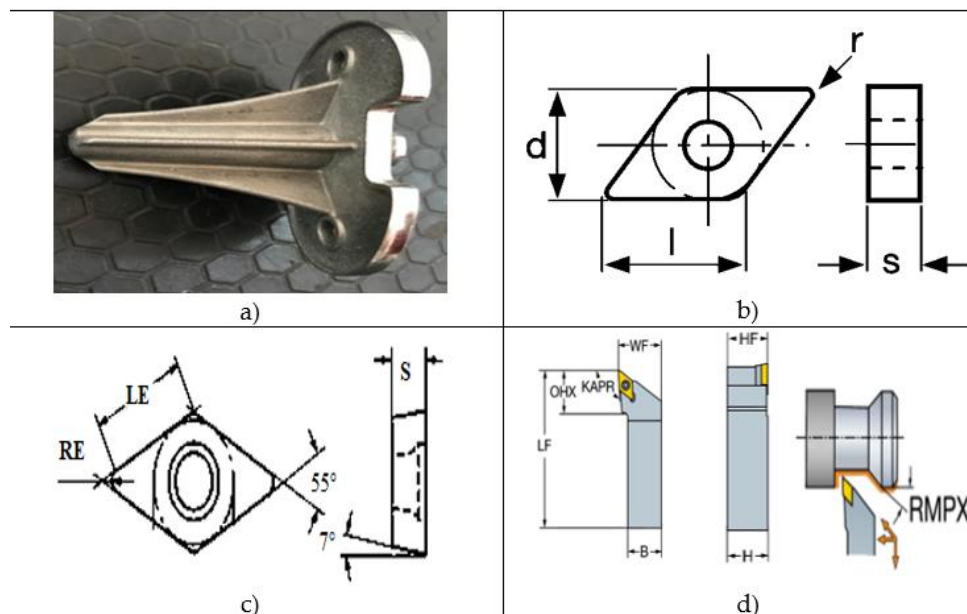


Figure 1. Test sample (Tibial component)

In the experiments, a total of three cutting tools were used: the cutting tool in DCMT form according to ISO produced by X (Fig.1b) and Y (Fig.1c) companies, and the cutting tools in DCGT (grinded tip) form belonging to Y company (Fig.1c). The cutting tools are TiAlN-based PVD coating with high-temperature hardness resistance. Also, SDJCR / L tool holder (Fig.1d) is used to connect the cutting tools to the lathe. The chemical compositions and mechanical properties of the sample are given in Table.1 During turning, temperature measurements were made with the OPTRIS PI 456 Thermal camera (OPTRIS, Berlin, Germany). In addition, Marh brand MarSurf M 300 type surface roughness measuring device was used in measuring the surface roughness.

Table 1. Chemical composition [28] and Mechanical properties [29] of CoCrMo alloy

Cr(27-30%) W(<0.2%)	Mo(5-7%) Si(<1.0%)	O2(<0.1%) Ni(<0.5%)	Fe(<0.75%) Al(<0.1%)	Mg(<1.0%) Co(Balanced)
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)	Elastic Modulus (GPa)
1263-1275	898-908	23-25	350	240-300 [3]

2.2. Tests and Measurements

Machining tests were performed on a HAAS ST-20Y CNC lathe (HAAS, Germany) with a maximum speed of 4000rpm. Therefore, suitable spindle speeds were obtained via a spindle speeder. Surface roughness

measurements as seen in Figure 2 were performed via Mahr Perthometer M300 portable measuring instrument by dividing the tibial component into 3 different regions. Roughness values were measured around the circular rings formed towards the machining center. Three measurements were taken from each of the 3 circular re-gions created to increase the stability of the measurement results and averaged. Due to the diameter difference and groove in the workpiece geometry, discontinuous turning occurs in the 1st and 2nd regions while continuous turning is performed in the 3rd region. Motion length (L_t) was set at 1.75 mm, and wavelength was adjusted at 0.8 mm in the Marsurf M300 measuring instrument for surface roughness measurements. It was determined by averaging variances in roughness profile on machined surfaces according to the ISO 4287 standard. The measurement of surface roughness was performed on the machined surface by three repetitions and then taken the average of these repetitions. The experimental setup where turning tests are carried out is shown in Figure 3.

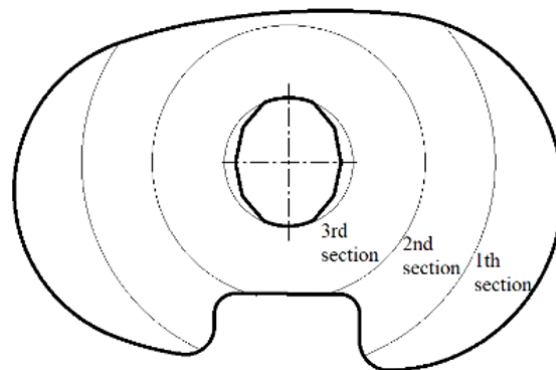


Figure 2. Surface roughness measurement

During turning, the temperature at the tool-workpiece zone was constantly measured using an OPTRIS PI 450 infrared (IR) thermal camera. The IR camera can measure temperatures up to 900 °C, it has a 7.5-13 μm spectral range, 40mK thermal sensitivity and 382x288 pixel resolution.

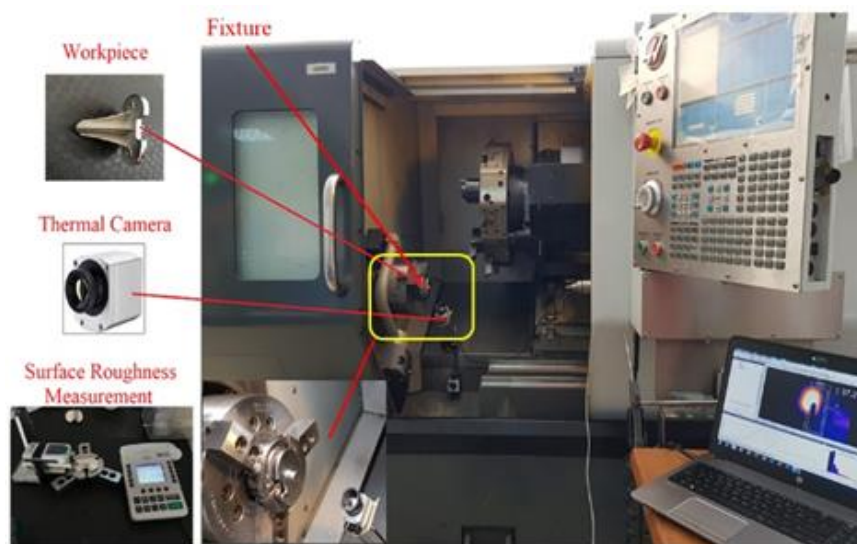


Figure 3. Experimental setup and schematic diagram

2.3. Design of Experiments

Taguchi optimization is a method based on testing many factors with the least factor with orthogonal arrays defined in the experimental design created. Orthogonal arrays are determined in two or three stages according to the nature of the problem. Taguchi L27 full factorial array was used in this study. S/N ratio is determined differently to determine the best value in experiment design. In the study, the smaller-better ratio was preferred among the S/N ratios. The equation of the chosen ratio is given below, and in the equation, Y represents the quality variable. The cutting parameters and their levels

are given in Table 2. The full Taguchi L27 array is given in Table 3.

The smaller-The better

$$S/N \text{ ratio} = -10 * \log(\Sigma(1/Y^2)/n) \quad (1)$$

Table 2. Parameters and levels for experimental turning

Symbols	Factors	Level 1	Level 2	Level 3
T	Cutting Tool	DCMT (X Companies)	DCMT (Y Companies)	DCGT (Y Companies)
V	Cutting speed (m/min)	40	60	80
f	Feed rate (mm/rev)	0.05	0.075	0.1
a	Deep of cut (mm)	0.1	0.1	0.1

Table 3. Taguchi L27 array

Exp. No	Code	Cutting Tool	Code	Cutting Speed (m/min)	Code	Feed Rate (mm/rev)
1	T1	X Comp.	V1	40	f1	0.05
2	T1	X Comp.	V1	40	f2	0.075
3	T1	X Comp.	V1	40	f3	0.10
4	T1	X Comp.	V2	60	f1	0.05
5	T1	X Comp.	V2	60	f2	0.075
6	T1	X Comp.	V2	60	f3	0.10
7	T1	X Comp.	V3	80	f1	0.05
8	T1	X Comp.	V3	80	f2	0.075
9	T1	X Comp.	V3	80	f3	0.10
10	T2	Y Comp.	V1	40	f1	0.05
11	T2	Y Comp.	V1	40	f2	0.075
12	T2	Y Comp.	V1	40	f3	0.10
13	T2	Y Comp.	V2	60	f1	0.05
14	T2	Y Comp.	V2	60	f2	0.075
15	T2	Y Comp.	V2	60	f3	0.10
16	T2	Y Comp.	V3	80	f1	0.05
17	T2	Y Comp.	V3	80	f2	0.075
18	T2	Y Comp.	V3	80	f3	0.10
19	T3	Y Comp.	V1	40	f1	0.05
20	T3	Y Comp.	V1	40	f2	0.075
21	T3	Y Comp.	V1	40	f3	0.10
22	T3	Y Comp.	V2	60	f1	0.05
23	T3	Y Comp.	V2	60	f2	0.075
24	T3	Y Comp.	V2	60	f3	0.10
25	T3	Y Comp.	V3	80	f1	0.05
26	T3	Y Comp.	V3	80	f2	0.075
27	T3	Y Comp.	V3	80	f3	0.10

3. Results and Discussion

3.1. Analysis of S/N ratios

Ra is shown as one of the most critical parameters as machinability output in machining operations [31,32]. In addition, the temperature that occurs in the cutting region during machining is another considerable parameter affecting surface quality and the tool performance [33,34]. For this reason, optimizing the surface roughness and temperature generated during the machining process is very important for machinability efficiency. Turning performance tests were completed based on Taguchi's L27 full factorial design using cutting tool, cutting speed and feed rate control factors. Table 4 gives the Ra and T outputs obtained as a result of the experiments and the S / N ratios obtained from the analysis result. The smallest-best approximation was used to obtain S / N ratios by using Equation 1. Consequently, the average surface roughness (Ra) value was obtained as 0.680 μm and the average S / N ratio as 3.68 dB. For the cutting temperature, the average temperature (T) value was 199 $^{\circ}\text{C}$ and the

average S / N ratio was -45.88 dB.

Table 4. Experiment results (Ra and T) and S / N ratios

Exp. No	Cutting Tool	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/rev)	Surface Roughness Ra (μm)	Surface Ropughness S/N	Average Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature S/N (dB)
1	T1	V1	f1	0.597	4.480513	152	-43.6369
2	T1	V1	f2	0.792	2.025496	168	-44.5062
3	T1	V1	f3	1.131	-1.06925	180	-45.1055
4	T1	V2	f1	0.494	6.125461	175	-44.8608
5	T1	V2	f2	0.718	2.877511	191	-45.6207
6	T1	V2	f3	0.904	0.876631	202	-46.107
7	T1	V3	f1	0.455	6.839772	218	-46.7691
8	T1	V3	f2	0.599	4.451464	235	-47.4214
9	T1	V3	f3	0.774	2.225181	251	-47.9935
10	T2	V1	f1	0.612	4.264972	160	-44.0824
11	T2	V1	f2	0.773	2.23641	191	-45.6207
12	T2	V1	f3	1.168	-1.34886	198	-45.9333
13	T2	V2	f1	0.518	5.713405	203	-46.1499
14	T2	V2	f2	0.755	2.441061	225	-47.0437
15	T2	V2	f3	0.948	0.463833	234	-47.3843
16	T2	V3	f1	0.486	6.267275	235	-47.4214
17	T2	V3	f2	0.615	4.222498	249	-47.924
18	T2	V3	f3	0.793	2.014536	265	-48.4649
19	T3	V1	f1	0.513	5.797653	138	-42.7976
20	T3	V1	f2	0.601	4.422511	149	-43.4637
21	T3	V1	f3	0.929	0.639686	160	-44.0824
22	T3	V2	f1	0.453	6.878036	157	-43.918
23	T3	V2	f2	0.537	5.400514	201	-46.0639
24	T3	V2	f3	0.684	3.298878	213	-46.5676
25	T3	V3	f1	0.408	7.786797	196	-45.8451
26	T3	V3	f2	0.511	5.831582	214	-46.6083
27	T3	V3	f3	0.607	4.336226	236	-47.4582

The S/N analysis table created with the Taguchi method is given in Table 5. According to the S / N response table, the best level was found according to the smallest S / N ratio within each control factor's levels. Accordingly, the control factors and levels for the lowest Ra (surface roughness) value were determined as T3V3f1 and for T (temperature), T3V1f1.

Table 5. S/N responses for surface roughness Ra and cutting temperature T

Levels	Surface roughness (Ra)			Cutting temperature (T)		
	T	V	f	T	V	f
1	0,7182	0,7907	0,5040	196,9	166,2	181,6
2	0,7409	0,6679	0,6557	217,8	200,1	202,6
3	0,5826	0,5831	0,8820	184,9	233,2	215,4
Delta	0,1583	0,2076	0,3780	32,9	67,0	33,9
The order of importance	3	2	1	3	1	2

*Data shown in bold are optimum conditions.

S/N ratios for Ra and T are given in Figures 4a and 4b, respectively. The levels with the smallest S/N ratios are seen in the graphs as the optimum level. Considering the smallest S/N ratios, the optimum Ra value is achieved with the DCGT (T3) tool at V3 and f1. Considering the smallest S/N ratio, it is seen that the DCGT (T3) tool, V1 and f1 are the ideal values for the T value. The graphic trends also give an idea about the effect levels of the factors. The most important factors are the feed rate and the cutting speed for the Ra and T, respectively based on Fig. 4a and 4b.

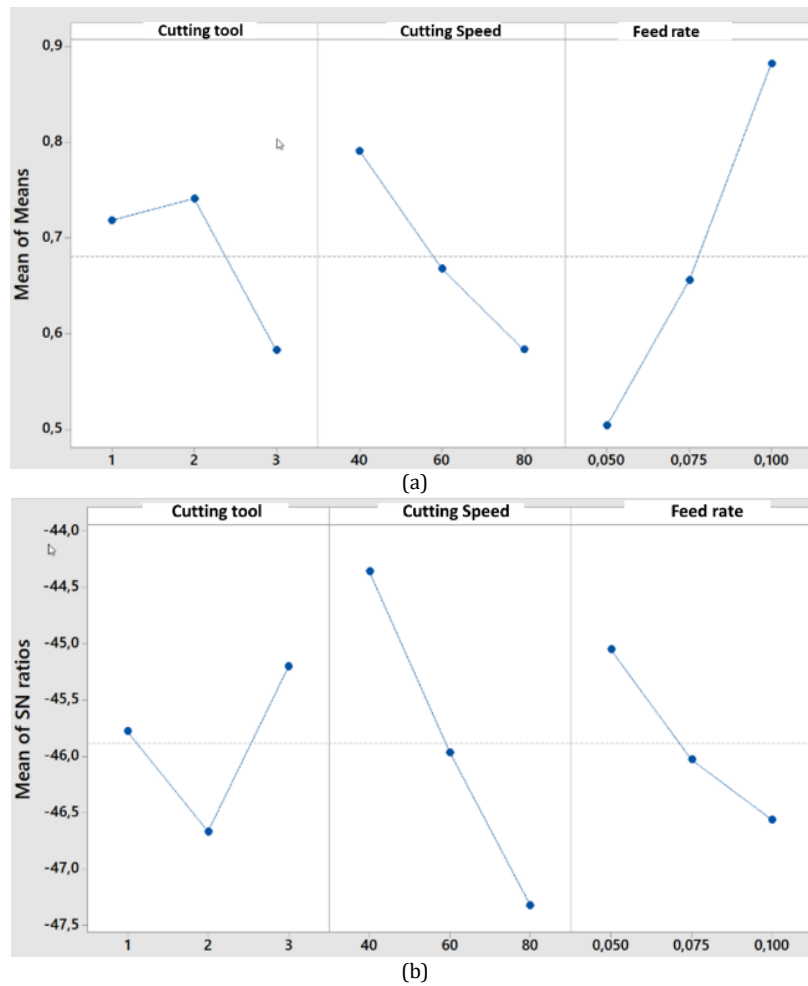


Figure 4. Main effect plots of S / N ratios for (a) Surface roughness Ra, (b) Temperature T

3.2. Analysis of Variance (ANOVA)

The influence of cutting parameters on Ra and T was determined using an ANOVA with a 95 percent confidence interval. Using the chart's contribution rates, you can see how much of an impact the control factor has on output. Analysis findings for the Ra and T variances may be seen in Table 6.

Table 6. ANOVA analysis results for Ra and T

Factor	Degree of Freedom (DF)		Sum-of-Squares (SS)		Mean-Square (MS)		F ratio		P value		Percentage Contribution Ratio (PCR%)	
	Ra	T	Ra	T	Ra	T	Ra	T	Ra	T	Ra	T
T	2	2	0.13197	6.3373	0.065983	3.1686	178.80	50.21	0.000	0.000	12.44	15.8
V	2	2	0.19602	25.6209	0.098011	12.8104	265.59	202.97	0.000	0.000	18.47	63.9
f	2	2	0.65134	6.7545	0.325670	3.3772	882.51	53.51	0.000	0.000	61.4	16.84
T * V	4	4	0.00418	0.5545	0.001045	0.1386	2.83	2.20	0.098	0.160	0.39	1.38
T * f	4	4	0.02153	0.1521	0.005383	0.0380	14.59	0.60	0.001	0.672	2.02	0.37
V * f	4	4	0.05281	0.1656	0.013203	0.0414	35.78	0.66	0.000	0.639	4.97	0.41
Error	8	8	0.00295	0.5049	0.000369	0.0631	-	-	-	-	0.27	1.25
Total	26	26	1.06080	40.0897	-	-	-	-	-	-	%100	%100
R2							Ra		T			
							99.72		98.74			

Considering the data in Table 6, it has been determined that the most efficient factor for Ra is the f (feed rate) with 61.4% PCR. The most effective factors in the second and third place are the V (cutting speed) and the T (cutting tool) with 18.42% and 12.44% PCR, respectively. According to Table 6, the most influential factor on the cutting temperature with 63.9% PCR is the V (cutting speed), followed by the f (feed rate) and the T (cutting tool) with 16.84% and 15.8% PCR, respectively.

3.3. Evaluation of Ra

In the performance experiments, the influence of the parameters (cutting speed and feed rate) on Ra for each tool is given in the graphics in Figure 5. If Figure 5a is examined for the T1 cutting tool, it is seen that it gives the best Ra value ($0.455 \mu\text{m}$) at V3 and f1. The highest value in terms of Ra was found as $1.131 \mu\text{m}$ at V3 and f2. When the Ra graphs for the tools are evaluated, the Ra value decreases inversely by increasing cutting speed. Better surface quality is obtained with the increasing cutting speed in machining as known. The reason for this can be explained by the decrease in friction due to the decrease in the tool chip interface by the increasing cutting speed and the increasing temperature decreases the materials strength [35,36]. In addition, when the graphs were examined, it is obvious that the Ra value increased with the increasing feed rate. During the machining process, the feed rate directly affects the cross-section of the chip that the cutting tool removes per unit time. With the increasing feed rate, the chip cross-section area increases and the slip plane in the first deformation zone increase with the increasing chip cross-section, more force is required for the cutting process and the cutting process becomes more difficult [37].

In the literature, the Ra value increases with the increasing feed rate [22,38-40]. This situation confirms that the most effective factor obtained in the variance analysis is the feed rate with 61.4% PCR. When Figure 5b is examined for T2 cutting tool, it is seen that there is no significant difference in terms of Ra values with T1 cutting tool with the same form. The lowest Ra value is $0.486 \mu\text{m}$ at V3 and f1. The highest Ra value is $1.168 \mu\text{m}$ at V1 and f2.

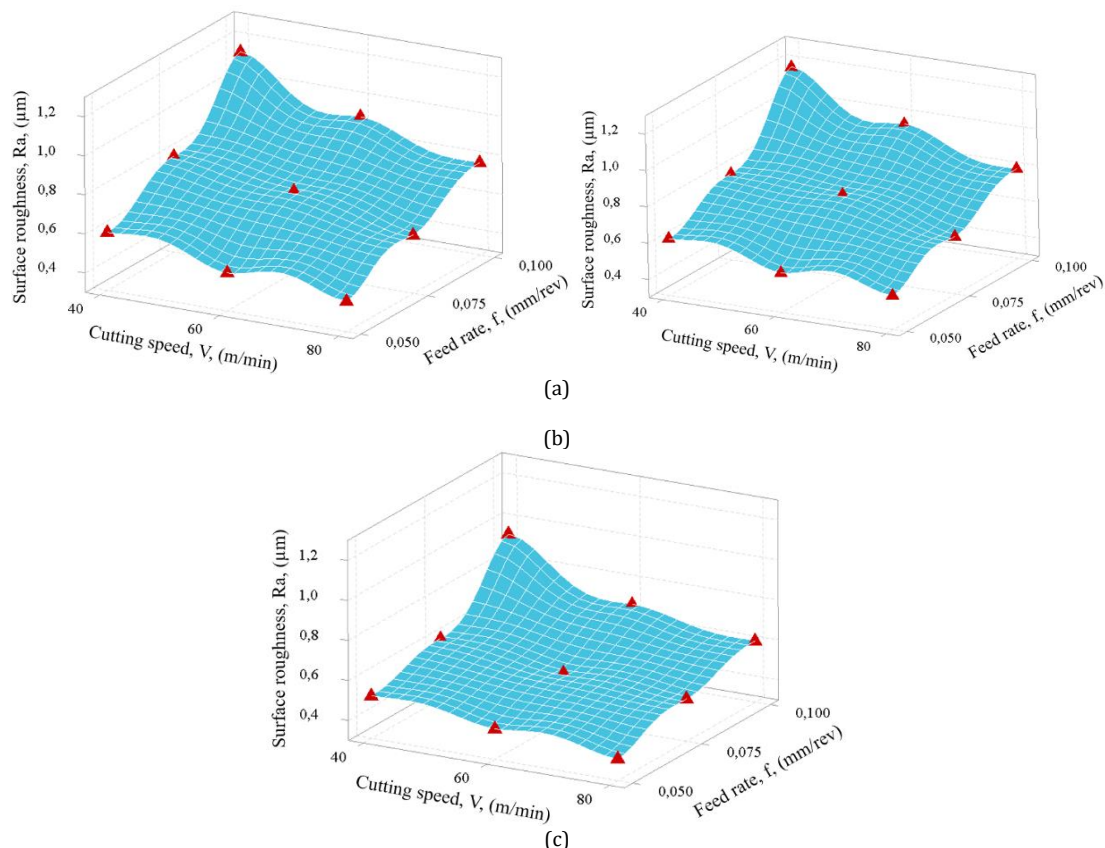


Figure 5. Surface roughness variation for (a) T1 (b) T2 (c) T3 cutting tools ((a) T1 (b) T2 (c) T3)

It is known that the area between the cutting tool/workpiece surface decreases with the increase of the rake angle in machining, so the friction is less and the cutting process is easier [41,42], Since the T3 cutting tool with a grinded tip is larger than the other T1 and T2 cutting tools used, better surface

qualities have been obtained. This statement is frequently encountered in studies in the literature [42,43]. When Figure 5c is examined for the T3 cutting tool, the best surface roughness value is $0.408 \mu\text{m}$ at V3 and f1. The highest Ra value was obtained as $0.929 \mu\text{m}$ at V1 and f2. From Figure 7.5, the most effective parameter in the T3 cutting tool is the feed rate. Figure 5 confirms that according to the S/N table, the best result for the surface roughness value will be obtained with the T3 cutting tool. Consequently, the better Ra values will be acquired by using the tip ground cutting tools.

3.4. Evaluation of Temperature

In the machining process, the temperature caused by friction between the surface and the tool reduces the machining quality by penetrating (sticking) to the surface more than necessary if the temperature is higher than desired [43]. This situation makes the cutting temperature one of the very important parameters for a required cutting process. The effect of cutting parameters on T for each tool in performance experiments is given in the graphics in Figure 6. When Figure 6a is examined for the T1 cutting tool, the lowest cutting temperature is obtained as 152°C at V1 and f2. While chip removal is taking place, the cutting tool and workpiece's contact area grows. In other words, as the area of contact between the cutting tool and the workpiece grows, so does the cutting temperature. Figure 6a demonstrates that cutting speed does not cause a significant rise in temperature. However, with the increase in the feed, the cutting temperature increased proportionally. This situation confirms that based on the ANOVA results, the parameter that has the highest effect on the cutting temperature is the cutting speed with 63.9% PCR. When Figure 6b and 6c are examined, it is seen that this situation is valid for T2 and T3 tools. Moreover, the lowest temperature value is 160°C and 138°C , respectively, at V1 and f2, while the highest temperature value is obtained as 265°C and 236°C , at V3 and f2. When Figure 6c is examined for the T3 tools, it is seen that the temperature increase is less than the other two sets of the tools. This situation is thought to be caused by the T3 cutting tool tip being ground. It is known in the literature that the increase in the rake angle and decrease in the effective surface between the tool and workpiece generates less friction and heat during the process [42]. Accordingly, the rake angle of the insert with grinded T3 is larger than the other tools, resulting in less cutting temperature during machining.

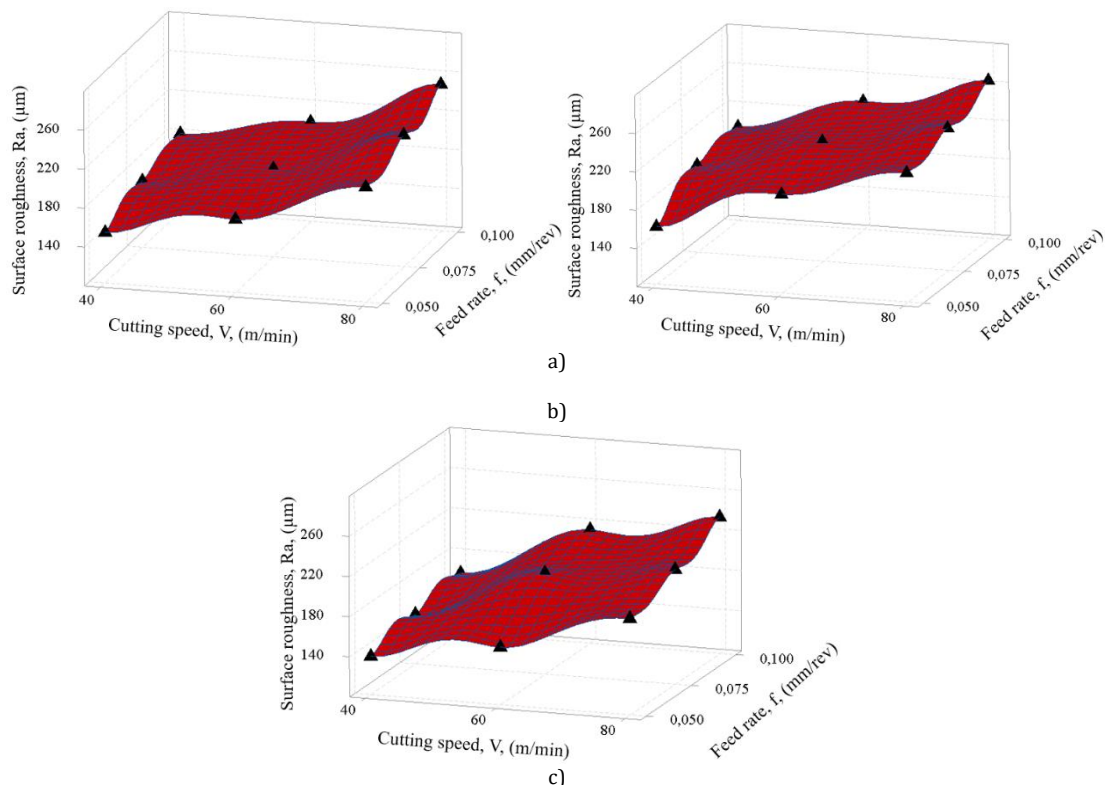


Figure 6. Cutting temperature variation for (a) T1 (b) T2 (c) T3 cutting tools ((a) T1 (b) T2 (c) T3)

3.5. Tool Performance

Figure 7 depicts the relationship between the amount of wear on the cutting tool side surface area and

the amount of surface roughness that occurs during the turning of the same material with varied mechanical qualities while using different cutting tools with varying mechanical properties. It was discovered that the lowest possible surface roughness was attained during the turning of the sample with the T3 cutting tool that possessed the maximum toughness, while the least amount of tool wear was seen in parallel. The opposite was true while creating the maximum roughness value during turning with T1 and T2 cutting tools of lesser toughness. As a result, greater tool wear occurred during turning. Surface roughness and tool wear are reduced in this scenario while turning the same material, since the toughness of the cutting tool improves with increasing toughness of the material [44].

At the tool-chip interface, as a result of the forces acting during the cutting process, the heat has been generated along the contact area due to friction, causing tool wear. It is necessary to know the maximum temperature and temperature distribution that are decisive in tool wear [45,46]. It is so important to accurately measure and determine the heat and temperature distribution at the tool-chip interface for estimating the tool wear. Since the depth of cut is so small in this study and results in higher cutting temperature at the slip zone and the tool-chip interface [47], it is so important to measure the temperature distribution formed here in a way that reflects the tool wear. By this context, the temperature caused by the friction between the cutting tool and the workpiece in the chip removal process played a major role in tool wear, depending on the material properties of the workpiece and the cutting tool [48]. Generally, factors such as increasing cutting speed, feed rate and also are known to increase the cutting temperature and cause tool wear [49,50]. With the help of Figure 6 and Figure 7b, the higher tool wear occurs with T2 tool causing the highest cutting temperature in machining of CoCrMo alloy.

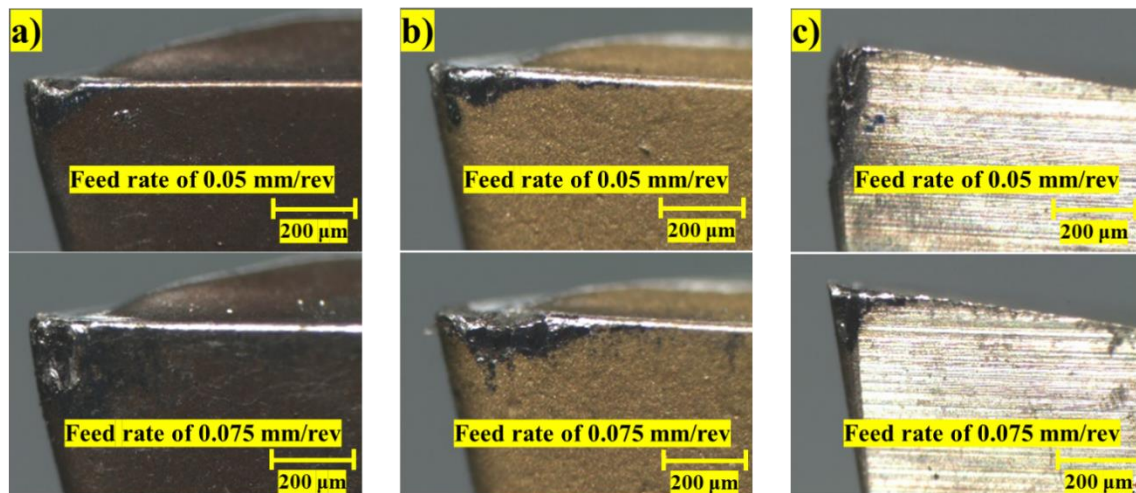


Figure 7. Tool wear images of different cutting tools in the cutting speed of 40 m/min, a) T1, b) T2, c) T3

4. Conclusion

For the machining of CoCrMo implant material (biomaterial), Taguchi L27 was used to explore the impact of the machining parameters on the Ra and the T (cutting tool, cutting speed, and feed rate). The experiments' outcomes are summarized in the following paragraphs.

There are statistically optimal Ra values at V3 and f1 for cutting tools of DCMT (X companies), DCMT (Y companies) and DCGT (Y companies), respectively, based on the statistical study. It is found that the maximum surface roughness values for each tool factors are at V1 and f2 for V1 and f2. Temperatures of 152, 160, and 138 °C are the best values for each DCMT (X companies), DCMT (Y companies), and the DCGT (Y companies) tool, respectively at V1 and f2. With DCMT (X companies), DCMT (Y companies), and DCGT (Y companies) cutting tools, V3 and f2 show the maximum cutting temperatures of 251, 265, and 236 °C. S/N ratios were utilized to determine the ideal Ra and T values. The statistical analysis determined that the best Ra value could be obtained at V3 and f1 using the DCGT (Y companies) cutting tool. At V1 and f1, the DCGT (Y companies) cutting tool produced the best T values.

According to the ANOVA results, the feed rate on the Ra has a PCR efficiency of %61.4. Furthermore, the T's cutting speed has the highest PCR at %63.9.

Cutting speed increased the surface roughness and the cutting temperature, according to the results. A little rise in cutting temperature has been seen when feed rate is increased. This raises surface roughness correspondingly.

Cutting tools with tip ground (DCGT (Y companies)) tips were found to provide the greatest results on Ra and T. It can be used to improve the quality of the surface.

Acknowledgment

This research was funded by Karabük University, grant number KBÜBAP-18-YL-189.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] E. Şap and H. Çelik, "Investigation of Effects of Ti and Mn Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Cobalt Based Alloys," *Electronic Journal of Machine Technologies*, vol. 9, no. 3, pp. 25–33, 2012.
- [2] E. Şap, "Investigation of effects of some metals on cobalt-based alloys," Firat University Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2010.
- [3] I. Milošev, *Biomedical Applications: CoCrMo Alloy for Biomedical Applications*, Ed. Boston, MA: Springer US, 2012.
- [4] E. Bahce, M. S. Güler, E. Emir, and C. Özel, "CoCrMo Tibial Komponentin Karbür Takı m ile İşlenmesinde Yüzey Özelliklerinin Araştırılması," *Ordu University Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 16–30, 2018.
- [5] H. Gökçe, İ. Çiftçi, H. Demir, "Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure molybdenum," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 40–360, 2018. doi:10.1007/s40430-018-1280-8
- [6] M. E. Korkmaz and M. Günay, "Experimental and Statistical Analysis on Machinability of Nimonic80A Superalloy with PVD Coated Carbide," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 36, no. 4, pp. 1141–1152, 2018.
- [7] A. T. Abbas, D. Y. Pimenov, I. N. Erdakov, M. A. Taha, M. S. Soliman, and M. M. El Rayes, "ANN surface roughness optimization of AZ61 magnesium alloy finish turning: Minimum machining times at prime machining costs," *Materials*, vol. 11, no. 5, 2018. doi:10.3390/ma11050808
- [8] A. T. Abbas, D. Y. Pimenov, I. N. Erdakov, M. A. Taha, M. M. El Rayes, and M. S. Soliman, "Artificial intelligence monitoring of hardening methods and cutting conditions and their effects on surface roughness, performance, and finish turning costs of solid-state recycled aluminum alloy 6061 chips," *Metals*, vol. 8, no. 6, 2018, doi:10.3390/met8060394
- [9] M. S. Alajmi and A. M. Almeshal, "Modeling of Cutting Force in the Turning of AISI 4340 Using Gaussian Process Regression Algorithm," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9. 2021. doi:10.3390/app11094055
- [10] M. Kuntoğlu, A. Aslan, D. Y. Pimenov, K. Giasin, T. Mikolajczyk, and S. Sharma, "Modeling of Cutting Parameters and Tool Geometry for Multi-Criteria Optimization of Surface Roughness and Vibration via Response Surface Methodology in Turning of AISI 5140 Steel," *Materials*, vol. 13, no. 19. 2020. doi:10.3390/ma13194242
- [11] M. K. Gupta, M. Mia, G. R. Singh, D. Y. Pimenov, M. Sarikaya, and V. S. Sharma, "Hybrid cooling-lubrication strategies to improve surface topography and tool wear in sustainable turning of Al 7075-T6 alloy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 1–4, pp. 55–69, 2019. doi:10.1007/s00170-018-2870-4
- [12] M. Mia and N. R. Dhar, "Optimization of surface roughness and cutting temperature in high-pressure coolant-assisted hard turning using Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 739–753, 2017. doi:10.1007/s00170-016-8810-2
- [13] G. Manimaran, S. Anwar, M. A. Rahman, M. E. Korkmaz, M. K. Gupta, A. Alfaify, and M. Mia, "Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication," *Tribology International*, vol. 155, p. 106762, 2021. doi:10.1016/j.triboint.2020.106762
- [14] M. Günay, M. E. Korkmaz, and N. Yaşar, "Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, pp. 678–687, 2020. doi:10.1016/j.jmapro.2020.05.031
- [15] M. A. Erden, N. Yaşar, M. E. Korkmaz, B. Ayvacı, K. Nimel Sworna Ross, and M. Mia, "Investigation of microstructure,

mechanical and machinability properties of Mo-added steel produced by powder metallurgy method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, doi:10.1007/s00170-021-07052-z

[16] M. E. Korkmaz and Nafiz Yaşar, "FEM modelling of turning of AA6061-T6: Investigation of chip morphology, chip thickness and shear angle," *Journal of Production Systems and Manufacturing Science*, vol. 2, no. 1, pp. 50–58, 2021.

[17] M. Mia and N. R. Dhar, "Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 6, pp. 1035–1044, 2016. doi:10.1016/j.jare.2016.05.004

[18] M. Mia and N. R. Dhar, "Effects of duplex jets high-pressure coolant on machining temperature and machinability of Ti-6Al-4V superalloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, pp. 688–696, 2018. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.10.040

[19] M. E. Korkmaz and M. Günay, "Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, no. 9, pp. 4863–4870, 2018, doi:10.1007/s13369-018-3204-4

[20] E. Bahçe, M. S. Güler, and E. Emir, "Investigation of surface quality of CoCrMo alloy used in the tibial component of the knee prosthesis according to the methods of turning and turning-grinding," *Materials Science*, vol. 26, no. 1, pp. 41–48, 2020, doi:10.5755/j01.ms.26.1.21729

[21] A. Bordin, A. Ghiotti, S. Bruschi, L. Facchini, and F. Bucciotti, "Machinability Characteristics of Wrought and EBM CoCrMo Alloys," *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 89–94, 2014. doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.082

[22] S. Bruschi, A. Ghiotti, and A. Bordin, "Effect of the process parameters on the machinability characteristics of a CoCrMo Alloy," *Key Engineering Materials*, vol. 554–557, pp. 1976–1983, 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1976

[23] B. Karpuschewski and J. Döring, "Influence of the Tool Geometry on the Machining of Cobalt Chromium Femoral Heads," *Procedia CIRP*, vol. 49, pp. 67–71, 2016. doi:10.1016/j.procir.2015.07.034

[24] A. Shokrani, V. Dhokia, and S. T. Newman, "Cryogenic High-Speed Machining of Cobalt Chromium Alloy," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 404–407, 2016. doi:10.1016/j.procir.2016.04.045

[25] K. Jagtap and R. Pawade, "A Comparative Analysis of Cutting Forces in Precision Turning of Co-Cr-Mo Bio-implant Alloy in Dry and Wet Machining Environments," *Advances in Intelligent Systems Research*, vol. 137, pp. 234–241, 2017. doi:10.2991/iccasp-16.2017.38

[26] M. R. Dijmarescu, T. D. Popovici, I. C. Tarba, M. C. Dijmarescu, and C. F. Bisu, "An experimental study on cutting forces when machining a CoCrMo alloy," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 400, no. 2, 2018. doi:10.1088/1757-899X/400/2/022019

[27] B. Karpuschewski, H. J. Pieper, and J. Döring, "Impact of the cooling system on the cutting of medical cobalt chromium with ceramic cutting inserts," *Production Engineering*, vol. 8, no. 5, pp. 613–618, 2014. doi:10.1007/s11740-014-0559-6

[28] G. Matula, A. Szatkowska, K. Matus, B. Tomiczek, and M. Pawlyta, "Structure and Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by Powder Injection Molding Method," *Materials*, vol. 14, no. 8, 2021. doi: 10.3390/ma14082010

[29] Y. Okazaki, A. Ishino, and S. Higuchi, "Chemical, Physical, and Mechanical Properties and Microstructures of Laser-Sintered Co-25Cr-5Mo-5W (SP2) and W-Free Co-28Cr-6Mo Alloys for Dental Applications," *Materials*, vol. 12, no. 24, 2019. doi:10.3390/ma12244039

[30] H. R. Kim, S. H. Jang, Y. K. Kim, J. S. Son, B. K. Min, K. H. Kim, and T. Y. Kwon, "Microstructures and Mechanical Properties of Co-Cr Dental Alloys Fabricated by Three CAD/CAM-Based Processing Techniques," *Materials*, vol. 9, no. 7, 2016. doi:10.3390/ma9070596

[31] M. Özdemir, "Analysis of the Effect Rates of Cutting Parameters on Surface Roughness using Surface Response Method," *Gazi University Science Journal: PART: C Design and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 639–648, 2019. doi:10.29109/gujsc.595722

[32] K. Leksycki, E. Feldshtein, G. M. Królczyk, and S. Legutko, "On the Chip Shaping and Surface Topography When Finish Cutting 17-4 PH Precipitation-Hardening Stainless Steel under Near-Dry Cutting Conditions," *Materials*, vol. 13, no. 9, 2020. doi:10.3390/ma13092188

[33] O. Çakır, M. Kiyak, and E. Altan, "Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153–154, pp. 35–41, 2004. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.190

[34] Y. Yamane, N. Narutaki, and K. Hayashi, "Suppression of tool wear by using an inert gas in face milling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 62, no. 4, pp. 380–383, 1996. doi:10.1016/S0924-0136(96)02439-9

[35] P. Fallböhrer, C. A. Rodríguez, T. Özel, and T. Altan, "High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, no. 1, pp. 104–115, 2000. doi:10.1016/S0924-0136(99)00311-8

[36] B. Özlü, M. Akgün, and H. Demir, "AA6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.5, no. 2, pp. 151-158, 2019. doi:10.30855/gmbd.2019.02.04

- [37] A. Takmaz, "Optimization By The Taguchi Method Of Effect On The Surface Roughness Of Cryogenic Treatment Applied To Cutting Tools," *Düzce University*, 2018.
- [38] A. Bordin, S. Bruschi, and A. Ghiotti, "The Effect of Cutting Speed and Feed Rate on the Surface Integrity in Dry Turning of CoCrMo Alloy," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 219–224, 2014. doi:10.1016/j.procir.2014.04.038
- [39] M. R. Dijmarescu, M. C. Dijmarescu, I. Voiculescu, T. D. Popovici, and I. C. Tarba, "Study on the influence of cutting parameters on surface quality when machining a CoCrMo alloy," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 400, no. 2, 2018. doi:10.1088/1757-899X/400/2/022020
- [40] R. Çakıroğlu, and G. Uzun, "Yüksek ilerleme ile frezeleme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağları ile modellenmesi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 58-66, 2021, doi:10.30855/gmbd.2021.01.07
- [41] M. Günay, İ. Korkut, E. Aslan, and U. Şeker, "Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, no. 1, pp. 44–49, 2005, doi:10.1016/J.JMATPROTEC.2004.07.092
- [42] M. Sekmen, M. Günay, and U. Şeker, "Effect on Formations of Built-up Edge and Built-up Layer, Surface Roughness of Cutting Speed and Rake Angle in the Machining of Aluminum Alloys," *Journal of Polytechnic*, vol. 18, no. 3, pp. 141–148, 2015.
- [43] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7, pp. 782–800, 2006, doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.07.024
- [44] I. Campos, M. Farah, N. López, G. Bermúdez, G. Rodríguez, and C. VillaVelázquez, "Evaluation of the tool life and fracture toughness of cutting tools boronized by the paste boriding process," *Applied Surface Science*, vol. 254, no. 10, pp. 2967–2974, 2008. doi:10.1016/j.apsusc.2007.10.038
- [45] M. S. I. Chowdhury, B. Bose, S. Rawal, G. S. Fox-Rabinovich, and S. C. Veldhuis, "Investigation of the Wear Behavior of PVD Coated Carbide Tools during Ti6Al4V Machining with Intensive Built Up Edge Formation," *Coatings*, vol. 11, no. 3. 2021. doi:10.3390/coatings11030266
- [46] M. Yavuz, H. Gökçe, and U. Şeker, "Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 3, no. 1, 2017.
- [47] S. Sulaiman, A. Roshan, and S. Borazjani, "Effect of cutting parameters on cutting temperature of TiAl6V4 alloy," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 392, pp. 68–72, 2013, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.392.68
- [48] J. Yuan, J. M. Boyd, D. Covelli, T. Arif, G. S. Fox-Rabinovich, and S. C. Veldhuis, "Influence of Workpiece Material on Tool Wear Performance and Tribofilm Formation in Machining Hardened Steel," *Lubricants*, vol. 4, no. 2. 2016. doi:10.3390/lubricants4020010
- [49] E. Şap, Ü. A. Usca, M. K. Gupta, M. Kuntoğlu, M. Sarıkaya, D. Y. Pimenov, and M. Mia, "Parametric Optimization for Improving the Machining Process of Cu/Mo-SiCP Composites Produced by Powder Metallurgy," *Materials*, vol. 14, no. 8. 2021. doi:10.3390/ma14081921
- [50] M. F. Ghazali, M. M. A. B. Abdullah, S. Z. Abd Rahim, J. Gondro, P. Pietrusiewicz, S. Garus, T. Stachowiak, A. Victor Sandu, M. Faheem Mohd Tahir, M. E. Korkmaz and M. S. Osman, "Tool Wear and Surface Evaluation in Drilling Fly Ash Geopolymer Using HSS, HSS-Co, and HSS-TiN Cutting Tools," *Materials*, vol. 14, no. 7, p. 1628, 2021, doi:10.3390/ma14071628

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Nanofluid Usage on Electricity Consumption in Thermoelectric Refrigeration Application: An Experimental Study

Pinar Mert Cuce^{a, b}, Tamer Guclu^{b, c}, Erdem Cuce^{*b, d}

Submitted: 07.02.2022 Revised: 13.04.2022 Accepted: 19.05.2022 doi:10.30855/gmbd.0705006

ABSTRACT

This study investigates the effects of nanofluid use in thermoelectric refrigerators on electricity consumption. A water-cooled block was placed on the hot surface of the TEC, and a water-to-air heat exchanger was added to the refrigeration cycle in order to cool the coolant. By adding 1% by mass of three distinct nanoparticles to the fluid, the temperature differences of the cooled cabinet were tested at three distinct outdoor temperatures. In addition, to measure the cabinet's performance when loaded, 1 litre of water was left in the cabinet, and the tests were repeated. In the case where water without nanoparticle addition, which is the reference case, was used as the coolant, the measurement was made for 1 hour, and the final temperature of the cooled cabinet was determined. Then the times to obtain the same cooled cabinet temperature using various nanoparticles were observed. It has been observed that energy savings are achieved in all nanofluid use cases compared to the reference situation. It has been observed that the temperature of the cooled cabinet drops to the lower temperatures earlier in cases where nanofluid was used. For this reason, this study is essential in terms of the efficient use of energy resources.

Termoelektrik Buzdolabı Uygulamalarında Nanoakışkan Kullanımının Elektrik Tüketimi Üzerindeki Etkisi: Deneysel Bir Çalışma

ÖZ

Bu çalışmada, termoelektrik soğutucularda nanoakışkan kullanımının elektrik tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla tasarlanan sistemde TEC'in sıcak tarafına su soğutmalı blok yerleştirilmiş ve soğutucu akışkanın ısısını almak için sisteme sudan havaya ısı eşanjörü eklenmiştir. Akışkana kütlece %1 oranında üç farklı nanopartikül eklenerek soğutucu kabinin sıcaklık farkları üç farklı dış ortam sıcaklığında test edilmiştir. Ayrıca soğutucu kabinin dolu olması durumundaki performansını ölçmek için kabine 1 litre su bırakılmış ve testler tekrarlanmıştır. Soğutma sıvısı olarak referans durum olan nanopartikül ilavesiz su kullanılması durumunda 1 saat boyunca ölçüm yapılmış ve soğutucu kabinin son sıcaklığı belirlenmiştir. Daha sonra çeşitli nanopartiküller kullanılarak aynı soğutucu kabin sıcaklığının elde edildiği zamanlar gözlemlenmiştir. Yüksüz koşullarda aynı soğutma kabini sıcaklığına ulaşmak için tüketilen enerji miktarı karşılaştırıldığında, referans duruma göre en yüksek iyileştirme Al₂O₃-Su nanoakışkanı ile %57 olarak hesaplanmıştır. Yüklü koşullarda, 18 °C ortam sıcaklığında Al₂O₃-Su nanoakışkanı kullanıldığında enerji tüketiminde en yüksek iyileşme %50 olarak elde edilmiştir. Referans duruma göre tüm nanoakışkan kullanım durumlarında enerji tasarrufu sağlandığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkan kullanıldığı durumlarda soğutucu kabin sıcaklığının su ile soğutmaya göre aynı sürelerde daha düşük sıcaklıklara düştüğü, yani daha az enerji tükettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu çalışma enerji kaynaklarının verimli kullanılması açısından önemlidir.

Keywords: Thermoelectric cooling, Nanofluids, Space cooling, Energy Consumption

^a Recep Tayyip Erdogan University, Engineering and Architecture Faculty, Dept. of Architecture 53100 - Rize, Türkiye
Orcid:0000-0002-6522-7092

^b Low/Zero Carbon Energy Technologies Laboratory, Faculty of Engineering and Architecture, 53100 - Rize, Türkiye

^c Bayburt University, Engineering Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 69000 - Bayburt, Türkiye
Orcid: 0000-0002-5864-3864

^d Recep Tayyip Erdogan University, Engineering and Architecture Faculty, Dept. of Mechanical Engineering 53100 - Rize, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0150-4705
e mail: erdem.cuce@erdogan.edu.tr

*Corresponding author:
erdem.cuce@erdogan.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

Termoelektrik Soğutma, Nanoakışkanlar, Alan Soğutma, Enerji tüketimi

1. Introduction

The noisy and vibrating studies of conventional compression cooling systems have led researchers to search for new cooling systems that will eliminate noise pollution [1]. In this context, thermoelectric devices are a major alternative to conventional cooling systems due to their advantages like silent and vibration-free operation, not containing moving parts and providing sustainable energy conversion [2]. In general, thermoelectric devices are classified as thermoelectric coolers (TECs) and thermoelectric generators (TEGs). TEGs, convert heat into electricity with the Seebeck effect. TECs, on the other hand, are the phenomenon of heat withdrawal from an environment by the Peltier effect and these devices are named Peltier. The Peltier effect is based on the principle that a circuit is formed between two P and N-type semiconductor materials and a temperature difference occurs between the surfaces when an electric current is applied [3]. TECs do not contain any refrigerants harmful to the environment. They can also be custom designed and manufactured for any cooling capacity or size. Thanks to these advantages, TECs make them widely used in various fields such as the food industry, aerospace industry, microelectronic systems, laser diodes, telecommunications, superconducting systems and medical devices [4]. However, TECs have a significant disadvantage due to their low coefficient of efficiency (COP) values compared to conventional cooling systems, especially at large cooling loads [5]. For this reason, researchers are working to increase the COP values of TECs. It is possible to increase the cooling power obtained from the cold side, especially by keeping the hot side temperature of TECs at very low values. For this purpose, fins are used on the hot surfaces of TECs [6]. Zhu and Yu [7] investigated the effect of heat sink optimization on the performance of thermoelectric devices. They used the entropy generation minimization method to optimise of TEC system. A mathematical model was prepared, and the total entropy generation rate was considered as an optimization objective function. According to the results of the theoretical study, they demonstrated that the cooling performance of TECs can be increased with suitable heat sink optimization. Zhu et al. [8] conducted a theoretical study to examine optimal heat sink dimensions. With the proper optimizing of heat sink dimensions, the highest coefficient of performance and the lowest cold side temperature can be achieved. In recent years, it has been achieved to reduce the hot surface temperatures even more with the help of a fluid circulating on these surfaces. Dizaji et al. [9] carried out an empirical study to examine the cooling performance of an air-water based thermoelectric system. They used a water-cooled block on the hot side of Peltier for the purpose of adjusting at constant temperature for the different climatic conditions and different flow rates. The empirical results showed that the temperature of the cold surface of Peltier can be further decreased by controlling hot side temperatures at lower values. In order to further enhance the quantity of heat removed from the hot surface of Peltier, it is a more economical and efficient solution to prefer nanofluids with much better thermal performances instead of the base liquid as a fluid [10]. Nanofluids are obtained by homogeneously dispersing nanoparticles in base liquids such as water, ethylene glycol, and kerosene. They provide much higher thermal conductivity than conventional refrigerants [11]. There are many studies in the literature to discharge larger amounts of heat from the hot surface of Peltier using nanofluids or different systems. Wiryasart et al. [12] examined the effect of using ferrofluid and nanofluid on heat transfer rates in thermoelectric modules. For this purpose, they prepared Fe_3O_4 ferrofluid and TiO_2 nanofluid at the 0.015% and 0.005% concentration ratios, respectively and they used a dummy battery pack as a heat load by filling it with water at a constant temperature. The results revealed that using nanofluid and ferrofluid ensured an increase of the Peltier effect by decreasing the Fourier effect. In addition, the maximum heat transfer rate was observed 11.17% higher than water and 12.57% higher than nanofluids for ferrofluids at the same concentration ratio. Lin et al. [13] carried out an empirical study to examine the thermal behaviour of light-emitting diodes (LEDs) with a system combining a TEC. They used water and TiO_2 as coolant and measured LED substrate temperature at distinct nanofluid concentration ratios and TEC power. The results revealed that with the use of nanofluids instead of water, it is possible to reduce the LED substrate temperature up to 18.5°C and to reduce the thermal resistance by 42.4%. Sohel et al. [14] examined the thermal performance of a mini channel heat sink. In the experimental study, Al_2O_3 -Water nanofluids were used as refrigerant at distinct Reynold numbers and volume ratios and the thermal performance values obtained in the case of using Al_2O_3 -Water nanofluids compared with values obtained in the case of using pure water. The experimental results showed that instead of pure water, using of Al_2O_3 -Water nanofluids ensures considerable increment in heat transfer performances for TEC applications. Mohammadian and Zhang [15] conducted an empirical work to evaluate the effect of using nanofluids on performance parameters in TEC applications. They prepared a thermoelectric cooling system containing two micro-channel heat exchangers installed on both surfaces of the Peltier. The experimental results revealed that the COP value and total entropy

production decrease at high Reynolds numbers with the decrease in particle size. Ahmed et al. [16] investigated cooling applications of electronic devices through TEC used with nanofluids. In their experimental study, they observed the thermal performance of the system by using Al_2O_3 -Water nanofluid at various volume concentrations to remove more heat from the hot surface of the TEC. According to the results, with the use of 0.2% Al_2O_3 -Water nanofluids, they achieved a 40% improvement in the COP value of the system. Nanofluids are used as an efficient method in cases where heat is required to be removed from the heat sinks, apart from TECs [17]. Peyghambarzadeh et al. [18] experimentally examined the thermal performance of Al_2O_3 -Water and CuO -Water nanofluids in a heat sink under constant heat flux and laminar flow conditions. Compared to the base fluid, the heat transfer coefficient enhanced up to 49% and 27% for the 1% volume of Al_2O_3 -Water and 0.2% volume of CuO -Water nanofluids, respectively. Naphon and Nakharintr [19] studied heat transfer properties of TiO_2 -Water nanofluids in comparison with de-ionized water. In their study, heat flux ratio, Reynolds number and inlet temperatures were considered. As a result of the study, they achieved that TiO_2 -Water nanofluids have better thermal performance than the de-ionized water. In an experimental study, Rimbault et al. [20] investigated the thermal behaviour of CuO -Water nanofluids at different volume fractions inside a microchannel heat sink. Experiments were conducted for both turbulent and laminar flow conditions. According to the experimental results, CuO -Water nanofluids showed highly better thermal performance than pure water.

In the present study, the effects of nanofluid usage in thermoelectric refrigerator applications on electricity consumption and cooling times are investigated. In the TEC system used in the thermoelectric cooling cabinet specially designed and produced for the study, a cooling block was used on the hot surface of the Peltier, and it was planned to remove more heat from the surface by circulating different nanofluids in various concentrations. The experiments were repeated for certain periods, both for the situation where the inside of the cabinet is empty and by leaving a certain amount of product to be cooled inside the cabinet and decreases in the indoor temperature of the cabinet were watched.

The aim of this study is to increase the quantity of heat removed by the hot surface of the Peltier and thus provide improvements in cooling power. When this situation occurs, it is expected that the cooling cabinet temperature will reach the lower temperatures earlier, and therefore faster product cooling will take place. As a result of this, less energy will be consumed especially in portable product cooling applications (picnic type refrigerators, in-car refrigerators, organ and drug transport boxes). In this respect, this study is important in terms of the efficient use of energy resources.

In the study, nanofluids, which are frequently used in cooling applications, were preferred. The nanoparticles used are easily supplied and there is precise information about their thermal and physical properties in the literature. In addition, they are suitable for comparison with each other and with other nanofluids in the literature in terms of thermal conductivity values. For these reasons, these nanofluids were preferred in this study. In addition, in order to observe the effect of mixing ratios, the tests were repeated at three different mixing ratios by mass.

2. Material

2.1. Preparation of Nanofluids

In the system, silicon dioxide (SiO_2), aluminium oxide (Al_2O_3) and titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles were prepared by a two-step method with water at 1% concentration ratios. The properties of the nanoparticles used in the system are shown in Table 1 and their preparation is shown in figure 1.

Table 1. Characteristics of nanoparticles used in study

Particle	Size (nm)	Phase	Surface Area (m^2/g)	Colour	Purity (%)
<i>Aluminium Oxide</i>	78	Gamma	>20	White	99,55
<i>Silicon Dioxide</i>	55-75	Amorphous	150-550	White	98,5
<i>Titanium Dioxide</i>	38	Anatase	55	White	99,55



Figure 1. Preparation of nanofluids

2.2. Preparation of TEC System

A TEC1-12715 model single stage TEC with 15 volts and 10 amperes power was used in the system. An aluminium ingot was adhered to the cold surface of TEC with thermal paste. Then, the other surface of the aluminium ingot was coated with thermal paste and the aluminium fin was combined with this surface. An aluminium water-cooled block was adhered to the hot side of the Peltier with the help of thermal paste. Then, an aluminium fin was attached to the other surface of this block with the same method. To accelerate the heat dissipation from the aluminium fins, 12 V, 1 A fans were used on both fins. Schematic description of the TEC system was shown in figure 2.

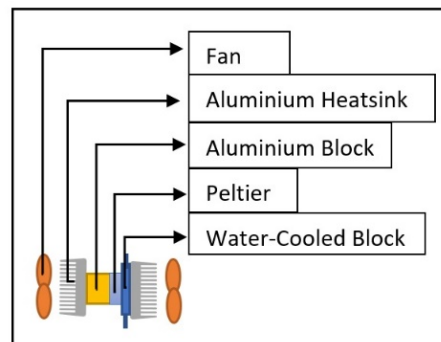


Figure 2. Schematic description of TEC systems

2.2. Preparation of Cooled Cabinet

First, a cabinet of 1.8 mm thick MDF material was produced with inner dimensions of 30 cm width, 30 cm depth, and 40 cm height. Later, a 60 mm larger cabinet was produced from this cabinet in all directions, and the smaller one was placed inside the larger one, and the 60 mm gaps in between were filled with XPS foam on the backside and polyurethane foam on the other sides. On the front, a frame made of PVC material is used. The production of the cooled cabinet was shown in Figure 3.



Figure 3. The production of the cooled cabinet

3. Method

First, the prepared TEC system was mounted from the front cover of the refrigerator cabinet. K-type thermocouples are placed in suitable places to measure cabin temperature, cooled product temperature, outdoor temperature, refrigerant temperature, and heatsink temperatures. One end of the heat exchanger is connected to the water-cooled block in the TEC assembly with a transparent hose. The other end of the water-cooled block is connected to the circulation pump with a transparent hose. The other end of the heat exchanger is connected to the mini fluid pool in which the circulation pump is located. Thus, the refrigerant coming to the heat exchanger by taking heat from the water-cooled block will leave its excess heat to the environment and go to the fluid pool, and from there it will return to the water-cooled block again with the circulation pump. The schematic diagram of the system is demonstrated in figure 4. Experiments were first carried out without adding nanoparticles, using 600 ml of water as a refrigerant, both for the loaded and unloaded conditions, and the results were accepted as the reference situation to be compared with the situations using nanofluids. Then, experiments were repeated with nanofluids (Al_2O_3 -Water, TiO_2 -Water, and SiO_2 -Water) prepared, both for the unloaded state and for the loaded state. In addition, the temperature of the conditioning room in which the experimental setup is located was adjusted to 18, 24 and 30 °C with the help of an air conditioner, and all tests were repeated at three different outdoor temperatures for loaded and unloaded conditions, and the effect of outdoor conditions on the cooling power was observed.

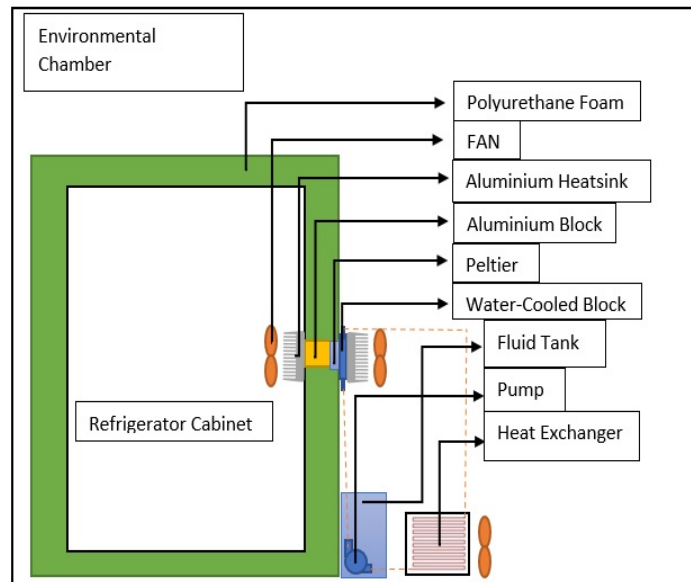


Figure 4. The schematic diagram of the TEC system

Test times were determined as 1 hour. In the case of using water without nanoparticle addition as the refrigerant, the temperature of the cooled cabin was measured after 1 hour, and it was observed in how many minutes the same cabin temperature was reached when nanofluids were used.

4. Results

Peltier with a power of 15 V 10 A was used in the system.

$$W = V \times I \quad (1)$$

$$W = 15 \times 10 = 150 \text{ W} = 0.15 \text{ kW}$$

4.1. Without Load Conditions

In the case of using water without nanoparticle addition as a refrigerant (reference case) without load conditions at 18 °C ambient temperature, the temperature of the cooled cabin decreased to 1.7 °C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the fastest in 1560 seconds when Al_2O_3 -Water nanofluid was used. It has been observed that faster cooling occurs in cases where TiO_2 -

Water and SiO₂-Water are used compared to the reference case. As shown in Figure 5, 540 kW energy is required in the reference case to reduce the cooled cabinet temperature to 1.7 °C, while this value is 234 kW when Al₂O₃-Water nanofluid is used.

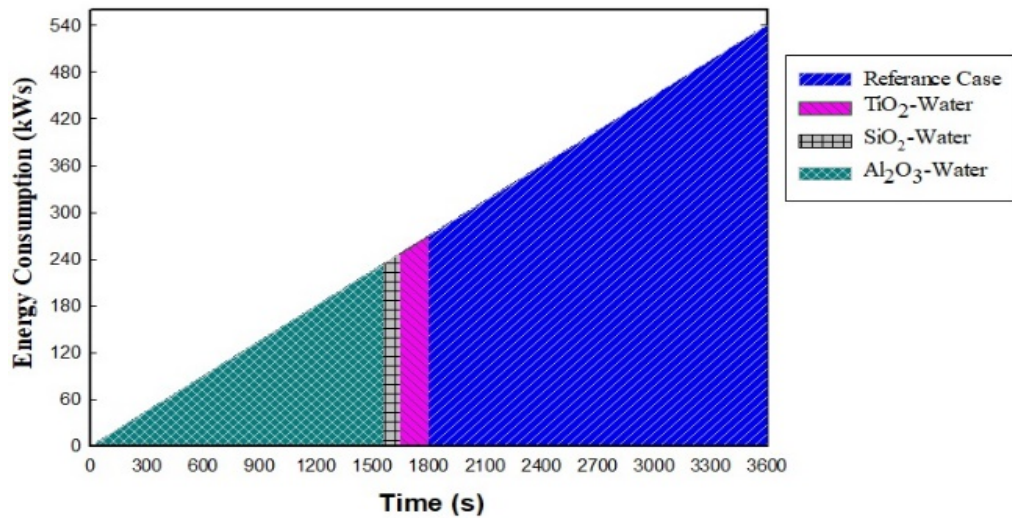


Figure 5. Comparison of electricity consumption at 18 °C ambient temperature without load conditions

For the 24 °C ambient temperature conditions, the temperature of the cooled cabin decreased to 1.3 °C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the fastest in 2130 seconds when Al₂O₃-Water nanofluid was used. It has been observed that faster cooling occurs in cases where TiO₂-Water and SiO₂-Water are used compared to the reference case. As seen in Figure 6, 319.5 kW of energy was consumed in the case where the temperature value at the end of the reference state is reached the fastest with nanofluids.

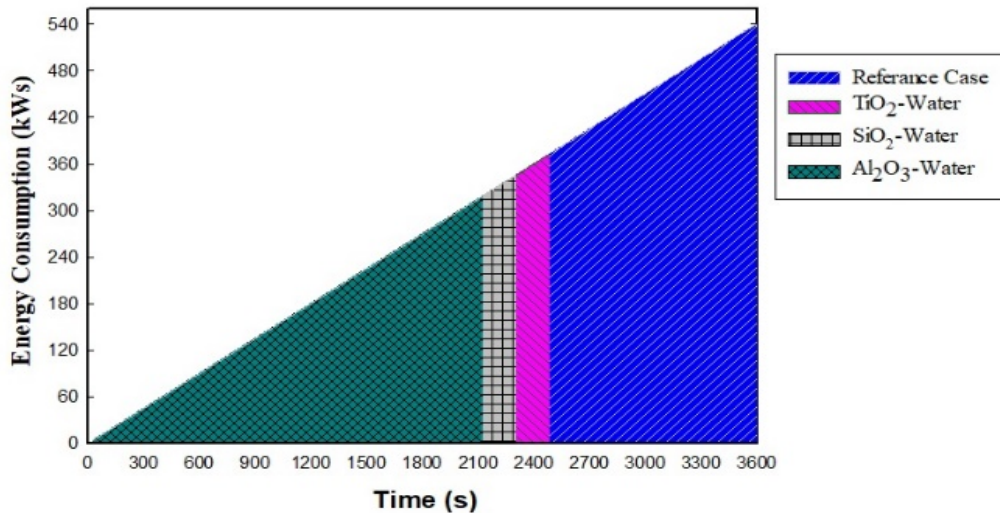


Figure 6. Comparison of electricity consumption at 24 °C ambient temperature without load conditions

For the 30 °C ambient temperature conditions, the temperature of the cooled cabin decreased to 6.6 °C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the fastest in 2700 seconds when Al₂O₃-Water nanofluid was used. It has been observed that faster cooling occurs in cases where TiO₂-Water and SiO₂-Water are used compared to the reference case. As seen in Figure 7 405 kW of energy was consumed in the case where the temperature value at the end of the reference state is reached the fastest with nanofluids.

4.2. With Load Conditions

In the reference case at loaded conditions at 30 °C ambient temperature, the temperature of the cooled cabin decreased to 11 °C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the

fastest in 2190 seconds when Al_2O_3 -Water nanofluid was used. It has been observed that faster cooling occurs in cases where TiO_2 -Water and SiO_2 -Water are used compared to the case of reference case. As shown in Figure 8, 540 kW energy is required in the reference case to reduce the cooled cabinet temperature to 1.7°C , while this value is 328.5 kW when Al_2O_3 -Water nanofluid was used.

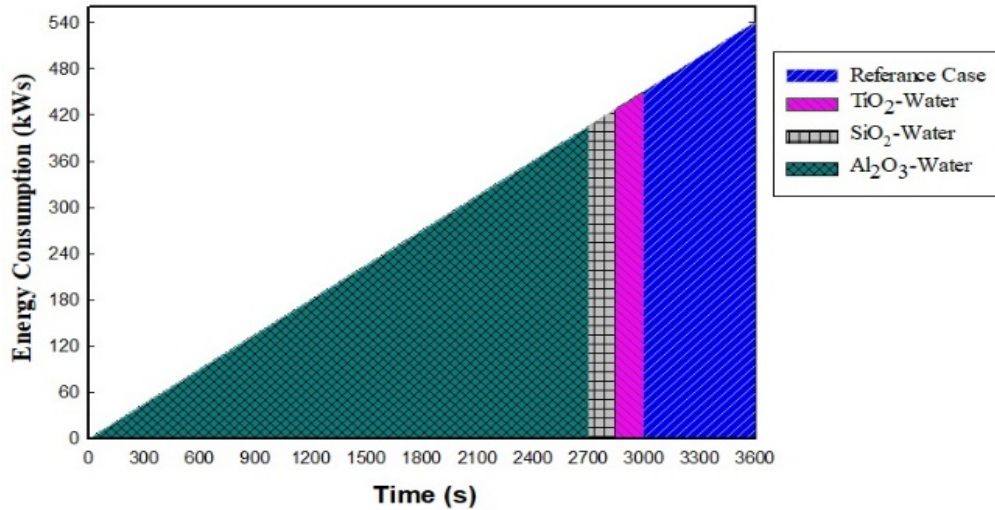


Figure 7. Comparison of electricity consumption without load conditions at 30°C ambient temperature

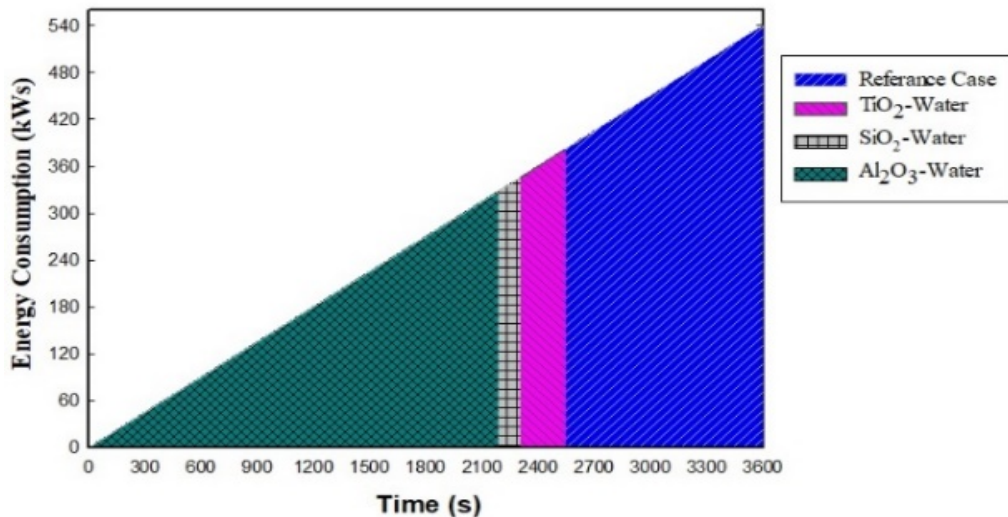


Figure 8. Comparison of electricity consumption with load conditions at 30°C ambient temperature

For the 24°C ambient temperature and reference case, the temperature of the cooled cabin decreased to 8.5°C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the fastest in 1920 seconds when Al_2O_3 -Water nanofluid was used. As seen in Figure 9, 288 kW of energy was consumed in the case where the temperature value at the end of the reference state is reached the fastest with nanofluids.

For the 18°C ambient temperature and reference case, the temperature of the cooled cabin decreased to 5.8°C at the end of 3600 seconds. The same temperature value was obtained the fastest in 1800 seconds when Al_2O_3 -Water nanofluid was used. As seen in Figure 10, 270 kW of energy was consumed in the case where the temperature value at the end of the reference state is reached the fastest with nanofluids.

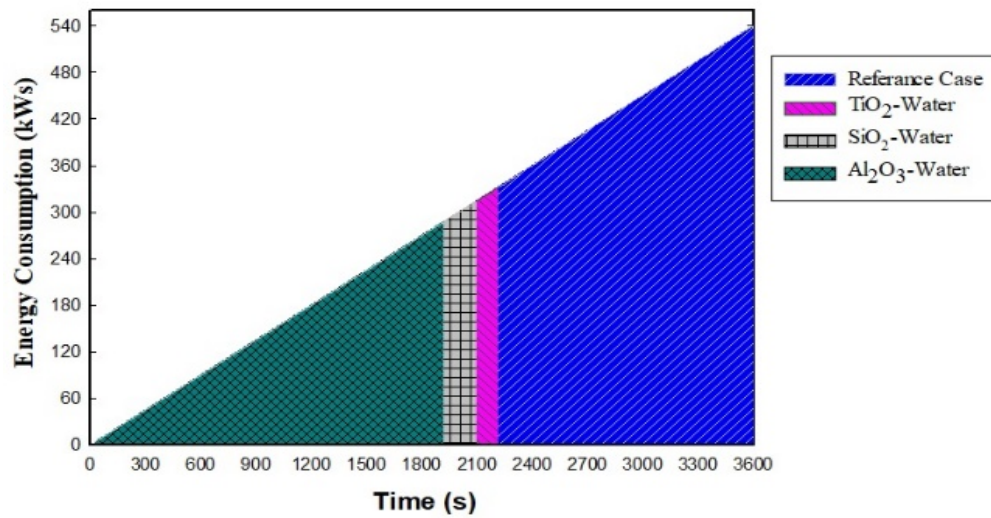


Figure 9. Comparison of electricity consumption with load conditions at 24 °C ambient temperature

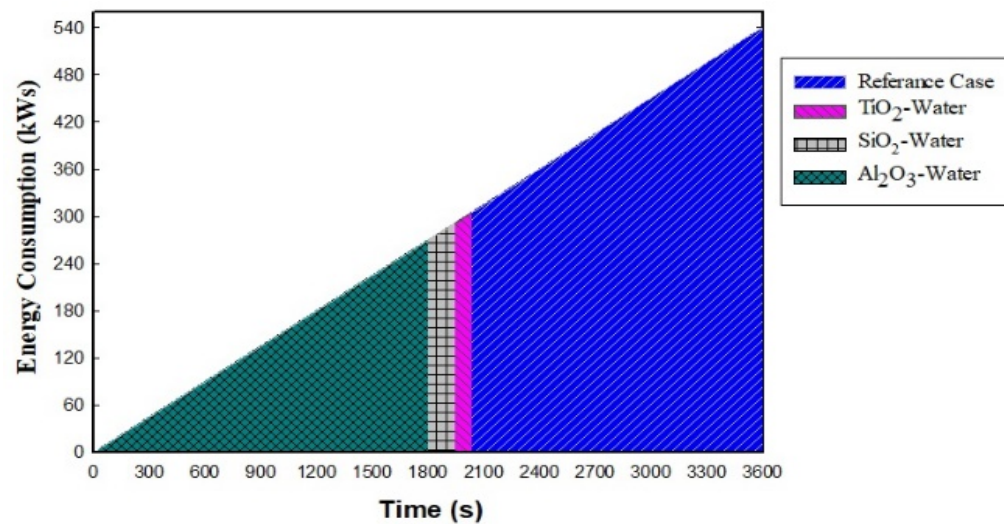


Figure 10. Comparison of electricity consumption with load conditions at 18 °C ambient temperature

5. Conclusion

In the present study, the effect of nanofluid usage in thermoelectric refrigerators on electricity consumption was investigated. According to the results obtained from the study, in the case of using nanofluid instead of water as a refrigerant in the system, the cooling cabinet temperatures can reach the lower values earlier. This situation provides significant advantages in terms of efficient use of energy resources, especially in applications that do not work continuously but are required to cool the product quickly (such as picnic type refrigerators, vehicle glovebox coolers, organ, and drug transport boxes).

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

References

- [1] Y. He, R. Li, Y. Fan, Y. Zheng, and G. Chen, "Study on the performance of a solid-state thermoelectric refrigeration system equipped with ionic wind fans for ultra-quiet operation," *International Journal of Refrigeration*, vol. 130, pp. 441–451, 2021. doi:10.1016/j.ijrefrig.2021.06.017
- [2] E. Cuce, T. Guclu, and P. M. Cuce, "Improving thermal performance of thermoelectric coolers (TECs) through a nanofluid driven water to air heat exchanger design: An experimental research," *Energy Conversion and Management*, vol. 214, pp. 112893, 2020. doi:10.1016/j.enconman.2020.112893

- [3] T. Guclu and E. Cuce, "Thermoelectric Coolers (TECs): From Theory to Practice," *Journal of Electronic Material*, vol. 48, no. 1, pp. 211–230, 2019. doi:10.1007/s11664-018-6753-0
- [4] X. D. Wang, Q. H. Wang, and J. L. Xu, "Performance analysis of two-stage TECs (thermoelectric coolers) using a three-dimensional heat-electricity coupled model," *Energy*, vol. 65, pp. 419–429, 2014. doi:10.1016/j.energy.2013.10.047
- [5] J. Yu and B. Wang, "Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples," *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 1, pp. 32–39, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.08.006
- [6] R. Chein and Y. Chen, "Performances of thermoelectric cooler integrated with microchannel heat sinks," *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 6, pp. 828–839, 2005. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.02.001
- [7] L. Zhu and J. Yu, "Optimization of heat sink of thermoelectric cooler using entropy generation analysis," *International Journal of Thermal Science*, vol. 118, pp. 168–175, 2017. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.015
- [8] L. Zhu, H. Tan, and J. Yu, "Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 685–690, 2013. doi:10.1016/j.enconman.2013.08.014
- [9] H. Sadighi Dizaji, S. Jafarmadar, S. Khalilarya, and A. Moosavi, "An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit," *Applied Energy*, vol. 181, pp. 357–366, 2016. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.074
- [10] M. Gupta, V. Singh, R. Kumar, and Z. Said, "A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 638–670, 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.02.073
- [11] E. Cuce, P. M. Cuce, T. Guclu, and A. B. Besir, "On the Use of Nanofluids in Solar Energy Applications," *Journal of Thermal Science*, vol. 29, no. 3, pp. 513–534, 2020. doi:10.1007/s11630-020-1269-3
- [12] S. Wiriyasart, P. Suksusron, C. Hommalee, A. Siricharoenpanich, and P. Naphon, "Heat transfer enhancement of thermoelectric cooling module with nanofluid and ferrofluid as base fluids," *Case Studies Thermal Engineering*, vol. 24, no. February, p. 100877, 2021. doi:10.1016/j.csite.2021.100877
- [13] X. Lin, S. Mo, B. Mo, L. Jia, Y. Chen, and Z. Cheng, "Thermal management of high-power LED based on thermoelectric cooler and nanofluid-cooled microchannel heat sink," *Applied Thermal Engineering*, vol. 172, p. 115165, 2020. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115165
- [14] M. R. Soheli, S. S. Khaleduzzaman, R. Saidur, A. Hepbasli, M. F. M. Sabri, and I. M. Mahbubul, "An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃-H₂O nanofluid," *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 74, pp. 164–172, 2014. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.010
- [15] S. K. Mohammadian and Y. Zhang, "Analysis of nanofluid effects on thermoelectric cooling by micro-pin-fin heat exchangers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 282–290, 2014. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.05.010
- [16] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 81–90, 2016. doi:10.1016/j.expthermflusci.2015.11.023
- [17] M. Khoshvaght-Aliabadi and M. Sahamiyan, "Performance of nanofluid flow in corrugated minichannels heat sink (CMCHS)," *Energy Conversion and Management*, vol. 108, pp. 297–308, 2016. doi:10.1016/j.enconman.2015.11.026
- [18] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, A. R. Chabi, and M. Salimi, "Performance of water based CuO and Al₂O₃ nanofluids in a Cu-Be alloy heat sink with rectangular microchannels," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 28–38, 2014. doi:10.1016/j.enconman.2014.05.013
- [19] P. Naphon and L. Nakharintr, "Heat transfer of nanofluids in the mini-rectangular fin heat sinks," *International Communications in Heat Mass Transfer*, vol. 40, no. 1, pp. 25–31, 2013. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.012
- [20] B. Rimbault, C. T. Nguyen, and N. Galanis, "Experimental investigation of CuO-water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink," *International Journal of Thermal Science*, vol. 84, pp. 275–292, 2014. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.025

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Analysis of Turkey's Base Metal Ore Exports by Herfindahl Hirschman Concentration Index

Mikail Başıyigit^a, Elif Uzun Kart^a

Submitted: 28.01.2022 Revised: 24.05.2022 Accepted: 07.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705007

ABSTRACT

Turkey produces underground resources through mining activities and brings them into the economy. Some of the produced minerals are exported. One of the most important of these minerals is base metal ores. Base metal ores are mainly exported to China, and its demand for raw materials is constantly increasing. These ores are also sent for re-import after processing to Belgium, which hosts the important smelters of Europe. However, the weight of these countries in the export markets has greatly increased. Therefore they are negatively affecting the market diversity of exports and increasing the risk of market concentration. The Herfindahl Hirschman concentration index was used to investigate and determine the extent of these risks and their impact on metallurgical raw material exports. The results showed that Turkey's base metal exports are moderately and highly concentrated and vulnerable to the risk of monopoly. In addition, it has been determined that increasing concentration levels increase the volume of raw material trade.

Türkiye Baz Metal Cevheri İhracatının Herfindahl Hirschman Yoğunlaşma Endeksi ile İncelenmesi

ÖZ

Türkiye yeraltı kaynaklarını madencilik faaliyetleri ile üreterek ekonomiye kazandırmaktadır. Üretilen bazı madenler ihraç edilmektedir. Bu madenlerden en önemlilerinden birisi de baz metal cevherleridir. Baz metal cevherleri sürekli büyüyen ve talebi artan Çin'e ve Avrupa'nın önemli izabe tesislerini barındıran Belçika'ya işlendikten sonra geri ithalat için gönderilmektedir. Ancak ihracat pazarlarında bu ülkelerin ağırlıklarının fazla olması ihracatın Pazar çeşitliliğine negatif yönde etki ederek pazar yoğunlaşması riskini artırmıştır. Bu risklerin boyutunu ve metalurjik hammadde ihracatı üzerindeki etkisini araştırmak ve belirlemek için Herfindahl Hirschman yoğunlaşma endeksi kullanılmıştır. Sonuçlar Türkiye baz metal ihracatının orta ve ileri düzeyde yoğunlaşma gösterdiğini, monopson riski taşıdığını göstermiştir. Ayrıca artan yoğunlaşma seviyelerinin hammadde ticareti seviyesini de artırdığı tespit edilmiştir.

Keywords: Base metals, mineral export, concentration index, HHI

^a, Marmara University, Technology Faculty, Dept. of Metallurgy and Material Engineering
34400 - İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8503-4001
e mail: mikail.basyigit@marmara.edu.tr

^a, Marmara University, Technology Faculty, Dept. of Metallurgy and Material Engineering
34400 - İstanbul, Türkiye
Orcid: 0000-0002-4950-2162
e mail: elif.uzun@marmara.edu.tr

*Corresponding author:
mikail.basyigit@marmara.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Baz metaller, maden ihracatı, yoğunlaşma endeksi, HHI

1. Introduction

Mineral reserves were accumulated, formed, and allocated through certain geological developments such as comet impacts, tectonic movements, and sedimentation. By the nature of this mechanism, material accumulation is not related or bounded with modern geography. Therefore “mineral reserves” were unevenly distributed on the land and under the sea [1]. Thus every modern country has different levels of abundance of minerals. While some countries are rich in case of certain minerals, some are not. However, this unequal dispersion does not affect modern society. Society is interconnected by the material flow that from abundant to scarce or from sufficient to insufficient.

Modern Turkey is located on the Anatolian peninsula and a small part of Thracian. There are 4 tectonic plates i.e. Anatolian plate, Eurasian Plate, Arabian Plate, and African Plate, under the modern Turkey. Therefore, the geology of Turkey is quite active and complex [2], [3]. This complexity has given Turkey important mineral reserves such as; boron (73% of world reserves), carbonated rocks (33% world reserves), graphite (28% of world reserves), barite (9% worlds reserves), antimony (6.7% of world reserves), gold (3% of world reserves) [4]–[9]. As a result of this wealth, Turkey exports 59 different mineral titles to 181 sovereign countries all over the world [10]. In 2021, Turkey made 5930M\$ from exported minerals. Thus minerals count for Turkey 2,63% of total exports [11], [12].

Exporting metallic raw materials and other minerals gives exporter countries a considerable amount of income regarding the unit value and amount of the material. There is another important parameter affecting income is the market itself namely market structure [13]. A concentrated market would pose danger for both exporters and importers. From the exporters’ aspect, the dependence on one or a small number of countries threatens prices and income respectively. Likewise; from importers’ point of view, the dependence jeopardizes material supply security in the mid-long term [1], [14], [15]. Therefore a diversified market structure is desired and aimed for both sides. The diversity of the markets is measured and determined with concentration (diversity) indexes. The most widely used indexes are Herfindahl-Hirschman, Concentration Ratio, and Shannon Wiener Entropy.

This paper deals with Turkey’s base metal ore exports i.e. aluminum, copper, lead, zinc, and nickel ores. The market concentrations of these metallurgic raw materials were determined individually for each mineral title. Thus, the impact of the market structure on mineral exports was investigated.

2. Material And Investigation Methodology

Base metals are common metals. After steel (iron), they are the most produced metals. When exposed to air or moisture, they oxidize relatively quickly. They are mostly listed as Al, Cu, Ni, Pb, Zn, and Sn. But in this study, Sn was excluded since there is no tin reserve in Turkey. In this research, as stated before, base metals were selected to observe the effect of market structure on export. Their reserves, production rates, and Turkey’s share were given respectively. Following this step, market shares were calculated by values were taken from Trademap. By using calculated market shares and concentration indexes (HHI) market diversities were determined.

2.1. Base Metals

Base metals are common metals. After steel (iron), they are the most produced metals. When exposed to air or moisture, they oxidize relatively quickly. They are mostly listed as Al, Cu, Ni, Pb, Zn, and Sn. But in this study, Sn was excluded since there is no tin reserve in Turkey.

2.1.1. Aluminum ore

World recoverable aluminum reserves (Al content) are approximately 30000Mtons. However, Turkey has only a very small portion of it. In the case of ore production, Turkey’s share is proportional to its reserve (Table 1).

Table 1. World and Turkey Aluminum Reserves and Production [16, 17]

	Reserves (Mton)		Production (Mton)	
	Amount	Share (%)	Amount	Share (%)
Turkey	63	0.21	1.00	0.27
Others	29937	99.79	369	99.73
Total	30000	100	370	100.00

2.1.2. Copper ore

While world recoverable copper reserves (Cu content) are approximately 870Mtons, Turkey's share is 3.79Mtons. Turkey's production is parallel to the share of its reserve (Table 2).

Table 2. World and Turkey Copper Reserves and Production [18,19]

	Reserves (Mton)		Production (Mton)	
	Amount	Share (%)	Amount	Share (%)
Turkey	3.79	0.44	0.10	0.49
Others	866.21	99.56	369.90	99.51
Total	870.00	100	370.00	100.00

2.1.3. Lead ore

World lead reserves contain 88Mtons of metallic Pb. Turkey holds 0.86Mtons of world reserves. However, Turkey's share in ore production is twice its reserve share (Table 3).

Table 3. World and Turkey Copper Reserves and Production [20, 21]

	Reserves (Mton)		Production (Kton)	
	Amount	Share (%)	Amount	Share (%)
Turkey	0.90	0.98	72	1.64
Others	87.10	99.02	4328	98.36
Total	88.00	100.00	4400	100.00

2.1.4. Nickel ore

World recoverable nickel reserves (Ni content) are approximately 95Mtons. Turkey bears 1.20Mtons of global reserves. Turkey's production is 10Ktons while world production is 2040Ktons (Table 4).

Table 4. World and Turkey Nickel Reserves and Production [22, 23]

	Reserves (Mton)		Production (Kton)	
	Amount	Share (%)	Amount	Share (%)
Turkey	1.20	1.28	10.20	0.50
Others	93.80	98.72	2029.80	99.50
Total	95.00	100.00	2040.00	100.00

2.1.5. Zinc ore

World recoverable zinc reserves (Zn content) are approximately 250Mtons. Turkey accounts for 2.2Mtons of total reserves (Table 5).

Table 5. World and Turkey Zinc Reserves and Production [20, 24]

	Reserves (Mton)		Production (Mton)	
	Amount	Share (%)	Amount	Share (%)
Turkey	22.00	0.88	0.22	1.83
Others	228.00	99.12	11.78	98.17
Total	250.00	100.00	12.00	100.00

2.2. Herfindahl Hirschman Concentration Index

Concentration (diversity) indexes have been used by scientists, economists, engineers, and biologists

for several decades. The versatility and adaptability of these indexes give them a wide range of usage areas.

The Herfindahl Hirschman Index was individually developed by two separate economists. While Hirschman used the index to examine the foreign trade of the US, Herfindahl incorporated the index to measure the competitiveness of US steel production. [25]. The formula of the index is given below (Eq.1) [26].

$$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (1)$$

Where;

HHI: Herfindahl –Hirschman Concentration Value

n: Number of exported countries

S_i: Share of exported countries (%)

Since this index used the 2nd power of shares, it gives higher importance to larger shares. The interpretation of HHI index intervals were given below in Table 6.

Table 6. HHI Intervals [27]

HHI	Concentration Level
HHI<100	Highly Diversified Market
100≤HHI<1500	Diversified Market
1500≤HHI<2500	Moderately Diversified Market
2500≤HHI<10000	Highly Concentrated Market
HHI=10000	Monopoly / Monopsony

2.3. Base Metal Ore Export

The export values were collected from Trademap. The time interval was selected as 2001-2020 due to data quality and availability. Since the data is accessible online, only 2020 values and related HHI values were given. The data belonging to the year 2020 were given for each base metal ore that was listed alphabetically. Aluminum ore was given in Table 7, copper ore in Table 8, lead ore in Table 9, nickel ore in Table 10, and finally zinc ore in Table 11.

Table 7. Turkey Aluminum Ore Export

Al Ore Export (M\$)	Year ₂₀₂₀	Share (%)	HHI ₂₀₂₀
China	12.75	34.07	1161
Canada	5.11	13.64	186
France	2.88	7.70	59
Greece	2.39	6.38	41
Spain	2.33	6.23	39
USA	2.15	5.75	33
Croatia	1.62	4.32	19
Holland	1.39	3.72	14
Israel	1.37	3.67	13
Kuwait	1.01	2.70	7
Others	0.00	0.00	
Total	37.43	100.00	1592

Table 8. Turkey Lead Ore Export

Pb Ore Export (M\$)	Year ₂₀₂₀	Share (%)	HHI ₂₀₂₀
China	153.18	88.85	7894
S.Korea	8.88	5.15	27
Germany	2.92	1.69	3
Bulgaria	1.74	1.01	1
India	1.72	1.00	1
Iran	1.61	0.94	1
Greece	1.15	0.66	0
Peru	0.58	0.33	0
Indonesia	0.39	0.22	0
Colombia	0.15	0.09	0
Othes	0.09	0.05	
Total	172.41	100.00	7927

Table 9. Turkey Nickel Ore Export

Ni Ore Export (M\$)	Year ₂₀₂₀	Share (%)	HHI ₂₀₂₀
China	16.77	99.93	9986
Others	0,02	0,07	
Total	16.79	100	9986

Table 10. Turkey Zinc Ore Export

Zn Ore Export (M\$)	Year ₂₀₂₀	Share (%)	HHI ₂₀₂₀
Belgium	169.02	58.26	3394
Iran	42.07	14.50	210
Spain	35.15	12.12	147
China	10.14	3.50	12
S. Korea	8.24	2.84	8
Finland	7.27	2.51	6
Mexico	5.76	1.99	4
Peru	5.18	1.78	3
Japan	4.30	1.48	2
Bulgaria	2.99	1.03	1
Others	0.00	0.00	
Total	290.11	100.00	3788

Results of the HHI Analysis were given in the following Results section. Evaluation and discussion of the results were given in the Discussion section.

3. Results

The market concentration analyses results were given as metal ore-wise for the years between 2001 and 2020.

3.1. Aluminum Ore HHI Values

Aluminum ore export market concentration values were given in Figure 1 for years between 2001-2020. While the index values were high in the early 2000s, later on market diversity has increased. Since 2010, aluminum ore export is moderately concentrated.

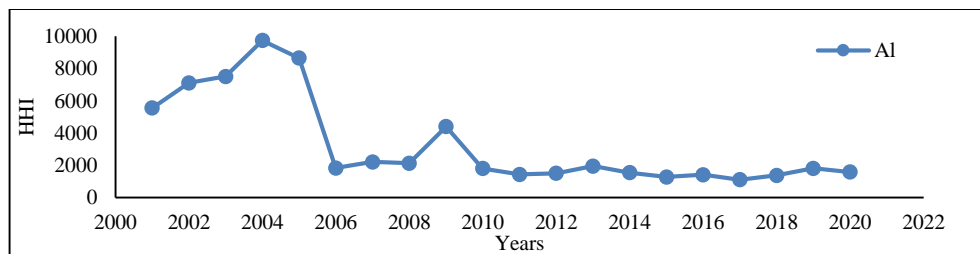


Figure 1. Aluminum ore export market concentration values

3.2. Copper Ore HHI Values

Concentration values of the copper ore export market were given in Figure 2. While the index values were low and the market was moderately concentrated after 2007 market diversity has been drastically dropped. In the last ten years, copper ore export is highly concentrated. Bulgaria is the largest importer of copper ore.

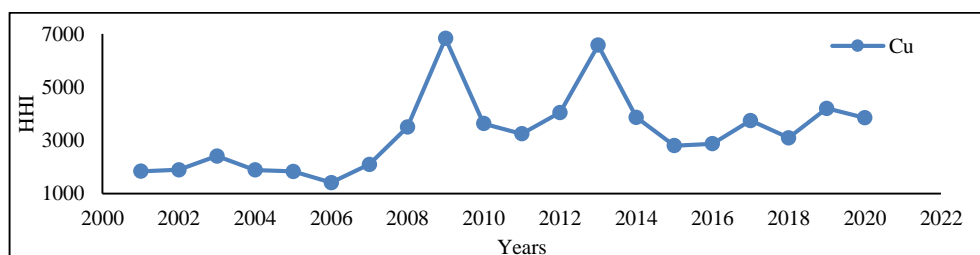


Figure 2. Copper ore export market concentration values

3.3. Lead Ore HHI Values

The lead ore export market has been poorly diversified for 20 years. Index values were given in Figure 3. China is the largest importer of lead ore.

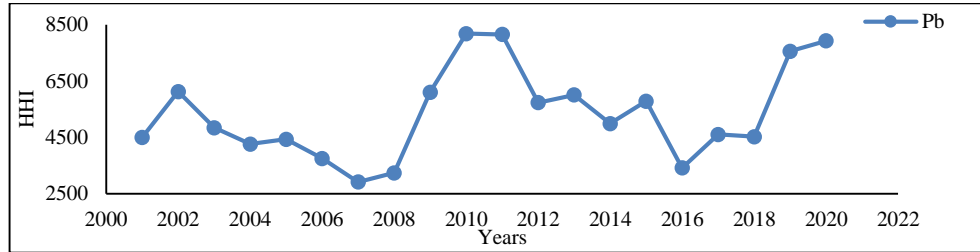


Figure 3. Lead ore export market concentration values

3.4. Nickel Ore HHI Values

Turkey has started exporting nickel ore in 2003. Since 2003 the market structure is almost monopsony (Figure 4). China is the largest (sometimes the sole) importer of Turkish nickel ore.

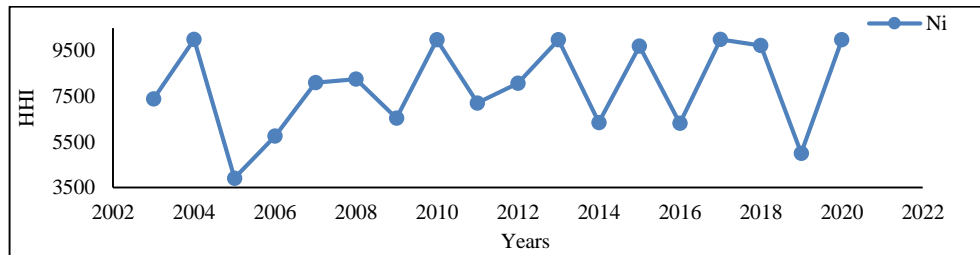


Figure 1. Nickel ore export market concentration values

3.4. Zinc Ore HHI Values

The diversity of the zinc ore export market has been decreased for 20 years. Market concentration has changed from moderately to high. Index values were given in Figure 5. Belgium is the largest importer of zinc ore

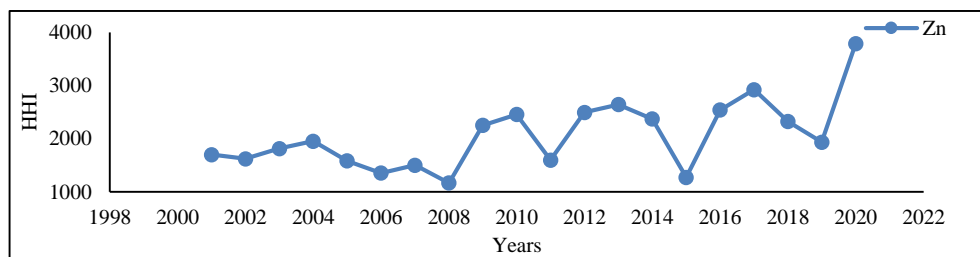


Figure 2. Zinc ore export market concentration values

The result of the market diversity analysis has shown that Turkey's base metal ore export exhibits "country dependence". In other words, while aluminum, lead, and nickel ore exports are dependent on China, copper, and zinc ore exports are dependent on Belgium. Aluminum ore export is the less concentrated market and stable for 10 years. Copper, lead, nickel, and zinc exports have more volatility. The effects of the market concentration on exports were discussed in the following section.

4. Discussion

In the previous section, Turkey's base metal exports were investigated. The results have shown that excluding the aluminum ore, mineral exports are highly concentrated. However, effect of the

concentration is unclear besides the potential monopsony risks. Therefore the relationships between HHI values and export volumes were presented.

Aluminum ore export volume shows no relationship with market diversity. The market concentration has no significant impact on the export level (Figure 6a). Among the five metals, aluminum has the most diverse market. Unlike the aluminum, copper has a concentrated market and the copper ore export tends to increase along with the market concentration (Figure 6b)

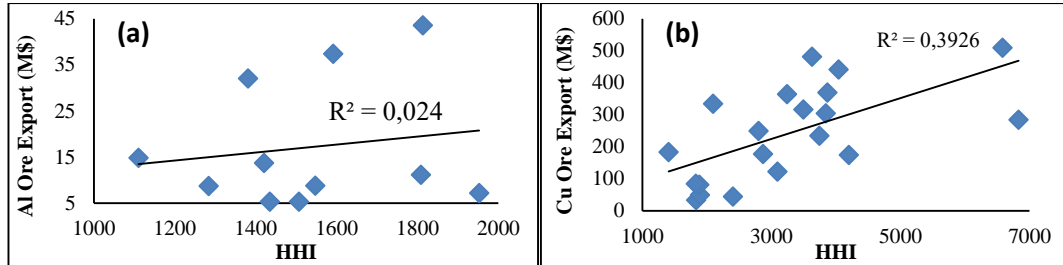


Figure 6. Market concentration – export volume relationship of Al (a) and Cu (b)

Lead ore export has a small tendency to increase with the market concentration (Figure 7a). Likewise, the nickel ore export increases with concentration level (Figure 7b). The nickel has the least diverse market among the other base metals.

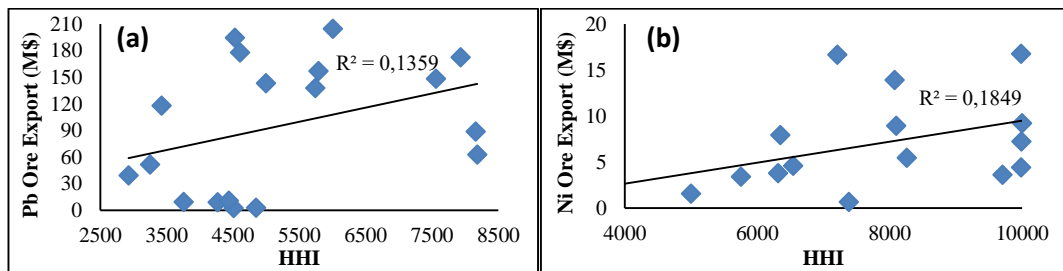


Figure 7. Market concentration – export volume relationship of Pb (a) and Ni (b)

Zinc ore export increases along with the market concentration. This mutual relationship can be distinguished from Figure 8. The zinc export market is the second most diversified market among the base metals.

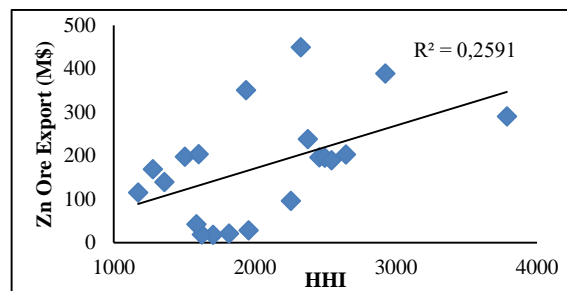


Figure 8. Market concentration – export volume relationship of Zn

5. Conclusion and Recommendations

In this study; Turkey's base metal ore export was investigated from the market concentration aspect. Moreover, the effect of the market diversity on export volume was examined for further inspection. The findings were summarized as below:

- Base metal ore export of Turkey is vulnerable to adverse outcomes of the market concentration.
- Two countries are responsible for the majority of the mineral imports, i.e. China and Belgium. However, the dynamics behind the imports are different. While Belgium imports metallurgical raw materials to smelt and export as a value-added material, China imports for both industrial purposes

and domestic demand.

- Aluminum ore export is not under the market concentration, unlike other minerals. But its trade volume is the 2nd smallest after nickel ore.
- Copper ore is mainly exported to Belgium. Metallic copper is reimported to Turkey after the smelting process. The market concentration positively affects the trade volume.
- The Major buyer of the lead ore is China. Therefore, solely focusing on China increases exports while increasing monopsony risk.
- Nickel ore export is monopsony, the sole buyer is China. This market structure poses a great danger in the long term for Turkey. Fortunately, the trade volume is minuscule.
- Zinc ore is the other mineral that Belgium imports most. Like copper ore, it is reimported after the smelting process.

As the exports are under the pressure of market stability due to excessive market concentration, there are several precautions are to take in long term:

- First of all domestic smelter facilities should be employed. In order to encourage entrepreneurs and corporates should be supported subsidies, incentives, and tax exemption. Because having smelter facilities means more domestic production and industrial material security.
- The mineral wealth should not be mined or exported without considering sustainability and future generations. Because they are nonrenewable resources.
- Market diversity should be provided at the macro level too. That means the export should not be concentrated on a specific country. It should be distributed to minimize demand/price shocks.

Acknowledgment

This study is part of the author's Ph.D. thesis. Authors thanks anonymous reviewers for their precious time and effort.

Conflict Of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest with other parts/groups/affiliations.

Symbols And Abbreviations

Metals	Others
Al: Aluminium	Mton: Million tons
Cu: Copper	Kton: Kilo tons
Ni: Nickel	M\$: Million US dollars
Pb: Lead	R ² : Determination coefficient
Zn: Zinc	

References

- [1] M. Başığit, "Contribution and/or dependency: Chinese hegemony on Turkey's mineral export," *Resour. Policy*, vol. 74, no. 102397, p. 8, 2021. doi:10.1016/j.resourpol.2021.102397
- [2] A. I. Okay, "Geology of Turkey : A Synopsis," *Small*, vol. 21, pp. 19–42.
- [3] M. C. Göncüoğlu, "Introduction to the geology of Turkey: Geodynamic evolution of the Pre-Alpine and Alpine terranes," *MTA Monogr. Ser.*, vol. 5, pp. 1–69, 2010.
- [4] ETİMADEN, "Bor sektör raporu," Ankara, 2021. [Online]. Available: https://www.etimaden.gov.tr/storage/2021/Bor_Sektor_Raporu_2020.pdf. [Accessed: 01.01.2022].
- [5] MTA, "Dünyada ve Türkiye'de Doğal Taşlar," Ankara, 2018. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/DOGALTAS.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].

- [6] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Graphite," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-graphite.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [7] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Barite," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-barite.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [8] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Antimony," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-antimony.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [9] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Gold," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-gold.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [10] İMİB, "Aylık Bazda Ürün Gruplarına Veya Ülkelere Göre Maden İhracatı Raporları - 2021," 2021. [Online]. Available: <https://www.imib.org.tr/links/istatistikler/202112.xlsx>. [Accessed: 01.03.2022].
- [11] T.C. Ticaret Bakanlığı, "2021 Yılı İhracat Rakamları," 2021 Yılı Aralık Ayı Dış Ticaret, Ticaret, Esnaf ve Kooperatif Verileri, 2022. <https://ticaret.gov.tr/haberler/2021-yili-aralik-ayi-dis-ticaret-ticaret-esnaf-ve-kooperatif-verileri>. [Accessed: 03.03.2022].
- [12] Bloomberg HT, "Türkiye'nin ihracatı 2021'de 225,4 B\$, Türkiye'nin ihracatı 2021'de 225,4 milyar dolara çıktı, 2022. <https://www.bloomberght.com/turkiyenin-ihracati-2021de-225-4-milyar-dolara-cikti-2295726>. [Accessed: 03.03.2022].
- [13] M. Başığıit, "Türkiye Maden İhracatı Ekonomisi Ve Pazar Yapısı: MINT Ülkeleri İle Karşılaştırılması," İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021.
- [14] T. Brown, "Measurement of mineral supply diversity and its importance in assessing risk and criticality," *Resour. Policy*, vol. 58, no. June 2017, pp. 202–218, 2018, doi: 10.1016/j.resourpol.2018.05.007.
- [15] P. Colley, "Trading practices in the coal market: application of the theory of bilateral monopoly to the Australian-Japan coal trade," *Resour. Policy*, vol. 24, no. 1, pp. 59–75, 1998, doi: 10.1016/S0301-4207(98)00009-9.
- [16] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Bauxite and Alumina," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-bauxite-alumina.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [17] MTA, "Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum," 2018. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/10Aluminyum.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [18] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Copper," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-copper.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [19] MTA, "Türkiye ve Dünyada Bakır," Ankara, 2016. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Bakir.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [20] MTA, "Dünyada ve Türkiye'de Kurşun-Çinko," Ankara, 2013. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/kursun-cinko.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [21] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Lead," 2021. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lead.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [22] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Nickel," 2021. doi: 10.5860/choice.37sup-314.
- [23] MTA, "Dünyada ve Türkiye'de Nikel," Ankara, 2018. [Online]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/img/Nikel.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].
- [24] USGS, "Mineral Commodity Summaries: Zinc," 2021. [Online]. Available:

<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-zinc.pdf>. [Accessed: 01.01.2022].

[25] M. İldırar and E. Kırıl, "Piyasa Yapısı Ve Yoğunlaşma: Türk Otomotiv Sektörü Üzerine Bir Analiz," *AİBÜ Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 18, no. 1, pp. 93-117, 2018.

[26] M. Naldi and M. Flamini, "Correlation and Concordance between the CR4 Index and the Herfindahl-Hirschman Index," *SSRN Electron. J.*, 2014, doi:10.2139/ssrn.2502764

[27] D. Şanlı, "Yüksek Teknoloji İhracatının Dinamikleri Üzerine Üç Makale," Gazi Üniversitesi, 2021.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Comparative Investigation of the Effects of Multiple Burnishing Surface Finishing on the Surface Properties of AISI 8620 Cementation Steel

Ece Ceren Ulaş^{a,*}, Adnan Akkurt^b

Submitted: 25.02.2022 Revised: 26.04.2022 Accepted: 15.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705008

ABSTRACT

Developments in machine manufacturing technology necessitate the quality performance of the finished surfaces to be in parallel. The burnishing method is carried out to surfaces in different geometries, and its effect on the normal machined surface quality has been demonstrated by various scientific studies. However, by subjecting the surface to more than one burnishing process, it is limited to obtain sufficient data on the surface properties of the material. In this study, AISI 8620 cementation steel, which is one of the materials commonly used in machine manufacturing, was preferred especially since a toughness in the core, a hard surface resistant to abrasion on the peripheral surface, and a ductile structure in impact work at required. The material was prepared 20 mm diameter with the turning method under the same machining parameters. On 4 of the 5 leveled surfaces prepared; In the examinations and comparisons made after the burnishing process applied from 1 burnishing number to 4 burnishing numbers, the best results were obtained in terms of surface roughness in 2 burnishing operations and surface hardness in 3 burnishing operations. The worst values were obtained in 1 burnishing operation for surface roughness and 4 burnishing operations for surface hardness.

Çoklu Ezme Yüzey Bitirme İşleminin AISI 8620 Sementasyon Çeliği Yüzey Özelliklerine Etkilerinin Karşılaştırılmalı İncelenmesi

ÖZ

Makine imalat teknolojisindeki gelişmeler bitirilmiş yüzeylerin kalite performanslarını aynı paralelde olmasını zorunlu kılmaktadır. Ezme yöntemi farklı geometrideki yüzeylere uygulanmakta olup normal işlenmiş yüzey kalitesine etkisi çeşitli bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur. Ancak yüzeyin birden fazla sayıda ezme işlemine tabi tutulmasıyla yüzey özellikleri hakkında yeterli veriye malzeme özelinde ulaşabilmek sınırlıdır. Yapılan çalışmada özellikle çekirdekte tokluk çevresel yüzeyde aşınmaya dayanıklı sert yüzey ve darbeli çalışmalarda sünek bir yapı gerektiği için makine imalatında yaygın kullanılan malzemelerden AISI 8620 sementasyon çeliği tercih edilmiştir. Malzeme 20 mm çapında tornalama yöntemi ile aynı işleme parametreleri altında hazırlanmıştır. Hazırlanan 5 kademeli yüzeyin 4'üne; 1 ezme sayısından 4 ezme sayısına olacak şekilde uygulanan ezme işlemi sonrasında yapılan inceleme ve karşılaştırmalarda 2 ezme işleminde yüzey pürüzlülüğü 3 ezme işleminde ise yüzey sertliği bakımından en iyi sonuçlar elde edilmiştir. En kötü değerler ise yüzey pürüzlülüğü için 1 ezme işleminde yüzey sertliği için ise 4 ezme işleminde elde edilmiştir.

Keywords: AISI 8620, burnishing, number of passes, surface properties, microstructure, surface roughness, surface hardness

^{a,*} Gazi University,
Graduate School of Natural and Applied
Sciences,
Dept. of Industrial Design Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-1399-1005
e mail: ececerenulas@gmail.com

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Computer Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-0622-1352

*Corresponding author:
ececerenulas@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

AISI 8620, ezme, ezme sayısı, yüzey özellikleri, mikro yapı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği

1. Giriş (Introduction)

Ezme işlemi soğuk şekillendirme olarak bilinmektedir. İmalat sanayinde dış yüzey sertliği normal malzeme sertliğine oranla daha yüksek olması istenilen ve yüzey pürüzlülüğü daha hassas olması beklenen parçalarda yüzey bitirme işlemi olarak uygulanmaktadır. Ezme işlemi ile yüzey üzerinden talaş kaldırma işlemi ile oluşan çiziklerin çentik etkisini ortadan kaldırması parça ömrünü de (dayanımını) artırmaktadır. Bunun dışında temaslı ve darbeye maruz kalan yüzeylerde çevresel sertliğin fazla merkeze doğru sertliğin ise düşük olması istenen yüzeyler için de ideal bir yüzey bitirme işlemi olduğu bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur[1-3]. Yine yapılan çalışmalarda işlem sırasında malzemeye bağlı olarak seçilmiş parametrelerin elde edilen yüzey özellikleri üzerinde belirleyici olduğu tespit edilmiştir[4-6].

Literatürdeki yüzey bitirme işlemlerine yönelik çalışmalar değerlendirildiğinde; mikro yapı ve SEM görüntülerinden en homojen tane yapısının ezme işlemi ile elde edildiği ve yüzey deformasyonun en düşük olduğu ayrıca yüzey pürüzlülüğü olarak da en iyi sonucun yine ezme yöntemi ile elde edildiği tespit edilmiştir. Silindirik iç ve dış yüzeyler için uygulanan yöntemler (delme, tornalama, taşlama, raybalama, honlama) genel olarak karşılaştırıldıklarında en iyi yüzey özelliklerinin (yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği, dayanım ve bunların dışında yüzey daireselliği ve yüzey silindirikliği) her bir parametre için en iyi sonuçların ezme yöntemi ile elde edildiği belirlenmiştir. Ancak doğru işleme parametreleri seçilmediğinde ezme yöntemi ile elde edilen yüzeylerde yüzey pürüzlülük artışlarının yanı sıra aşırı ezme kuvveti etkisi ve gereksiz ezme işlem sayısının artışı ile beraber kullanma şeklinde çatlama, kırılma, kopmaların meydana geldiği belirlenmiştir [7-17]. Silindirik iç yüzeye yönelik olan çalışmalar [7-12], silindirik dış yüzeye yönelik çalışmalar[13-14] ve düzlemsel yüzeye yönelik çalışmalar [15-17] dir.

Literatürde farklı özelliklerdeki malzemelere ezme işlemi uygulandığı ve işlemin yüzeye etkisinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Alaşım elementleri krom, nikel ve molibden olan AISI 8620 sementasyon çeliğinin üretimde yaygın kullanılması ve kullanım öncesi malzemenin özelliklerini geliştirmeye yönelik çeşitli uygulamaların (borlama, karbürleme, sementasyon vb. ısı işlemler) yapıyor olması malzemenin seçilmesinde etkili olmuştur. Belirtilen ısı işlemlerin söz konusu malzemenin üretilmiş parça yüzey özelliklerine etkisinin ezme işlemi ile sağlanıp sağlanamayacağı sorusunun cevabına yönelik herhangi bir verinin olmaması malzemenin tercihinde etkili olmuştur.

AISI 8620 sementasyon çeliği yüzey özelliklerini geliştirmesine yönelik yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde;

Calik ve arkadaşları karbürlenmiş ve borlanmış AISI 8620 çeliğinin sertlik ve aşınma davranışlarını incelemiştir. İncelemeler sırasında işlenmiş yüzey; difüzyon tabakası, geçiş bölgesi ve bor - karbondan etkilenmeyen matris olarak 3 ayrı bölgeye ayrılmıştır. EDS ve XRD analizleri sonucunda en belirgin fazların sırasıyla Fe₂B, α-SiC ve Fe₃C olduğu anlaşılmıştır. Borlama işlemi ile elde edilen sertliğin karbürlenmiş numunelere kıyasla yüksek olduğu ve aşınma davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca borlanmış yüzeyin karbürlenmiş yüzeye kıyasla daha pürüzsüz olduğu, karbürlenmiş ve borlanmış numunelerin difüzyon tabakalarının sırasıyla 5-6 µm ve 55-65 µm olduğu ve sertlik-aşınma özellikleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu anlaşılmıştır [18].

Çelik ve arkadaşları AISI 8620 malzemenin hazırlanan numunelerin yüzeylerini geliştirmek için SiC/C tozlarını parça üzerinde açmış oldukları kanallara doldurarak TIG yüzey tarama yöntemi ile kompozit malzeme türünde elde ettikleri yüzeylerin mikro yapı ve SEM incelemeleri, yüzey ile merkez arasında sertlik dağılımı, yüzey pürüzlülüğü değişimleri ve aşınma dayanımlarını incelemiştir. Yüzey sertliğindeki artış buna bağlı olarak aşınma dayanımında olumlu sonuç elde ediyorken sürtünme katsayısının da azaldığını tespit etmişlerdir[19]. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar beklenen doğrultuda açığa çıkmıştır.

Kumar ve arkadaşları AISI 8620 sementasyon çeliğine değişken akım ve ısı girdisi parametreleri ile TIG ark (TIGA) yöntemi uygulayarak yüzeydeki kaynak izotermi, termal çevrimi ve soğuma hızını analitik olarak modellenmiş sonrasında deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda mikro yapı, sertlik değişimi ve kalıntı gerilimlerini incelemiştir. Sonuç olarak TIGA yöntemi ile yüzey sertliğinin %80 oranında artış olduğu görülürken aynı yüzeyde basma artık gerilmelerinin oluştuğu ortaya konulmuştur [20].

Alshareef ve arkadaşları AISI 8620 sementasyon çeliği malzemeye uyguladıkları ezme işlemi ile malzeme yüzeyinde meydana gelen değişimleri doğrulamak amacıyla model oluşturmayı hedeflemişlerdir. Yaptıkları çalışmada ısıl işlem ve tornalama işlemi ile elde edilen numunelere bilyeli ezme işlemi (6 mm çaplı bilye uçlu takım kullanılmış) uygulamış ve elde edilen yüzeyler üzerinde incelemeler yapmışlardır. Optik mikroskop ile yapılan incelemelerde tornalama ve tornalama+ezme işlemlerinde mikro yapı kalınlığında yaklaşık 12 – 18 µm değişim gözlemlenirken nano boyutlu tane tabakasında değişim gözlenmemiştir. Yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde tornalama işlemi sonrasında ezme işlemi gerçekleştirildiğinde sadece tornalamış yüzeye kıyasla %60 iyileşme gözlenmiştir. Artık gerilme irdelendiğinde ise basınç arttıkça gerilmenin azaldığı, ilerleme hızı arttıkça gerilmenin arttığı belirtilmiştir ve 125 m/dak ezme hızında maksimum artık gerilmenin olduğu ortaya konmuştur. Yapılan analitik çalışmalarda ise oluşturulan lineer regresyon modelinde yaklaşık %81 R2 değeri ile ezme parametreleri arasında güçlü korelasyon saptanmış ve Anova analizi ile basınç ve ilerleme hızının kalıntı gerilimi oluşumunda en etkin parametre olduğu ortaya konmuştur [21].

AISI 8620 sementasyon çeliği malzemenin işlenebilirlik özelliklerine yönelik birçok çalışma yapılmış olup bu çalışmalar sonrasında uygulanan yöntem ve işleme bağlı olarak yüzey pürüzlülük, yüzey sertliği, aşınma davranışı ve yüzeyde oluşan artık gerilmelere yönelik bulgular ortaya konmuştur[22-24].

Ezme parametrelerine bağlı yüzey özelliklerindeki değişimler (yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değişimleri) hakkında araştırmacılar tarafından yapılan analizleri kapsayan birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda yüksek devir hızları ve düşük ilerlemelerde yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Düşük devir ve yüksek ilerleme hızlarında sertliğin düştüğü ezme sayısı arttıkça sertliğin de arttığı elde edilen veriler ile ortaya konmuştur [25-26]. Takım geometrisinin ezilerek elde edilecek yüzeye etkilerini araştırmaya yönelik çalışmalar da bulunmaktadır[27-30]. Ayrıca ezme işlemi ile tamamlanacak yüzeyleri içeren parçaların pürüzlülük ve sertlik dışındaki özelliklerinin (örneğin mikro yapı) önemli olduğu, geçiş sayısına bağlı olarak taneciklerdeki incelmeler beraberinde martenzitik dönüşümün olumlu etkilendiğini buna bağlı olarak da yüzey sertlikte önemli gelişmeler olduğunu ve martenzit miktarının sertlik değişiminde etkili olduğunu gösteren çalışmalar da gerçekleştirilmiştir[31-33].

Genel olarak konu ile ilgili bilimsel çalışmalar değerlendirildiğinde ezme sayısının elde edilen yüzey özelliklerine etkilerinin olduğu (bazı çalışmalarda en etkin parametre olduğu) vurgulanmıştır. Ancak unutulmaması gereken her bir malzeme türüne göre seçilecek ezme derinliği ezme sayısına doğrudan etki etmektedir. Ezme derinliği çok küçük boyutlarda tercih edilerek onlarca kez ezme yapılabilir ancak üretim maliyetleri düşünüldüğünde bu durumun tercih edilmesinin söz konusu olamayacağı açıktır. Yapılması gereken ezme takım üreticilerinin her malzeme türü için belirlemiş oldukları ezme parametre ve ezme derinliklerini kullanarak o martenzitik malzeme özelinde kaçınıcı tekrar ezme işleminin yüzey özellikleri üzerinde en iyi sonucu verdiğinin belirlenmesidir. Sonrasında ise ezme işlemi devam ettiğinde yüzey özelliklerindeki bozulmanın başladığı sayı belirlenerek ideal ezme sayısı tespit edilmelidir. Bu durum değerlendirildiğinde literatürdeki bazı çalışmaların önerilen ezme derinliğinden çok daha küçük değerlerde seçilerek ideal yüzey için ezme sayısının fazla gösterilmesi saha uygulamalarında geçerli olmayacaktır.

Malzeme türüne göre seçilmiş olan ezme parametreleri yüzey özelliklerine doğrudan etki eder. Bu da ezme parametrelerinin doğru seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Ezme işleminin genel anlamda tüm malzeme yüzeylerinde olumlu etkisi olduğu bilinmektedir. Ancak ezme işlem sayısının yüzeyi belli bir tekrardan sonra bozduğu ve her bir malzeme için kaç kez ezme işlemi yapılacağı kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışma bu durumu hedefleyerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular ve değerlendirmeler detaylıca ele alınmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

2.1. Malzeme ve numune hazırlama (Material and sample preparation)

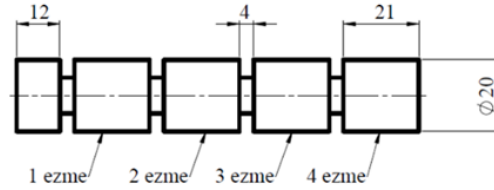
Çevreden merkeze doğru tokluk özelliğinin arttığı çevresel yüzeylerinde ise düşük karbon içermesinden dolayı sementasyon ve nitrasyon gibi ısıl işlemlerle sert ve aşınmaya dayanıklı, darbeye maruz kalan ortamlarda sünek yapısı ile darbe etkisini sönmüleyen bir çelik türü olması nedeniyle yapılan çalışma için AISI 8620 (20NiCrMo2) tercih edilmiştir. Sementasyon ve nitrasyon genellikle

parçanın çevresel yüzey özelliklerini (sertlik, aşınma direnci vb.) geliştirmek için uygulanan ısıl işlemlerdir. Ezme yönteminin de parça çevresel yüzey özelliklerinden sertliklerini artırmak için uygulandığı bilinmektedir. Malzeme tercihinde ezme yönteminin ısıl işlemlere alternatif olup olmayacağını belirlemek için yapılan çalışma gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemleri ile malzemeye yüksek sıcaklıkta ısı girdisi ve soğumalar sonrası yüzey üzerinde istenmeyen çatlakların oluşumu söz konusu olmakta iken ezme işlemi ile işleme yöntemlerinden kaynaklı oluşabilen çatlaklar/çizikler onarılmaktadır. Bu özelliği ile ezme yöntemi tercih ediliyorken sementasyon ve nitrasyon gibi çok önemli ısıl işlemleri uygulamadan da istenilen sertlik değerine ulaşıp ulaşılamayacağı malzeme tercihinde etkili olmuştur. Tablo 1'de AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1. AISI 8620 kimyasal bileşimi (% ağırlık oranı) (Chemical composition of AISI 8620 (% rate)) [34]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Min.	0.17	-	0.65	-	-	0.35	0.15	0.4
Maks.	1.23	0.04	0.95	0.035	0.004	0.7	0.25	0.7

AISI 8620 sementasyon çeliği malzeme Taksan TTC-630 modeli CNC torna tezgâhında 448 m/dak kesme hızı, 0.35 mm/devir ilerleme hızı ve 1.25 mm talaş derinliği ile Şekil 1'de görülen numuneler halinde hazırlanmıştır (aynı numuneden 4 adet olacak şekilde). Hazırlanan her bir numune tüm yüzeyler (4 kademe) önce belirlenmiş olan ezme parametreleri ile ezilmiştir. Daha sonra aynaya yakın olan ezilmiş kademe bırakılarak diğer üçü 2 kez ezilmiş, daha sonra aynaya yakın 2 tanesi bırakılmış baştaki ikisi 3 kez ezilmiş devamında ise puntaya yakın olan kademe dördüncü kez ezilmiştir. Bu şekilde ezilmiş numuneler elde edilmiştir. Söz konusu işlem 4 farklı numune için tekrar edilmiştir. Ezme işleminde Şekil 2'de görülen Yamato SKUV20 ezme takımı kullanılmıştır. Ezme işlemi sırasında seçilmiş olan parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda yer alan değerler ve tezgâh işleme parametreleri sabit tutulmuş ezme sayısının elde edilen yüzeye etkisinin belirlenebilmesi için sadece ezme sayısı değişken olarak belirlenmiştir. Şekil 3'te ise ezme işlemi deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.



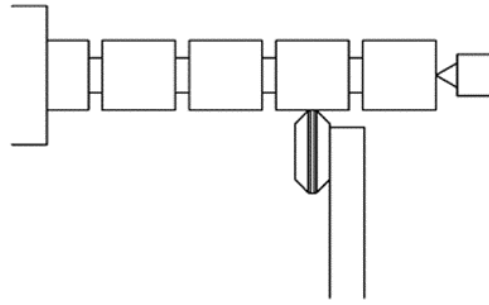
Şekil 1. Ezme işlemi ile hazırlanan numune (Sample prepared with burnishing)



Şekil 2. Ezme takımı (Burnishing tool) [35]

Tablo 2. Ezme parametreleri (Burnishing parameters)

Ezme devir sayısı	500 m/dak
Ezme ilerleme hızı	0.09 mm/devir
Ezme derinliği	0.1 mm
Ezme çapı	20 mm
Ezme durumu	Islak işleme şartlarında
Ezme sayısı	1 - 2 - 3 - 4



Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental setup)

2.2. Metalografik çalışmalar (Metallographic studies)

Ezme işlemi ile tamamlanmış olan malzeme metalografik incelemeler için ATM Brillant 250 disk kesme cihazı kullanılarak numuneler $\text{Ø}20 \times 21$ mm boyutlarında (ezme sayısına göre) kesilmiştir. Her bir ezme sayısına göre ayrılmış numuneler hedeflenen özelliklerin tespit edilebilmesi için tekrar ortadan kesilerek 8 farklı numune (her ezme sayısından ikişer adet) olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Her ezme sayısından birer numune ATM Opal 460 cihazı kullanılarak bakalite alınmış daha sonra hazırlanmış olan bu numunelere ATM Sapphire 550 cihazı ile farklı kalınlıklardaki yüzey iyileştirme elemanları kullanılarak temizleme, parlatma işlemleri sonrasında malzeme için belirlenmiş olan dağlayıcı kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiş olup metalografik tespitlerin yapılması için numuneler hazırlanmıştır.



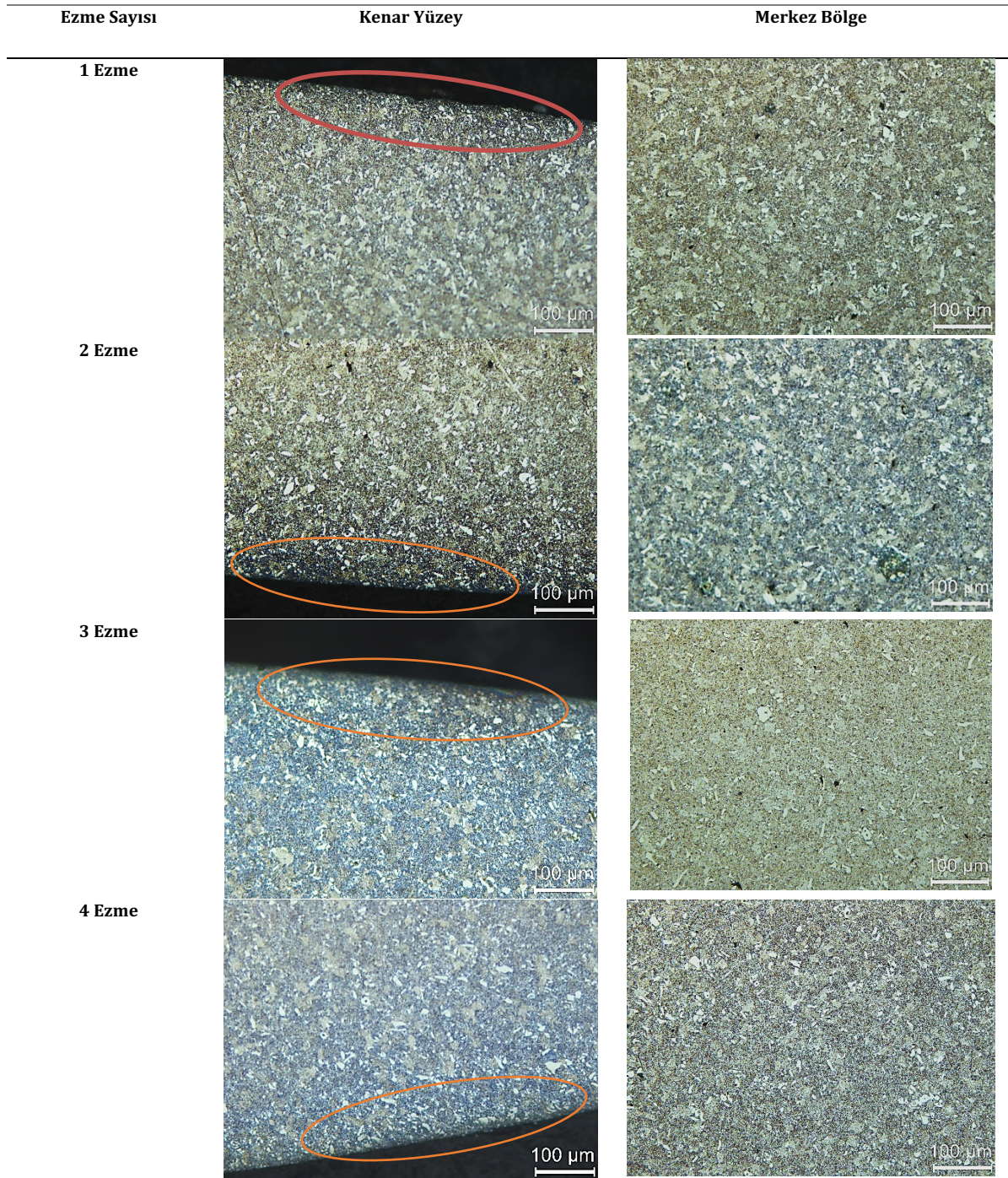
Şekil 4. Numune hazırlama işlem basamağı (Sample preparation process step)

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Experimental Results and Discussion)

3.1. Ezme işleminin mikroyapıdaki etkisinin incelenmesi (Investigation of the effect of burnishing on the microstructure)

Farklı sayıda ezilerek elde edilen numune yüzeylerinin mikro yapıları optik mikroskop marifetiyle (Leica DMI 5000 M) incelendiğinde ezme sayısının mikro yapı üzerinde etkisi net bir şekilde tespit edilmiştir. Ezilen yüzey bölgesi ile ezme işleminin etkilemediği merkez bölgesinin karşılaştırmalı mikro yapı görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. Elde edilen görüntülerden numune yüzey morfolojisi incelendiğinde ezme sayısındaki artış ile beraber kenar bölgede karbür tanelerinin yoğunlaştığı tespit edilmiştir (işaretlemeler ile belirtilmiştir).

Ezme sayısına bağlı olarak yüzey geometrisindeki değişimler değerlendirildiğinde 1 kez ezilen numune kenar yüzeyinde belirgin yüzey geometri bozuklukları olduğu tespit edilmiştir. 2 kez ezilerek elde edilen numune kenar yüzeyi değerlendirildiğinde 1 ezme numunesi yüzeyinde bulunan bozukluklarının büyük oranda giderildiği tespit edilmiş ve ölçüm aletleri ile belirlenmiştir (Çizelge 1). 2 ezme operasyonu ile elde edilen yüzey incelendiğinde karbür tanelerinin kenara doğru yoğunluğunun arttığı bununda tek ezmeye göre daha sert bir yüzeye sebep olduğu açıktır ve bu durum ölçümler ile de saptanmıştır (Çizelge 2). 3 ezme işlemi değerlendirildiğinde ise kenar yüzeyin ikinci yüzeye oranla biraz daha kötü ancak karbür yoğunluğunun çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durum 2 ezme ile 3 ezme işlemi uygulanan numunelerin yapılan ölçümlerinde net bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Çizelge 1 ve Çizelge 2). 4 ezme işlemi ile elde edilen yüzey değerlendirildiğinde ise 3 ezmeye oranla yüzey pürüzlülüğünde ve sertlikte görüntü ve ölçüm sonuçlarında da görüleceği gibi bir bozulma söz konusudur (Çizelge 1 ve Çizelge 2).

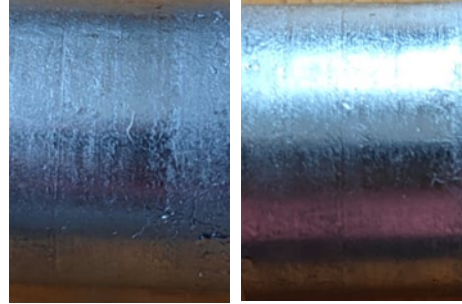


Şekil 5. Ezme sayısına bağlı olarak numune mikro yapı değişimlerinin karşılaştırılması (Comparison of sample microstructure changes depending on the burnishing number)

3.2. Ezme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi (Investigation of surface roughness after burnishing)

Tornalanarak elde edilen yüzeylere farklı sayıda uygulanan ezme işlemi sonrasında lazer pürüzlülük cihazı ile (Hommel Tester T8000) yapılan temassız pürüzlülük ölçümleri ile elde edilen ortalama ve maksimum pürüzlülük değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'den de görüleceği gibi malzeme yüzeyi pürüzlülük yönüyle değerlendirildiğinde 2 ezmenin AISI 8620 sementasyon çeliği için ideal ezme sayısı olduğu ancak 1 ezme ile oluşturulan yüzeylerin diğer sayıdaki ezmelere oranla daha kötü olduğu belirlenmiştir. Makine imalat sanayindeki uygulama şekli değerlendirildiğinde parçaların tek ezme ile bitirilmelerinin uygun olmadığı oysa aynı yüzey bir kez daha ezildiğinde pürüzlülük yönüyle mükemmel yüzeye ulaşılacağı şeklinde yorumlanabilir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde 2 ezmeden sonraki ezme işlemlerinin yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etki edeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Yüzeyin sertlik özelliğini artırmak için ezme sayısı artırılabilir. Ancak yapılacak

yeni ezme işlemlerinin parça yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkileyeceği göz ardı edilmemelidir. Yapılan çalışmada ezme sayısı 4 ve sonrası malzemenin pürüzlülük değerlerini olumsuz etkilediği gibi yüzeyde aşırı pekleşmeye (tabakalaşma oluşumuna) sebep olarak çatlama, kırılma, kabuklanma gibi istenmeyen durumların oluştuğu tespit edilmiştir (4 ezmeden sonra seçili numunelere 5 ve 6 ezme uygulanmış ancak pürüzlülük ölçümü ve yüzey özelliği belirleme işlemleri gerçekleştirilememiştir) (Şekil 6).



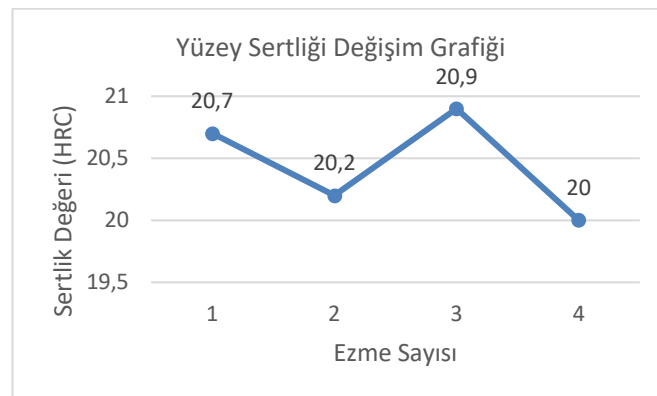
Şekil 6. 5 ve 6 ezme sayısı ile işlenmiş yüzey görüntüsü (5 and 6 with burnishing machined surface view)



Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğü incelemesi (Surface roughness investigation)

3.3. Ezme işlemi sonrası yüzey sertliğinin incelenmesi (Investigation of surface hardness after burnishing)

Numunelere uygulanan ezme işlemlerinin sonrasında elde edilen yüzeylerde yapılan mikro sertlik ölçümleri her bir ezme sayısına göre Şekil 8’de verilmiştir. Verilen çizelge incelendiğinde her bir ezme sayısı ile elde edilen sertlik değerinin karşılaştırılması sonucunda maksimum sertliği 3 ezme işlemi ile minimum sertlik değerinin ise 4 ezme işlemi ile oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Yüzey sertliği incelemesi (Surface hardness investigation)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Makine imalat sanayinde yaygın kullanıma sahip AISI 8620 sementasyon çeliği üzerinde gerçekleştirilen ezme işlemleri ile bu malzeme kullanılarak üretilen iş parçalarının hangi ezme sayısının parça yüzey özelliklerine nasıl bir etkisinin olduğu araştırılarak elde edilen sonuçların yayınlanması ile rutin uygulamaların (sadece tormalama ya da tormalanmış yüzeyin tek ezme ile bitirilmesinin tam olarak uygun olmadığı) yetersiz olduğu konusunda farkındalık oluşturmak hedefiyle yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar;

- AISI 8620 sementasyon çeliği için yüzey pürüzlülüğü en iyi olsun hedefi ile üretilen parçalara 2 ezme uygulanması gerektiği tespit edilmiştir.
- 1 ezme sayısının yapılan ezme işlemleri içerisinde en olumsuz olduğu ve 2 ezmenin sonrasında yapılan 3 ve 4 ezmelerin yüzey pürüzlülüğünü giderek bozduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen parçanın en yüksek yüzey sertliğine ulaşması hedefleniyor ise 3 ezme işleminin yapılması gerektiği ancak 4. ezme işlemi yapıldığında ise sertlik değerinde büyük düşüşlerin olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.
- Yüzey sertliğinde daha iyi sonuç elde edilmesi için yapılan 3 ezme işleminin yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına sebebiyet vereceği bilinmeli ve o parça için hangi özelliğin daha önemli olduğu değerlendirilerek ezme sayısına karar verilmelidir. Özetle daha sert bir yüzey elde ediliyorken yüzey pürüzlülüğünün bozulmasının göze alınıp alınmayacağı değerlendirilmelidir.

Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışma FYL-2022-7555 proje numarası ile Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir. Destekleri için Gazi Üniversitesine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] D. Mahajan and R. Tajane, "A review on ball burnishing process," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, no. 4, pp. 1-8, 2013.
- [2] S. Dzionk, B. Sciborski and W. Przybylski, *In Advances in Manufacturing II: Problems of Flaking in Strengthening Shaft Burnishing*. Poland: Springer, 2019, pp. 108-121.
- [3] S. C. Cagan, C. I. Pruncu and B. B. Buldum, "An investigation into ball burnishing process of magnesium alloy on CNC lathe using different environments." *Journal of Magnesium and Alloys*, vol.8, no.4, pp. 1061-1070, 2020. doi: 10.1016/j.jma.2020.06.008
- [4] T. Dyl, "The influence of burnishing parameters on the hardness and roughness on the surface layer stainless steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 63-69, 2017.
- [5] H. Yılmaz and S. Recep, "Effect of ball burnishing treatment on the fatigue behavior of 316L stainless steel operating under anodic and cathodic polarization potentials," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 49, no. 11, pp. 5393-5401, 2018. doi:10.1007/s11661-018-4889-4
- [6] I. O. Tugay, A. Hosseinzadeh and G. G. Yapıcı, "Hardness and wear resistance of roller burnished 316L stainless steel," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, no. 10, pp. 2405-2409, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2021.04.363
- [7] A. Akkurt and İ. Ovalı, "Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 15, no. 3, pp. 371-382, 2009
- [8] İ. Ovalı, İ., & A. Akkurt, "Comparison of burnishing process with other methods of hole surface finishing processes applied on brass materials," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 8, pp. 1064-1072, 2011. doi: 10.1080/10426914.2010.536931
- [9] A. Akkurt, "Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 20, no. 6, pp. 960-968, 2011. doi: 10.1007/s11665-010-9718-x

- [10] A. Akkurt and İ. Ovalı, "Improving the surface topography of mild steel with the burnishing process," *International Journal of Materials Research*, vol. 105, no. 10, pp. 1004-1016, 2014. doi: 10.3139/146.111112
- [11] A. Akkurt, A. Kurt, A. Özdemir and U. Şeker, "Comparison of hole surface finishing processes with roller burnishing method applied in copper materials," *Gazi University Journal of Science*, vol. 27, no. 1, pp. 721-734, 2014
- [12] H. Ökmen & E. R. Ümit, "Ti6Al4V alaşımında esnek honlama ve silindirik parlatma işlemlerinin delik yüzey özelliklerine etkilerinin incelenmesi," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 28, no. 2, pp. 128-135, 2020. doi: 10.31796/ogummf.697885
- [13] P. Kaldunski, R. Patyk, L. Kukielka, L. Bohdal, J. Chodor & A. Kulakowska, "Numerical analysis and experimental researches of the influence of technological parameters burnishing rolling process on fatigue wear of shafts," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2078, no. 1, 2019. doi: 10.1063/1.5092085
- [14] M. Arsalani, M. R. Razfar, A. Abdullah and M. Khajezadeh, "Fatigue behavior improvement of hardened parts using sequential hard turning, grinding, and ball burnishing operations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 235, no. 1, pp. 87-99, 2021. doi:10.1177/1464420720951889
- [15] A. Skoczylas and Z. Kazimierz, "Studies on the selected properties of C45 steel elements surface layer after laser cutting, finishing milling and burnishing," *Advances in Science and Technology*, vol. 10, no. 32, 2016. doi:10.12913/22998624/65127
- [16] F. Sönmez, H. Başak, A. Güral and Ş. Baday, "Investigating the efficiency of secondary aging and burnishing process in friction stir welded Al-7075-T6 material," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 19, no. 10, pp. 1515-1520, 2018. doi:0000-0003-1718-892X
- [17] A. Skoczylas and Z. Kazimierz, "Selected properties of the surface layer of C45 steel parts subjected to laser cutting and ball burnishing," *Materials*, vol. 13, no. 15, pp. 3429-3448, 2020. doi:10.3390/ma13153429
- [18] A. Calik, A. Duzgun, A. E. Ekinçi, S. Karakas and N. Ucar, "Comparison of hardness and wear behaviour of boronized and carburized AISI 8620 steels," *Acta Physica Polonica A*, vol. 116, no. 6, pp. 1029-1032, 2009
- [19] O. N. Çelik, M. Ulutan, H. Gaşan, Ü. Er and S. Buytoz, "Effects of graphite content on the microstructure and wear properties of an AISI 8620 steel surface modified by tungsten inert gas (TIG)," *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 6, pp. 1423-1429, 2011. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.09.009
- [20] R. Kumar, P. K. Ghosh & S. Kumar, "Thermal and metallurgical characteristics of surface modification of AISI 8620 steel produced by TIG arcing process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, pp. 420-431, 2017. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.10.020
- [21] A. J. Alshareef, I. D. Marinescu, I. M. Basudan, B. M. Alqahtani and M. Y. Tharwan, "Ball-burnishing factors affecting residual stress of AISI 8620 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 3, pp. 1387-1397, 2020. doi:10.1007/s00170-020-05119-x
- [22] S. Roy, J. Zhao, P. Shrotriya & S. Sundararajan, "Effect of laser treatment parameters on surface modification and tribological behavior of AISI 8620 steel," *Tribology International*, vol. 112, pp. 94-102, 2017. doi:10.1016/j.triboint.2017.03.036
- [23] S. Kumar, "Gra of SAE 8620 for optimizing surface roughness and material removal rate," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 2277-9655, 2018. doi:10.5281/zenodo.1228661
- [24] M. A. Erden & F. Aydın, "Wear and mechanical properties of carburized AISI 8620 steel produced by powder metallurgy," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, no. 3, pp. 430-439, 2021. doi:10.1007/s12613-020-2046-8
- [25] C. S. Jawalkar & R. S. Walia, "Study of roller burnishing process on En-8 specimens using design of experiments," *Journal of mechanical engineering research*, vol. 1, no. 1, pp. 38-45, 2009.
- [26] G. Basar & F. Kahraman, "Prediction of surface hardness in a burnishing process using taguchi method, fuzzy logic model and regression analysis," *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol.36, no. 4, pp. 1283-1295, 2018.
- [27] A. M. Hassan, "The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals," *Journal of materials processing technology*, vol. 72, no. 3, pp. 385-391, 1997. doi:10.1016/S0924-0136(97)00199-4
- [28] H. et al., Hamadache, "Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 180, no. 1-3, pp. 130-136, 2006. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013
- [29] H. Başak and F. Sönmez, "Haddleme işleminde haddleme aparat tipinin (bilyeli, makaralı, çift makaralı) yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğine etkilerinin incelenmesi," *Politeknik Dergisi*, vol. 18, no. 3, pp. 125-132, 2015. doi:10.2339/2015.18.3, 125-132
- [30] D. Shivalingappa, "The influence of ball and roller burnishing process parameters on surface integrity of Al 2024 alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 1337-1340, 2020. doi:10.1016/j.matpr.2020.02.614
- [31] C. H. Fu, M. P. Sealy, Y. B. Guo and X. T. Wei, "Austenite-martensite phase transformation of biomedical Nitinol by ball burnishing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 12, pp. 3122-3130, 2014. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.07.019

[32] A. J. Tadi, S. R. Hosseini, & M. N. Semiromi, "Formation of Surface Nano/Ultrafine Structure using Deep Rolling Process on the AISI 316L Stainless Steel," *Material Science & Engineering International Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 88-93, 2017. doi:10.15406/MSEIJ.2017.01.00015

[33] R. Jerez-Mesa, G. Fargas, J. J. Roa, J. Llumà and J. A. Travieso-Rodriguez, "Superficial effects of ball burnishing on trip steel AISI 301LN sheets," *Metals*, vol.11, no. 1, pp. 82-94, 2021. doi: 10.3390/met11010082

[34] Önerler, "8620 Çelik (AISI 8620, 20NiCrMo2, 1.6523) Özellikleri", 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.onerler.com.tr/tr/8620-celik/> . [Erişim tarihi: 15.02.2022]

[35] Yamato, "SKUV20 – Yamato Single Roll Modular Tool", 2022. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.yamatoroll.eu/skuv20-yamato-single-roll-modular-tool/>. [Erişim tarihi: 20.02.2022]

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Estimating Streamflow Data with Machine Learning Techniques

Esra Aslı Çubukçu^{a*}, Vahdettin Demir^b, Mehmet Faik Sevimli^c

Submitted: 19.02.2022 Revised: 22.05.2022 Accepted: 20.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705009

ABSTRACT

Keywords: Stream Flow, Forecasting, Machine Learning, Lamas River.

^{a*} KTO Karatay University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Dept. of Civil engineering, Konya- Türkiye
Orcid: 0000-0003-4159-205X
e mail: cubukcuasli@gmail.com

^b KTO Karatay University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Dept. of Civil engineering, Konya- Türkiye
Orcid: 0000-0002-6590-5658

^c KTO Karatay University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Dept. of Civil engineering, Konya- Türkiye
Orcid: 0000-0002-4676-8782

*Corresponding author:
cubukcuasli@gmail.com

Anahtar Kelimeler: Akarsu Akışı, Tahmin, Makine Öğrenmesi, Lamas Nehri.

Estimation of stream flows is very important in basin and flood management. It is a very difficult topic to predict hydrological events that do not show linearity and depend on many parameters. In this study, streamflow modeling has been made and compared by using Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM) and Deep Learning (DL) optimizations using monthly average streamflow data of Mersin Lamas River. When the results are examined, it has been observed that the best method in solving the problem is ANN and SVM methods, which give more unsuccessful results. Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Nash Sutcliffe model Efficiency coefficient (NSE), Mean Absolute Relative Error (MARE) and Coefficient of Determination (R^2) were used as comparison criteria. 1 input model of DL gave the best result (RMSE= 0.7647, MAE=0.7370, NSE=0.9724, MARE=27.9326, R^2 =0.9962).

Akım Verilerinin Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Tahmin Edilmesi

ÖZ

Akarsu akımlarının tahmini havza ve taşkın yönetiminde oldukça önemlidir. Doğrusallık göstermeyen ve birçok parametreye bağlı olan hidrolojik olayların tahminleri oldukça zor bir konudur. Bu çalışmada Mersin Lamas Nehri aylık ortalama akım verileri kullanılarak Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Derin Öğrenme (DÖ) optimizasyonları kullanılarak akım modellemesi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde problemin çözümünde en iyi yöntemin DÖ olduğu YSA ve DVM yöntemlerinin ise buna göre daha başarısız sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma kriteri olarak Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Hata (OMH), Nash Sutcliffe modeli verimlilik katsayısı (NSE), Ortalama Mutlak Bağlı Hata (OMBH) ve Determinasyon Katsayısı (R^2) kullanılmıştır. En iyi sonucu DÖ'ye ait 1 giriş modeli vermiştir (KOKH= 0.7647, OMH=0.7370, NSE=0.9724, OMBH=27.9326, R^2 =0.9962).

1. Giriş (Introduction)

Akarsuyun kesitinden birim zamanda geçen su miktarı akarsu debisi olarak tanımlanır. Bu debi büyük oranda yılın her mevsimi ya da ayında aynı akımı gösteremez. Yaşanılan bu değişim akarsuyun rejimini oluşturmaktadır. Akarsu rejimi temel olarak havzanın yağış miktarına göre değişkenlik göstermektedir. Yıl içinde değişen bu rejim yağış, sıcaklık, zemin tipi, havza morfolojisi ve buharlaşma gibi birçok parametreye bağlıdır. Doğal akış içerisinde bulunan rastgele parametrelerin etkisiyle akım doğrusal değildir ve dinamik davranış sergilemektedir [1]. Akarsu akışlarının öngörülmesi; havzada oluşabilecek taşkın, sel ve kuraklık durumlarında kullanılacak sel riski yönetim planları, alınabilecek önlemler, tahmin ve uyarı sistemleri, can ve mal kayıplarının öngörülebilmesi açısından havza tahliyesi ya da kuraklık durumunda gerekli su temini açısından oldukça önemli bir konudur [2]. Dünya'da küresel çapta iklim değişikliği sonucu olarak yine küresel çapta yağış rejimi değişikliği yaşanmaktadır. Ani yağışlar ve sıcaklık değişimleri sonucu eriyen karların oluşturabileceği taşkın ve sel sonucunda can ve mal güvenliğimiz için havza ve taşkın yönetimi oldukça önemlidir [3]. Akarsu akımının bilinmesi su kaynaklarının ve yapılarının doğru tasarımı ve ekonomik olarak doğru değerlendirilmesi açısından son derece önem taşımaktadır ve son yıllarda öne çıkan bir konu olmuştur. Ancak hidrolojik olaylar birçok parametreye bağlıdır ve çoğu zaman öngörülmesi oldukça zor bir konudur. Literatüre bakıldığında birçok parametreye ve doğal akışa bağlı olan hidrolojik olayların (buharlaşma, rüzgâr, yağış, akım vb.) tahmin ve modelleme çalışmalarında kapalı kutu ve makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Detaylı bilgi için çalışmalar incelenebilir [4]–[6]. Akarsu akımının da genellikle makine öğrenmesi ve kapalı kutu yöntemleriyle kabul edilebilir ölçekte sonuçlar verdiğini görürüz [7]. Son yıllarda hayatımızın her alanında sürekli gelişen farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin hidrolojik problemlerdeki çözümlerindeki başarısının karşılaştırılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

Makine öğrenmesi, insan beyninin öğrenme şeklini taklit ederek, veri ve algoritmaları kullanarak, doğruluğunu tecrübelerle artıran bir yapay zekâ sistemidir [8]. İlk olarak uzman dama oyuncusu Robert Nailey'in bilgisayara karşı dama oynayarak kaybetmesi örneği ile hayatımıza girmiştir [9]. Makine öğrenmesi kullanılan veri dahilinde istatistiksel yöntemler, çeşitli algoritmalar ve tahminler ile içgüdüsel olarak eğitilir. Bu eğitim sonucunda da test yapılmak istenen verinin tahminsel modeli öğrenilen eğitim içgüdüsel sonucunda ortaya koyulmaktadır.

Derin öğrenme, verilere dayalı olarak insan beyninin tecrübe özelliğini temel alan ve yapay sinir ağı kullanan makine öğrenmesi sistemidir. Dijital sistemler, örneklerden faydalanarak davranışsal bir eğitim sürecinden geçerek tecrübeye dayalı bir öğrenim tamamlar ve ardından bu bilgileri kullanarak insanlar gibi tepki verir, davranış gösterir ve performans sergiler. Kısaca, derin öğrenme; makine öğrenmesinin yapay sinir ağı kullanılan halidir [10].

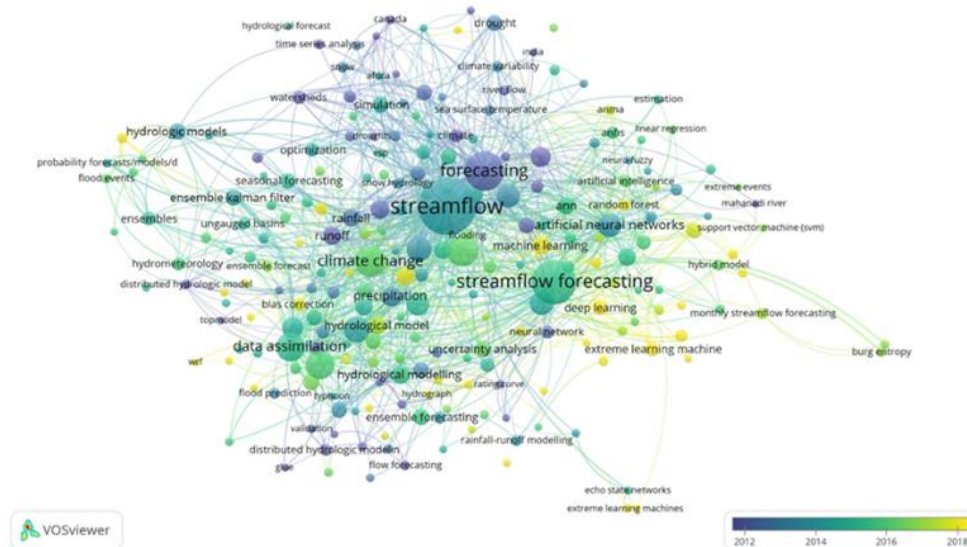
Makine öğrenmesi; bilgisayara verilen veri veya bilginin kendi içerisindeki kalıp veya fonksiyonları algılayabilen ve buna göre problemlere çözüm üretmeyi temel alan algoritma sistemleridir. Bu algoritmalar; içerisinde en az bir katmanlı YSA barındıran makine öğrenmesi sistemlerine ise derin öğrenme sistemleri adı verilmektedir. Aralarındaki temel fark bu şekilde ayırt edilebilir.

YSA'lar öğrenme işlemlerini örnekler yardımı ile gerçekleştiren, insanların tecrübe ederek öğrenme mekanizmasının makineye aktarılmış hali olarak tanımlanabilir. Bu öğrenme mekanizması, bilinenden farklı olarak ortama uyum sağlama, adapte olabilme, belirsizlik anında geçmiş tecrübeler veya eksik bilgilere göre çalışabilme yeteneğini kullanarak hesaplama özelliğini bilgisayara kazandırmaktadır [11].

Akım modellemesi ile ilgili literatürde yer alan bazı önemli çalışmalar incelendiğinde; Dibike ve arkadaşları 2001 yılındaki çalışmaları ile nehir sistemlerinin tasarımları, işletimi ve nehir akışlarının verilerini elde etmek için kullanılacak yağış-akış modellemesini YSA yöntemleriyle uygulamaya başlayanlardandır. YSA girdi ve çıktılar arasındaki doğrusal olmayan karmaşık yapıya sahip en başarılı makine öğrenme tekniği olarak görülmüştür. Çalışmada Çok Katmanlı YSA (ÇKYSA), Radyal Tabanlı YSA (RTYSA) ve Genelleştirilmiş YSA (GRYSA) kullanılarak modelleme yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında, YSA yöntemlerinin başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [12]. Hu ve arkadaşlarının 2009 yılındaki araştırmalarında YSA'ya dayalı yağış akış modelinin kullanılan, Back Propagation ağına kıyasla üç geliştirmenin yapıldığı, yağış sürecinin modellenmesi için değiştirilmiş

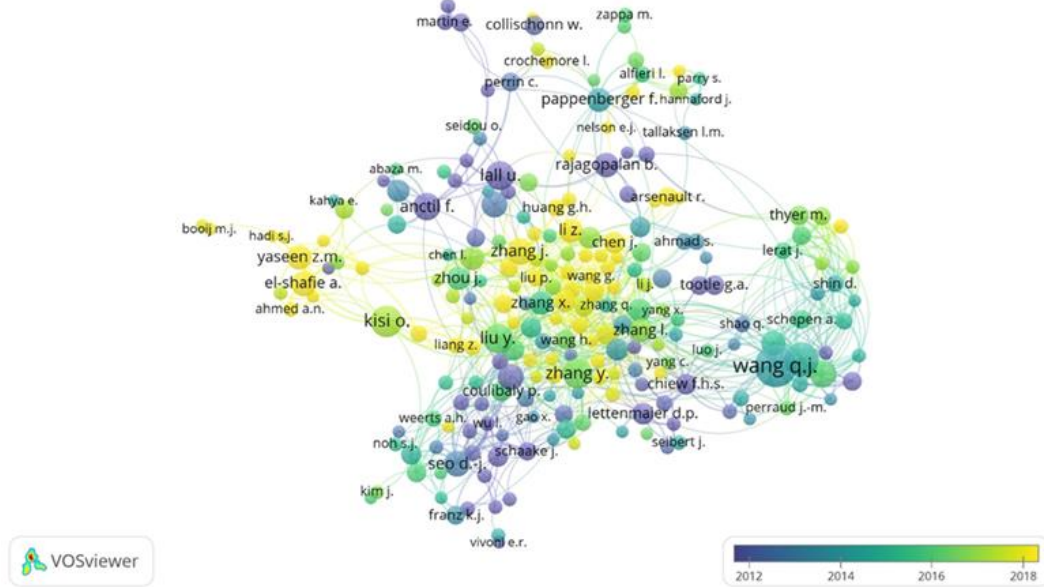
bir sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Çalışma alanı olarak Çin'deki havza alanları seçmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda, önceki hidrolojik bilginin sinir ağı öğrenme algoritması ile birleştirilmesi, sinir ağlarının yağmurun akışa dönmesi için kapalı kutu modeli olarak kullanılması yerine tavsiye etmişler, yedi havzanın hepsinde tutarlı gelişmeler sağlamışlardır [13]. Ren ve arkadaşları 2010 yılındaki çalışmada Çin'in Liaoning eyaletinde bir havzaya bulanık mantık ve YSA metodlarını bir hidrolojik modelle birleştirerek, gerçek zamanlı taşkın akışı modellemişlerdir [14]. Yaseen ve arkadaşları 2015 yılındaki çalışmada akarsu akışını yapay zekâ uygulamaları yapılan literatür çalışmalarını ve sonuçlarını ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda gelecek araştırmalara yön vermesi için bazı önerilerde bulunmuşlardır. Çalışmada dalgacık dönüşümü metodunun analizin doğruluğunu iyileştirdiğini saptamışlardır [1]. Tosunoğlu ve arkadaşları 2020'de yaptıkları çalışmada farklı makine öğrenmesi algoritmalarını Çoruh havzasındaki aylık nehir akımlarının modellenmesinde kullanmıştır. Kullandıkları veriler 1963 ve 2011 yıllarındaki aylık ortalama nehir akımınıdır. Makine öğrenmesi modeli için, SVR, Adaptif Yükseltme (AdaBoost), K En Yakın Komşular (KNN) ve Rassal Ormanlar gibi makine öğrenmesi algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan modellere ait test skoru sonuçlarına göre Rassal Orman tabanlı model diğer modellere göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir [2]. Asaad (2021), yapay sinir ağı modeli olan Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA), derin öğrenme metodu olarak yeni geliştirilen Uzun Kısa Süreli Bellek (UKSB) ve yapay sinir ağı ile bulanık mantığın özelliklerini birlikte kullanan Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ASBÇS) gibi farklı yapay zekâ tekniklerini ve Meram Çayı üzerindeki Küçük Muhsine Akım Gözlem İstasyonundan (AGİ) ölçülen 1981-2017 yılları arasındaki ortalama aylık debilerini kullanarak, gelecekteki 1 yıl, 2 yıl ve 3 yıl gibi uzun süreli tahminlerde bulunulmuştur. Sonuçlar, UKSB modelinin, ÇKA ve ASBÇS modellerine kıyasla daha yüksek tahmin doğruluğu ve daha düşük hata verdiğini göstermektedir. Ayrıca, UKSB tekniğinin gelecekteki uzun süreli tahminler için uygun olduğu görülmüştür [15]. Rahimzad ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada doğrusal regresyon, çok katmanlı algılayıcı, destek vektör makineleri ve zaman serilerini kullanarak ABD'nin Kentucky Havzasında 26 yıllık veri kullanarak akış tahmini yapmıştır. Tarihsel yağışlara bağlı olarak 3 farklı senaryoya göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında zaman serilerinin hidrolojik modellemelere uygun olduğu ve hızlı sonuç verdiği gözlemlenmiştir [10].

Literatürde yer alan diğer çalışmaları incelemek için Scopus veri tabanında, “streamflow” ve “forecast” kelimeleriyle arama yapılmıştır. Arama sonucunda edilen çalışmalar ait özet dosya VOSviewer yazılımı (<https://www.vosviewer.com>) kullanılarak incelenmiştir. 2012-2018 dönemine karşılık gelen tarihlerdeki çalışmaların dağılımı incelenmiştir. Yayınlanan çalışmalarda 3229 anahtar kelime bulunmuştur. Bu anahtar kelimeler Şekil 1'de gösterilmektedir. Literatür çalışmalarının yaptığı bilim insanlarına bakıldığında 3216 farklı ismin bu yıllarda çalışma yaptığı görülmektedir. Bu isimler ve dağılımları Şekil 2'de gösterilmektedir. Literatür çalışmalarının yapıldıkları ülkeler baz alındığında, 92 ülke gözlenmektedir. Bu ülkelerin dağılımları Şekil 3'te gösterilir.

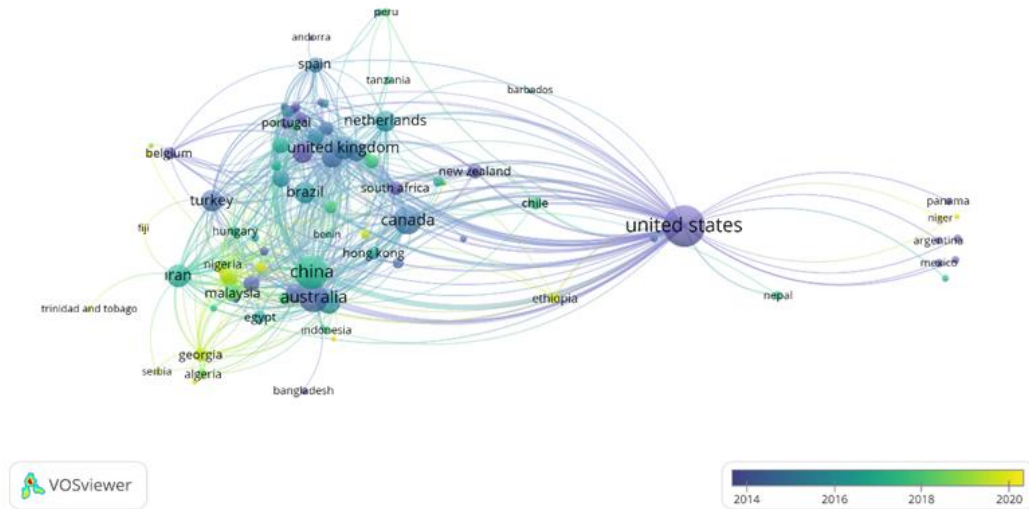


Şekil 1. Akarsu akım çalışmalarında yer alan anahtar kelimelerin yıllara göre dağılımı (Distribution of keywords in stream flow studies by years)

Şekil 1’de yer alan literatür çalışmalarının anahtar kelimeleri incelendiğinde, streamflow (akım) ve forecasting (tahmin) terimlerinin birbirleriyle ve son yıllarda iklim değişikliği, yapay zekâ ve makine öğrenmesi teknikleriyle oldukça ilişkili olduğu görülmektedir. Şekil 2 ise 2012-2018 yılları arasında ortak yayınlarda buluşan araştırmacıların isimlerini göstermektedir. Ayrıca kabarcık büyüklükleri araştırmacıların yayın sayısına göre oluşturulmuştur. Örneğin Wang Q. J.’nin toplam 54 adet çalışması bulunmaktadır.



Şekil 2. Akarsu akım çalışmalarını gerçekleştiren araştırmacıların dağılımı (Distribution of researchers who carried out stream flow studies)



Şekil 3. Akarsu akımı çalışmalarının ülkelere göre dağılımı (Distribution of stream flow studies by country)

Şekil 3’te yer alan ülkelerin dağılımı incelendiğinde, Amerika Birleşik Devletleri’nin en fazla (715) çalışmanın yapıldığı ülke olduğu görülmektedir. Ardından Çin (336), Avustralya (224), Kanada (198), Hindistan (105) ve Birleşik Krallık (103) gelmektedir. Türkiye’de ise 2014-2020 yılları arasında 79 adet çalışmanın yapıldığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, Mersin Lamas (Limonlu) Nehri’nin 1967-2020 yılları arasındaki aylık akım verileri kullanılarak, Yapay Sinir Ağları (YSA) Destek Vektör Makineleri (DVM), ve Derin öğrenme (DÖ) yöntemlerinin farklı algoritma ve optimizasyonlarıyla modeller oluşturulup sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada aylık verilerin en eski %80’lik kısmı eğitim, en güncel %20’lik kısmı ise test aşamalarında kullanılmıştır. 2. Bölümde materyal ve yöntem detayları, 3. Bölümde uygulama ardından son bölümde ise çalışmanın nihai sonucu yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

Çalışmada 1967 yılının Ekim ayından itibaren 2020 yılının Eylül ayına kadar 54 su yılının aylık akım verisi kullanılmıştır. Veriler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir [16].

Verilerin en eski %80'lik kısmı eğitim aşamasında, en güncel %20 verisi ise test aşamasında kullanılmıştır. Verilerin istatistiki bilgileri Tablo 1'de yer almaktadır. Buna göre T gözlenen akışı ve tahmin verisini, T-1; 1 aylık, T-2; 2 aylık, T-3; 3 aylık, T-4 ise 4 aylık geçmişe ötelemeyi ve giriş sıralamasını temsil eder. Veri setinin eğitim ve test olarak ayrı ayrı tanımlayıcı istatistiki bilgileri Tablo 2'de verilmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde %80-%20 örnekleri olduğu görülür, detaylı bilgi için çalışma incelenebilir [17]. Ayrıca Şekil 4'te girişler arasındaki korelasyon grafiği verilmiştir.

Tablo 1. Verilerin tanımlayıcı istatistiki bilgileri (Descriptive statistical information of the data)

Kriter/Sütun	T-1	T-2	T-3	T-4	T
Ortalama	5.124	5.125	5.121	5.117	5.122
Standart Hata	0.177	0.177	0.177	0.177	0.177
Ortanca	3.685	3.685	3.685	3.680	3.685
Standart Sapma	4.492	4.492	4.492	4.492	4.492
Basıklık	11.757	11.757	11.769	11.776	11.764
Çarpıklık	3.025	3.025	3.028	3.030	3.027
Aralık	33.546	33.546	33.546	33.546	33.546
En Büyük	0.854	0.854	0.854	0.854	0.854
En Küçük	34.400	34.400	34.400	34.400	34.400
Toplam	3300.162	3300.492	3297.702	3295.152	3298.642
Veri sayısı	644	644	644	644	644

Tablo 2. Eğitim ve test setinin istatistiki bilgileri (Statistical information of the training and test set)

Kriterler	Eğitim Verileri	Test Verileri
Ortalama	5.288	4.557
Standart Hata	0.197	0.412
Ortanca	3.930	2.890
Standart Sapma	4.459	4.623
Basıklık	12.598	9.451
Çarpıklık	3.098	2.892
Aralık	33.546	27.730
En Büyük	0.854	0.871
En Küçük	34.400	28.601
Toplam	2717.873	574.189
Veri Sayısı	514	126



Şekil 4. Verilerin korelasyon matrisi (Correlation matrix of data)

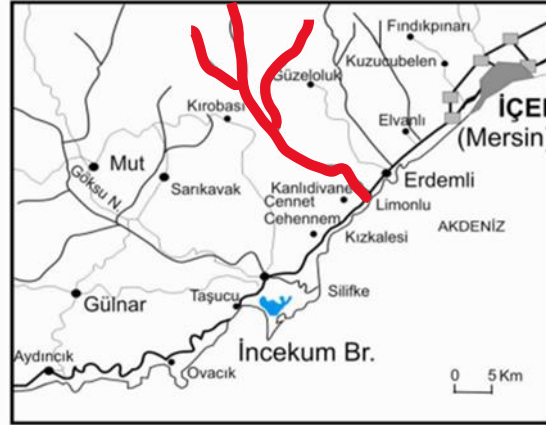
Şekil 4'te T anı ile T-n ayları arasındaki korelasyon değerleri renklendirilerek verilmiştir. Grafikte T-1'den T-4'e gidildikçe korelasyon katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. T-4'te sifıra oldukça yaklaşıldığı için bu aydan geriye gidilmemiştir (son satır). Bu nedenle 4. girişe kadar modellemeler gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Çalışma alanı (Work space)

Mersin, Adana'nın batısında, Karaman'ın güneydoğusunda, Niğde'nin güneybatısında, Konya'nın güneyinde ve Antalya'nın doğusunda yer almaktadır. Yüz ölçümü 15.853 km²'dir. Akdeniz havzasında

bulunur. Mersin ili, güneyde Akdeniz Anadolu'nun iç kesimlerinden yüksek Batı ve Orta Torosların yaylaları ve zirveleri Kuzeyden gelen dağlar ile çevrilidir [18-19].

Lamas Çayı olarak bilinen, Limonlu Çayı, Toroslardan kaynağını alan, Mersin ili sınırlarında bulunmaktadır. Karaaydın yöresinde Yüçlük Dağından kaynağını alır, Aksıfat Deresi ile birleşir Limonlu'da Akdenizi dökülür. Halk arasındaki adı Lamas Çayı'dır. Akarsu 1500 km² büyüklüğündeki alanın sularını toplar, uzunluğu 130 km'dir. Evdirek, Susma ve Akçay önemli kollarıdır. Kar erimelerinin yanında karstik kaynaklarda akarsuyu besler. Yıllık ortalama debisi 6,25 m³/s'dir [20].



Şekil 5. Çalışma alanı Mersin Lamas (Limonlu) Nehri (The study area is Mersin Lamas (Limonlu) River) [21]

Limonlu Çayı Havzası toprak özellikleri bakımından Akdeniz iklimi etkisini yansıtmaktadır. Saha içerisinde en geniş yayılışa sahip toprak zonal toprak grubunda yer alan Kırmızı Akdeniz Toprağı (Terra Rossa) dır [21]. Bu çalışma alanının seçilmesinde en büyük etken nehirde meydana gelen taşkınlardır. Geçmiş yıllarda Mersin Lamas nehrinde birçok taşkın meydana gelmiş ve bu taşkınlarda maddi-manevi kayıplar yaşanmıştır [3]. Bu nedenle nehir verilerinin tahmini ve takibi önem arz etmektedir.

2.2. Metot (Method)

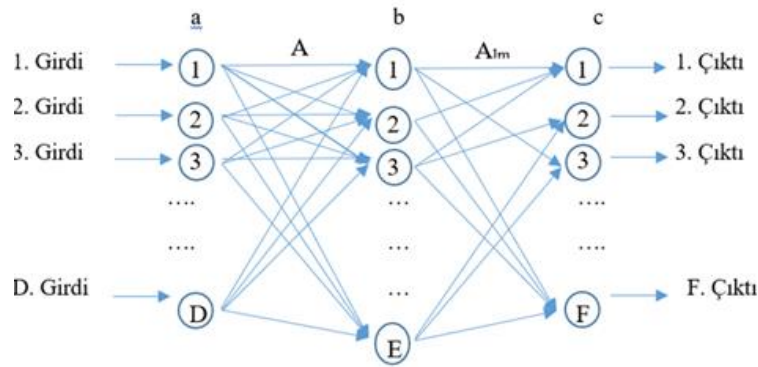
Bu çalışmada 3 farklı YSA yöntemi (ÇKYSA, RTYSA, GRYSA), 3 farklı DVM eğitim fonksiyonu (Polynomial, Gaussian ve Linear) ve 3 farklı DÖ optimizasyon algoritması; Adaptive Moment Estimation (Adam), Stochastic Gradient Descent With Momentum (SGDM) ve Root Mean Square Propagation (RMSProp) karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Çok Katmanlı YSA (Multilayered ANN)

En yaygın kullanılan YSA modellerinden biri olan ÇKYSA, bir girdi katmanı, en az bir hücreli ara katman ve bir çıktı katmanından oluşur. Girdi katmanı, çözülecek problemi YSA'ya dahil edilmesini sağlar. Çıktı katmanı, işlenen bilgilerin ağda dışa aktarıldığı katmandır. İki katman arasında gizli katman bulunabilir. Tüm girdileri ve ağırlıkları çarparak toplayıp fonksiyondan geçirerek o nöronun çıktı değeri hesaplanır. ÇKYSA modelinde bilgi akışı ileri yönde gerçekleştiği için ileri beslemelidir. Hata minimum olana kadar geriye doğru yayılır. Sayısal optimizasyon yöntemlerini kullanan ve çözümlerde hızlı yakınsama sağlayan bu klasik algoritmaların yanı sıra Levenberg-Marquardt algoritmaları da sıklıkla tercih edilir hale gelmiştir [22]. Levenberg-Marquardt algoritması hakkında daha detaylı bilgiyi burada bulabilirsiniz [23].

Şekil 6'da b ve c tabakalarındaki her bir hücre, önceki tabakadan NET ağırlıklı toplam çıktıları girdi olarak almaktadır. NET değerleri Denklem 1'de eşitlikle bulunmaktadır.

$$NET_{xb} = \sum_{a=1}^D A_{ab} C_{xa} + \theta_b \quad (1)$$



Şekil 6. Üç Tabakalı/Katmanlı (a, b, c tabakaları) bir YSA yapısı (An ANN structure with three layers/layers (layers a, b, c)) [24]

θ_b taraflılık sabiti (bias), A_{ab} a ve b tabakaları arasındaki ağırlıklar kümesi, D girdi vektörünün boyutu, ζ_{xa} x örneği için a tabakasının çıktı kümesidir. İkinci tabaka olan b ve üçüncü tabaka c' den her bir hücre, NET değerini doğrusal olmayan bir tasnif fonksiyonundan geçirir. Bunun sonucunda Denklem 2'de $f(NET)$ çıktısı üretilir. Ardından hata ve gerçek çıktı değerleri hesaplanır.

$$f(NET) = \frac{1}{1+e^{-NET}} \quad (2)$$

2.2.2. Radyal tabanlı YSA (Radial based ANN)

Radyal Tabanlı YSA (RTYSA) kavramı literatüre 1988 yılında Broomhead ve Lave tarafından getirilmiştir. İnsanlarda görülen sinir sistemindeki nöron hücrelerinin temel alındığı bir YSA modelidir. Etki-tepki durumları dikkate alınarak geliştirilmiştir. RTYSA modelleri, eğitimlerini çok boyutlu uzayın bir boyutu olarak düşünülebilir. Bunu bir eğri uydurma yaklaşımı olarak görmek mümkündür [22], [25-26]. Böylelikle RTYSA örneğinin eğitim performansı, çıktı vektör uzayındaki verilere en yakın sonucu bulma ve dolayısıyla bir interpolasyon problemine dönüşmektedir [22]. RTYSA yapısı genel olarak YSA yapısına benzer şekilde giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. Fakat diğer YSA'lardan farklı olarak girdi katmanından gizli katmana geçerken veriler radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonlarına ve doğrusal olmayan bir küme analizine maruz kalmaktadır. Gizli katmanla çıktı katmanı arasındaki yapı diğer YSA tiplerinde olduğu gibi işler ve asıl eğitim bu katmanda gerçekleşir.

2.2.3. Genelleştirilmiş YSA (Generalized ANN)

Specht (1991) tarafından önerilen genelleştirilmiş regresyon sinir ağı geri yayılım yöntemindeki gibi yinelemeli bir eğitim prosedürü gerektirmez [27]. GRYSA, eğitim verisini kullanarak girdi ve çıktı vektörleri arasındaki herhangi bir fonksiyonu tahmin etmektedir. Eğitim seti genişledikçe tahmin hatası sifıra iner [28]. Tanım olarak bilindiği gibi regresyon, "x" ve eğitim seti verildiğinde bir "y" bağımlı değişkeninin en olası değerini bağımsız "x" değişkenine bağlı olarak tahmin eder. Regresyon metodu ortak kare hatasını en aza indirecek şekilde "y" yi tahmin eder. GRYSA, bir eğitim seti verildiğinde "x" ve "y" nin ortak Olasılık Yoğunluk Fonksiyonunu (OYF) tahmin eden bir metottur. OYF veriden bir ön kabul yapılmadan elde edildiği için sistem genel olarak idealdir [28].

2.2.4. Destek vektör makineleri (Support vector machines)

Destek vektör makineleri (DVM); lineer ve non-lineer karmaşık problemlerin ilişkisini makine öğrenimi yoluyla yakalayabilen, güçlü bir yöntemdir. Regresyon problemlerinin çözümünde de kullanılmaktadır. Yöntem temel olarak iki farklı sınıfla Lagrange çarpanlarına göre ayıran optimum ayırıcıyı bulmayı amaçlayan ve bu amaçla örnek verileri (eğitim seti) kullanan bir tekniktir. DVM genellikle doğrusal olmayan ilişkiyi tanımlamak için uygundur [2], [29-30].

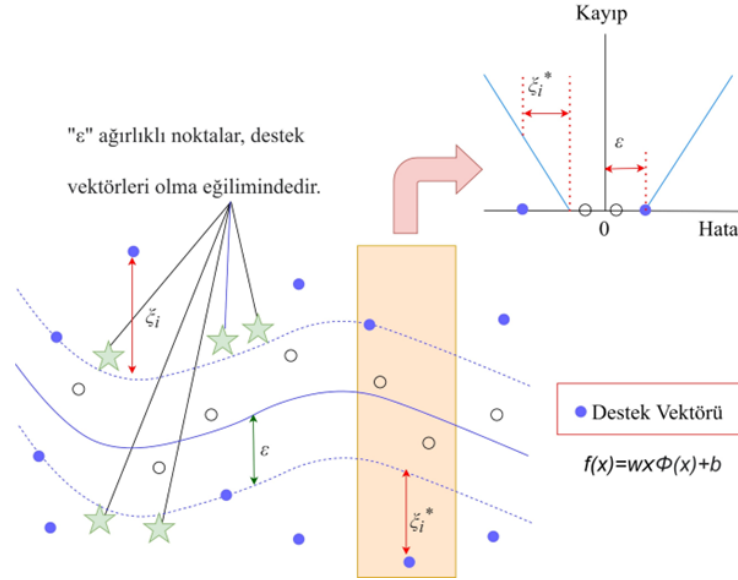
$$l(x) = v^T x + y = 0 \quad (3)$$

Burada $(\zeta_1, \dots, \zeta_n)$ hedef veri seti, v normal vektör ve y eşik değeridir. Hiper düzlemden başlayarak, $\zeta_i \in (-1, +1)$ ile dikkate alınan bir veri, $\zeta_i v_i + y \geq +1$ ise sınıf 1'dir ve $\zeta_i v_i + y \leq -1$ ise sınıf 2'dir ($v \cdot x + b \geq 1$ i=1.....n. [29]. Hedef veriler doğrusal olarak ayrılmıyorsa, doğrusal olmayan DVM kullanılır.

Bu durumda eğitim verileri, birbirinden ayrılabilir daha yüksek uzayda haritalanır. SVMR modelinin yapısal konfigürasyonu Şekil 7'de gösterilmiştir. DVMR regresyon fonksiyonunun özeti aşağıdaki gibidir [31].

$$f(x) = w \times \phi(x) + b \quad (4)$$

Denklemden w ağırlık vektörü, b sapma ve ϕ transfer fonksiyonudur.



Şekil 7. Destek vektör makineleri şeması. (Schematic of support vector machines.)

2.2.5. Derin öğrenme ve LSTM mimarisi (Deep learning and LSTM architecture)

Derin Öğrenme, makine öğrenmesinin bir sonraki adımı olarak görülebilir, yapay zekâ ve görüntü işleme hayatımızın birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür algoritmalar otomatikleştirilmiş bir model oluşturarak daha genelleştirilmiş bir model sağlama özellikleri vardır. İçerisinde çeşitli optimizasyonlar kullanılabilir. Bu çalışmada LSTM derin öğrenme mimarisine ait 'Adam', 'RMSProp' ve 'SGDM' optimizasyonları kullanılmıştır [7].

LSTM; Tekrarlayan Yapay Sinir Ağlarının (RNN) zayıf yanlarının revize edilerek geliştirilmiş versiyonu olarak tanımlanabilmektedir. RNN'lerin çalışma durumu bilgiyi LSTM mimarisine göre daha kısa süre saklayabilmesidir. LSTM bu yönüyle RNN'in gelişmiş halidir. Hücrelerin etkileşim sayısını artırarak bunu yapmıştır. LSTM öğrenilen bilgiyi uzun bir süre muhafaza ederek çalışır bu sebeple uzun süreli öğrenimler-tahminler konusunda başarı gösterdiği görülür. Genel olarak 4 hücreden meydana gelir. Bunlar giriş, çıkış ve unutmaya kapılarıdır. Bu unutmaya kapıları sayesinde bilgiler tek bir dosya ile uzun süreli olarak hatırlanır [10], [30], [32].

$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (5)$$

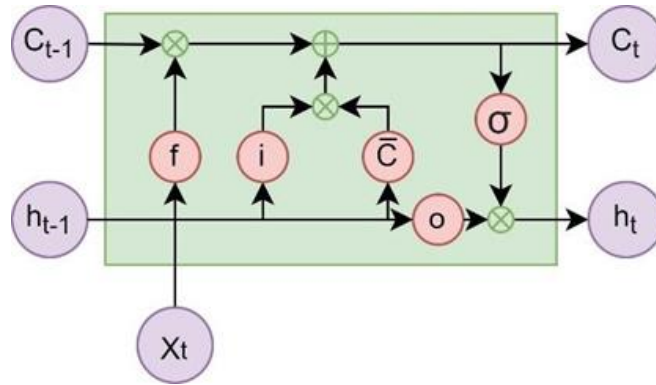
$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (6)$$

$$o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (7)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (8)$$

$$C_t = f_t \otimes C_{t-1} + i_{t-1} \otimes \tilde{C}_t \quad (9)$$

$$h_t = o_t \otimes \tanh(C_{t-1}) \quad (10)$$



Şekil 8. LSTM mimarisi genel çalışma diyagramı. (LSTM architecture general working diagram.)

it, ft ve ot sırasıyla giriş kapısı, unutma kapısı ve çıkış kapısıdır; Wi, Wf ve Wo sırasıyla giriş, unutma ve çıkış kapılarını girişe bağlayan ağırlıkları gösterir; Ui, Uf ve Uo giriş, unutma ve çıkış kapılarından gizlenene kadar olan ağırlıkları temsil eder. Sırasıyla katman; bi, bf ve bo giriş, unutma ve çıkış kapısı sapma vektörlerini belirtir, sırasıyla; t hücrenin önceki andaki durumudur; Ct hücrenin mevcut durumudur; ht-1 hücrenin önceki zaman noktasındaki çıktısını ifade eder; ht, hücrenin çıkışını ifade eder [33].

Adam algoritması için denklemler aşağıdaki gibidir;

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (11)$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (12)$$

$$m'_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}, v'_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (13)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{v'_t + \epsilon}} m'_t \quad (14)$$

RMSProp algoritması için denklemler aşağıdaki gibidir;

$$E[g^2]_t = 0.9E[g^2]_{t-1} + 0.1g_t^2 \quad (15)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{E[g^2]_t + \epsilon}} g_t \quad (16)$$

$$g_t = \nabla_{\theta_t} J(\theta_t) \quad (17)$$

SGDM algoritması için denklemler aşağıdaki gibidir;

$$v_{t+1} = \gamma v_t + \eta \nabla_{\theta} J \quad (18)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - v_{t+1} \quad (19)$$

$\theta \in \mathbb{R}^n$: Model parametreleri; η : Öğrenme katsayısı; $\nabla_{\theta} J(\theta)$: Parametrelere bağlı olarak hedef fonksiyonunun eğimi; $g_{\theta, t}$: her bir köşegen elemanı, η_{θ} parametresine göre, t. iterasyona kadar hesaplanmış eğim değerlerinin kareleri toplamı; ϵ : öğrenme katsayısının 0'a bölünmesini engellemek için atanan sabit değer [34].

3. Uygulama (Application)

Karşılaştırma kriteri olarak Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Hata (OMH), Nash Sutcliffe modeli verimlilik katsayısı (NSE), Ortalama Mutlak Bağlı Hata (OMBH), ve determinasyon katsayısı (R^2) kullanılmıştır. Karşılaştırma kriterlerinin formülleri Denklem 20-24' te verilmiştir.

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_p - Y_o)^2} \quad (20)$$

$$OMH = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_p - Y_o| \quad (21)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_p)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_o - Y_{avr})^2} \quad (22)$$

$$OMBH = \frac{1}{N} \left(\frac{\sum_{i=1}^N |Y_p - Y_o|}{Y_o} * 100 \right) \quad (23)$$

$$R^2 = \left(\frac{N * (\sum Y_o * Y_p) - (\sum Y_o) * (\sum Y_p)}{\sqrt{(N * \sum Y_o^2) - (\sum Y_o)^2} * \sqrt{(N * \sum Y_p^2) - (\sum Y_p)^2}} \right)^2 \quad (24)$$

Denklemlerde kullanılan N veri sayısı, Y_p modelde tahmin edilen akım değeri, Y_o gerçekte gözlenen akım değerini, Y_{avr} ise akım ortalamasını temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan veriler Lamas nehri akım verileridir. Dolayısıyla birimler m^3/sn cinsindedir. Karşılaştırma kriterlerimizden Karekök ortalama karesel hata, Ortalama mutlak hata ve Ortalama mutlak bağıl hata; bkncz. Denklem (20-21-23) hata sonuçları olduğundan modeldeki hata sonuçlarının birimleri de aynı şekilde m^3/sn 'dir. Hata sonuçlarının yüksek olması modelin gerçek veriye göre uzakta yani kötü sonuç verdiğini anlatır. Düşük olması ise modelin gerçek veriye göre yakın, hatası düşük ve modelin uygun olduğunu göstergesidir. NSE verimlilik katsayısına baktığımızda 1'e yaklaştıkça modelin gerçeğe yakın tahmin sonucunun iyi olduğu gözlemlenir. Ancak (-) ve 1'den uzak sonuçlarda modelin güzel tahmin yapamadığı ve gerçekten uzak sonuçlar olduğu gözlemlenir. R^2 determinasyon katsayısı 0 - 1 arasında değer alabilmektedir. 1'e yaklaştıkça modelin gerçeğe uyumluluğu ve doğruluğu artar şeklinde yorumlanır.

Tablo 3'te 3 farklı YSA modelinin tahmin sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Test sonuçlarına bakıldığında ÇKYSA yönteminin 2 girişli modeli en iyi determinasyon katsayısını ve düşük hata oranını vermektedir Aşağıda verilen tüm tablolarda renklendirme işlemi hatalarda en düşükler kırmızı, NSE ve R^2 'de 1'e en yakınlar kırmızı tonunda renklendirilmiştir. Bu renklendirmeye göre en kırmızı modeller en iyi model olarak seçilebilir.

Tablo 4'te Derin öğrenme yönteminin 3 farklı algoritmasının tahmin sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Adam, RMSProp ve SGDM algoritmalarının modellerinin birbirine yakın ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği, YSA modellerine göre daha başarılı olduğu gözlemlenir.

Tablo 5'te Vektör destek makinelerinin 3 farklı optimizasyonla akım modellemesi sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde Polynomial algoritmasının 2 giriş sonucu en iyi sonucu verdiği gözlemlenir.

Tablo 3. YSA modeli eğitim ve test sonuçları (ANN model training and test results)

Yöntem	Algoritma	Değerlendirme Kriteri	Eğitim Aşaması				Test Aşaması			
			1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş	1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş
YAPAY SINIR AĞLARI	GRYSA	KOKH	3.065	1.202	0.203	0.057	3.316	3.872	5.110	4.229
	ÇKYSA		2.821	2.927	2.013	2.011	3.349	2.607	4.362	3.815
	RTYSA		3.069	2.841	2.626	2.698	3.292	3.272	3.283	3.022
	GRYSA	OMH	1.800	0.759	0.080	0.007	2.028	2.117	2.664	2.347
	ÇKYSA		1.512	1.507	1.077	1.067	1.780	1.508	1.998	1.867
	RTYSA		1.623	1.441	1.486	1.513	1.807	1.610	1.765	1.662
	GRYSA	NSE	0.527	0.927	0.998	1.000	0.481	0.293	-0.232	0.156
	ÇKYSA		0.599	0.568	0.796	0.796	0.471	0.679	0.103	0.313
	RTYSA		0.526	0.593	0.653	0.633	0.489	0.495	0.492	0.569
	GRYSA	OMBH	35.857	17.627	2.159	0.218	52.523	46.114	58.267	49.001
	ÇKYSA		27.135	26.779	21.649	20.784	35.347	34.480	43.272	35.558
	RTYSA		28.340	25.333	27.851	28.729	37.573	30.747	36.049	34.743
GRYSA	R^2	0.536	0.929	0.998	1.000	0.485	0.361	0.078	0.213	
ÇKYSA		0.599	0.568	0.796	0.796	0.473	0.680	0.220	0.346	
RTYSA		0.526	0.593	0.653	0.633	0.491	0.499	0.505	0.584	

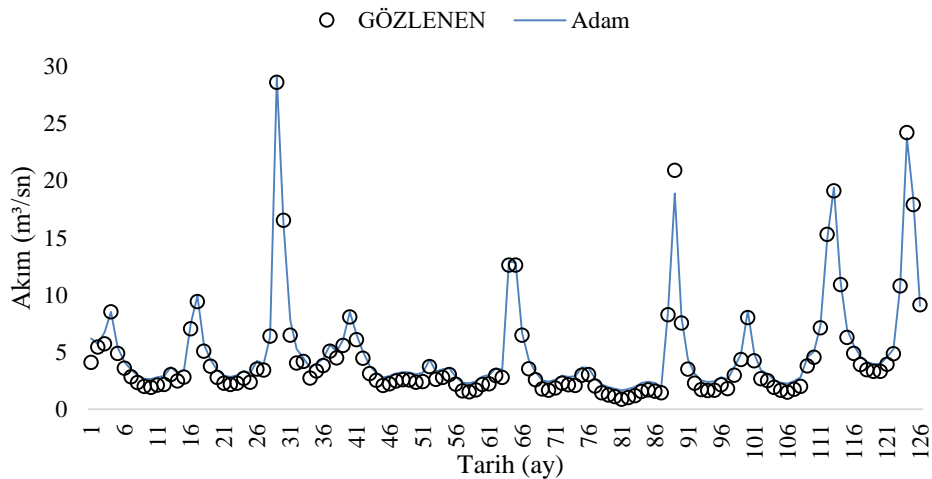
Tablo 4. Derin öğrenme modeli eğitim ve test sonuçları (Deep learning model training and test results)

Yöntem	Algoritma	Değerlendirme Kriteri	Eğitim Aşaması				Test Aşaması			
			1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş	1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş
DERİN ÖĞRENME (DEEP LEARNING)	ADAM	KOKH	0.169	0.332	0.214	0.303	0.708	0.690	0.696	0.774
	RMSPROP		0.075	0.243	0.120	0.185	0.765	0.770	0.781	0.863
	SGDM		0.184	0.138	0.147	0.366	0.812	0.778	0.749	0.574
	ADAM	OMH	0.128	0.275	0.183	0.181	0.656	0.613	0.626	0.713
	RMSPROP		0.054	0.202	0.090	0.139	0.737	0.674	0.753	0.730
	SGDM		0.109	0.092	0.096	0.310	0.751	0.733	0.712	19.888
	ADAM	NSE	0.999	0.994	0.998	0.995	0.976	0.978	0.977	0.972
	RMSPROP		1.000	0.997	0.999	0.998	0.972	0.972	0.971	0.965
	SGDM		0.998	0.999	0.999	0.993	0.969	0.972	0.974	0.985
	ADAM	OMBH	2.742	7.460	5.150	3.052	25.264	20.843	22.509	27.044
	RMSPROP		1.259	5.174	2.181	2.879	27.933	23.190	27.728	26.051
	SGDM		2.399	2.107	2.123	7.157	27.529	27.554	27.266	0.519
	ADAM	R ²	0.999	0.997	0.999	0.999	0.996	0.994	0.993	0.994
	RMSPROP		1.000	0.999	0.999	0.999	0.996	0.987	0.995	0.987
	SGDM		0.998	0.999	0.999	0.998	0.994	0.995	0.996	0.995

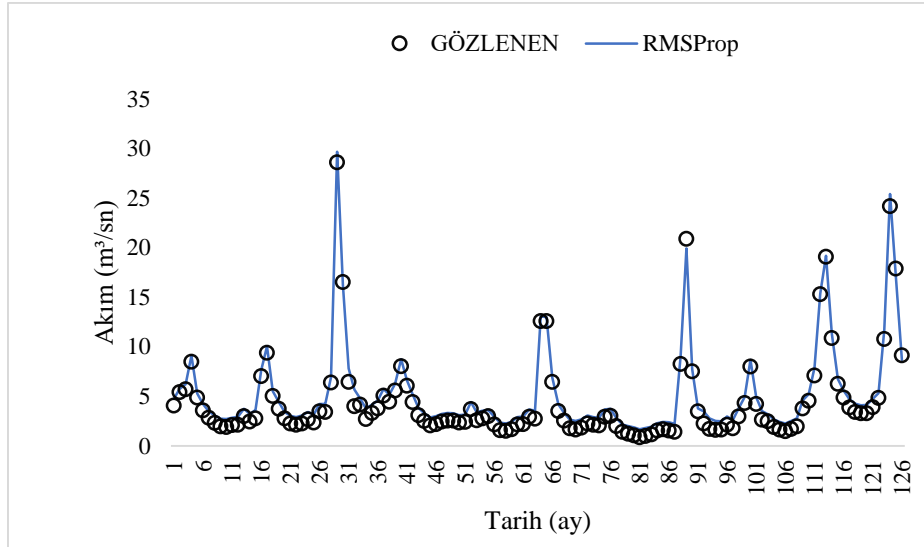
Tablo 5. Destek vektör makineleri modeli eğitim ve test sonuçları (Support vector machines model training and test results)

Yöntem	Algoritma	Değerlendirme Kriteri	Girişler (Eğitim)				Girişler (Test)			
			1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş	1 Giriş	2 Giriş	3 Giriş	4 Giriş
DESTEK VEKTÖR MAKİNE LERİ (SVM)	GAUSSIAN	KOKH	23.671	3.255	3.038	2.871	3.562	3.381	3.522	3.314
	LINEAR		3.457	3.456	3.441	3.446	3.633	3.597	3.575	3.579
	POLYNOMIAL		3.315	4.196	4.341	2.685	3.410	3.945	3.396	3.322
	GAUSSIAN	OMH	1.490	1.339	1.145	1.127	1.987	1.842	1.893	1.825
	LINEAR		1.813	1.782	1.782	1.779	2.146	2.092	2.076	2.076
	POLYNOMIAL		1.687	3.161	2.431	1.429	2.102	3.554	1.877	1.777
	GAUSSIAN	NSE	0.470	0.466	0.535	0.585	0.402	0.461	0.415	0.482
	LINEAR		0.398	0.398	0.403	0.402	0.377	0.390	0.397	0.396
	POLYNOMIAL		0.446	0.113	0.050	0.637	0.451	0.266	0.456	0.479
	GAUSSIAN	OMBH	23.671	20.460	16.741	17.058	50.233	44.814	46.531	45.281
	LINEAR		30.028	29.818	29.500	29.481	53.559	52.563	51.735	51.701
	POLYNOMIAL		27.728	82.567	47.486	25.265	55.779	129.580	35.717	38.131
	GAUSSIAN	R ²	0.518	0.507	0.597	0.636	0.435	0.518	0.453	0.532
	LINEAR		0.420	0.433	0.433	0.434	0.400	0.427	0.426	0.428
	POLYNOMIAL		0.496	0.317	0.409	0.655	0.511	0.681	0.503	0.490

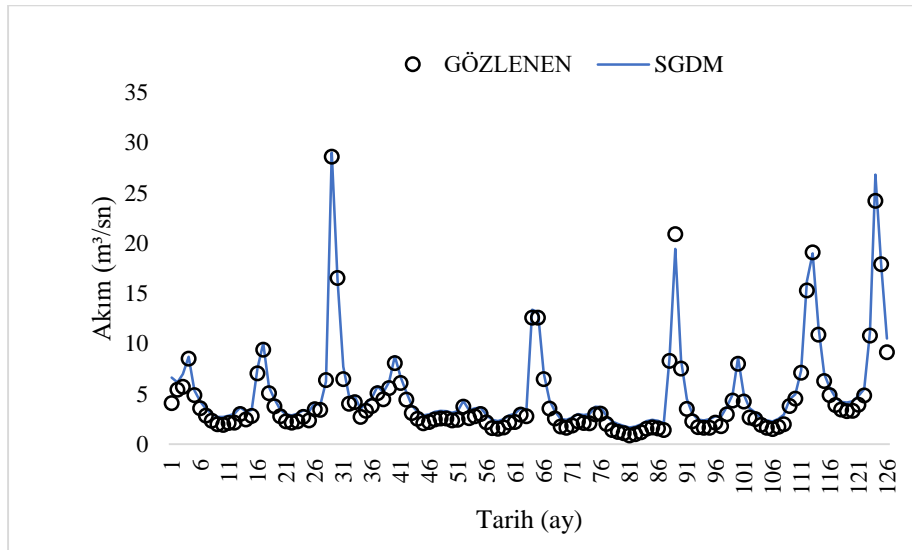
Tablolarda görüldüğü gibi en iyi model veren yöntem DÖ'dür. DÖ yöntemi için 3 farklı optimizasyonun tahmin ve gözlenen akım değerlerinin gidiş grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 9. DÖ yöntemi Adam optimizasyonu test sonuçları gidiş grafiği (DL method Adam optimization test results trend graph)



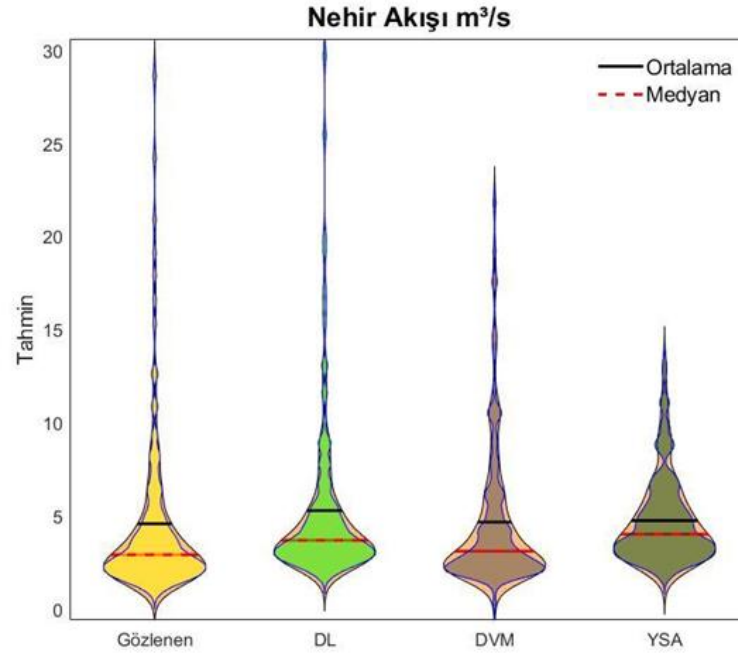
Şekil 10. DÖ yöntemi RMSProp optimizasyonu test sonuçları gidiş grafiği (DL method RMSProp optimization test results trend graph)



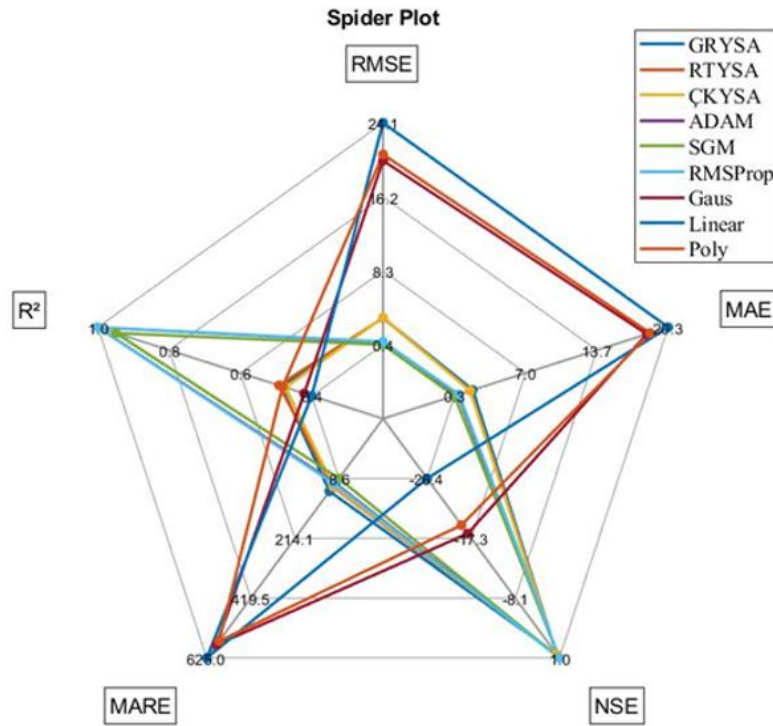
Şekil 11. DÖ yöntemi SGDM optimizasyonu test sonuçları gidiş grafiği (DL method SGDM optimization test results trend graph)

Şekil 9, 10 ve 11’de Derin öğrenme yönteminin 3 farklı optimizasyonunun test sonuçları ve gözlenen akım değerleri ile gidiş grafiği verilmiştir. Grafiklerde tahmin değerlerinin gerçek değerleri piklerde ve minimum noktalarda yakaladığı modellerin oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 12’de yer alan Violin grafiği, tahminlerin gözlenen değer ile yorumlanma gücünü istatistiksel parametrelerle çizilmiş şekillerle ifade etmektedir [35]–[37]. Bu açıdan Şekil 12 incelendiğinde DÖ yönteminin YSA ve DVM yöntemlerine göre gözlenen değerleri daha iyi ifade ettiği tespit edilmiştir. Gözlenen veriye en yakın diyagramın DÖ yönteminin verdiği görülmüştür. DVM ve YSA kıyaslamasında DVM daha iyi sonuç vermiştir ancak ikisi de ortalamalara bakıldığında daha uzak sonuçlar vermiştir. Yapay zekâ kullanımında önce YSA sonra DVM sonra teknoloji ilerledikçe DÖ ile gözlenen değerlere daha da yaklaşıldığı sonucu çıkarılır.



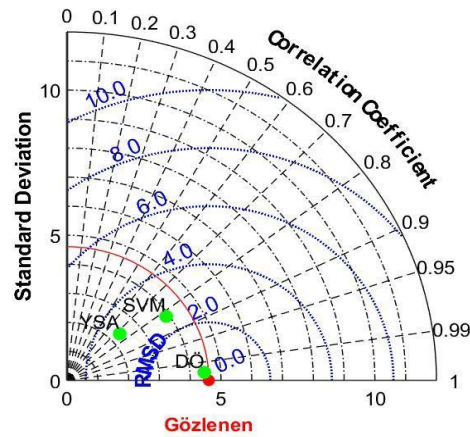
Şekil 12. Sonuçların Violin diyagramı (Violin diagram of results)



Şekil 13. Tüm yöntemlerin 1 giriş için sonuçların Spider grafiği (Spider graph of results for 1 input of all methods)

Şekil 13'te tüm yöntemlerin 1 giriş için karşılaştırma kriterlerinin Spider diyagramı olarak verilmiştir. Çizgilerin renklerine bakıldığında DÖ optimizasyonlarının diğerlerine göre R²'si yüksek hata miktarları düşük olarak gözlemlenmektedir.

Şekil 14'te yöntemlerin en iyi sonuç veren modellerinin korelasyon katsayılarının grafiği Taylor diyagramı şeklinde verilmiştir. RMSProp modelinin en yüksek korelasyon katsayısı ile model sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca RMSProp'un gözlenen değere en yakın model olduğu görülmektedir.



Şekil 14. Tüm yöntemlerin en iyi sonuçlarının Taylor diyagramı (Taylor diagram of the best results of all methods)

4. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada, Mersin Lamas (Limonlu) Nehri'nin 1967-2020 yılları arasındaki aylık akım verileri kullanılarak, YSA, DVM ve DÖ yöntemlerinin farklı algoritma ve optimizasyonlarıyla tahminler oluşturulup sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada aylık verilerin en eski %80'lik kısmı eğitim, en güncel %20'lik kısmı ise test aşamalarında kullanılmıştır. KOKH, OMH, NSE, OMBH, ve R^2 kullanılmıştır. Ayrıca sonuçlar Taylor, Violin ve Spider grafikleri ile yorumlanmıştır.

Sonuçlar incelendiğine;

DÖ yönteminin 3 farklı algoritmasının da birbirine yakın ve en iyi sonuçları verdiği görülmektedir. RMSProp 1 giriş sonuçları; (KOKH= 0.7647, OMH= 0.7370, NSE= 0.9724, OMBH=27.9326, $R^2= 0.9962$), Adam 1 giriş sonuçları; (KOKH= 0.7077, OMH= 0.6557, NSE= 0.9764, OMBH=25.2640, $R^2= 0.9956$), SGDM 1 giriş sonuçları; (KOKH= 0.8119, OMH= 0.7506, NSE= 0.9689, OMBH= 27.5292, $R^2= 0.9935$).

YSA ve DVM yöntemleri DÖ kötü sonuçlar vermesine rağmen kendi aralarında yakın sonuçlar vermiştir. ÇKYSA 2 giriş (KOKH= 3.3489, OMH= 1.7800, NSE= 0.4710, OMBH=35.3472, $R^2=0.4729$), Polynomial 2 giriş (KOKH= 3.9447, OMH=3.5538, NSE= 0.2660, OMBH=129.5801, $R^2=0.6809$)

Tablosal sonuçların ardından model değerleri ve gözlenen değerlerle oluşturulan Taylor ve Violin diyagramları incelendiğinde, akım modellemesinde YSA sonra DVM sonra teknoloji ilerledikçe DÖ ile gözlenen değerlere daha da yaklaşıldığı sonucu çıkarılmıştır.

Simgeler (Symbols)

Simge	Açıklama
$\mathbb{Q}_1, \dots, \mathbb{Q}_n$	hedef veri seti
v	normal vektör
y	eşik değeri
i_t	giriş kapısı
f_t	unutma kapısı
o_t	çıkış kapısı
W_i	giriş kapısını girişe bağlayan ağırlık
W_f	unutma kapısını girişe bağlayan ağırlık
W_o	çıkış kapısını girişe bağlayan ağırlık
U_i	giriş kapısından gizlenene kadar olan ağırlığı
U_f	unutma kapısından gizlenene kadar olan ağırlığı
U_o	çıkış kapısından gizlenene kadar olan ağırlığı
B_i	giriş kapısı sapma vektörü
b_f	unutma kapısı sapma vektörü
b_o	çıkış kapısı sapma vektörü
t	hücrenin önceki andaki durumu
C_t	hücrenin mevcut durumu
h_{t-1}	hücrenin önceki zaman noktasındaki çıktısı
h_t	hücrenin çıkışı
θ_b	tarafılık sabiti (bias)

A_{ab}	a ve b tabakaları arasındaki ağırlıklar kümesi
D	girdi vektörünün boyutu
ζ_{xa}	x örneği için a tabakasının çıktı kümesi
N	veri sayısı
Y_p	modelde tahmin edilen akım değeri
Y_o	gerçekte gözlenen akım değerini
Y_{avr}	akım ortalaması

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Makalenin yazarları arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar (References)

- [1] Z. M. Yaseen, A. El-shafie, O. Jaafar, H. A. Afan, and K. N. Sayl, "Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000-2015," *J. Hydrol.*, vol. 530, pp. 829–844, November 2015. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.10.038
- [2] F. Tosunoğlu, S. Hanay, E. Çintaş, and B. Özyer, "Monthly Streamflow Forecasting Using Machine Learning," *Erzincan Univ. J. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 1242–1251, 2020. doi:10.18185/erzifbed.780477
- [3] V. Demir, A. Alptekin, M. Ö. Çelik, and M. Yakar, "2D Flood modeling with the help of GIS: Mersin / Lamas River," in *2nd Intercontinental Geoinformation Days (IGD) - 5-6 May 2021*, pp. 176–178, 2021.
- [4] H. Çitakoğlu, A. Aydemir, "Determination of Monthly Wind Speed of Kayseri Region With Gray Estimation Method," in *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering*, pp. 415–420, 2019.
- [5] H. Citakoglu, B. Babayigit, and N. A. Haktanir, "Solar radiation prediction using multi-gene genetic programming approach," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 142, no. 3–4, pp. 885–897, 2020. doi:10.1007/s00704-020-03356-4
- [6] H. Çitakoğlu and Y. Özeren, "Sakarya Havzası Su Kalitesi Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 24, pp. 10–17, 2021. doi:10.31590/ejosat.898046
- [7] C. Boyraz and S. N. Engin, "Streamflow prediction with deep learning," in *6th International Conference on Control Engineering and Information Technology*, pp. 25–27, 2018. doi:10.1109/CEIT.2018.8751915
- [8] S. B. Kotsiantis, I. D. Zaharakis, and P. E. Pintelas, "Machine learning: A review of classification and combining techniques," *Artif. Intell. Rev.*, vol. 26, no. 3, pp. 159–190, 2006. doi:10.1007/s10462-007-9052-3
- [9] A. L. Samuel, "Some studies in machine learning using the game of checkers," in *IBM Journal of Research and Development*, vol. 44, no. 1.2, pp. 206–226, Jan. 2000. doi:10.1147/rd.441.0206
- [10] M. Rahimzad, A. Moghaddam Nia, H. Zolfonoon, J. Soltani, A. Danandeh Mehr, and H. H. Kwon, "Performance Comparison of an LSTM-based Deep Learning Model versus Conventional Machine Learning Algorithms for Streamflow Forecasting," *Water Resour. Manag.*, vol. 35, no. 12, pp. 4167–4187, 2021. doi:10.1007/s11269-021-02937-w
- [11] E. Oztemel, *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık Eğitim, 2012.
- [12] Y. B. Dibike and D. P. Solomatine, "River flow forecasting using artificial neural networks." *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology*, vol. 26, no. 1, pp. 1–7, 2001. doi:10.1016/S1464-1909(01)85005-X
- [13] T. S. Hu, K. C. Lam, and S. T. Ng, "A Modified Neural Network for Improving River Flow Prediction / Un Réseau de Neurones Modifié pour Améliorer la Prédiction de L'Écoulement Fluvial flow prediction," *Hydrol. Sci. J. ISSN*, vol. 50, no. 2, pp. 298–318, 2009. doi:10.1623/hysj.50.2.299.61794
- [14] M. Ren, B. Wang, Q. Liang, and G. Fu, "Classified real-time flood forecasting by coupling fuzzy clustering and neural network," *Int. J. Sediment Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 134–148, 2011. doi:10.1016/S1001-6279(10)60033-9
- [15] M. Asaad, "Aylık Ortalama Akım Verilerinin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmin Edilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2021.
- [16] DSİ, "Faaliyetler," Devlet Su İşleri, [Online]. Available: <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/692>. [Accessed: May. 22, 2022].
- [17] H. C. Kilinc and B. Haznedar, "A Hybrid Model for Streamflow Forecasting in the Basin of Euphrates," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, 2022. doi:10.3390/w14010080
- [18] Enerji Atlası, "Lamas Çayı," enerjiatlasi.com, [Online]. Available: <https://www.enerjiatlasi.com/akarsular/lamas-cayi.html>. [Accessed: May. 22, 2022].
- [19] Wikipedia, "Limonlu Çayı," tr.wikipedia.org, Mar. 26, 2022 [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Limonlu_Çayı. [Accessed: May. 22, 2022].

- [20] T.C. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Taşkın Ve Kuraklık Yönetimi Dairesi Başkanlığı, "Doğu Akdeniz Havzası Kuraklık Yönetim Planı Nihai Rapor Özeti," Ankara, 2018.
- [21] İ. Özalp, "Limonlu (Lamas) Çayı Havzası'nın Fiziki Coğrafyası," Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, 2009.
- [22] U. Okkan and H. Y. Dalkılıç, "Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağları ile Kemer Barajı Aylık Akımlarının Modellenmesi," *İMO Tek. Dergi*, vol. 23, no. 112, pp. 5957–5966, 2012.
- [23] M. A. Çavuşlu, Y. Becerikli, and C. Karakuzu, "Levenberg- Marquardt Algoritması ile YSA Eğitiminin Donanımsal Gerçeklenmesi," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgi. Bilim. ve Mühendisliği Derg.*, vol. 5, no. 5, pp. 1–7, 2012.
- [24] E. A. Çubukçu, "Yıllık Anlık Maksimum Akımların, Coğrafi Veri Bileşenleri Ve Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Kto Karatay Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2019.
- [25] T. Partal, E. Kahya, and K. Cığızoğlu, "Yağış Verilerinin Yapay Sinir Ağları ve Dalgacık Dönüşümü Yöntemleri ile Tahmini," *İtü Mühendislik Derg.*, vol. 7, no. 3, pp. 73–85, 2008.
- [26] T. Poggio and F. Girosi, "Regularization Algorithms for Learning That Are Equivalent to Multilayer Networks," *Science*, vol. 247, no. 4945, pp. 978–982, 1990. doi:10.1126/science.247.4945.978
- [27] A. Sürel, "Genelleştirilmiş Regresyon Yapay Sinir Ağının Su Kaynakları Mühendisliğinde Kullanımı," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [28] M. Alp and K. Cığızoğlu, "Farklı Yapay Sinir Ağı Metodları ile Yağış-Akış İlişkinin Modellenmesi," *İtü Mühendislik Derg.*, vol. 3, no. 1, pp. 80–88, 2004.
- [29] B. E. Boser, I. M. Guyon, and V. N. Vapnik, "A training algorithm for optimal margin classifiers," *Proc. fifth Annu. Work. Comput. Learn. theory*, pp. 144–152, 1992. doi:10.1145/130385.130401
- [30] H. Citakoglu, "Comparison of multiple learning artificial intelligence models for estimation of long-term monthly temperatures in Turkey," *Arab. J. Geosci.*, vol. 14, no. 20, 202. doi:10.1007/s12517-021-08484-3
- [31] N. M. Eldakhly and M. Aboul-Ela, "A Novel Approach of Weighted Support Vector Machine with Applied Chance Theory for Forecasting Air Pollution Phenomenon in Egypt," *Int. J. Comput. Intell. Appl.*, vol. 17, no. 1, pp. 1–29, 2018. doi:10.1142/S1469026818500013
- [32] D. Zhang, J. Lin, Q. Peng, D. Wang, T. Yang, S. Sorooshian, ... and J. Zhuang, "Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm," *J. Hydrol.*, vol. 565, pp. 720–736, 2018. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.08.050
- [33] M. Liu, Y. Huang, Z. Li, B. Tong, Z. Liu, M. Sun, ... and H. Zhang, "The applicability of lstm-knn model for real-time flood forecasting in different climate zones in China," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 2, pp. 1–21, 2020. doi:10.3390/w12020440
- [34] G. Ser and C. T. Bati, "Determining the best model with deep neural networks: Keras application on mushroom data," *Yuz. Yil Univ. J. Agric. Sci.*, vol. 29, no. 3, pp. 406–417, 2019. doi:10.29133/yyutbd.505086
- [35] J. L. Hintze and R. D. Nelson, "Violin plots: A box plot-density trace synergism," *Am. Stat.*, vol. 52, no. 2, pp. 181–184, 1998. doi:10.1080/00031305.1998.10480559
- [36] K. E. Taylor, "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram," *J. Geophys. Res.*, vol. 106, pp. 7183–7192, 2001.
- [37] Legouhy A., "al_goodplot - boxplot & violin plot," www.mathworks.com, Dec. 17, 2021 [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/91790-al_goodplot-boxplot-violin-plot. [Accessed: May. 22, 2022].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Design and Analysis of Hydrogen Production Combined System from Hydrogen Sulfide with Renewable Energy Source

Kemal Gök^{a,*}, Adnan Sözen^b

Submitted: 22.04.2022 Revised: 21.06.2022 Accepted: 27.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705010

ABSTRACT

Keywords:
Hydrogen, hydrogen sulfide, wind energy, solar energy, Black Sea, economic analysis

^{a,*} Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems of Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8030-6509
e mail: kemalgokk@gmail.com

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems of Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8373-2674

*Corresponding author:
kemalgokk@gmail.com

The importance of clean energy resources has increased with the gradually decrease of energy resources and increasing environmental conscious. Hydrogen energy, comes at the forefront of environmentally friendly energy sources, can also be produced from hydrogen sulfide which is abundant in the bottoms of the Black Sea. The Black Sea has a great energy potential with a hydrogen capacity of 270 million tons. In this research, a study has been carried out that the energy required for the production of hydrogen from hydrogen sulfide at the bottom of the Black Sea by direct electrolysis method can be obtained from renewable energy sources on the Black Sea coast. A plant design which can produce 50 tons of hydrogen per year with approximately 640 MWh obtained from solar and wind energy on the Black Sea coasts has been considered. It was concluded that a hybrid system that can benefit from both solar and wind energy could be established in Istanbul and Zonguldak Filyos as a result of the solar and wind energy potential analyzes and economic analyzes were carried out in order to investment evaluation in these locations. Net present value method and internal rate of return method have been preferred and two different scenarios where the investment is realized by receiving 100% loan or by receiving 25% equity capital and 75% loan are discussed. Investment feasibility assessment and profitability ratios for both Istanbul and Filyos seem to be quite good, and it has been observed that the payback period of solar power plants is shorter compared to wind power plants.

Yenilenebilir Enerji Kaynağı ile Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretim Kombine Sistem Tasarımı ve Analizi

ÖZET

Enerji kaynaklarının giderek azalması ve artan çevre bilinci ile temiz enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Çevre dostu enerji kaynaklarının en başında hidrojen enerjisi gelmekte olup hidrojen Karadeniz'in diplerinde bol miktarda bulunan hidrojen sülfürden de üretilmektedir. Karadeniz, 270 milyon ton hidrojen kapasitesi ile büyük bir enerji potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, doğrudan elektroliz yöntemi ile Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde gerekli olan enerjinin Karadeniz kıyılarındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanabileceği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Karadeniz kıyılarındaki güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak yaklaşık 640 MWh'lik bir enerji ile yıllık 50 tonluk hidrojen üretebilecek bir tesis tasarlanmıştır. Yapılan güneş ve rüzgar enerjisi potansiyel analizleri neticesinde hem güneş enerjisinden hem de rüzgar enerjisinden yararlanılabilecek hibrit bir sistemin İstanbul ve Zonguldak Filyos'da kurulabileceği sonucuna varılmış ve bu lokasyonlarda yatırım yapılabilirliği görebilmek adına ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemi tercih edilmiş olup yatırımın %100 kredi çekilerek ya da %25 öz sermaye, %75 kredi çekilerek gerçekleştirildiği iki farklı senaryo ele alınmıştır. Hem İstanbul hem de Filyos için yatırım yapılabilirlik ve karlılık oranları gayet iyi gözükmemekte olup rüzgar enerjisi santrallerine göre güneş enerjisi santrallerinin geri dönüş sürelerinin daha kısa olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler:
hidrojen, hidrojen sülfür, rüzgar ve güneş enerjisi, Karadeniz, ekonomik analiz

1. Giriş (Introduction)

Nüfus artışı, küreselleşme, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesi gibi nedenlerle sınırlı miktarlarda bulunan enerji kaynakları tükenmekte ve enerji maliyetleri sürekli bir artış göstermektedir. Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, enerji maliyetlerinin artması ve çevre bilinci gibi nedenlerle birçok ülke yenilenebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu enerji kaynaklarından da teknolojisi hızla gelişen, çevre dostu ve doğada bol miktarda bulunan hidrojen enerjisi ön plana çıkmıştır. Hidrojen hem fosil yakıtlardan; hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebildiği gibi hidrojen sülfür, hidrokarbon gibi maddelerden de elde edilir. Hidrojen üretiminde kullanılabilecek en önemli kaynaklardan biri de Karadeniz'in diplerinde bulunan hidrojen sülfürdür. Karadeniz'de bulunan hidrojen sülfürden hidrojen üretilebileceği ve bu proste yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabileceği ön görülmüştür.

Sherif ve ark. hidrojen üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanılması ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Rüzgâr enerjisinden ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin mümkün olup olmayacağını araştırmış ve bu mümkün olursa hidrojenin çevre dostu bir yakıt olacağını öngörmüştür [1]. Levene ve ark. yapmış oldukları çalışmada hidrojen üretiminde kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarını, elektroliz yöntemi ile hidrojen üretiminin maliyetini incelemiştir. Sonuç olarak da rüzgâr ve güneş enerjisinden bol miktarda hidrojen üretilebileceğini belirtmiştir [2].

Baykara ve ark. yaptıkları çalışmada Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürü potansiyel bir hidrojen kaynağı olarak görmüşlerdir. H_2S 'den hidrojen üretimi için öne çıkan teknikleri inceleyip Karadeniz'deki H_2S 'den hidrojen üretimi ile ilgili bir mühendislik değerlendirmesi yapmışlar ve H_2S 'nin önemli bir kaynağı olduğu vurgulamışlardır. [3]. Midilli ve ark. Karadeniz'in dip sularında, H_2S konsantrasyonu ve su tabakası derinliğine bağlı olarak hidrojen enerji potansiyelini tahmin etmek için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre Karadeniz dip sularındaki tahmini H_2S miktarı yaklaşık olarak 4,587 milyar tondur. H_2S 'nin hidrojene %100 dönüştüğü varsayılarak Karadeniz dip sularındaki 4,587 milyar ton H_2S 'den yaklaşık 270 milyon ton hidrojen enerjisi üretilebileceği tahmin edilmiştir [4].

Petrov ve ark. Karadeniz dip sularında bulunan H_2S 'den H_2 ve S üretimi proseslerini araştırmışlardır. Deniz suyunun ekstraksiyonu, H_2S adsorpsiyonu, hidrojen ve polisülfürlerin elektrokimyasal üretimi; deniz suyunun tuzdan arındırılmasıyla tatlı su üretimi ve ortaya çıkan tuzlu çözeltiden klorealkalin elektrolizi yoluyla daha fazla hidrojen üretimi gibi prosesin aşamalarının ekonomik ve çevresel yönleri ile ilgili incelemelerde ve değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Karadeniz dip sularında bulunan H_2S 'den H_2 ve S üretiminde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanabilen ve ekolojik dengeli bozmayan teknolojilerin geliştirilebileceğini ileriye sürmüşlerdir [5]. Şanlı ve Mat yaptıkları çalışmada bir yakıt hücresinde yakıt olarak H_2S içeren Karadeniz suyunun doğrudan kullanılmasını önermişlerdir. Karadeniz suyunun elektrolizi ile hidrojen üretiminde proses ve tesis tasarımı, deniz suyunun derinliklerden pompalanması, işlenmiş deniz suyunun deşarj hattı ile tekrar denize salınması ve üretilen hidrojenin taşınması vb. konuların maliyetli olacağını bunun yerine yakıt pili sistemini kullanarak hem elektrik üretilebileceğini hem de maliyetlerin daha az olacağını savunmuşlardır [6].

Türktaşlar çalışmasında, laboratuvar ortamında sentetik olarak Karadeniz suyunun kompozisyonunu oluşturmuştur. Dolaylı elektroliz yöntemini kullandığı deneysel çalışmasında kükürt eldesi ve hidrojen üretimi için optimum sıcaklıklar, süre, çözelti miktarları vb. parametreleri belirlemeye çalışmıştır. Yaptığı hesaplamalarda elde edilen hidrojen enerjisinin yaklaşık %35'i elektroliz için harcanırken, geri kalan enerji yararlanılabilir enerji olarak kullanılabilecektir. Ayrıca, CHEMCAD simülasyon programı ile Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden 1 MW teorik enerji elde edilebilecek bir hidrojen üretim tesisi tasarımı yapmıştır [7]. Stavros Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen eldesinin fizibilite çalışmasını ve ekonomik analizini yapmıştır. Karadeniz'deki deniz suyunun çıkarılması, deniz suyundan H_2S 'in elde edilmesi, H_2S 'den hidrojen ile kükürt üretimi ve bu ürünlerin depolanması aşamalarını Aspen Plus simülasyon programı ile tasarlamıştır. Karadeniz için H_2S 'den hidrojen üretiminin hem çevresel hem ekonomik olarak öneminden bahsetmiştir. Yaptığı ekonomik analizler sonucu tasarlamış olduğu tesisin geri ödeme süresini 5,5 yıl olarak hesaplamıştır [8]

Karapekmez ve Dinçer jeotermal enerji santrallerin çalışması esnasında ortaya çıkan H₂S gazından H₂ üretilebileceğine dair bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada AMIS teknolojisi ile donatılan bir jeotermal enerji santralinde, bir PEM elektrolizörü kullanarak H₂S gazından H₂ üretimi için yeni bir model oluşturmuşlardır [9]. Karapekmez ve Dinçer başka bir çalışmasında jeotermal, güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin olduğu kombine bir enerji santralinde çevre için zararlı olan H₂S gazından H₂ üretimi ile ilgili bir sistem tasarlamışlardır. Yenilebilir enerji kaynaklarının potansiyellerini inceleyip termodinamik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan sistemde saniyede 0,7388 kg hidrojen sülfürden 0,0433 kg hidrojen üretilcekleri sonucuna varmışlardır [10].

Öztürk ve ark. Karadeniz’de bulunan hidrojen sülfür ve doğalgazın birlikte olduğu bir sistem üzerine çalışma yapmışlardır ve bunu Aspen Plus programında modellemişlerdir. Tasarladıkları sistemde, enerji ihtiyacı açık denizde kurulan güneş ve rüzgâr enerji santrallerinden sağlanan bir PEM elektrolizör Karadeniz’de bulunan olan H₂S gazından H₂ ve S üretiminde kullanılmaktadır. Sistemde daha sonra üretilen hidrojen ve Karadeniz’de bulunan doğalgaz ile karıştırılmaktadır. Sistemin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir ve yanmanın verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir [11].

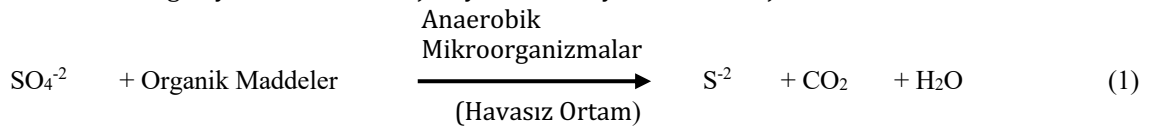
Şeker ve Aydın Karadeniz’in dip sularındaki hidrojen enerjisi potansiyeline istinaden Karadeniz Bölgesi’nde hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisi kurmak için en uygun yerin neresi olabileceği üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yer seçiminde dört ana ve on iki alt kriter ile Samsun, Sinop, Giresun ve Zonguldak olmak üzere dört alternatif yer belirlemişlerdir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemini bu kriterlere ve alternatif lokasyonlara uygulayarak tesis için en uygun yerin Sinop olabileceğine karar vermişlerdir [12].

Literatür taraması sonucunda, hidrojen enerjisinin gelecekte önemli bir yere sahip olacağı ve ülkelerin hidrojen enerjisi teknolojileri üzerinde çalışmalar yaptığı görülmüştür. Hidrojen üretimi için farklı yöntemler mevcut olup hidrojen üretiminde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanılabilirliği vurgulanmıştır. Hidrojen üretimi için Karadeniz’de bol miktarda bulunan H₂S’den yararlanılması ve Karadeniz’in kıyılarına ya da denizin altına bir hidrojen üretim tesisi kurulabileceğinden bahsedilmiştir.

Karadeniz’in dip sularında bulunan hidrojen sülfürden hidrojen üretiminin enerji olarak ne kadar önemli olduğu ve hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliği bu çalışmada ön görülmüştür. Bu bağlamda, Aspen Plus simülasyon programında tasarlanmış olan bir hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisinin kurulacağı lokasyonda rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyelleri incelenmiş ve tesis için gerekli enerjinin bu kaynaklardan sağlanması amaçlanmıştır. Hem güneş enerjisi hem de rüzgâr enerjisinden yararlanmak için hibrit bir enerji santralinin kurulmasının daha uygun olacağı ön görülerek kurulacak santrallerin üretebileceği enerji miktarları hesaplanmış ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Karadeniz’in Diplerindeki Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretimi (Hydrogen Production from Hydrogen Sulfide at the Bottom of the Black Sea)

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak farklı hammaddelerden üretilen, güvenli ve kolayca taşınabilen, ulaşımdan ısınmaya, ısınmadan sanayiye birçok alanda yararlanabileceğimiz çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Hidrojen; kömür, doğalgaz gibi hidrokarbonlar ile su, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra hidrojen sülfürden de üretilir.



Normal şartlar altında yanıcı ve renksiz bir gaz olan hidrojen sülfür aynı zamanda uçucu ve çok zehirli bir gazdır. Hidrojen sülfür, genellikle oksijensiz ortamda organik maddelerin bakteriler tarafından parçalanmasıyla oluşmaktadır. Oksijensiz ortamlarda bol olarak bulunan sülfat (SO₄²⁻), sülfat indirgeyici bakterilerin yardımı ile sülfüre dönüşür. Sülfür iyonu da hidrojen iyonu ile reaksiyona girerek hidrojen sülfür gazını meydana getirir. Volkanik gazlar, doğal gaz ve petrol rezervleri, okyanus

tabanlarındaki termal bacalar ve jeotermal bölgeler, bataklıklar ve Karadeniz'in dip suları hidrojen sülfürün doğal olarak üretildiği yerlerdir. Hidrojen sülfür, insanlar ve hayvanlar için son derece zehirli bir gazdır. Çürük yumurta kokusuna sahip bu gaza uzun süre maruz kalındığında, kısmi felç, baygınlık ve ölüme kadar sonuçlanabilen durumlar ortaya çıkabilmektedir [13].

Toksik ve korozyif özellik gösteren hidrojen sülfür gazının çevre açısından tehlikeli olduğu aşikârdır ve bunun yok edilmesi gerekmektedir. H₂S yüksek ısıl değere sahip olmasına rağmen doğrudan yakıt olarak kullanıldığında çevre için tehlikeli olan sülfür dioksit gazını oluşturmaktadır [14]. H₂S gazının hava ile kısmi oksidasyon neticesinde saf kükürt ve suyun ortaya çıktığı Claus Prosesi endüstride kullanılan en yaygın ve gelişmiş yöntemdir [15].

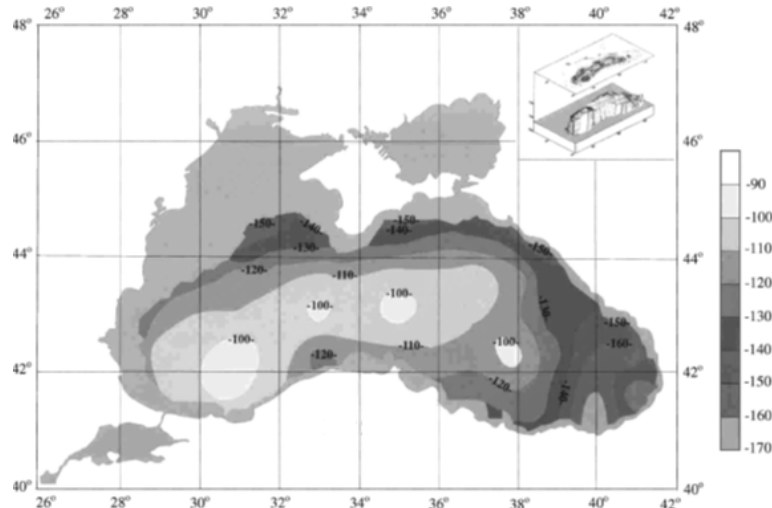
Gaz tesislerinden, rafinerilerden ve metalürjik proseslerden sürekli yan ürün olarak H₂S ortaya çıkmaktadır. H₂S gazından hidrojen üretilebilmesi ve H₂S'in bertaraf edilmesi gerekliliğinden dolayı hidrojen sülfüre ilgi artmış olup H₂S, H₂ ve S kaynağı olarak düşünölmeye başlanmıştır [16]. Hidrojen sülfür gazından hidrojen üretimi, gelişmekte olan çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Termal, termokimyasal, fotokimyasal, plazma, elektrokimyasal, doğrudan ve dolaylı elektroliz yöntemleri gibi birçok yöntem ile hidrojen sülfürden hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir [7].

Hem suyun elektrolizi hem de hidrojen sülfürün elektrolizi endotermik yani dışarıdan enerji gereken reaksiyonlardır. Normal şartlar altında suyun elektrolizi için gereken enerji 237,1 kJ/mol iken, H₂S'nin elektrolizi için gereken enerji 73,28 kJ/mol'dür. Suyun elektrolizinde kullanılan enerji miktarı, hidrojen sülfürün elektrolizinde kullanılan enerji miktarından yaklaşık 3,235 kat daha fazladır [17].

H₂S'den elde edilen hidrojen enerjisi, H₂O'dan elde edilen hidrojen enerjisine göre daha kârlı olmakla birlikte H₂S'den H₂ üretiminde yan ürün olarak endüstride kullanımı yaygın olan S açığa çıkmaktadır. H₂S'den hidrojen üretimi yöntemlerinde yüksek sıcaklıklarda çalışmaktan kaçınmak için elektroliz yöntemi tercih edilmiş olup ekseriyetle bu yöntemle yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

2.1. Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfür (Hydrogen sulfide at the bottom of the Black Sea)

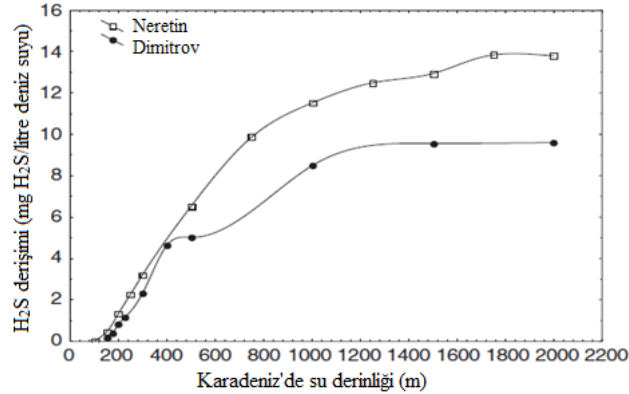
%90'ı anaerobik olan Karadeniz'de de bol miktarda H₂S bulunmaktadır. Karadeniz'in dip sularında aşırı kirlenme ve tuz yoğunluğundan dolayı oksijen miktarı azalmakta ve deniz canlıları ölmektedir. Bunun sonucunda meydana gelen birikimler ile de Karadeniz'in dip sularındaki H₂S yoğunluğunun arttığı söylenebilir [18].



Şekil 1. Karadeniz'deki hidrojen sülfür dağılımı (Hydrogen sulfide distribution in the Black Sea) [19]

Şekil 1'de Karadeniz'deki hidrojen sülfür dağılımı verilmiştir. Karadeniz'in orta bölgelerinde yaklaşık 100 m'de H₂S'ye ulaşılabilirken kıyı bölgelerinde 125-150 m'de H₂S tabakasına ulaşılabilir [4]. Şekil 2'de Karadeniz'in derinliklerindeki hidrojen sülfürün derinlik ile değişimi verilmiştir. Neretin ve Dimitrov yapmış oldukları çalışmada Karadeniz'in 100-2000 m derinliklerindeki hidrojen sülfür konsantrasyonunu belirlemişlerdir. Neretin'e göre 2000 m maksimum H₂S derişimi 13,8 mg H₂S /L iken, Dimitrov'a göre 9,6 mg H₂S /L 'dir [20]. İki çalışmadan Karadeniz'in derinliklerinde enerji kaynağı

olarak yeterli miktarda H_2S olduğu sonucu çıkarılabilir. Bunun sonucunda H_2S 'in bir hidrojen kaynağı olduğu kanısına varılmıştır.

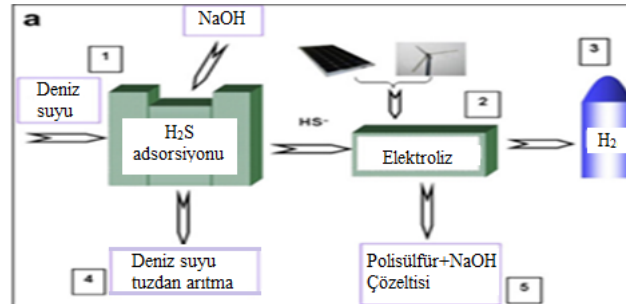


Şekil 2. Karadeniz derinliklerindeki hidrojen sülfürün derinliğe göre değişimi (Variation of hydrogen sulfide in the Black Sea with depth) [20]

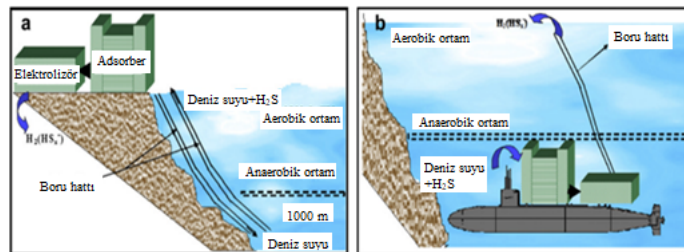
Karadeniz dip sularındaki 4,587 milyar ton H_2S 'den elde edilebilecek hidrojen yaklaşık 270 milyon tondur. Bu değerler H_2S 'nin %100 verimli bir şekilde parçalanması ile hidrojen enerjisine dönüştüğü varsayılarak hesaplanmıştır. 270 milyon ton hidrojen enerjisinden yaklaşık 38,3 TJ ısı enerjisi; yaklaşık 8,97 milyon GWh elektrik enerjisi üretilebilir. Bu ısı enerjisi de 808 milyon ton benzin, 766 milyon ton doğalgaz, 841 milyon ton fueloil ve 851 milyon ton petrole yaklaşık olarak eşdeğerdir [18].

2.2. Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisi (Hydrogen production facility from hydrogen sulfide in the black sea)

Karadeniz'in diplerindeki H_2S 'den hidrojen üretim yöntemleri ile ilgili literatürde pek fazla çalışma mevcut değildir. Literatürde Karadeniz'in diplerindeki H_2S 'den hidrojen üretimi için H_2S 'nin deniz suyundan ayrıştırılması ve H_2S 'nin maksimum verimle hidrojen ve kükürde dönüşmesi en önemli iki adım olarak belirlenmiştir. Diğer önemli husus da kurulacak olan tesisin denizin kıyısında mı yoksa denizin altında mı olacaktır.



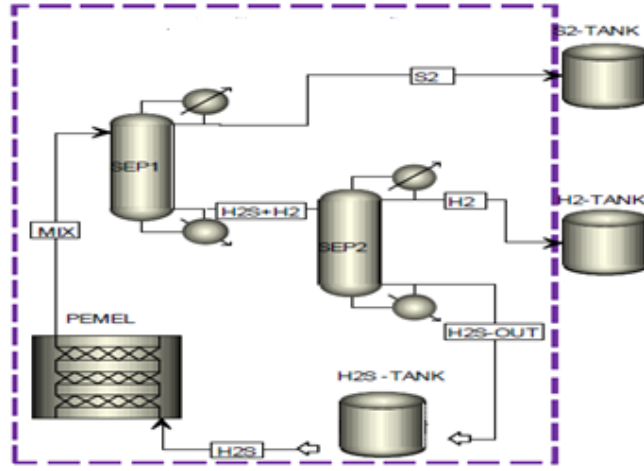
Şekil 3. Tasarlanan sistemin proses akış şeması (Process flowsheet of the designed system) [5]



Şekil 4. Tasarlanan sistemin muhtemel kurulumları (Possibilities for installation of the designed system) [5]

Daha önceki çalışmalarda tasarlanan sistemler incelendiğinde, mevcut teknolojilere uygun olarak hidrojen ve kükürdün üretimi ile tatlı suyun üretimi olarak iki ana proses belirlenmiştir. Birincisi deniz suyundan HS^- ayrıştırılması ardından hidrojen ve sülfürün elektrokimyasal üretimidir. İkincisi de deniz suyunun arıtılmasıdır (Şekil 3). Adsorpsiyon ve elektroliz modülleri tasarlanan sistemin ana bileşeni oluşturmaktadır. Elektroliz için gereken elektrik güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji

kaynaklarından elde edilebilir. Karadeniz'de, ana ünite kıyıya (Şekil 4a) veya deniz tabanına (Şekil 4.6b) kurulabilir [5].



Şekil 5. Aspen Plus programında tasarlanan sistemin proses akış şeması (The process flowsheet of the system designed in the Aspen Plus program) [11]

Midilli ve ark. bir PEM elektrolizörde H₂S'yi, H₂ ve S'ye ayırmışlardır. Şekil 5'te H₂S'nin elektroliz proses şeması verilmiştir. Aspen Plus programında modellenen elektroliz prosesinde, hidrojen sülfür 800 kPa basınçta 100 kg/h olarak PEM elektrolizörüne girmektedir. Öncelikle Sülfür, birinci separatörde (SEP1) ayırmakta ve S₂ tankında depolanmaktadır. Daha sonra hidrojen sülfür ile hidrojen karışımı ikinci separatöre (SEP2) girmekte ve oradan üretilen hidrojen, H₂ tankında; hidrojen sülfür de H₂S tankında depolanmaktadır [11].

Yapılan bu çalışmada, hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde yani H₂S'nin elektrolizinde kullanılacak olan enerji kaynaklarının potansiyeli üzerine bir çalışma yapılacağı göz önüne alınırsa, daha çok H₂S'nin elektrolizi ile ilgilenilmiştir. Daha önce yapılan çalışmaların incelenmesi neticesinde, Karadeniz'in diplerinde bulunan H₂S'den hidrojen üretimi için düşünülen tesisin özelliklerine karar verilmiştir. Bu tesis tasarlanırken elektroliz aşamasında bazı kabuller yapılmıştır:

- * Tüm gazlar ideal kabul edilmiş olup ortam sıcaklığı 25 °C, basınç 101,325 kPa'dır.
- *Sistem ve çevre arasındaki ısı alışverişi ihmal edilebilir seviyededir.
- *Ekserjiler ile kinetik ve potansiyel enerjilerin değişimleri ihmal edilebilir seviyededir.
- *Proses kararlı ve sürekli akış olarak kabul edilmiştir.
- *Tüm bileşenlerin sabit sıcaklık ve basınçta çalıştıkları varsayılmıştır.
- *Elektrik kayıpsız olarak iletilebilmektedir.
- * H₂S, H₂ ve S'nin elektroliz sırasında basınç ve sıcaklıkları (150 °C, 0,8 MPa) sabittir
- *Hidrojen sülfürün kütle debisi 100 kg/h olarak kabul edilmiştir [11].

Bu kabuller neticesinde kullanılan simülasyon programında, 100 kg/h hidrojen sülfürün elektroliz sonucunda 5,87 kg/h hidrojen üretebilmek için gerekli enerji miktarı da 0,075 MW olmaktadır [11]. Kurulacak olan tesis, günlük 140,8 kg; yıllık 50 tonluk hidrojen üretebilecek kapasitede düşünülmüştür. Bakım, arıza gibi durumlar düşünülerekten bir yıl 355 gün olarak alınmıştır. Elektroliz prosesi bu şekilde tasarlandığında yaklaşık olarak 638,85 MWh'lik bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu sistemde yıllık 852 ton hidrojen sülfür 50 ton hidrojene dönüşecektir.

3. Yenilebilir Enerji Kaynakları Kullanılarak Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretimi (Hydrogen Production from Hydrogen Sulfide Using Renewable Energy Sources)

Tasarlanan tesiste yıllık enerji ihtiyacı 638,85 MWh hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı bu enerjiyi Karadeniz'de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktır. Karadeniz'deki güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri analiz edilerek H₂S'den H₂ üretim tesisinin nereye kurulması gerektiğine yön verilmiştir.

Karadeniz'in orta bölgelerinde yaklaşık 100 m'de H₂S'ye ulaşılabilirken kıyı bölgelerinde 125-150 m'de H₂S tabakasına ulaşılabilir. Ancak doğu ve orta Karadeniz kıyılarına göre Marmara ve batı

Karadeniz kıyılarında daha sığ yüzeylerde H_2S 'ye ulaşmak daha mümkün gözükmektedir [19]. Üretim tesisinin yeri belirlenirken farklı parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir. İstenilen her yere istediğimiz şekilde bir tesis kurulması mümkün değildir. Bunun için aşağıda belirtilen hususlar göz önüne alınmıştır:

*Kıyıda kurulan enerji santrallerinin, açık denizde kurulan enerji santrallerine göre kurulum ve işletme maliyetlerinin daha düşük olması ve kullanımının daha yaygın olması sebebiyle tasarlanacak tesisin karada olması tercih edilmiştir.

*Karadeniz'den H_2S çıkarılıp bundan hidrojen üretileceği göz önüne alındığında tesisin Karadeniz'in kıyı kesimlerine yakın olması gerektiği düşünülmüştür.

*Tesisin kurulacağı yer belirlenirken yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilecek enerji potansiyeli göze alınmıştır. Sadece Karadeniz'in kıyılarındaki güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri ve yıllık ne kadar enerji sağlayabileceğimiz incelenmiştir.

*Güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri belirlenirken T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu GEPA ve REPA atlaslarından yararlanılmıştır. Analizi yapılacak bölgeler bu atlaslardaki en yüksek potansiyele sahip alanlardan seçilmiştir.

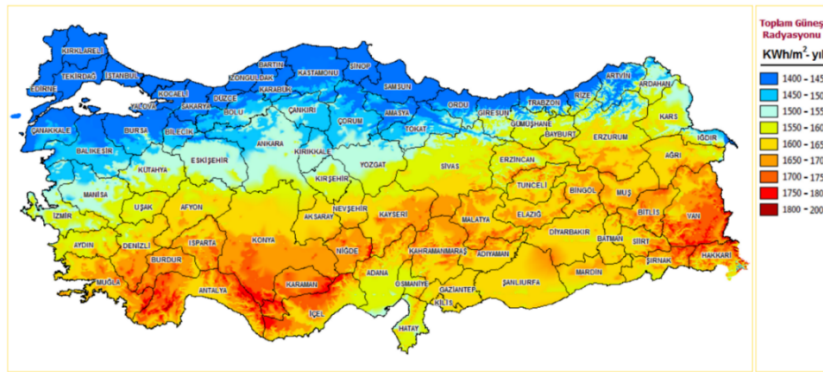
*İlgilenilen bölgenin arazi yapısı ve bitki örtüsü, arazi mülkiyeti, ulaşım imkanları, arazi içerisindeki fay hatları gibi parametreler dikkate alınmıştır.

*Trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarına yakınlıkları dikkate alınmıştır.

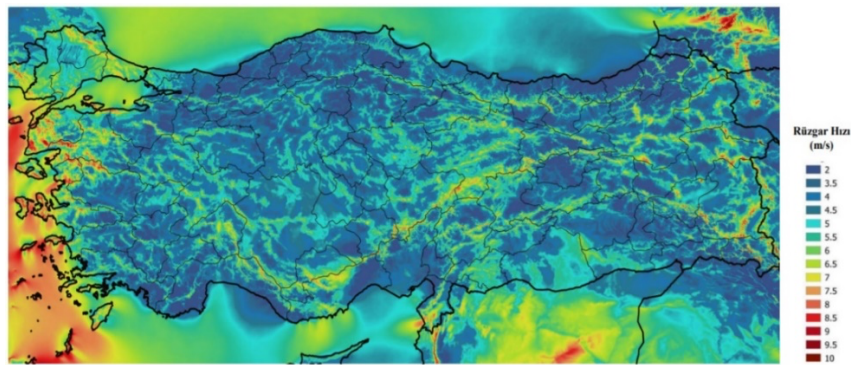
*Arazinin yüksekliği, bakı ve eğimi, sulak alanlar, arazideki orman varlığı gibi durumlar incelenmiştir.

*Arkeolojik ve çevresel kısıtlamaların olduğu alanlar da göz önüne alınmıştır.

Ayrıca yer seçimi yapılırken yatırım ve işletme maliyetleri gibi ekonomik etkenler; depolama, dağıtım ve ulaşım gibi teknik etkenler; insan sağlığı ve çevre bilinci gibi çevresel etkenler ile istihdam ve teşvikler gibi sosyal etkenlerin önemi de göz ardı edilmemiştir.



Harita 1. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA) (Turkey solar energy map) [21]



Harita 2. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli atlası (REPA) (Turkey wind energy map) [22]

Karadeniz kıyılarında güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenirken GEPA (Harita 1) ve REPA (Harita 2) dikkate alınmış ve her ilden bir nokta belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Belirlenen kapasite de hidrojen üretimi için gerekli olan 638,85 MWh'lik enerji elde etmek için kapasite faktörleri göz önünde bulundurularak güneş enerjisi kurulu gücü 1 MW, rüzgâr enerjisi kurulu gücü 0,8 MW olan santrallerin kurulması düşünülmüştür.

Dikkate alınan hususlar neticesinde Karadeniz kıyılarındaki güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelleri

hesaplanmıştır. Doğu Karadeniz bölümünün gerek hem rüzgâr hem de güneş enerji potansiyelinin düşük olması gerek santral kurulamayacak alanların yoğunluğundan dolayı buradaki iller değerlendirilmeye alınmamıştır. Ayrıca Türkiye’de yaşanan son gelişmelerden dolayı Karadeniz’e kıyısı olan Zonguldak Filyos’un da enerji potansiyelinin incelenmesi gereği duyulmuştur. Gerek Karadeniz’de doğalgaz bulunması gerekse Filyos’ta ilk mega endüstri bölgesinin ve Türkiye’de ilk üçe girecek bir limanın varlığı lokasyon olarak buranın da göz önüne alınması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda doğalgazın içerisine hidrojen ilavesi ile doğalgazın yanma verimliliğinin arttığı, CO2 emisyonunun azaldığı gözlemlenmiştir [11]. Bu sebeple ki Karadeniz’den çıkarılan doğalgaz ve Karadeniz’in diplerindeki H₂S’den elde edilen hidrojenin bir tesiste üretilip karıştırılabileceği göz önüne alınmıştır. Bunun için de en uygun yer olarak bir mega endüstri bölgesi olacak olan Filyos düşünülmüştür.

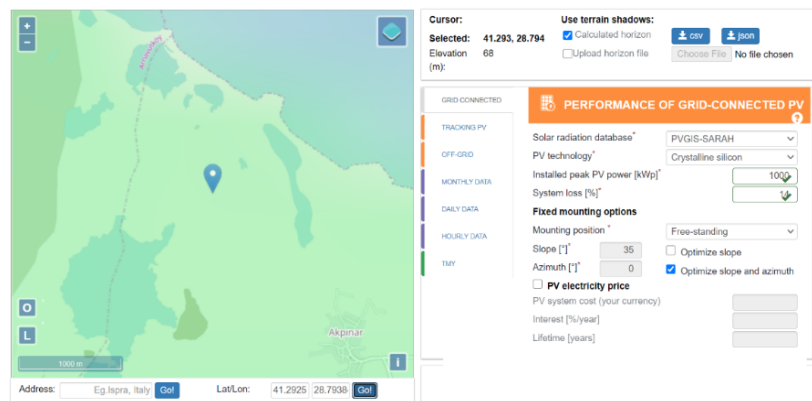
3.1. Karadeniz kıyılarındaki güneş enerjisi potansiyeli (Solar energy potential on the Black Sea coasts)

Karadeniz kıyılarında güneş enerjisi potansiyeli belirlenirken GEPA dikkate alınmış ve her ilden bir nokta belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizini yapılan nokta seçilirken güneş enerjisi potansiyeli yakın olan yerlerde, daha doğru karşılaştırma yapabilmek adına rüzgâr enerji potansiyeli atlasına göre en yüksek rüzgar potansiyeli olan yerlerin seçilmesine dikkat edilmiştir. Aynı zamanda GES ve RES kurulamaz alanlar da göz önünde bulundurulmuştur. GEPA’dan ve PVGIS simülasyon programından her 11 ilin ve Filyos’un en yüksek güneş radyasyon değerleri seçilerek üretilebilecek enerji miktarı bulunmuştur. Yıllık enerji üretimi ile ilgili analiz çalışmaları yapılırken hassasiyetin mümkün olduğunca artırılabilmesi için yıllara göre yatay düzleme gelen toplam güneş radyasyonunun aylık ortalamalarına dayandırılmasıyla hazırlanan ücretsiz PVGIS yazılım programı kullanılmıştır.

PVGIS, güneş radyasyon haritalarına göre PV sistem ve tesislerinin güneş enerjisi üretim değerlerini hesaplayan ücretsiz bir simülasyon yazılım programıdır. Google veri tabanını kullanan PVGIS, kullanıcı tarafından harita üzerinde belirlenen enlem ve boylamlarda, PV modülün çeşidi ve toplam kapasiteleri, sistem performans oranı, modül montaj özellikleri ve açıları, izleme özellikleri gibi parametrelere göre bir PV sisteminin aylık ve yıllık güneş ışınım değerlerini (kWh/m²), potansiyel elektrik üretimini (kWh) hesaplar [23]. PVGIS programında yapılan enerji analizi kapsamında:

- *Güneş radyasyon veri tabanı olarak PVGIS-SARAH veri tabanı kullanılmıştır.
- *Tasarlanacak sistemin kurulu gücü 1000 MW olarak seçilmiştir.
- *GEPA haritalarına göre belirlenen koordinatları program üzerinden seçilmiştir.
- *PV güneş paneli olarak kristal silikon PV modülü seçilmiştir.
- *Sistemin yük kayıpları standard olarak %14 kabul edilmiştir.
- *Panellerinin montaj eğimi 35° ve yatay azimut açısı 0° program tarafından optimum olarak seçilmiştir.

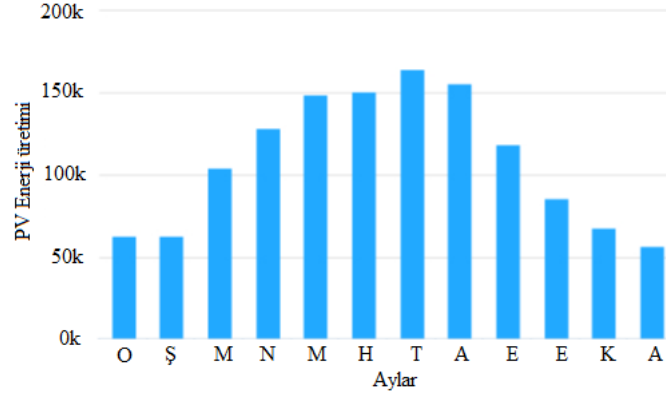
Karadeniz kıyılarında güneş enerjisinden yıllık enerji üretimi birbirine yakın olmakla Samsun, Zonguldak ve İstanbul illeri ile Filyos’un potansiyelin biraz daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6. İstanbul ilinde seçilen noktanın PVGIS ile analizi (Analysis of the selected point with PVGIS in Istanbul)

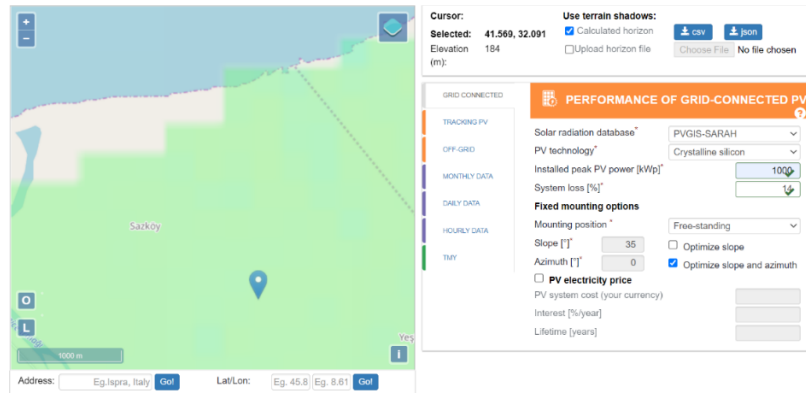
İstanbul Karadeniz’e kıyısı olan en gelişmiş şehirdir. İstanbul’da da kıyı kesimlerdeki güneş radyasyonu birbirine yakın olup seçilen nokta PVGIS programına girilmiş ve belirlediğimiz enerji analizi kapsamına

göre PV tasarımı yapılmıştır (Şekil 6). Tasarlanan sistemin aylık enerji üretim miktarları Şekil 7'de verilmiştir. İstanbul'da PV sisteminin yıllık enerji üretimi 1307,6 MWh olarak hesaplanmıştır.

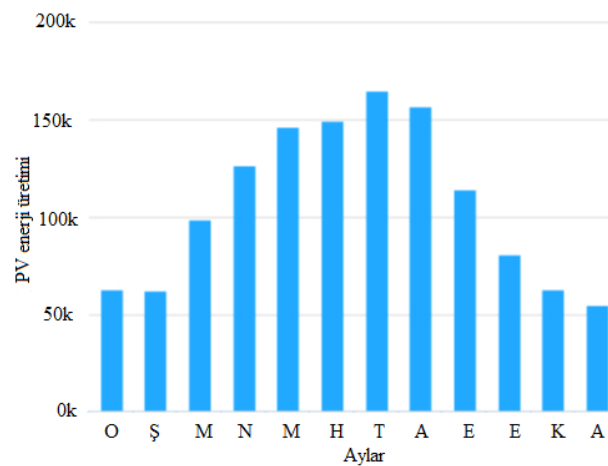


Şekil 7. İstanbul ilinde tasarlanan PV sisteminin aylık enerji üretimi (Monthly energy production of the PV system designed for Istanbul)

Filyos'un güneş radyasyonu hemen hemen her yerde aynı olup seçilen nokta PVGIS programı ile belirlediğimiz enerji analizi kapsamına göre PV tasarımı yapılmıştır (Şekil 8). Tasarlanan sistemin aylık enerji üretim miktarları Şekil 9'da verilmiştir. Filyos'ta tasarlanacak olan PV sisteminin yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretebileceği hesaplanmıştır.



Şekil 8. Filyos'ta seçilen noktanın PVGIS ile analizi (Analysis of the selected point with PVGIS in Filyos)



Şekil 9. Filyos'ta tasarlanan PV sisteminin aylık enerji üretimi (Monthly energy production of the PV system designed for Filyos)

2.2. Karadeniz kıyılarındaki rüzgâr enerjisi potansiyeli (Wind energy potential on the Black Sea coasts)

Karadeniz kıyılarında rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenirken; orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği rüzgar enerji potansiyel atlası dikkate alınmış ve bu haritalara göre belirlenen illerden bir nokta seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizini yapılan nokta seçilirken güneş enerjisi potansiyeli, GES ve RES

kurulamaz alanlar da göz önünde bulundurulmuştur. Doğu Karadeniz bölümünün hem rüzgâr hem de güneş enerji potansiyeli düşük olduğu için buradaki iller değerlendirilmeye alınmamıştır.

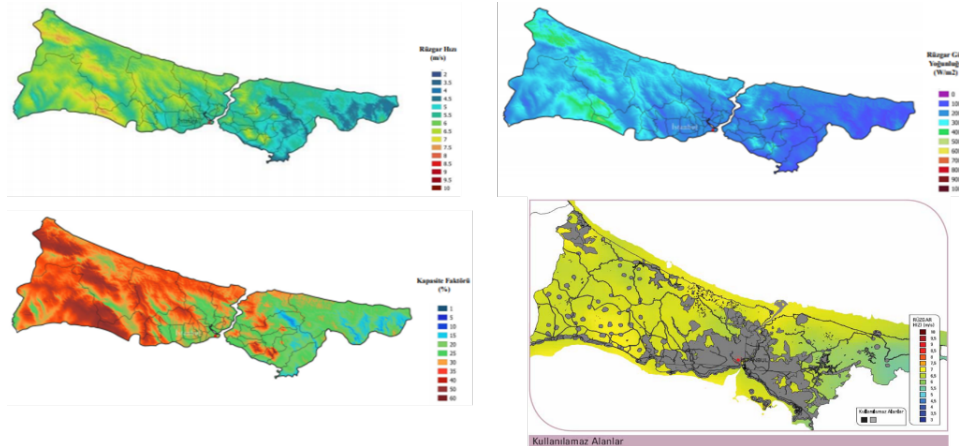
Bir rüzgâr enerjisi santralının yıllık enerji üretiminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi çok önemlidir. Ekonomik bir RES yatırımı için, rüzgâr hızı en az 6-7 m/s, güç yoğunluğu en 350-400 W/m², kapasite faktörü ise en az %30-35 olmalıdır [24]. Bu çalışmada, illerin rüzgâr enerji potansiyel atlaslarında yer alan rüzgâr hızı, güç yoğunluğu ve kapasite faktörüne göre alanlar belirlenmiştir. Belirlenen alanların noktasal olarak rüzgâr hızları ve güç yoğunluğu Global Atlas Wind üzerinden belirlenerek uygun bir türbin seçilmiş ve teorik hesaplamalar yapılmıştır.

GAW, yüksek rüzgâr enerji potansiyeline sahip alanları tespit etmek ve ön hesaplamalar yapmak için Danimarka Teknik Üniversitesi ve Dünya Bankası tarafından tasarlanmış web tabanlı, ücretsiz bir yazılımdır. Rüzgâr enerjisi potansiyeli olan bölgeler hakkında bir ön değerlendirme imkânı sunan bu program, büyük/orta ölçekli rüzgâr verilerinin küçük ölçekli verilere indirgeyerek bir modelleme yapmaktadır [25]. Seçilen alanlarda kurulmak üzere, ortalama rüzgâr hızına ve kapasite faktörüne uygun özelliklere sahip ENERCON marka E-48 tipi 3 kanatlı bir türbin seçilmiştir. Türbinin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [26].

Tablo 1. ENERCON marka E-48 tipi türbinin teknik özellikleri

Güç üretim oranı	800 kW	Kanat Sayısı	3
Kule yüksekliği	76m	Dönme hızı	16-31,5 devir/dakika
Rotor çapı	48m	Dönme Yönü	Saat yönü
Güç faktörü (Cp)	0,48	Süpürme Alanı	1809,6 m ²
IEC 61400-1 türbin sınıfı	Sınıf IIA	Uzaktan kontrol	Enercon Scada
Kanat malzemesi	GRP malzeme (Yıldırıma dayanıklı)	Rotor	Rüzgâra karşı aktif alan kontrolü
Ana Yatak	İkiz konik makaralı rulman	Jeneratör	Enercon direk tahrikli dairesel jeneratör
Türbinin Esneklik Özelliği	Tek bir türbin kanadı rüzgârın hızına göre yönü ve açılı ayarlanabilir.	Türbini durdurma	28-34 m/s (Enercon fırtına kontrol sistemi)
Fren sistemi	3 tane aktif saha kontrol sistemi acil güç desteğiyle birlikte, rotor freni ve rotor kilidiyle birlikte		

Karadeniz ve Marmara bölgelerinin REPA'larındaki rüzgâr hızı güç yoğunluğu ve kapasite faktörüne göre güneş enerjisi potansiyeli için seçilen aynı noktaların rüzgâr potansiyelleri incelenmiştir. Karadeniz kıyılarında belirlenen alanlardaki rüzgâr enerjisinden yıllık enerji üretimine bakıldığında Sinop, Kastamonu ve İstanbul illerinin potansiyellerinin biraz daha fazla olduğu görülmüştür.



Harita 3. İstanbul ilinin rüzgâr enerji potansiyel atlası (Istanbul Wind energy map) [22]

Seçilen koordinatların noktasal olarak rüzgâr hızları Global Atlas Wind üzerinden belirlenmiş ve seçilen türbine göre yıllık enerji üretimi teorik olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr gücünün teorik olarak hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda belirtilmiştir.

$$E_K = \frac{1}{2} mV^2 \quad [E_K: \text{Kinetik Enerji (J)}, m: \text{Kütle (kg)}, V: \text{Rüzgâr Hızı (m/s)}] \quad (3)$$

$$V(h) = \frac{U^*}{K} \ln \frac{h}{z_0} \quad [U^*: \text{Rüzgâr hızı yükseklik faktörü}, K: \text{Von karman sabiti (0,4)}, z_0: \text{Yer yüzeyindeki}]$$

engellerden kaynaklanan pürüzlülük uzunluğu (m), h: Rüzgâr hızının yerden yüksekliği (m)] (4)

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta \quad [\rho: \text{Havanın yoğunluğu} (\text{kg/m}^3), A: \text{Kanat süpürme alanı} (\text{m}^2), \eta = \eta_m \eta_g \eta_e] \quad (5)$$

Toplam gücü bulduktan sonra türbinin kapasite faktörünün bulunup buna göre yıllık enerji miktarı bulunmalıdır.

$$KF = \frac{\text{Türbinin üreteceği enerji}}{\text{Türbin anma gücünde üreteceği enerji}} \quad (6)$$

Bakım, arıza gibi durumlar düşünülerekten bir yıl 355 gün (8520 saat) olarak alınmıştır. Kurulacak olan rüzgâr enerji santralinin yıllık üreteceği enerji miktarı:

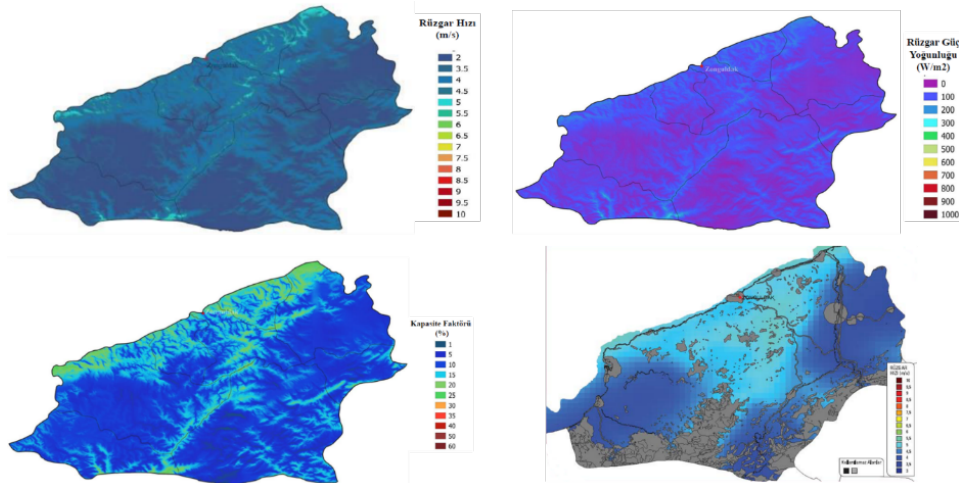
$$P_r (\text{MWh}) = P_r * 8520h * KF \quad (7)$$

Rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplanacak noktanın GAW programı üzerinden REPA haritalarına uygun olması amacıyla 100 m'deki rüzgâr hızına bakılmıştır. Eşitlikler kullanılarak öncelikle 100 m yükseklik için rüzgâr hızı yükseklik faktörü (U^*) hesaplanmıştır. Hesaplanan değere bağlı olarak seçilen türbinin kule yüksekliği (76 m) için hız hesaplanmıştır. Seçilen alanlar, seyrek ağaçların ve yapıların olduğu ova, çayır tipi alanlar olduğu için bu değer yüzey pürüzlülük uzunluğu 0,05 olarak alınmıştır [27].

Tablo 2. İstanbul ve Filyos'ta kurulacak olan RES için teorik hesaplamalar (Theoretical calculations for RES to be established in Istanbul and Filyos)

	İstanbul	Filyos
100 m'deki rüzgâr hızı (V)	7,58 m/s	6,16 m/s
Rüzgâr hızı yükseklik faktörü (U^*)	0,39 m/s	0,32 m/s
76 m'deki rüzgâr hızı (V)	7,30 m/s	5,93 m/s
Toplam güc (P_r)	207,5 kW	111,3 kW
Kapasite faktörü (KF)	%25,9	%14
Santralin yıllık üreteceği enerji	457,8 MWh	134,7 MWh

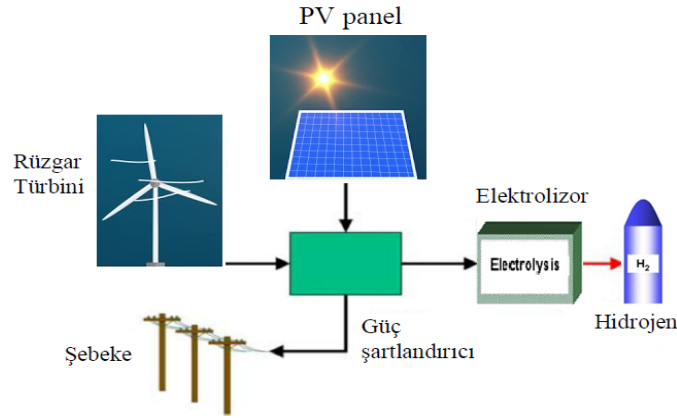
Tasarlanan hidrojen üretimi tesisinde hidrojen sülfürün elektrolizi için gerekli olan enerji miktarı yaklaşık 640 MWh olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerjisi için yapılan teorik hesaplamalarda hem İstanbul hem de Filyos için santralin üreteceği yıllık enerji miktarları bu değerden az olduğundan ve en azından kurulacak santralin bu değeri karşılaması gerektiği düşünüldüğünden kurulacak santralin yıllık 640 MWh'den daha fazla enerji üretebilmesi gerektiği öngörülmüştür. Bu sebeple de maliyetler göz önüne alınarak İstanbul için en az 2 adet türbine ($457,8*2=915,6$ MWh) ihtiyaç olacaktır. Filyos'un güneş enerji potansiyeli yönünden ilk sırada yer alması ve jeopolitik önemi düşünülünce rüzgâr enerji potansiyeline de bakılması gerektiği düşünülmüştür. Filyos'da kurulacak bir santralde 640 MWh'lik enerjiyi elde edebilmek için ise en az 5 adet türbine ($134,7*5= 673,5$ MWh) ihtiyaç olacaktır.



Harita 4. Filyos'un rüzgâr enerji potansiyel atlası (Filyos wind energy map) [22]

Bu çalışmanın amacı hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması olduğu düşünülürse hem rüzgâr hem de güneş enerjilerinden yararlanılmasının gerektiği düşünülmüştür.

Hem daha fazla yenilebilir enerji kaynağından yararlanmak hem de elektroliz prosesine sürekli enerji verebilmek adına hibrit bir enerji santralinin (Şekil 10) kurulmasına karar verilmiştir. Ayrıca kurulacak olan enerji santrallerinden elde edilecek enerji şebekeye de verilebilir.



Şekil 10. Seçilen lokasyonlarda kurulacak olan hibrit enerji santrali (Hybrid power plant to be built in selected locations)

Tesisin kurulacağı alan seçilirken yapılan rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyellerine bakılmıştır. Ayrıca seçilecek alanın jeopolitik önemi; sanayi, ulaşım, istihdam gibi sosyo-ekonomik durumları da ihmal edilmemiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kombine tesisin kurulacağı alan olarak İstanbul ili ve Zonguldak Filyos seçilmiştir.

4. Kurulacak Olan Enerji Santrallerinin Ekonomik Analizi (Economic Analysis of Power Plants to be Built)

Enerji santrallerinde ekonomik analiz yapılırken; arazi, makine, altyapı vb. gibi ilk yatırım maliyetleri ve çalışan maaşları, destek ekipmanları, bakım giderleri vb. gibi işletme-bakım maliyetleri göz önüne alınır. Ekonomik bir değerlendirme kriteri olan birim enerji üretim maliyeti, kullanım ömrü boyunca santralden birim enerji elde etmek için gerekli olan bütün maliyetlerdir. Bir yatırımcı için diğer bir önemli kriter ise proje finansmanında kullanılan öz sermaye ve kredi borçlanmasından oluşan kaynak maliyetidir [28]. Bu çalışmada, net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemlerine göre ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bir yatırımın yıllara göre gelirlerinin bugünkü değerleri toplamı ile yıllara göre giderlerinin bugünkü değerleri toplamı arasındaki fark yatırımın net bugünkü değeridir ve pozitifse yatırım uygundur. Bir yatırımın net bugünkü değerini sıfıra eşitleyen iç karlılık oranı yönteminde iç karlılık oranının sermaye maliyetinden büyük olması gerekmektedir [28].

Ekonomik analizler yapılırken aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır [28]:

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım bedeli}}{\text{Yıllık Net Kazanç}} \quad (8)$$

$$\text{Net Bugünkü Değer} = \frac{A}{(1+r)} + \frac{A}{(1+r)^2} + \frac{A}{(1+r)^3} + \dots + \frac{A}{(1+r)^n} - I \quad (9)$$

I: ilk yatırım tutarı, A: yıllık döneme ait nakit akışı, r: getiri oranı

$$\text{Yatırım Harcaması} = \frac{\text{Nakit akışı}}{(1+\text{iç karlılık oranı})} \quad (10)$$

$$0 = CF + \frac{CF}{(1+r)} + \frac{CF}{(1+r)^2} + \frac{CF}{(1+r)^3} + \dots + \frac{ACF}{(1+r)^n} \quad (11)$$

CF: her yıla ait nakit akışı, iç karlılık oranı: r

Yatırımcının %100 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirildiği ya da yatırımcının %25 öz sermaye, %75 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirdiği varsayılmıştır. Her iki senaryo için de kurulum maliyeti, faiz oranları, dağıtım ve sistem kayıpları gibi temel unsurlar sabit tutulmuştur. Bir güneş enerjisi santralinin maliyet analizini yapılırken;

*Yer seçimi, saha incelemesi, proje hazırlığı ve yönetimi, mühendislik çalışmaları, danışmanlık hizmetleri vb. gibi fizibilite çalışma maliyetleri

*Güneş panelleri ve ekipman maliyetleri

- *Arazi bedeli ve altyapı, yol vb. inşaat maliyetleri
- *Şalt sahası, kablolama, devreye alma vb. elektrik maliyetleri
- *Arıza bakım, sigorta, yönetim, eğitim vb. gibi operasyonel maliyetler
- *Öngörülemeyen maliyetler dikkate alınmaktadır.

Rüzgâr enerjisi santrallerinde en önemli yatırım maliyetleri ise işletme ve bakım maliyetleridir. Bir rüzgâr enerjisi santralının toplam maliyetinin yaklaşık %76'sı türbin maliyeti, yaklaşık %9'u şebeke bağlantı maliyetleri ve %7'si montaj-kurulum maliyetleri olarak gösterilmektedir [29]. Bir rüzgâr enerjisi santralının maliyet analizini yapılırken;

- *Sahada ölçümlerin yapılması, projelendirme, mühendislik analizleri ve hesaplamaları vb. gibi danışmanlık ve proje maliyetleri
- *Yol, altyapı, temellerin yapılması gibi inşaat maliyetleri
- *Türbin parçalarının üretimi, nakliyesi ve montajı gibi türbin ve montaj maliyetleri
- *Şalt sahası, kablolama, devreye alma ve enerji nakil hatları vb. elektrik maliyetleri
- *Arıza bakım, sigorta, yönetim, eğitim vb. gibi operasyonel maliyetler
- *Kontrol ve izleme sistemleri, uzaktan kontrol gibi diğer maliyetler dikkate alınmaktadır.

Güneş ve rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik analizi yapılırken bazı varsayımlarda bulunulmuştur:

- *Elektroliz için gerekli enerjinin tamamı güneş veya rüzgâr enerji santralinden üretilen elektrik enerjisi ile sağlanmakta olup üretilen fazla elektrik enerjisi H₂S kapsamında satılacaktır. Devletin destek alma fiyatı 32,00 TL kuruş/kWh olarak verilmiş olup %60 oranında yerli desteği de aldığı varsayılarak toplamda 36,8 (32+8*0.6) TL kuruş/kWh üzerinden elektrik satışı gerçekleşecektir [30]. Avro üzerinden hesaplanacak olursa 12.01.2022 tarihli T.C. Merkez Bankası'ndan alınan kura (1 €: 15,6 ₺) göre satış fiyatı 2,35 €/kWh olacaktır. Elektrik destek alım fiyatı 10 yıl garanti süresince sabit tutulmuştur. 10 yıl sonrasında, YEKDEM mekanizmasının kaldırılması gözetilerek, elektrik satış fiyatının her yıl %2,35 oran artışla satılacağı varsayılmıştır.
- *Kredi faiz oranı %10, enflasyon oranı %5 olarak alınmıştır.
- *2020 yılı sonrasında zorunlu olan karbon piyasa mekanizması dikkate alınarak karbon fiyat hesaplaması analize dahil edilmiştir. Satılan karbon fiyatı 3 €/ton olarak alınmıştır. 1 kWh elektrik üretimi için yaklaşık 0,65 kg CO₂ azaltımı yapıldığı varsayılmıştır [31].
- *Kurulacak GES için yaklaşık 2 hektarlık (20000 m²) bir alan yeterli olurken, RES için yaklaşık 1 hektarlık (10000 m²) bir alan yeterli olmaktadır.
- *İstanbul için, Kanal İstanbul projesi ile birlikte arazi fiyatlarında büyük bir artış yaşanmıştır. Seçilen alanın satın alınması projenin değeri ile kıyaslandığında oldukça yüksek kalacağından arsa fiyatı olarak seçilen bölgenin bulunduğu belediyeden arsa rayiç bilgileri alınmıştır. Eyüpsultan Belediyesi'nin belirlediği rayiç bedeli m² başına 343,2 TL (yaklaşık 22 €) olup arsa bedeli bu fiyattan belirlenmiştir [32].
- *Filyos için, Filyos Belediyesi ile telefonda görüşülerek rayiç bedelinin m² başına 220 TL (yaklaşık 14 €) olduğu öğrenilmiş ve bu değer kullanılmıştır.
- *Yapılması planlanan GES için yaklaşık 4.000 adet PV paneli ve 40 adet invertör kullanırken, RES için İstanbul'da 2 adet, Filyos'ta 5 adet türbin kullanılacaktır.
- *PV panellerin ve invertörlerin fiyatları satış sitelerinden ve CSUN solar üretici fiyat aralığından alınmıştır. 1640×990×40mm boyutlarında, 19,1kg ağırlığında, 250 Wp gücünde, %15,4 panel verimliliğine sahip CSUN 250-60 PSAR panelinin yaklaşık olarak fiyatı 157 € olarak bulunmuştur. SMA Sunny Tripower 20000TL-30 modülü fiyatı 2645 € olarak alınmıştır [33]. PV panel ve invertör fiyatları, analizde modül fiyatı içerisinde €/kW olarak alınmıştır.
- *Türbin fiyatları satış sitelerinden ve üretici firmadan alınmıştır. Enercon E-48 türbinin yaklaşık fiyatı 300000 €'dur [34]. Analizlerde türbin fiyatı €/kWp olarak kullanılmıştır.
- *İncelenen farklı projelerde bir PEM elektrolizörün maliyeti yaklaşık olarak 60000 € olarak alınmıştır [5]. Yapılan analizlerde, hesaplamaların kolay yapılabilmesi için PEM elektrolizör fiyatı arsa bedelinin içerisinde yer almıştır.
- *Güneş enerji santralleri için, malzeme ve işçilik fiyatları belirlenirken Şanlıurfa Enerji İhtisas Bölgesi için yapılan 1 MW'lık güneş enerjisi santralleri baz alınmıştır. Baz alınan çalışmalarda modül fiyatının yaklaşık yüzde %61 malzeme ve işçilik fiyatları olarak hesaplanmıştır [35]. Rüzgar enerjisi santralleri için, şebeke, yol yapımı ile kurulum ve montaj maliyetleri yaklaşık olarak türbin maliyetinin %18 olarak belirlenmiştir. Arıza bakım maliyetleri yaklaşık olarak %2, sigorta maliyetleri yaklaşık olarak %0,8, yönetim ve danışmanlık maliyetleri yaklaşık olarak %2,4 olarak alınmıştır [29]. Hem GES hem RES için

bu maliyetlerin net şekilde verilmemesinin sebebi proje alanına ve yerine göre maliyetlerin değişebileceğinin ön görülmesidir.

* Yapılan araştırmalarda hidrojenin kg başına fiyatı 3,18-5,75 \$ dolar olarak bulunmuştur [36]. Başka bir çalışmada ise fiyatın 2.16 €/kg olduğu görülmüştür [37]. Ekonomik analiz yapılırken bu değerler ortalaması alınarak kilogram başına hidrojenin fiyatı yaklaşık 2,5 € olarak belirlenmiştir. Yıllık yaklaşık 125000 € değerinde hidrojen, 40000 € değerinde sülfür elde edilecektir [38].

Tablo 3. İstanbul'da kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	27%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	19%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 631324
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	31%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	23%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 1582309
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	31%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	24%
	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 2257067
	Sermaye Geri Ödeme Periyodu	4 Yıl 12 Ay
	Proje Geri Ödeme Periyodu	4 Yıl 12 Ay

Bu veriler ışığında İstanbul'da kurulacak olan güneş enerjisi santralının yıllık enerji üretimi 1307,6 MWh olup bunun 640 MWh'lik kısmı elektroliz prosesinde hidrojen üretimi için kullanılacak olup geri kalan 667 MWh şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 4 yıl 12 ay (Tablo 3) olurken finansmanı %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 5 yıl 9 ay (Tablo 4) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. İstanbul'da kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (100% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	19%
	Net Bugünkü Değeri	€ 610048
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	23%
	Net Bugünkü Değeri	€ 1529304
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	23%
	Net Bugünkü Değeri	€ 2184583
	Proje Geri Ödeme Periyodu	5 Yıl 9 Ay

Filyos'ta kurulacak olan güneş enerjisi santralinde üretilecek olan 1336,7 MWh'lik enerjinin 640 MWh'lik kısmı elektrolizde kullanılacak olup geriye kalan 697 MWh şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 3 yıl 11 ay (Tablo 5) olurken finansmanı %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 4 yıl 5 ay (Tablo 6) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Filyos'ta kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Filyos)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	37%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	26%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 775600
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	40%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	29%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 1743245
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	40%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	29%
	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 2428713
	Sermaye Geri Ödeme Periyodu	3 Yıl 11 Ay
	Proje Geri Ödeme Periyodu	3 Yıl 11 Ay

Tablo 6. Filyos'ta kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (100% loan) to be Built in Filyos)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	26%
	Net Bugünkü Değeri	€ 756044
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	31%
	Net Bugünkü Değeri	€ 1700292
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	29%
	Net Bugünkü Değeri	€ 2371395
Proje Geri Ödeme Periyodu		4 Yıl 5 Ay

İstanbul'da tasarlanacak olan 1,6 MW kurulu güce sahip santralin yıllık enerji üretimi 915,6 MWh olarak hesaplanmıştır. 640 MWh'lık kısmı elektrolizde kullanılacak olup geriye kalan kısım şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 11 yıl 6 ay (Tablo 7), %100 kredi ile kurulacak olan santralin ise 18 yıl 8 ay (Tablo 8) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. İstanbul'da kurulacak olan 1,6 MW'lık RES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1,6 MW WPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	-10%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	4%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	-€ 32619
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	11%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	11%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 622132
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	11%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	12%
Proje Net Bugünkü Değeri		€ 1018561
Sermaye Geri Ödeme Periyodu		11 Yıl 6 Ay
Proje Geri Ödeme Periyodu		11 Yıl 6 Ay

Tablo 8. İstanbul'da kurulacak olan 1,6 MW'lık RES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1,6 MW WPP (100% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	4%
	Net Bugünkü Değeri	-€ 32619
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	10%
	Net Bugünkü Değeri	€ 562129
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	11%
	Net Bugünkü Değeri	€ 888443
Proje Geri Ödeme Periyodu		18 Yıl 8 Ay

Filyos'un rüzgâr enerjisi potansiyeli güneş enerjisi potansiyeline göre bir hayli düşük olmakla beraber Filyos'un önemine binaen kurulabilecek olan rüzgâr enerjisi santrallerinin teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Elektroliz için gereken enerjiyi rüzgâr enerjisinden elde etmek için en az 5 adet türbin gerekmektedir ki bu ekonomik olarak uygun değildir.

3. Sonuçlar (Conclusions)

Azalan enerji kaynakları ve artan enerji maliyetleri ile beraber çevre bilincinin de etkisiyle birçok ülke yenilenebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynakları arayışına girmiştir. Bu enerji kaynaklarından da doğada bol miktarda bulunan ve çevre dostu olan hidrojen ön plana çıkmıştır. Hem fosil yakıtlardan hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilen hidrojen Karadeniz'in diplerinde bol miktarda bulunan hidrojen sülfürden de üretilebilmektedir. Karadeniz'in diplerindeki H₂S'den elde edilebilecek hidrojen yaklaşık 270 milyon tondur. Sonuç olarak Karadeniz, büyük bir enerji potansiyeline sahiptir.

Karadeniz kıyılarının güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelleri analiz edilerek güneş enerjisi kurulu gücü 1 MW, rüzgâr enerjisi kurulu gücü 0,8 MW olan santrallerin kurulması düşünülmüş ve bu kurulu güçlere göre yıllık enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Yıllık 50 ton üretebilecek olan tesisin enerji ihtiyacı 638,85 MWh olup bu enerji, Karadeniz'de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacaktır.

PVGIS simülasyon programı ile yapılan analizler neticesinde, Karadeniz kıyılarında güneş enerjisinden yıllık enerji üretimi birbirine yakın olmakla Filyos yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer almıştır. Sırasıyla Zonguldak 1317,3 MWh, Samsun 1308,1 MWh ve İstanbul 1307,6 MWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Rüzgâr enerjisinden yıllık enerji üretimine bakıldığında Sinop yıllık 658 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer alırken, sırasıyla Kastamonu 483,4 MWh, İstanbul 457,8 MWh, Kırklareli 286,6 MWh, Samsun 257 MWh ve Filyos 134,7 MWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Bu çalışmanın amacının hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması olduğu düşünülürse hem güneş enerjisi hem de rüzgâr enerjisinden yararlanmak için hibrit bir enerji santralının kurulmasına karar verilmiştir. Tasarlanan enerji santrallerinin şebekeye bağlı enerji sistemleri olarak şebekeye elektrik verebilecektir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kombine tesisin kurulacağı alan olarak İstanbul ili ve Zonguldak Filyos seçilmiştir. İstanbul enerji potansiyeli olarak en iyi il çıkmasının yanı sıra analiz yapılan bölgenin, mega bir proje olarak gösterilen Kanal İstanbul projesine yakın olması, İstanbul'un sanayi, ulaşım vb. alanlarda daha çok enerjiye ihtiyacı olması, gerekli altyapının İstanbul'da bulunması gibi sosyal ve ekonomik etkenler de göz önüne alınmıştır. Filyos'un güneş enerjisi potansiyeli, analizi yapılan alanlarda yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer almaktadır. Filyos'un en önemli seçilme nedeni ise buraya yapılacak olan mega endüstri bölgesi ve Türkiye'de ilk üçe girecek bir limanın varlığıdır. Ayrıca Karadeniz'de bulunan yaklaşık 540 milyar m³ doğalgaz bu bölgeden dağıtılacak olup buraya birçok sanayi kolu yatırım yapacaktır. Filyos Türkiye'nin kuzey kapısı olup ulaşım ve lojistik anlamda denizyolu, demiryolu, karayolu ve havayolu imkânları mevcuttur.

Seçilen alanların ve yapılacak olan santrallerin karlı ve yatırım yapılabilirliğini görebilmek adına ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemi tercih edilmiş olup yatırımcını %100 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirildiği ya da yatırımcının %25 öz sermaye, %75 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirdiği iki farklı senaryo ele alınmıştır. Şebekeye bağlı bir sistem tasarlandığı için devletin vermiş olduğu teşviklerden yararlanılacağı düşünülmüştür. Seçilen iki yer için de hem güneş hem de rüzgâr için iki farklı senaryoda ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.

İstanbul için finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak güneş enerjisi santralının geri dönüş süresi 4 yıl 9 ay olarak hesaplanmıştır. %100 kredi ile kurulacak güneş enerjisi santralının geri dönüş süresi ise 5 yıl 5 ay olarak hesaplanmıştır. Buradan iki senaryonun da uygulanabileceği ve fizibil olduğu sonucu çıkarılmakla beraber öz sermaye oranı ne kadar fazla ise projenin geri dönüş süresi de o kadar kısa olmaktadır. Filyos'da %25 öz sermaye, %75 kredi ile kurulması planlanan güneş enerjisi santralının yatırımın geri dönüş süresi 3 yıl 6 ay olarak hesaplanmıştır. %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi ise 3 yıl 11 ay olarak hesaplanmıştır.

Gerek Filyos'un güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması gerekse santralin kurulacağı arsa bedelinin daha ucuz olması sebebiyle Filyos için İstanbul'a göre güneş enerjisi yatırımının geri dönüş süresi daha kısadır. Ancak iki proje için de yatırım yapılabilirlik ve karlılık oranları gayet iyi gözükmektedir.

İstanbul için finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak rüzgâr enerji santralının geri dönüş süresi 10 yıl 8 ay olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerji santralleri ilk yatırım maliyetleri yüksek olan enerji santralleri olmakla beraber yatırımın geri ödeme süresi uygun gözükmektedir. %100 kredi ile kurulacak rüzgâr enerji santralının geri dönüş süresi 18 yıl 8 ay olarak hesaplanmıştır.

Filyos'un diğer seçilen bölgelere göre rüzgâr enerji potansiyelinin az olduğu görülmüştür. Ancak yine de bir maliyet analizi yapılarak bir öngörüye sahip olunabileceğine kanaat getirilmiştir. Yapılan analiz, Filyos'taki rüzgâr enerjisi santrali yatırımının net bugünkü değerinin ve iç verimlilik oranının negatif olması yatırımın iyi bir yatırım olmadığını göstermektedir.

Hidrojen temiz, çevre dostu gelecek için önemli bir enerji kaynağıdır. Karadeniz'de de bertaraf edilmesi gereken ve hidrojen üretebileceğimiz bol miktarda hidrojen sülfür mevcuttur. Bu çalışmada hidrojen sülfürden hidrojen üretimi için gerekli enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgârdan elde edilebileceği ekonomik analizlerle gösterilmeye çalışılmıştır. İstanbul'da hem güneş hem rüzgârdan hibrit bir sistemle hidrojen üretimi ekonomik olabilmektedir. Filyos'ta ise sadece güneş ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmekte olup Karadeniz'den doğalgaz da çıkarılabileceği varsayılırsa

buraya yatırım yapılması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada hidrojen sülfürden hidrojen üretiminin elektroliz prosesi üzerinde daha çok durulmuş ve bu prosesin enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. Hidrojen sülfürün denizden çıkarılması ve deniz suyundan ayrıştırılması kısımları da önem arz etmekte ve bu proseslerin de enerji gereksinimleri dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerin %100 yerli olarak imal edilmesi durumunda maliyetler daha da azalacak olup karlılık oranları artacaktır. Devlet teşviki ile arsa bedelleri de daha düşük olursa yatırımcılar için daha teşvik edici olabilir.

Simgeler (Symbols)

\$	US Dolar
€	Euro
₺	Türk Lirası
°C	Celcius
AMIS	Abatement of Mercury and Hydrogen Sulfide
CHEMCAD	Chemical Computer Aided Design
CO ₂	Karbondioksit
GAW	Global Atlas Wind
GES	Güneş enerjisi santrali
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GRP	Glass fiber Reinforced Composite
GWh	GigaWattsaat
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
H ₂ S	HidrojenSülfür
kg	Kilogram
kg/h	Kilogram/saat
kJ	Kilojoule
kPa	Kilopaskal
kWh	KiloWattsaat
L	Litre
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
MPa	MegaPaskal
MW	MegaWatt
MWh	MegaWattsaat
PEM	Polimer Elektrot Membranlı
pH	Power of Hydrogen
PV	PhotoVoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgar enerjisi santrali
S	Kükürt
SO ₄ ²⁻	Sülfat
TJ	Terajoule
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
V	Vanadyum
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

Çıkar Çatışması Bildirimi (Conflict Of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] S. A. Sherif, F. Barbir and T. N. Veziroğlu, "Wind energy and the hydrogen economy review of the technology," *Solar Energy*, vol. 78, no. 5, pp. 647-660, 2005. doi:10.1016/j.solener.2005.01.002
- [2] J. I. Levene, M. K. Mann, R Margolis and A Milbrandt, "An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources" *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/CP-560-37612, 2005.
- [3] S. Z. Baykara, H. E. Figen, A. Kale and T. N. Veziroğlu, "Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1246-1250, 2008. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.07.021
- [4] A. Midilli, M. Ay, A. Kale, and T. N. Veziroğlu, "A parametric investigation of hydrogen energy potential based on H₂S in Black Sea deepwaters" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 1, pp. 117-124, 2007. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.04.006

- [5] K. Petrov, S. Z. Baykara, D. Ebrasu, M. Gulin, and T. N. Veziroğlu, "An assessment of electrolytic hydrogen production from H₂S in Black Sea waters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 8936-8942, 2011. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.04.022
- [6] A. E. Sanlı and M. D. Mat, "Performance analysis of direct Black Sea hydrogen sulphide (in artificial sea water)/hydrogen peroxide fuel cells" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 35, pp. 6440-6448, 2015. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.03.042
- [7] M. Türkaslan, "Karadeniz Suyundan Hidrojen Üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [8] M. Stavros, "Feasibility study of hydrogen production and power in fuel cell reactors, from the H₂S-rich Black Sea waters," Master of Science (MSc) in Energy Systems, School of Science & Technology, International Hellenic University, Thessaloniki, Greece, 2012.
- [9] A. Karapekmez and İ. Dinçer, "Modelling of hydrogen production from hydrogen sulfide in geothermal power plants," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10569-10579, 2018. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.02.020
- [10] A. Karapekmez and İ. Dinçer, "Development of a multigenerational energy system for clean hydrogen generation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 299, 2021. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126909
- [11] A. Midilli, M. Öztürk and İ. Dinçer, "Effective use of hydrogen sulfide and natural gas resources available in the Black Sea for hydrogen economy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 10697-10707, 2021. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.12.186
- [12] S. Seker and N. Aydin, "Hydrogen production facility location selection for Black Sea using entropy based TOPSIS under IVPF environment," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 32, pp. 15855-15868, 2019. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.183
- [13] N.N. Greenwood and A. Earnshaw, *Chemistry of Elements*, Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [14] D. Stirling, *The Sulfur Problem: Cleaning up Industrial Feedstocks*, Cambridge: The Royal Society Of Chemistry, 2000.
- [15] M. Kim, W. Ju, K. Kim and D. Park, "Selective oxidation of hydrogen sulfide to elemental sulfur and ammonium thiosulfate using VO_x/TiO₂ catalysts," *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 159, pp. 225-228, 2006. doi:10.1016/S0167-2991(06)81574-0
- [16] J. Zaman and A. Chakma, "Production of hydrogen and sulfur from hydrogen sulfide," *Fuel Processing Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 159-198, 1995.
- [17] O. Yılmaz, "Deniz Suyundaki Hidrojen Sülfürün (H₂S), Farklı Metal Elektrotlar Kullanılarak Elektro-Oksidasyonunun İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [18] M. Ö. Ültanır, "Hidrojen enerjisi ve Türkiye'de hidrojene geçiş sorunları," in Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Tebliği, İzmir, Türkiye, Ekim 17-22, 1994, Ankara: Dünya Enerji Konseyi Türk Millî Komitesi, 1995. pp. 549-563.
- [19] Y. Ustun, "Karadeniz Havzası ve Türk Boğazları Sistemi," dogailebaris.org.tr, March 10, 2006. [Online]. Available: <http://www.dogailebaris.org.tr>. [Accessed: April 21, 2021].
- [20] L.N. Neretin, I.I. Volkov, M.E. Bottcher and V.A. Grinenko, "A sulphur budget for the Black Sea anoxic zone," *Deep-Sea Research Part I*, vol. 48, no. 12, pp. 2569-2593, 2001. doi:10.1016/S0967-0637(01)00030-9
- [21] ETKB, "Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)," enerji.gov.tr, Jan. 01, 2010. [Online]. Available: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx22>. [Accessed: Dec 11, 2021].
- [22] ETKB, "Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)," enerji.gov.tr, Jan. 01, 2007. [Online]. Available: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>. [Accessed: Dec 13, 2021].
- [23] Europea Commission, "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)," ec.europa.eu, March 01, 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/starting>. [Accessed: Dec 12, 2021].
- [24] M. Çalışkan, "Orta Karadeniz Bölgesi Rüzgar Enerjisi Potansiyeli," emo.org.tr, Sep. 5, 2007. [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/09260384253eef3_ek.pdf. [Accessed: Dec. 15, 2021].
- [25] Danmarks Tekniske Universitet (DTU), "Global Atlas Wind (GWA)," globalwindatlas.info, Oct. 25, 2019. [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/about/introduction>. [Accessed: Dec. 16, 2021].
- [26] The Wind Power, "Manufacturers and turbines, Enercon, E48/800," thewindpower.net, Nov. 07, 2010. [Online]. Available: https://www.thewindpower.net/turbine_en_3_enercon_e48-800.php. [Accessed: Jan. 28, 2022].
- [27] S. Güzel, "Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Hesaplamasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırması," Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [28] E. Saray, "Yenilenebilir Enerji Üretim ve Yatırım Maliyetleri Karşılaştırması: Ege Bölgesi Örneği," Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2019.

- [29] Z. T. Altuntaşoğlu, "Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar," *Mühendis ve Makine Dergisi*, vol. 52, no. 617, pp. 56- 63, 2012.
- [30] EPDK, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması-YEKDEM," epdk.gov.tr, Jan. 29,2021. [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-122/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-destekleme-mekanizmasi-yekdem>. [Accessed: Jan. 20, 2022].
- [31] European Commision, "Review of the EU ETS market stability reserve final report/2021," op.europa.eu, April 12, 2021. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5fac10fc-353a-11ec-bd8e-01aa75ed71a1>. [Accessed: Jan. 22, 2022].
- [32] Eyüpsultan Belediyesi, "Arsa Rayiç Bilgileri," eyupsultan.bel.tr, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://ebelediye.eyupsultan.bel.tr/web/guest/5>. [Accessed: Jan. 24, 2022].
- [33] Europe-solarstore, "Solar panels and solar inverters," europe-solarstore.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/>. [Accessed: Jan. 24, 2022].
- [34] Wind-turbine-models, "Enercon E-48," wind-turbine-models.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/marketplace?manufacturer=22>. [Accessed: Jan. 25, 2022].
- [35] E. U. Divitçi, H. Şahin, K. Demirkol, M. Güllüoğlu, N. Güllü, S. Çadırcı ve S. Kağıtçı, "Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Santrali Yatırımları için Şanlıurfa Enerji İhtisas Endüstri Bölgesi Fizibilitesi ve Etüdü," sutso.org.tr, July 11, 2015. [Online]. Available: <https://www.sutso.org.tr/projeler/11/sanliurfa-ilinde-gunes-enerjisine-dayali-elektrik-uretim-santralleri-icin-enerji-endustri-ihstias-bolgesi-fizibilite-raporu-projesi>. [Accessed: Feb. 01, 2022].
- [36] Statista, "Forecast hydrogen selling price of selected giga-scale projects worldwide by 2021 wind and solar costs," statista.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1260117/projected-selling-prices-of-large-scale-hydrogen-green-projects/>. [Accessed: Jan. 26, 2022].
- [37] Recharge/Global News And Intelligence for the Energy Transition, "Green hydrogen currently cheaper to produce in Europe than grey and blue H2 due to high natural gas and carbon prices," rechargenews.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-currently-cheaper-to-produce-in-europe-than-grey-and-blue-h2-due-to-high-natural-gas-and-carbon-prices/2-1-1080887>. [Accessed: Jan. 26, 2022].
- [38] Chemanalyst, "Sulphur Price Trend and Forecast," rechargenews.com, Jan. 01, 2020. [Online]. Available: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/sulphur-39>. [Accessed: Jan. 26, 2022].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

All Aspects of Metaverse Studies, Technologies and Future

Osman Güler^{a,*}, Serkan Savaş^b

Submitted: 22.03.2022 Revised: 21.06.2022 Accepted: 17.07.2022 doi:10.30855/gmbd.0705011

ABSTRACT

Keywords: Metaverse, 3D technologies, augmented reality, virtual reality, mixed reality

^{a,*} Tusaş Şehit Hakan Gülşen Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi
06890 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3272-5973
e mail: hanciosman@hotmail.com

^b Kırıkkale University,
Faculty of Engineering and
Architecture,
Dept. of Computer Engineering
71450 - Kırıkkale, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3440-6271

*Corresponding author:
hanciosman@hotmail.com

Cyber space, which is called the fifth dimension in human life, has started to transform into a different living space with metaverse applications. In its current form, the metaverse universe, where education, games and entertainment, art, architecture, commercial etc. applications are used for field needs, has recently become an area where technology leader organizations focus and invest more. With these investments, 3D technologies, virtual reality, augmented reality and artificial intelligence studies for the metaverse universe have also increased. Based on the developments in this subject, this study emphasizes the importance and necessity of studies in the metaverse universe. In the study, researches and results related to the metaverse were examined. For this purpose, a descriptive research model was used. In terms of research philosophy, the basic research model and document research model related to the application method were created. The universe of the research consists of studies obtained through Google Scholar. Studies on metaverse in the last 20 years have been downloaded with the specified keyword. As a result of the research, it was determined that the studies on the metaverse increased especially after the pandemic, it was used especially in the game industry and it was applied to an increasingly diverse field. It has been stated that countries that want to take place in this universe, which is expected to reach billions of users, should accelerate their studies and decide which of the "user" and "producer" positions they want to take place in.

Tüm Yönleriyle Metaverse Çalışmaları, Teknolojileri ve Geleceği

ÖZ

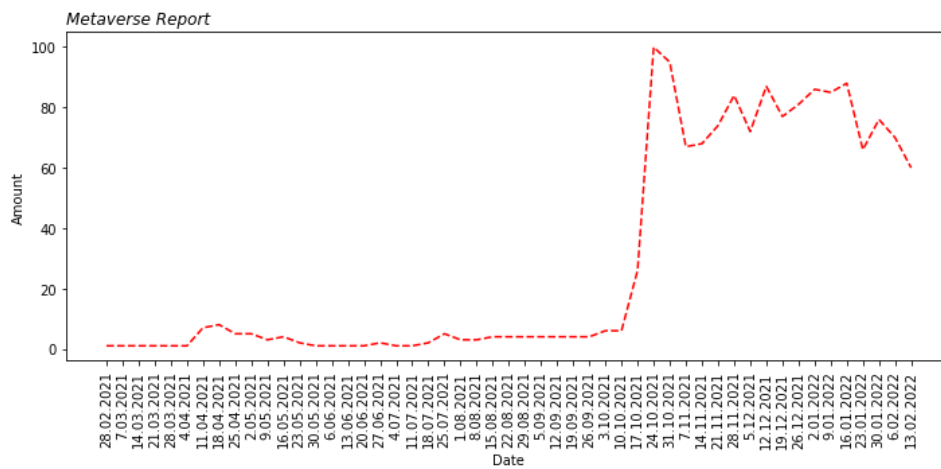
İnsan hayatındaki beşinci boyutu olarak adlandırılan siber uzay, metaverse uygulamaları ile birlikte daha farklı bir yaşam alanı haline dönüşmeye başlamıştır. Mevcut haliyle eğitim, oyun ve eğlence, sanat, mimari, ticari vs. uygulamaların, alan ihtiyaçlarına yönelik kullanılmakta olduğu metaverse evreni, son dönemde teknoloji lideri kuruluşların odaklandığı ve daha fazla yatırım yaptığı bir alan haline gelmiştir. Bu yatırımlarla birlikte metaverse evrenine yönelik 3 boyutlu teknolojiler, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve yapay zekâ çalışmaları da artış göstermiştir. Bu konuda yaşanan gelişmelerden yola çıkarak bu çalışma, metaverse evrenindeki çalışmaların önemi ve gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışmada metaverse ile ilgili araştırmalar ve sonuçları incelenmiştir. Bu amaçla betimsel bir araştırma modeli kullanılmıştır. Araştırma felsefesi açısından uygulama yöntemine ilişkin temel araştırma modeli ve belge araştırma modeli oluşturulmuştur. Araştırmanın evrenini Google Akademik üzerinden elde edilen çalışmalar oluşturmaktadır. Belirlenen anahtar kelime ile metaverse konusunda son 20 yılda yapılan çalışmalar indirilmiştir. Araştırma sonucunda metaverse ile ilgili çalışmaların özellikle pandemi sonrasında artış gösterdiği, özellikle oyun sektöründe kullanıldığı ve giderek artan farklılıkta alanlara da uygulandığı tespit edilmiştir. Milyarlarca kullanıcıya ulaşması beklenen bu evrende yer almak isteyen ülkelerin çalışmalarına hız kazandırması ve "kullanıcı" ile "üretici" pozisyonlarından hangisinde yer almak istediğine karar vermesi gerektiği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metaverse, 3 boyutlu teknolojiler, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, karma gerçeklik

1. Giriş (Introduction)

Metaverse terimi ilk olarak 1992 yılında Neal Stephenson tarafından yazılan, insanların bir avatar kullanılarak sanal gerçeklik ile internet ortamında çevrimiçi olduğu bilim kurgu romanı olan Snow Crash isimli romanda kullanılmıştır. Metaverse kelimesi meta (ötesinde) ve universe (evren) kelimelerinin birleşiminden meydana gelen, çevrimiçi 3 boyutlu ortamlarda kullanıcıların kendileri için seçtikleri bir dijital avatar yardımı ile kullanıcıların fiziksel dünyadaymış gibi iletişim kurabilecekleri, etkileşime girebileceği, eğlence, ticaret, oyun, eğitim vb. birçok faaliyetlerin yapılabileceği sanal bir dünya olarak tanımlanmaktadır [1], [2].

30 yıl önce ortaya atılan ve farklı araştırmacılar tarafından üzerinde çalışılan Metaverse ifadesi, 2021 yılında Mark Zuckerberg tarafından sosyal platformlarının adının Meta olarak değiştirilmesiyle yeniden gündeme gelmiş ve popüler olmuştur. Şekil-1'de son bir yılda Google Trend aramalarında metaverse kelimesinin dünya geneli arama değerleri görülmektedir. Mark Zuckerberg'in açıklamasından sonra arama sayılarında yüksek bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Google Trends metaverse arama sayıları (Google Trends metaverse search counts)

Sanal ortamlar artık gerçek hayatın kendisi haline dönüşmeye başlamıştır [3]. İnsanların hayalinde metaverse, sanal gerçeklik gözlüğü ile çevrimiçi ortamda tasarlanmış 3 boyutlu sanal bir dünyada etkileşime girebileceği, gerçek dünyadaki engeller olmadan yaşayabileceği bir ortam olarak canlanmıştır. Bu dünyada insanlar ticaret yapabilecek, iş imkânları geliştirebilecek, istedikleri yerleri gezebilecek, çeşitli sosyal aktivitelere (konser, tanıtım, tatil, konferans, oyun vb.) bir avatar yardımı ile katılabilecektir. Metaverse, aslında insanların hayatında çeşitli bilgisayar oyunları, konferans ve toplantı sistemleri, eğitim platformları, oyunlar ve bu alanda yapılan sinema ve tanıtımlar ile 30 yıldır var olan bir sistemdir. İnsanların çevrimiçi olarak oyun, sosyalleşme ve eğlence amaçlı olarak kullandıkları CityScape, Minecraft, Roblox, SecondLife, SandBox, DecentreLand, Zepeto, Fortnite vb. uygulamalar ile metaverse dünyaları yıllardır hayatımızda yer almıştır [4-7].

Covid-19 pandemi dönemi metaverse teknolojisinin geliştirilmesi için önemli bir süreç olmuştur. Pandemiden önce metaverse, insanlar için sosyalleşebileceği ve oyun oynayabileceği bir eğlence platformu olarak görülüyordu [8]. Ancak pandemi döneminde aktif olarak dünya genelinde kullanılmaya başlayan ve gerçek zamanlı çevrimiçi uzaktan eğitim sistemleri, iş toplantıları, oyunlar, etkinlikler, vb. uygulamalar, potansiyel bir ikinci dünyanın gelişmesine yol açtı. Günümüzde bu çevrimiçi ortama katılmak için internet bağlantısı olan herhangi bir cihaz kullanılması yeterlidir. Gelecekte ise metaverse, dünyayı tamamen 3 boyutlu modelleyerek sanal bir ortamda, kendi seçeceğimiz dijital bir avatar kullanarak bu dünyada yaşamamızı sağlayacak ve sanal gerçeklik ile artırılmış gerçeklik teknolojileri üzerine inşa edilmesi planlanan bir sistemdir.

Bu çalışmada metaverse üzerine yapılan akademik çalışmalar ve sonuçları, metaverse teknolojileri ve platformları araştırılmıştır. Bu amaçla betimsel bir araştırma modeli kullanılmıştır. Araştırma felsefesi açısından uygulama yöntemine ilişkin temel araştırma modeli ve belge araştırma modeli oluşturulmuştur. Araştırmanın evrenini Google Akademik üzerinden elde edilen çalışmalar oluşturmaktadır. Akademik arama motorları üzerinden metaverse anahtar kelimesi kullanılarak,

metaverse konusunda son 20 yılda yapılan ve içeriğinde metaverse terimi geçen akademik makale ve konferans bildirileri indirilmiştir. Bulunan çalışmalar içerik ve çalışma alanı olarak gruplandırılmıştır. Sonrasında metaverse teknolojileri ve metaverse platformları açıklanmıştır. Bu çalışmanın amacı, metaverse üzerine derinlemesine bir araştırma ile gelecek çalışmalara yol göstermektir.

Araştırmanın yapısı şöyle devam etmektedir. İkinci bölümde metaverse üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde metaverse teknolojileri ve mimarileri detaylı olarak açıklanmış, son bölümde ise tartışma ve araştırmanın sonuçları açıklanmıştır.

2. Metaverse Alanında Yapılan Çalışmalar (Studies in the Metaverse Field)

Bu bölümde metaverse alanında yapılan araştırmalar, çalışma alanlarına göre; eğitim, araştırma ve geliştirme, turizm ve sanat, iletişim araştırmaları ve diğer araştırmalar olmak üzere beş farklı kategoriye ayrılarak, geçmişten günümüze kadar kronolojik olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen kaynaklara ait bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Metaverse içerikli çalışmalara ait alan ve yayın türü bilgileri (Field and publication type information of studies with metaverse content)

Çalışma Alanı	Makale	Bildiri
Eğitim	28	6
Araştırma Geliştirme	25	7
Turizm ve Sanat	5	1
İletişim	3	0
Diğer	2	2

2.1. Eğitim alanında yapılan çalışmalar (Studies in the field of education)

Jennings ve ark. [9] Second Life adlı sanal dünyada bulunan 170 eğitim kurumunun sanal dünyada yarattığı mekânları ve düzenlediği etkinlikleri incelemişlerdir. Çalışma kapsamında incelenen sanal kampüsleri etkin kampüs ve yansıtıcı kampüs olmak üzere 2 sınıfta tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda iki sınıfta gruplandırılan bu kampüslerin her ikisinde çok karmaşık ve bakımlı yapıda olduğu, her kampüsün sanal ortamlarda eğitim faaliyetlerinin nasıl yürütüleceği konusunda farklı bir model sağladıklarını belirtmişlerdir. Boulos ve ark. [10] Second Life sanal dünyasını tıp ve sağlık eğitimcilerine tanıtmak amacıyla, burada kurulan bazı tıp ve sağlık eğitimi örneklerini araştırmışlar ve sonuçta sanal dünyaların web teknolojisinin geleceğinin önemli bir parçası olduğunu, yaratıcı tıp ve sağlık eğitimlerinde büyük bir potansiyel sunduğu açıklamışlardır. De Lucia ve ark. [11] Second Life ortamında sanal bir kampüs oluşturarak öğrencilerin bu sanal kampüste eşzamanlı aldıkları eğitimleri ve sanal öğrenmeyi değerlendirmişlerdir. Sanal ortam ile varlık, farkındalık, iletişim ve konfor ile ilgili kullanıcı izlenimlerini analiz etmişler ve sanal ortamın eşzamanlı iletişim ve sosyal etkileşimi başarıyla desteklediğini, ayrıca öğretmenler ve öğrencilerin gerçekten motive olduklarını belirtmişlerdir.

Schaf ve ark. [12] kontrol ve otomasyon eğitimi için, farklı yerlerde çalışanlar arasında işbirliğine dayalı projelerin geliştirilmesine ve uzaktan deneylerin yapılmasına olanak tanıyan bir karma gerçeklik laboratuvarı ortamı sunmuşlardır. Sonuçta bu tür bir etkileşimli sistemin işçiler ve mühendisler için sistematik bir destek sağladığını ve sunulan araştırmanın işbirlikçi mühendisliği desteklemek için uygun maliyetli etkili bir araç olarak kullanılabilceğini önermişlerdir. Warburton [13] Second Life'in eğitim faaliyetleri için sunduğu imkânları, öğretim yaklaşımlarını ve bir eğitim aracı olarak Second Life ortamının kullanılmasının önündeki engelleri araştırmıştır. Sonuç olarak sanal dünyaların eğitim için cazip alanlar olduğunu, ancak eğitimcilere özel tasarım zorlukları sunduğunu göstermiştir. Barry ve ark. [14] sanal dünyada probleme dayalı öğrenme eğitiminin, biri Japonya'da diğeri Amerika'da bulunan iki farklı öğrenci grubu üzerindeki öğrenmede etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, hem Amerika hem de Japonya'da bulunan ekiplerinin prim oluşturmanın zor bir görev olduğunu ve ışınlanma görevinin nispeten kolay olduğunu düşündüklerini, her iki takımın da metaverse ortamdaki sınıfta bulunmaktan yüksek bir memnuniyet duyduklarını göstermiştir. Ancak, eğitim dilinin İngilizce olmasından dolayı Japonya ekibinin zorlandığı belirtilmiştir. Baker ve ark. [15] sanal dünyada psikoloji eğitiminin tasarım, maliyet, etkileşim, iletişim, teknoloji kullanımı vb. alanlar açısından avantajlarını ve dezavantajlarını tartışmışlardır. Çalışma sonucunda yazarlar psikoloji eğitiminde sanal dünyaların kullanımının öğrenme süresinin ve teknoloji sorunlarının maliyetleri artırdığını, ama öğrenci katılım potansiyeli, sanal ortamlar ve sanal nesnelere yaratma yeteneğinin öğrenciler üzerinde olumlu bir etki

yarattığını vurgulamışlardır.

Huang ve ark. [16] sanal dünyadaki akış deneyimlerinin öğrencilerin öğrenmeye yönelik tutumları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta, insan becerilerinin, zorluklarının ve etkileşiminin 3B sanal dünyalarda gezinirken akış deneyimleriyle pozitif ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Getchell ve ark. [17] Second Life ortamında oyun tabanlı öğrenme uygulamasının çevrimiçi oyun uygulamalarına göre farklılıklarını ve hizmet kalitesini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, metaverse ortamların, yeni eğitim bağlarının oluşturulmasını kolaylaştıran oyun tabanlı öğrenme için esnek bir platform sunduğunu, temel bilgisayar sistemleri gelişmeye devam ettikçe ve ağlar geliştikçe, bu teknolojiye erişimi olan öğrenci ve eğitimcilerin sayısı artmaya devam edeceğini göstermişlerdir. Ariyadewa ve ark. [18] sanal dünya tabanlı öğrenme modeli ve sanal bir eğitim ortamı tasarımı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Önerilen modelin, kullanılan temel teknolojiden bağımsız olarak sanal 3B öğrenme ortamını tutarlı bir şekilde tanımlayabileceğini belirtmişlerdir. Tamai ve ark. [19] Second Life sanal dünyasında Japonya'ya gelen öğrenciler için Japon dili ve kültürü üzerine eğitim alabilecekleri bir e-öğrenme platformu oluşturarak bu platformda öğrenme sürecinin avantajlarını ve sınırlarını tartışmışlardır. Bu çalışma sonucunda yazarlar meta veri tabanına dayalı öğrenmenin, Japon geleneklerini, dilini ve kültürünü öğrenmede, ders kitabı veya normal sınıfla geleneksel öğrenme yöntemiyle karşılaştırıldığında etkili olabileceğini öne sürmüşlerdir. Aralarında bilgi farkı olduğunda, öğrenciler arasında sorunsuz bir etkileşimi kolaylaştırmanın önemli olduğu vurgulanmıştır.

Esteves ve ark. [20] Second Life sanal dünyasında üniversite düzeyinde bilgisayar programlama eğitiminin analizine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada eğitimin etkileri ve başarıda engel olan problemler tartışılmıştır. Yazarlar, birinci sınıfta öğretmenin fiziksel varlığının öğrencilerin sanal dünya arayüzünü anlamaları için önemli olduğu, çünkü öğrencilerin sanal ortamı ve program editörünü kullanmasını kolaylaştırdığı sonucuna varmışlardır. Ahmad ve ark. [21] Second Life sanal dünyasında sağlık eğitimi üzerine bir kurs modülü geliştirmişler ve eğitim sonunda test uygulaması yapmışlardır. Araştırmanın sonucunda öğrencilerin çoğu sanal gerçeklik programıyla çalışmanın gerçek hasta üzerinde deney yapmaktan güvenli, etkileşimli, daha az sıkıcı, hatırlaması kolay ve uzaktan sağlık öğrencisi için alternatif çalışma seçeneği olduğunu söylemişlerdir. Yazarlar çalışma sonucunda, sağlık öğrencilerinin internet konusunda bilgili olması gerektiğini, sanal ortamda öğrenme ve eğitime başlamak için uygun kılavuza ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Liu ve ark. [22] sanal ortamların etkileşimli platformlar olması sebebiyle yabancı dil eğitimine uygun platformlar olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak iyi bir dil öğrenme sanal topluluğunun, kullanıcının dinlediğini anlama becerilerini, ders sırasında telaffuz becerilerini ve okuma becerilerini etkili bir şekilde geliştirmesine yardımcı olacağı çıkarımında bulunmuşlardır.

González ve ark. [23] sanal dünyalarda çevrimiçi rol oynama oyunu motoruna dayalı eğitici video oyunlarının tasarımı ve eğitimde kullanımı üzerine araştırma yapmışlardır. Yapılan araştırma sonuç olarak eğitici video oyunlarının, gerçek dünyada teknik ve sosyal becerilerin gelişimini desteklediğini, motivasyonu artırarak öğrenmeyi desteklediğini ve oyunların sağladığı en önemli öğrenme türünün oyun topluluklarında gerçekleşen sosyal öğrenme olduğunu ortaya çıkarmıştır. Xanthopoulou ve ark. [24] tarafından çalışanlar üzerinde yapılan bir araştırmada, sanal dünyada aktif öğrenme ve dönüşümlü liderlik ile ilgili çevrimiçi oyun oynamanın istihdama ve çalışanların performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışma bulguları, çevrimiçi oyun oynamanın işyerinde iyi bir işleyiş için gerçekten yararlı etkileri olabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak çevrimiçi oyunların esas olarak eğlendirmek için tasarlanmasına rağmen, bazı unsurlarının organizasyonlarda öğrenme ve liderliğin geliştirilmesinde kullanılabileceğini önermişlerdir.

Vernaza ve ark. [25] metaverse ortamların sanal öğrenme ortamları olarak kullanımı ve elektronik eğitimi ile ilgili öğrenme uygulamaları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında online olarak direnç değerleri değiştirilebilen ve sonuçlarının eş zamanlı olarak kullanıcıya gösterildiği bir sanal laboratuvar tasarlamışlardır. Çalışma kısıtlılığı olarak aynı anda birden fazla öğrencinin direnç değerini değiştirmesi sonucu sistemin doğru dönüt sağlayamayacağını vurgulamışlardır. Çözüm olarak eş zamanlı gruplar halinde çalışmasını önermişlerdir. Crespo ve ark. [26] e-öğrenme için sanal bir kampüste ARIMA tabanlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada uzman sistemler üzerine bir kursta bilginin yayılması ile sistemin kullanıcı sayısı arttıkça performansının analizi gerçekleştirilmiştir. Sunucunun çevrimiçi dersleri almak isteyebilecek öğrencilerin erişimi tarafından oluşturulan yüksek trafik yüküne sahip olduğu durumlarda matematiksel davranış modellerini test etmek ve kanıtlamak amacıyla ARIMA modeli bir uzman sistem geliştirilmesinin, kabul edilebilir bir

orta vadeli tahmin ürettiğini belirtmişlerdir. González ve ark. [27] sanal dünyaların öğrenmeyi, işbirliğini, motivasyonu ve öğrencilerin akademik performansının iyileştirilmesi için sağlayabileceği potansiyel faydaların üzerine araştırma yapmışlardır. Öğrencilerin sanal ortamda kendilerini rahat hissettiklerini, öğrencilerinin ortamın güzel, rahat, ferah ve öğrenmeye uygun olduğunu düşündüklerini açıklamışlardır. Ayrıca sanal dünya aracılığıyla öğretilen içeriklerin uygun olduğunu düşündükleri için öğrencilerin motivasyonunun arttığını belirtmişlerdir.

Kanematsu ve ark. [28] Bilim, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik (STEM) eğitimi için sanal dünyaları kullanmışlardır. Sanal dünyada öğrenciler araba tasarımı için bir araya gelerek tartışmışlar, kalem ve çizim tabletleri kullanarak sanal araba yapmışlardır. Çalışma sırasında öğrencilerin iletişim hızları ve içerikleri, katılımcıların iletişimleri için kısa mesaj alışverişinde bulunmuşlardır. Ancak, Second Life ile birlikte Skype gibi diğer iletişim biçimlerini de kullanabilecekleri öngörülmüştür. Sonuç olarak sanal dünyada yapılan proje çalışmasının öğrenciler için çok keyifli olduğu, bu nedenle güçlü bir eğitim aracı olabileceği vurgulanmıştır.

Amorim ve ark. [29] OpenSim yazılımı kullanarak sayısal sistemler eğitimi için 3B sanal bir laboratuvar geliştirmişler ve eğitimin öğrenciler üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Sonuçlar öğrencilerin laboratuvar kullanımına ilişkin kabullerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Sanal ortamın yapısal olarak, hareket ve etkinlikler açısından tatmin edici olduğu belirtilmiştir. Sanal ortamı kullanarak öğrenmenin kolay olduğunu göstermişlerdir. Kanematsu ve ark. [30] öğrencilere metaversede nükleer güvenlik eğitimi için sanal sınıf aracılığıyla vermişlerdir. Daha sonra önce sanal sınıfta sonra gerçek sınıfta deneyler yapmışlardır. Sanal ve gerçek eğitiminin harmanlanmasının başarılı olduğunu vurgulamışlardır. Sanal ortamlarda ders, yönlendirme ve rehberlik ile eğitimlerde uygulamalı deneylerin karışımının ve harmanlanmasının etkili olabileceğini önermişlerdir. Barry ve ark. [31] metaverse ortamında probleme dayalı öğrenmede daha iyi sonuçlar elde etmek için, metaversede ders alan öğrencilerin problem çözmeye karşı gerçek hayatta verdikleri tepkileri analiz etmişlerdir. Sonuçta öğrencilerin eğitimden keyif aldıkları, problemlerin zorluğu ile öğrencilerin göz kırpması sayısının arttığı, sanal eğitimde daha yüksek sonuçlar elde etmek için öğretmenlerin göz kırpması sistemini kullandıklarında öğrencilerin tutumlarını değerlendirebileceklerini göstermişlerdir.

Quintana ve ark. [32] öğretmen adaylarının pedagojik eğitimi için sanal dünyada bir model geliştirilmesi ve öğretmen eğitimindeki kazanımları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen bulgular, işbirlikçi öğrenme deneyimine dayalı olarak öğrencilerin öğretme becerilerini güçlendirmelerine olanak tanıyan öğrenme sistemleri aracılığıyla öğrenciler için açısından olumlu çıkarımlar getirdiğini göstermektedir. Sanal ortamlar, öğretmen adayları için oldukça motive edici entellektüel ve teknolojik bir meydan okuma oluşturduğu, kullanım sırasında gözlemlenen teknik ve kullanılabilirlik zorluklarının, mekânları ve çalışma yöntemlerini güçlendirecek ölçüde çözüldüğü belirtilmiştir. Kanematsu ve ark. [33] e-öğrenme ortamları için eğitim süresince öğrencilerin göz kırpması ve yüz sıcaklıkları gibi biyolojik verileri ölçerek ve psikolojik davranışları takip etmiş ve aralarındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Sonuçta öğrencilerin videolarda önerilen problemleri çok kolay bir şekilde cevaplayabildikleri için duygusal tepkilerinin özellikle göz kırpması sayısına açıkça karşılık geldiğini göstermişlerdir. Kullanılan mevcut yöntemde dış sıcaklıkların etkisi ve ayrıca örneklemenin uygunluğu hesaba katılmadığı için yüz sıcaklıklarının ölçümünün değiştirilmesini önermişlerdir. Benzer şekilde Kanematsu ve ark. [34] e-öğrenme ortamında bu defa öğretmenlerin psikolojik ve zihinsel durumlarını değerlendirmek için göz kırpması verilerini analiz edip, bir model oluşturmayı amaçlamışlardır. Göz kırpması hızının, konsantrasyon gücü ile belirli bir korelasyona sahip olduğunu, öğretmenlerin göreve konsantre olduklarında daha yavaş ve güçlü bir şekilde göz kırpması eğiliminde bulduklarını belirtmişlerdir.

MacCallum ve ark. [35] bir metaverse ortamı olan artırılmış gerçeklik üzerine öğretmenlerin eğitim olarak içerik geliştirmelerini ve öğretmenler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak çalışmanın artırılmış gerçeklik araçlarının eğitimde nasıl uygulanabilecekleri hakkında yeni fikirlere yol açtığını, ancak bu yeni fikirleri öğretmenlerin, öğretmen adaylarının sahip olmadığı bir dereceye kadar deneyim gerektirdiğini ortaya koymuşlardır. Bu nedenle, artırılmış gerçeklik uygulamalarında eğitim potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için, tüm deneyim seviyelerindeki öğretmenlere uygun mesleki gelişim sağlanmasını önermişlerdir. Díaz [36] sınıf dışında öğretmene ve öğrenciye bilgiye erişimi sunan ve esnek hale getiren sanal dünyalar ile hibrit bir mobil öğrenme ortamının modellenmesini açıklamıştır. Sonuçta acemi bir öğretmenin metaverse ortamı ile etkileşime girerken başlangıçta biraz zorlanabileceğinin göz önünde bulundurulması gerektiğini, ancak etkileşim ve

uygulama ile buna uyum sağlayabileceğini, öğrenlerin ise sanal dünyayla etkileşime daha hazır olduklarını ve bu nedenle öğrencilerin metaverse ortamda bulunan dijital kaynakları yönetmesinin daha kolay olduğunu belirtmişlerdir.

Díaz ve ark. [37] metaverse ortamında üniversite öğrencileri için kendi kendine öğrenmeyi ve işbirlikçi öğrenmeyi teşvik eden eğitimi matematik dersinde uygulamışlar. Çalışmada eğitim ortamının kullanılabilirliği ile işlevselliği değerlendirilmiştir. Sanal dünyalarla, öğretmenin sınıf ve işbirlikçi öğrenme gibi pedagojileri kullanmasını kolaylaştırarak eğitimde esnekliği ve sınıf dinamiklerini arttırdığını, programlama ve meta veri tabanlarının oluşturulmasının yapısı nedeniyle çeşitli bilişim kaynaklarının ve etkileşimli unsurların sisteme dâhil edilmesini kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Estudante ve ark. [38] metaverse ortamını kullanarak artırılmış gerçeklik tabanlı bir eğitsel kaçış oyunu tasarlamışlar ve öğrencilerin motivasyonunu, bu tür araçların avantajlarını ve sınırlılıklarını tartışmışlardır. Akıllı telefon kullanımının aynı anda birlikte çalışabilen öğrenci sayısını sınırladığı, eğitici kaçış oyunlarının oda, malzeme, kilitler gibi bazı maddi sınırlamaları çözdüğünü ve maliyeti düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca etkinlik için odada eğitimcilerin bulunmasının gerekmediği vurgulanmıştır. Tang ve ark. [39] üniversite öğrencileri için artırılmış gerçeklikle oyun platformu ve dijital kütüphane alıştırmaya etkinliği düzenlemişlerdir. Ardından öğrencilerden gelen dönütler değerlendirilmiştir. Öğrenciler bu oyunun bilgilendirici ve yaratıcı olduğunu ve olumlu karşılandığını, artırılmış gerçeklik oyununun kütüphane alanlarını, hizmetlerini ve konu kütüphanecilerini tanımalarına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 2. Eğitim alanında yapılan çalışmalar (Studies in the field of education)

Yazar Bilgisi	Yıl	Tür
Jennings ve ark. [9]	2007	Makale
Boulos ve ark. [10]	2007	Makale
De Lucia ve ark. [11]	2009	Makale
Schaf ve ark. [12]	2009	Makale
Warburton [13]	2009	Makale
Barry ve ark. [14]	2009	Konferans
Baker ve ark. [15]	2009	Makale
Huang ve ark. [16]	2010	Makale
Getchell ve ark. [17]	2010	Konferans
Ariyadewa ve ark. [18]	2010	Konferans
Tamai ve ark. [19]	2011	Makale
Esteves ve ark. [20]	2011	Makale
Ahmad ve ark. [21]	2011	Makale
Liu ve ark. [22]	2012	Makale
González ve ark. [23]	2012	Makale
Xanthopoulou ve ark. [24]	2012	Makale
Crespo ve ark. [26]	2013	Makale
González ve ark. [27]	2013	Makale
Kanematsu ve ark. [28]	2013	Makale
Amorim ve ark. [29]	2014	Makale
Kanematsu ve ark. [30]	2014	Makale
Barry ve ark. [31]	2015	Makale
Quintana ve ark. [32]	2015	Makale
Kanematsu ve ark. [33]	2016	Makale
Kanematsu ve ark. [34]	2019	Makale
MacCallum ve ark. [35]	2019	Konferans
Díaz [36]	2020	Konferans
Díaz ve ark. [37]	2020	Konferans
Estudante ve ark. [38]	2020	Makale
Tang ve ark. [39]	2021	Makale
Siyaev ve ark. [40]	2021	Makale
Siyaev ve ark. [41]	2021	Makale
Park ve ark. [42]	2021	Makale

Siyaev ve ark. [40], [41] metaverse ortamda uçak bakım eğitimi üzerine ses tanıma ile kontrol edilebilen bir eğitim hazırlamışlar ve ses ile kontrol sisteminin doğruluk ve hata oranını analiz etmişlerdir. Önerilen metaverse ortamının pahalı fiziksel uçakları, kolayca değiştirilebilen ve

güncellenebilen sanal uçakla değiştirdiği için havacılık kolejleri için ucuz ve ölçeklenebilir bir çözüm olduğu, uçak bakımının etkin eğitimini ve öğretimini kolaylaştırmak için teknik rehberlik ve tüm kaynakları sağladığı, uçak bakım eğitimini geliştirdiği belirtilmiştir. Park ve ark. [42] oyunlaştırma ile eğitim üzerine farklı oyuncu tipleri arasındaki öğrenme motivasyonundaki farklılıkları analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, farklı oyuncu türleri arasında motivasyon açısından istatistiksel bir farklılık olmadığı, her tür oyuncu tarafından tercih edilen oyun deneyimleri, kuralları ve stratejileri oluşturabilecek ortamların oluşturulmasının, oyunlaştırma tasarımında önemli bir faktör olduğu önerilmiştir. Eğitim alanında yapılan önceki çalışmalara ait bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur.

Eğitim alanında yapılan çalışmalar incelendiği zaman, sanal dünyalarda yapılan eğitim faaliyetlerinin öğrencilerin ilgisini çektiği ve motivasyonlarını artırdığı, bu sayede öğrencilerin eğitimlere katılımını ve akademik başarılarını artırdığı görülmüştür. Tasarlanan eğitim ortamlarında öğrencilerin teknoloji kullanımına olan yatkınlığından dolayı zorlanmadıkları ve sistemleri kolaylıkla kullanabildikleri, öğrencilerin anadilleri dışında farklı bir dilde yapılan platformlarda kullanım zorluğu çektiği görülmüştür. Eğitimlerin ise genel olarak teknoloji kullanımı alışkanlıkları açısından platformlarda zorlanabilecekleri belirtilmiştir. Yine öğretmenlerin içerik üretimi konusunda eğitim almaları ve teknolojik yeniliklere adapte olmaları gerektiği önerilmiştir. Sanal dünyalarda verilen eğitimlerin, eğitimin maliyetini düşürdüğü, zamandan ve mekândan dolayı olumlu etkiler sağladığı görülmüştür.

2.2. Metaverse ortamları tasarımı ve iyileştirme çalışmaları (Metaverse environments design and improvement studies)

Schroeder ve ark. [43] Activeworlds isimli sanal dünyada, sanal dünyaların coğrafi özellikleri ile ulaşım, hareketlilik, şehir planlama gibi sosyal yönleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Activeworlds'deki sanal dünyalar sisteminde arazi tahsisi ve coğrafi şekillendirmenin sınırsız fırsatlara sahip olduğu, hayalî ve gerçek dünya benzeri çeşitli ve farklı dünya atmosferleri oluşturulduğunu belirtmişlerdir. Bu çeşitliliğin, farklı kullanıcı gruplarının kendi favori yerlerini ve sosyalleşme yollarını bulmalarına fırsat verdiğini ve bu çeşitliliğe rağmen kullanıcıların hala belirli dünyalarda bir araya geldiğini ve genel sosyalleşme için merkezi alanlarda yoğunlaştığını vurgulamışlardır. Jaynes ve ark. [44] yeni işbirliği modellerini desteklemek için gelişmiş ağ protokolleriyle dikey olarak entegre edilmiş, ölçeklenebilir, kendi kendini kalibre eden, sürükleyici projektör tabanlı Metaverse ortamı tasarımını ele almışlardır. Oluşturulan Metaverse'in amacı, kullanıcılara görsel duyularını geleneksel zaman ve mekân engellerinin kaldırıldığına inandıran açık, sınırsız, sürükleyici bir ortam sağlamaktır. Sonuçta kullanıcıların Metaverse Görüntüleme Portalı adı verilen bir arabirim aracılığıyla bu meta-dünyaya eriştiği, görsel olarak sürükleyici, kendi kendini yapılandıran ve izleyen, etkileşimli ve işbirlikçi yapıda olduğu belirtilmiştir. Bu tür bir platformu ve görsel olarak sürükleyici uygulamaları destekleyen özel amaçlı bilgisayar ağlarının metaverse platformları için kritik bir bileşen olduğunu vurgulamışlardır.

Jaynes ve ark. [45] projeksiyon tabanlı metaverse ortamı tasarımı ile tasarım ve uygulama sürecinde meydana gelebilecek engelleri araştırmışlardır. Oluşturulan sistemlerin büyük çoğunluğunun laboratuvarlarla veya diğer özel amaçlı tesislerle sınırlandırıldığını ve genel bilgisayar ve insan iletişim modelleri üzerinde çok az etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Maliyet, altyapı gereksinimleri ve bakım faaliyetleri, sürükleyici ekranların yaygın şekilde kullanılmasının önündeki engel olduğunu vurgulamışlardır. Cagnina ve ark. [46] Second Life sanal dünyasında firmaların iş modellerini nasıl etkileyebileceği konusunu araştırmış, şirketleri destekleyecek haritalama çerçevesi önermişlerdir. Sonuçta ortak rekabet çerçevelerinin müşterilerin, tedarikçilerin, rakiplerin ve tamamlayıcıların varlığını görmesi olduğu bulgusuna erişmişlerdir. Sanal dünyalardaki sanal ürün ticareti, sanal malların satışı için karakterize edildiği belirtilmiştir. Firmaların ödeme sistemini uygulayabilmesi için sanal ekonominin ve gerçek değeri olan bir para biriminin varlığının ayırt edici faktör olduğu vurgulanmıştır. Kumar ve ark. [47] Second Life sanal dünyası üzerinden, metaverse sistemlerin istemci, sunucu ve ağ performans analizini yapmışlar ve optimizasyon çeşitleri önermişlerdir. Second Life gibi metaverse platformlarının geleneksel çevrimiçi oyunların aksine, sanal dünyadaki konumlarına bağlı olarak kullanıcılara dinamik olarak sürekli değiştirilen bir içerik sağladığı belirtilmiştir. Bu yüzden bu platformların sunucular, istemciler ve ağ üzerinde önemli bir iş yükü ve trafik oluşturduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, sanal dünyalar daha fazla kullanıcıyı, etkileşim türlerini ve gerçekçiliği desteklemek için geliştikçe, bu talepler büyüklük sıralarında artacağı için metaverse platformlarının gelecekteki bilgisayar sistemlerinin tasarımında önemli bir rol oynayacağı vurgulanmıştır.

Papagiannidis ve ark. [48] metaverse ortamlarında, sanal dünyalarda ve çevrimiçi oyunlarda kazanç sağlayabilecek iş fırsatlarını ve zorluklarını tartışmışlar, kurumsal sosyal sorumluluk sonuçlarını incelemişlerdir. Bu platformlarda kullanıcıların avatar kullanımından dolayı davranışlarının etkilenebileceği ve bir kullanıcıyla iletişim kurulduğunda gerçekte kiminle iletişim sağlandığı veya ticaret yapıldığının bilinmemesinin olumsuz etkiler doğurabileceği tartışılmıştır. Bu yüzden Second Life gibi sanal dünyaların sadece oyun olarak değil, oldukça karmaşık topluluklar olarak görülmesi gerektiği vurgulanmıştır. Chesney ve ark. [49] deneysel ekonomi için sanal dünyaların bilimsel potansiyelini, sundukları konu havuzları ve deneysel platformlar açısından incelemişler, kullanıcıların karşılaştığı belirli metodolojik fırsatları ve zorlukları belirtmişlerdir. Sanal dünya havuzlarının standart olmayan doğasına ve sağladığı deney ortamının belirli kusurlarına rağmen, davranışları ile geleneksel ortamlarda gözlemlenenler arasındaki önemli ve sistematik genel farklılıkları tespit edilmemiştir. Sonuçta, sanal dünya ekonomik kullanıcılarının, standart ekonomik ortamlarda gözlemlenen benzer davranışsal düzenliliklere dayandığını vurgulamışlardır. Bourlakis ve ark. [50] metaverse ortamının, sanal dünyada kurulan mağazaların ve perakende satışlarının üzerindeki etkisini ve evrimini incelemişler, gelenekselden elektronik ve metaverse perakendeciliğine geçişi araştırmışlardır. Çalışma sonucunda perakendecilerin promosyon stratejilerini tasarlarken, özellikle meta veri deposu aşamasında da çalışmayı hedefliyorlarsa, bütünsel ve kapsayıcı bir yaklaşım kullanmaları gerektiğini belirtmişler ve gelecekteki araştırmalar için metaverse kullanıcıları ile ilgili politika geliştirmeye yönelik acil ihtiyaç olduğunu önermişlerdir. Schlemmer ve ark. [51] sanal dünyalarda insanların avatar tercihi ve varlığının değerlendirilmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kullanıcıların hesapları incelendiğinde, avatarlarını oluşturan tüm deneklerin cinsiyetlerini koruduklarını ve çoğunun görünüşlerine veya fiziksel kimliklerine benzer özellikleri koruduklarını gözlemlemişlerdir.

Davis ve ark. [52] metaverse sistemleri, metaverse teknolojilerini ve kapasitelerini, avatar kullanımı ve sistemdeki davranışları incelemişler, sanal ekipler arasındaki iletişim, araştırma ve uygulamalar üzerine model geliştirmişlerdir. Metaverse platformlarının organizasyonel roller, davranışlar ve beklentiler için yeni bir ortam sunduğu belirtmişler, fakat yöneticilerin insanların bu ortamlarda gerçek dünyadaki meslektaşları gibi davranacağını ve görüneceğini varsaymaması gerektiğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak bu ortamlardaki ekiplerin ve insanların davranışları temel davranışlarından farklı olabileceği için potansiyel olarak iki dünya arasında gerilimler ve yeni davranış senaryoları yaratılabileceği, bu nedenle sanal dünyadaki ekiplerin geleneksel ekipler gibi yönetilmemesi gerektiği belirtilmiştir. Ayiter [53] metaverse dünyaları için özel olarak geliştirilmekte olan ground-< > adlı bir sanat eğitim alanının temel bileşenlerinden bazılarını tanımlamış ve kendini gözlemlemeye dayalı bir sanat eğitim stratejisi önermiştir. Kullanıcıların, avatarların yanı sıra birden fazla alt avatarın varlığını gerektiren yaratıcı görevleri aktif olarak takip ettiğini, sanal dünya mesleklerinin genellikle yapılandırılmamış olduğunu ve öğrenme sisteminin gerektireceği bilinçli olarak yönlendirilen, kendini gözlemleyen niteliklerden yoksun görüldüğünü belirtmişlerdir. Sonuç olarak, anlamsız yaratıcı oyun oturumlarından, öğrencilerin kişisel yaratıcı uygulanabilirlik duygusunu edindikleri yapılandırılmış, özerk bir öğrenme ortamına geçişi sağlamanın önemini vurgulamışlardır. Van der Land ve ark. [54] sanal dünyalarda etkili ekip işbirliği oluşturmak ve ekip işbirliğini geliştirmek üzere teorik bir model önerisi sunmuşlardır. Önerilen modelin, geleneksel etkileşimli bilgisayar teknolojileriyle karşılaştırıldığında, 3B sanal ortamların, paylaşılan sanal ortam ve avatar tabanlı etkileşim yoluyla ekip işbirliğini desteklediğini belirtmişlerdir. Paylaşılan sanal ortam aracılığıyla, kullanıcıların daha yüksek düzeyde varlık hissine sahip olduklarını, gerçekçilik ve etkileşim yaşadıklarını ve bu sayede, kullanıcıların bilgi işleme düzeyinin arttığını belirtmişlerdir. Avatar temelli etkileşimin ise daha fazla sosyal mevcudiyet sağladığını ve kendini sunum üzerinde kontrol hissi uyandırdığını, böylece sanal ortamda iletişim desteği seviyesini arttırdığını belirtmişlerdir. Sonuçlar daha yüksek düzeyde bilgi ve iletişim desteği yoluyla, daha yüksek bir paylaşılan anlayış düzeyine ulaşıldığını ve ekip performansının olumlu yönde etkilendiği göstermektedir.

Lee ve ark. [55] metaverse servisleri üzerine kullanıcıların farklı servisler arası alışkanlıklarını, hizmetlerin benimsenmesindeki yenilik ve taklit etkilerini incelemişlerdir. Bu servislerin benimsenmesini ölçmek için 2 yıllık bir süre boyunca Twitter.com, Maps.Google.com, Secondlife.com ve iPhone satışlarındaki IP trafik hacmindeki değişiklikleri ölçerek benimsemeyi ölçmüşlerdir. Yenilik ve taklit etkisini ortaya çıkarmak ve zaman serisi verilerini analiz etmek için Bass modelini kullanılmıştır. Sonuçlar, bu hizmetlerin her birinin farklı yenilik ve taklit katsayı değerleri verdiğini göstermiştir. Tüm Metaverse hizmetleri için taklit etkilerinin yenilik etkilerinden daha fazla olduğu ve Secondlife'in yenilik etkilerinin diğerlerinden daha büyük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Owens ve

ark. [56] metaverse ortamda çalışan sanal proje ekipleri arasındaki iletişim, koordinasyon ve etkileşim ile ilgili zorlukları araştırmışlar ve sanal ekiplerin metaverse teknolojisi kullanımını değerlendirmişlerdir. Sonuçların, meta veri deposu teknolojisi yeteneklerinin, sanal proje yönetimi ve sanal ekiplere ilişkin mevcut araştırma ve uygulamadaki boşlukları ele almak yeni yollar sağlayabileceğini çıkarımını yapmışlardır. Massimo [57] sanal dünyalarda dini yerlerin ziyaret analizini, katılımcı gözlemleri üzerinden araştırmıştır. Sonuç olarak sanal dünyalarda ziyaret edilen dini yerleri insanlar tasarladığı için tasarımın ve içeriğin insanları etkilemek için biraz fazla abartılı olduğu belirtilmiştir. Arroyo ve ark. [58] sanal dünyalarda hareket kabiliyetine sahip avatarların kullanım olanaklarını araştırmışlar, bulanık denetleyicileri optimize etmek için evrimsel hesaplama kullanan model önermişlerdir. Sanal dünyada fazla avatara sahip olmanın gecikmeyi artırdığı ve deney yapmayı imkânsız hale getirdiği vurgulanmıştır. Sonuçta önerilen modelin fazla kullanıcı sayısını önemli ölçüde azaltarak avatar mobilite kontrolünü önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir.

Terrace ve ark. [59] sanal dünyalarda büyük sahneleri görüntüleme istemcilerden kaynaklı oluşabilecek görüntü kalitesi kayıplarını en aza indiren otomatik, denetimsiz bir dönüştürme süreci tasarımı sunmuşlardır. Ortaya çıkan aşamalı format, müşterilerin modeli hızlı bir şekilde görüntülemesine olanak tanıyan bir temel ağ ve istendiği gibi ek ayrıntı akışı için aşamalı bir bölüm içerir. Açık bir sanal dünya platformu olan Sirikata platformunda bu yönteminin kullanılarak 700'den fazla modeli işlendiği belirtilmiştir. Ayiter [60] metaverse sanal dünyalarında tipografik tasarım mekanizmaları aracılığıyla metinsel içeriğin yaratılmasını ve görselleştirilmesini araştırmıştır. Bu tür ortamlarda okunabilirliğin, genellikle metin ve tipografinin bulmaca vb. gibi eğlenceli bir araç olarak veya içeriğin anlaşılması amaçlanan görsel yapılar olarak kullanılmasıyla sağlanabileceği, böylece oyun tarzında yüksek katılım ve merak meydana getireceği belirtilmiştir. Kim ve ark. [61] sanal dünyalarda kullanıcıların sanal topluluklar ve avatarlarla özdeşleşmelerinin etkilerini araştırmışlar, kullanıcının diğer topluluk üyelerine olan güvenini oluşturduğu bir model önermişlerdir. Sonuçlar sanal dünyaların henüz kullanıcıların toplu etkinliklerini ve 3B sanal dünyalarda toplu eğitimlerini canlandırmadığını göstermektedir. Sanal hizmetlerin kullanımını kolaylaştırmak için, sanal ürün üreticilerin, kullanıcıların toplu faaliyetlerini teşvik edebilecek bazı pazarlama stratejileri veya teknolojileri benimsemiş gerektiği vurgulanmıştır. Parsons ve ark. [62] sanal dünyaların nöropsikolojik değerlendirmeler için kullanılmasının faydaları, sınırları ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar üzerine bir araştırma yapmışlardır. Nöropsikolojik değerlendirmenin, duygusal ve bilişsel bozuklukların tedavisinin güvenilirliği, sanal dünyalarda algısal ortamın daha iyi kontrolü, daha tutarlı uyarı sunumu ve daha kesin ve doğru puanlama ile artırılabilirliği vurgulanmıştır. Sanal dünyaların ayrıca, daha spesifik bilişsel alanların tanımlanmasına izin vererek, ayrı davranışsal tepkilerin arttırılması yoluyla nörobilişsel ölçümlerin geçerliliğini artırabileceği, biliş ve duygunun ekolojik olarak daha geçerli durumlarda değerlendirilmesine ve tedavi edilmesine izin verebileceği belirtilmiştir. Chandra ve ark. [63] sanal dünyada girişimciliğin etkilerini ve sanal dünyadaki girişimcilik faaliyetlerinin gerçek dünya ile karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapmışlar ve sanal dünyaların daha fazla fırsat yarattığını öne sürmüşlerdir. Sonuçlar, kullanıcı yenilikçilerinin ve kullanıcı girişimcilerin sanal hayatta kat ettikleri yolların, gerçek hayattakilere büyük ölçüde benzediğini göstermiştir. Ayrıca sanal bir dünya olarak Second Life'in gerçek dünyada girişimci eylemlere yol açan fırsatların yanı sıra Second Life'ta daha fazla fırsat yarattığını öne sürmüşlerdir.

Gadalla ve ark. [64] metaverse ortamındaki sanal mağazacılık ile web tabanlı çevrimiçi mağazacılık sistemlerinin hizmet kalitelerini karşılaştırmış ve metaverse mağazacılığı için hizmet kalitesini belirleyen kavramları sunmuşlardır. Sonuçta metaverse mağazacılığının hizmet kalitesinin web tabanlı mağazacılıktan farklı olduğunu, metaverse mağazacılığının kullanıcılara insan teması, duygusal ifade ve sanal deneme gibi metaverse platformlara özgü özellikler sağladığını belirtmişlerdir. Dionisio ve ark. [65] sanal dünyaların mevcut durumlarını incelemişler, etkili bir insan sosyokültürel etkileşimi sağlayan Metaverse ortamlarının geliştirilmesi için ihtiyaç duyulan gelişmeleri özetlemişlerdir. Metaverse platformların gerçekçilik, her yerde bulunabilirlik, birlikte çalışabilirlik ve ölçeklenebilirlik özelliklerine sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Rehm ve ark. [66] sanal dünyadaki gelişmeleri, metaverse ortamında teknolojik yenilikler ile dijital iş uygulamalarının ilişkilendirilmesini araştırmışlardır. Teknolojik yeniliklerden yola çıkarak, yüksek katma değerli uygulamalar için birleştirici bir platform ve tasarım alanı olarak hizmet veren bir metaverse ortamına ihtiyaç olduğunu öngörmüşlerdir. Metaverse ortamının yeni nesil siber fiziksel sistemlerde yüksek katma değerli uygulamalar oluşturmak ve insan merkezli yaklaşımları kullanmak için önemli bir fırsat sunduğunu belirtmişlerdir. Berger ve ark. [67] sanal dünyalarda etkileşimsel mimari tasarım ve mekânsal konumlandırmayı analiz etmişler, etkileşimde bulunan kullanıcıların fiziksel yaşam ve sanal yaşam

arasındaki farklarla nasıl başa çıktıklarını değerlendirmişlerdir. Sanal yaşamdaki uzayın, fiziksel yaşamdaki uzayın birçok yönünü taklit ettiğini, ancak belirli iletişim biçimlerini mümkün kılan fiziksel yaşamın sağladığı bazı olanakların sanal dünyalarda daha zor olduğunu belirtmişlerdir. Girvan ve ark. [68] sanal dünyaların tanımı için yeni bir çerçeve sunmuşlar, sanal dünyanın ne olduğunu, sanal dünyada kullanıcı deneyimini, etkileşimleri ve sanal dünyaların teknik özelliklerini tartışmışlardır. Sanal dünyaları, avatarlar olarak temsil edilen sakinlerinin yaşadığı ve şekillendirdiği ortak, simüle edilmiş mekânlar olarak tanımlamışlardır. Bu avatarların, kullanıcılar hareket ettikçe, nesnelere etkileşime girdikçe bu alanla ilgili kullanıcı deneyimlerine aracılık ettiğini belirtmişlerdir.

Zhou ve ark. [69] sanal dünyalarda mülkiyet hakları, gelir üretimi ve sanal dünyada mülk sahibi olma üzerine bir araştırma yapmışlardır. Mevcut ortamda, düzenleyici çerçeveler, platform sahipleri ve kullanıcı yenilikçileri arasındaki gerilimlerle başa çıkmak için yetersiz donanıma sahip olduğunu, içerik sahipliğini platformdan ayırma girişimlerinin zor olduğu ve sanal dünyalar için mevcut yönetim modellerinin, platformun mülkiyet çıkarlarını büyük ölçüde destekleyerek diğer rakip mülkiyet çıkarlarını desteklemediğini belirtmişlerdir. Nevelsteen [70] sanal dünyanın ve tüm temel bileşenlerini ayrıntılı bir şekilde tanımlamış ve sanal dünyada uygulanan teknolojileri sınıflandırmıştır. Sonuç olarak sanal bir dünya uygulayan teknolojileri sınıflandırmak için temellendirilmiş teoriyi kullanmadaki yeniliğin, yeni bir teknolojinin ortaya çıkması durumunda ele alınabileceğini, yeni teknolojinin mevcut teoriye meydan okuması durumunda, önerilen teoriye özellikler eklenebileceğini ve tanımın güncellenebileceğini belirtmişlerdir. Ryskeldiev ve ark. [71] sanal dünyalar için merkezi olmayan blokzincir tabanlı bir sistem modeli ve sistemin karma gerçeklik uygulamalarına entegrasyonunu önermişler, yaklaşımlarının faydalarını ve sınırlamalarını tartışmışlardır. Mevcut uygulamanın basit olmasına ve spam saldırılarına karşı ek koruma katmanları sağlamasa da, merkezi olmayan eşler arası araştırma ilgisini vurgulamak için yeterli olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 3. Araştırma geliştirme kapsamında yapılan çalışmalar (Studies carried out within the scope of research and development)

Yazar Bilgisi	Yıl	Tür
Schroeder ve ark. [43]	2001	Makale
Jaynes ve ark. [44]	2003	Konferans
Jaynes ve ark. [45]	2005	Makale
Cagnina ve ark. [46]	2005	Konferans
Kumar ve ark. [47]	2008	Makale
Papagiannidis ve ark. [48]	2008	Makale
Chesney ve ark. [49]	2009	Makale
Bourlakis ve ark. [50]	2009	Makale
Schlemmer ve ark. [51]	2009	Makale
Davis ve ark. [52]	2009	Makale
Ayiter [53]	2011	Makale
Van der Land ve ark. [54]	2011	Makale
Lee ve ark. [55]	2011	Makale
Owens ve ark. [56]	2011	Makale
Massimo [57]	2011	Makale
Arroyo ve ark. [58]	2011	Makale
Terrace ve ark. [59]	2012	Konferans
Ayiter [60]	2012	Konferans
Kim ve ark. [61]	2012	Makale
Parsons ve ark. [62]	2012	Makale
Chandra ve ark. [63]	2012	Makale
Gadalla ve ark. [64]	2013	Makale
Dionisio ve ark. [65]	2013	Makale
Rehm ve ark. [66]	2016	Makale
Berger ve ark. [67]	2016	Makale
Girvan ve ark. [68]	2018	Makale
Zhou ve ark. [69]	2018	Makale
Nevelsteen [70]	2018	Makale
Ryskeldiev ve ark. [71]	2018	Konferans
Jot ve ark. [72]	2021	Konferans
Bolter ve ark. [73]	2021	Konferans
Park ve ark [74]	2022	Makale

Jot ve ark. [72] metaverse ortamlarında işitsel ve görsel ile sanal ve gerçek uyumu sağlamak için çift kulaklı parametrik 6 serbestlik dereceli nesne tabanlı etkileşimli ses motorları tasarımına yönelik bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen çözümün, iyi kurulmuş ve kapsamlı bir şekilde uygulanan etkileşimli ses standartlarını temel aldığı ve Magic Leap'in artırılmış gerçeklik işletim sisteminde temel bir yazılım bileşeni olarak uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Bolter ve ark. [73] artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik üzerine bir çalışma yapmışlar ve bunlara karşılık gelen mitlerinin her birinin, Bazin'in sinema mitinin varyasyonlarını veya iyileştirmelerini temsil ettiğini tartışmışlardır. AR için, yaşanmış dünyamızın tamamen dijital olarak yeniden yapılandırılmasını, VR için içinde yaşadığımız dünyaya benzeyen veya benzemeyen bir dünyanın mükemmel 3 boyutlu yanılması olduğunu belirtmişlerdir. Park ve ark [74] metaverse ortamları gerçekleştirmek için gerekli kavramları ve temel teknikleri, donanım, yazılım ve içerik olarak ayırmış, kullanıcı etkileşimi ve uygulama yaklaşımları üzerinden analiz etmiştir. Sonuç olarak, sürükleyici Metaverse'i sosyal etkiler, kısıtlamalar ve açık zorluklar olarak uygulamaya yönelik sınırlamaları ve yönergeleri özetlemişlerdir. Araştırma ve geliştirme üzerine yapılan önceki çalışmalara ait bilgiler Tablo 3'de sunulmuştur.

2.3. Turizm ve sanat üzerine yapılan çalışmalar (Studies on tourism and art)

Hazan [75] sanal dünyalarda çeşitli kültür kurumlarının yapmış oldukları sanal müze ve sergi çalışmalarını incelemiş, sanal dünyada sosyal etkileşim ve telif hakkı korunması konularını araştırmıştır. Çalışmada müzelerin, insanları müze çatısı altında bir araya getirme potansiyelleri için 3B alanını değerlendirmelerinin de tıpkı müze web sitelerinin müze aktivitelerine ilgi uyandırması kadar etkili olacağı belirtilmiştir. Böylece yeni tür (dijital) ziyaretçilerin, müzelerin sanal fiziksel kapılarından içeri girerek hem bilgi sahibi olabileceği hem de müze heyecanını birebir yaşayabileceği belirtilmiştir. Tasa ve ark [76] metaverse'in tarihsel evrimini ve sanat ile metaverse arasındaki dinamik ve dönüştürücü ilişkiyi araştırmışlardır. Araştırma sonucunda meta-sanat kavramının metaverse için yerel sanat biçimi olduğu ve metaverse bağlamında yaratılabilmesi için; kaynak ve işbirliği açısından açık, performatif, zamansal ve birbirine bağlı olması gerektiği belirtilmiştir. Bu yapılanma ile gerçekleştirilen meta-sanatın daha sürdürülebilir olacağı ve sanat camiası için de yeni tartışmaların ve açılımların önünü açacağı belirtilmiştir. Ando ve ark. [77] metaverse ortamında yapılan müze ve sergi gezisinden, ziyaretçilerin görüntülediği sergilerden hareket günlüklerinin çıkarımı üzerine çalışmışlardır. Çalışma, ziyaretçilerin sergi ürünü ile ziyaretçi arasındaki mesafe ve açıları hesaplayarak sergi ziyareti ve hareket durum tespitini iyileştirmeyi amaçlayan teknik bir çalışma olarak kurgulanmıştır. Çalışmada önerilen yöntem, %10,3 ile %4,6 oranlarda iyileştirmeler sağlamıştır.

Sequeira ve ark. [78] second life ve opensim gibi sanal dünyalarda sanal arkeoloji üzerine yapılan çalışmaları incelemişler ve yeni yaklaşımları değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, sanal platformlardaki sümilasyonların eğitim ve öğretim için hâlihazırda başarılı olarak kullanıldıklarını ve bunların sanal arkeoloji alanına da dâhil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Loong [79] sanal dünyalarda oyunlaştırılmış turizm aracılığıyla hedefler ve imgeler arasında kavramsal ve metodolojik bir bağlantı kuran bir oyunlaştırma çalışması yapmışlardır. Araştırmacılar, oyunlaştırılmış turizmin ekonomik katkılarına odaklanmış ve bu turizmin hedeflerinin belirlenebilirliğine ve hesaplanabilirliğine vurgu yapmışlardır. Turizmin oyunlaştırılması gerektiğini söyleyerek, müzeleştirme başlanması ve kültürel miras alanlarının artan metalaşması kapsamında oyunlaştırma yaklaşımın, turizm hedeflerini belirlemede bir umut ışığı olduğunu belirtmişlerdir. Choi ve ark. [80] sanal dünyalarda ziyaretçiler ve görüntüleme aygıtları yardımı ile kullanıcıların etkileşime girebileceği, artırılmış gerçeklik tabanlı bir müze ve sergi çalışması yapmışlardır. Bu uygulama çalışmasında ayrıca kullanıcı deneyimi sağlamak için hikâye anlatımı da gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın amacı, artırılmış gerçeklik ve sanal dünya uygulamalarını hibrit bir şekilde sunarak metaverse ortamında sergi alışkanlığını geliştirmek olarak belirtilmiştir. Turizm ve sanat alanında yapılan önceki çalışmalara ait bilgiler Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Turizm ve sanat üzerine yapılan çalışmalar (Studies on tourism and art)

Yazar Bilgisi	Yıl	Tür
Hazan [75]	2010	Makale
Tasa ve ark [76]	2010	Makale
Ando ve ark. [77]	2013	Konferans
Sequeira ve ark. [78]	2013	Makale
Loong [79]	2014	Makale
Choi ve ark. [80]	2017	Makale

2.4. İletişim üzerine yapılan çalışmalar (Studies on communication)

Hughes [81] sanal dünyalarda uzaktan kurulan iletişim yöntemlerinin, gerçek ve karma dünya üzerinde iletişime etkisini araştırmıştır. Günümüzde teknolojiye yaşanan gelişmelerle birlikte artık iletişimin klavye ve monitör ötesini geçtiğini belirten araştırmacı, internetin sunduğu özgürlük sayesinde bilgi işlem normlarında ve bilginin organizesinde de artık kuralların yeniden yazılmaya başladığını belirtmiştir. Nishihara ve ark. [82] sanal dünyalarda avatar kullanılarak yapılan sohbetlerde avatarlar arası mesafeye odaklanarak, avatar kullanarak rahat bir iletişim sağlamak için sanal dünyada kişisel alanı araştırmışlardır. Çalışmada, yüz yüze iletişim sırasında sözlü bilgilerin yanı sıra kişilerarası mesafe ve yüz ifadesi gibi sözel olmayan bilgilerin de konuşmacılar tarafından sorunsuz bir şekilde iletişim kurmak için kullanıldığı ancak yüz yüze olmayan iletişimde sözlü olmayan bilgi alışverişinin sınırlı olduğu belirtilmiştir. Bu sınırlılığı gidermek için gerçekleştirilen uygulama sonucunda, sanal alandaki kişisel alan eğilimi, gerçek uzaydaki kişisel alanla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak yüz yüze iletişimde kişisel alan karşı tarafla olan ilişkiye göre değişmekle birlikte çalışmada önerilen sistem kullanıldığında ise sanal ortamda değişme eğilimi göstermemiştir.

Park ve ark. [83] sanal dünyalarda insanların avatarlar arası iletişimlerinde kişiselleştirilmiş avatar kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda katılımcılar kendi ifadelerini somutlaştıran ve kişiselleştirilen avatarların kendilerine daha fazla benzediklerini ve bu avatarlara daha yakın hissettiklerini belirtmişlerdir. Çalışmada tasarımcılar için kullanıcının kimliğini doğru bir şekilde temsil etmek ve kullanıcıların avatarlarıyla ilişki kurmasına yardımcı olmak amacıyla, insanların bireyselleştirilmiş sanal avatarları nasıl algıladıkları konusunda öneriler getirilmiştir. İletişim üzerine yapılan önceki çalışmalara ait bilgiler Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. İletişim üzerine yapılan çalışmalar (Studies on communication)

Yazar Bilgisi	Yıl	Tür
Hughes [81]	2012	Makale
Nishihara ve ark. [82]	2015	Makale
Park ve ark. [83]	2021	Makale

2.5. Diğer çalışmalar (Other studies)

Han ve ark. [84] sanal dünyalarda 3 boyutlu arayüze sahip akıllı ev otomasyon sistemi geliştirmişler ve kontrolör amaçlı bir ev sunucusu kullanmışlardır. Çalışmada sanal ve gerçek dünya arasında veri alışverişini sağlamak için bir standart oluşturmak adına bir kontrol protokolü hazırlanmıştır. Araştırmacılar bu çalışma sayesinde, kullanıcıların 3B teknolojisi ve internet yardımıyla zamana ve mekâna bağımlı olmaksızın gerçekçi bir tasarımla çalışan sistem üzerinden ev cihazlarını kontrol edebileceklerini ve çalışmalarını izleyebileceklerini belirtmişlerdir.

Kim ve ark. [85] kullanıcının çevresel değişikliklere verdiği tepkileri sanal dünyaya aktarmak için, gerçek dünyadan alınan verileri ile sanal dünyaya aktarmışlar ve gerçekçi bir sanal ortam tasarlamışlardır. Araştırmacılar çalışmada tasarlanan sistemin değiştirilebilir ve genişletilebilir olduğunu ayrıca farklı temel sensörlerden ve sanal dünyalardan da bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

Han ve ark. [86] sanal dünyalar kullanılarak mental zihinsel hastalık tedavisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, hastaların çevrimiçi tanı ve tedaviye aşinalıklarını azaltmaları, daha aktif bir psikoterapi atmosferi sunmaları ve hastaların tedavi sürecindeki rahatsızlıklarını azaltmalarına yardımcı olabilecek metaverse tabanlı bir dijital tanı ve tedavi alanı oluşturulması amaçlanmıştır. Ayrıca, meta veri tabanına dayalı olarak, daha akıllı ve görsel olarak daha gerçekçi bir dijital terapi ortamı hazırlanması da amaçlanmıştır. Araştırmacılar çalışmanın gelecekte bir Metaverse ortamında dijital terapi doktorlarına ve hastalarına daha iyi hizmet vermesine katkı sağlayacağını belirtmişlerdir.

Fang ve ark. [87] metaverse ortamlar için karakter yapımını araştırmışlardır. Çalışmada, dakikalar içinde tamamen donatılmış, saç ve kıyafeti eksiksiz, foto-gerçekçi bir dijital karakter yaratma için yeni bir tarayıcı tabanlı uygulama geliştirilmiştir. Metahuman Creator ismi verilen bu uygulama dijital avatarları sezgisel bir iş akışı aracılığıyla yaparak daha gerçekçi tasarımlar oluşturmak için geliştirilmiştir. Metaverse alanında yapılan diğer çalışmalara ait bilgiler Tablo 6’de sunulmuştur.

Damar [88], 1990-2021 yılları arasında Web of Science veri tabanında metaverse üzerine yapılan çalışmaları incelemiş ve çalışmaların bibliyometrik bir değerlendirmesini sunmuştur. Sonuç olarak son zamanlarda popüler olan metaverse için literatürde az sayıda çalışmanın olduğunu, son aylarda çalışma sayılarının arttığını belirtmiştir. Ayrıca metaverse teknolojisinin sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik teknolojileri ile birlikte yoğun bir şekilde işlendiğini, eğitim sektörü ve dijital pazarlama alanlarının alana ilgi gösterdiğini vurgulamıştır.

Tablo 6. Diğer çalışmalar (Other studies)

Yazar Bilgisi	Yıl	Tür
Han ve ark. [84]	2010	Makale
Kim ve ark. [85]	2013	Makale
Han ve ark. [86]	2021	Konferans
Fang ve ark. [87]	2021	Konferans
Damar [88]	2021	Makale

3. Metaverse Teknolojileri ve Mimarisi (Metaverse Technologies and Architecture)

Bilişim teknolojileri alanında internet ve sunucu teknolojileri, bulut bilişim ve uç bilişim teknolojileri, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik teknolojileri, kripto para ve blokzincir teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler ile birlikte kişisel bilgisayara sahip olma oranlarında artış yaşanmıştır, çevrimiçi oyun ve sanal dünya literatürü ile birlikte metaverse kavramını hayatımıza girmiştir [89]. Metaverse platformları çevrimiçi sistemlerde gerçek zamanlı çalışan bir altyapı üzerine kurulur. İnternet üzerinden, çevrimiçi sunucularda inşa edilen metaverse platformlarına, kullanıcılar istemci olarak erişir ve bir dijital avatar yardımı ile internet üzerinde yaratılmış olan sanal bir dünya ile etkileşime girer. Çeşitli firmalara ait farklı platformlar bulunmaktadır. Temelde metaverse platformları ve arkaplanda kullanılan teknolojik alt yapı incelendiğinde, metaverse bileşenlerinin her birinin birbirine bağlı olduğu görülmektedir. Metaverse platformlarını oluşturan teknolojik bileşenler bu bölümde açıklanmıştır.

3.1. Metaverse bileşenleri (Metaverse components)

3.1.1. Genişletilmiş gerçeklik (Extended reality)

Genişletilmiş gerçeklik (XR) teknolojisi, bilişim teknolojileri alanındaki en belirgin yeni gelişmelerden biridir ve insanların kısmen veya tamamen oluşturulan dijital içerik ile etkileşime girdiği sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve karma gerçeklik teknolojilerini kapsayan bir şemsiye bir terimdir [4]. Genişletilmiş gerçeklik, gerçek dünya ve sanal dünyayı birleştirerek insanların makine ile etkileşime girebildiği bir dünya deneyimi sağlar. Hızla gelişen sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve metaverse ile farklı bir boyut bulan genişletilmiş gerçeklik teknolojisi, ilerleyen zaman içinde hayatımızın her noktasında yer alacak olan, kullanıcıya gerçeklik ile duyguları arasında etkileşim kurmasını sağlayan simüle edilmiş sanal bir dünya sunan metaverse dünyaları için önemli ve kritik bir noktada bulunmaktadır [90].

Metaverse platformları, sanal gerçeklik platformları, çok oyunculu çevrimiçi video oyunları, açık oyun dünyaları ve artırılmış gerçeklik çalışma alanlarıyla uyumlu olabileceği bir yapım aşamasındadır [91]. Bilgi teknolojilerindeki bu yenilikler ile metaverse ortamlarda daha önce yapmadığımız faaliyetleri yapmamıza, daha verimli olmamıza, bulunmadığımız mekânlarda olmamıza imkân sağlar [92]. Metaverse dünyalarının gelecekteki en önemli bileşenlerinden biri olacak olan genişletilmiş gerçeklik terimini anlayabilmek için artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve karma gerçeklik kavramlarını ve aralarındaki farkları bilmek önemlidir.

3.1.2. Artırılmış gerçeklik (Augmented reality)

Artırılmış Gerçeklik, gerçek dünya görüntüleri ve nesnelere ile görsel, işitsel, dokunsal ve koku alma gibi dijital platformlarda tasarlanmış algısal verileri birleştiren sanal bir teknolojidir [4], [38], [39]. Günümüzde mobil telefonlar ile kullanımı yaygınlaşmış, erişimi kolay ve eğitim, eğlence, reklam, pazarlama vb. olmak üzere her alanda etkin olarak kullanılan bir teknolojidir. Artırılmış gerçeklikte

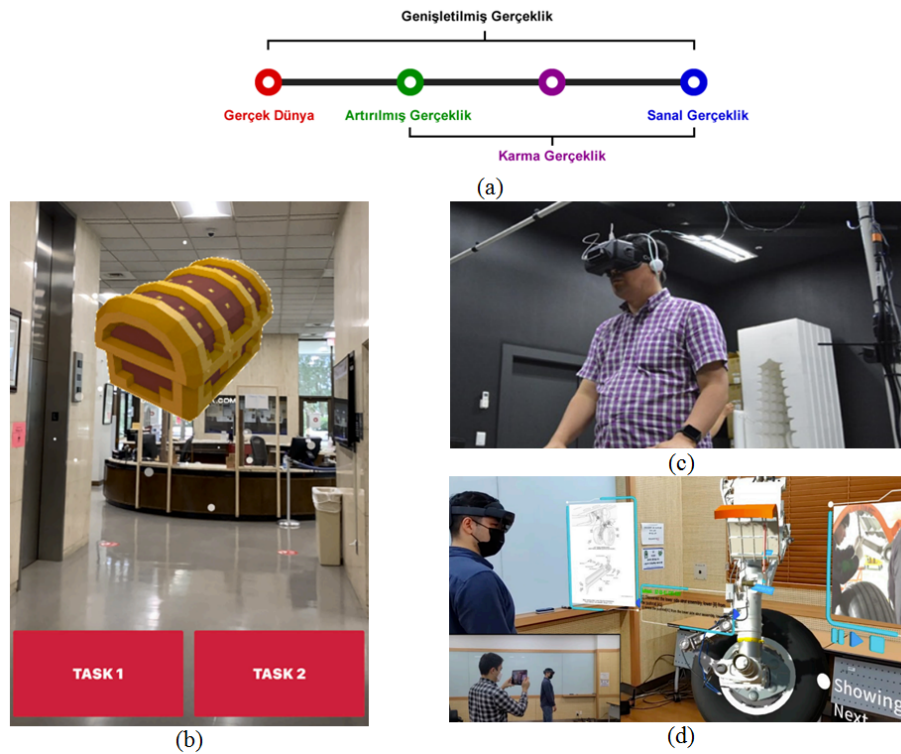
kullanıcı gerçek dünyadaki bağlantısını koparmamış olur, etrafındaki sesleri duyabilir ve çevresini gözlemleyebilir.

3.1.3. Sanal gerçeklik (Virtual reality)

Kullanıcıların bir başlık (Head Mounted Display-HMD) kullanarak, 3 boyutlu dijital olarak tasarlanmış kurgusal sanal bir dünyayı deneyimlemesine imkân sağlayan bir teknolojidir [80], [85]. Sanal gerçeklikte kullanıcı fiziki olarak gerçek dünyada olsa da, kulaklık ve başlık kullandığı için etrafındaki sesleri duyamaz ve çevresini gözlemleyemez, bu yüzden gerçek dünyadan tamamen ayrılmış olur [4].

3.1.4. Karma gerçeklik (Mixed reality)

Karma Gerçeklik, insanların fiziksel dünyanın içinde akıllı gözlükler ve başa takılan cihazlar kullandığı, dijital alanda oluşturulan sanal nesnelerin ile gerçek ortamdaki nesnelerin bir araya getirildiği ve birbiriyle etkileşime girdiği, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçekliğin bir karışımıdır [4], [41], [80]. Genişletilmiş gerçeklik diyagramı ve gerçeklik türlerine ait görüntüler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Genişletilmiş gerçeklik diyagramı, (b) Artırılmış gerçeklik örnek uygulama görüntüsü [38], (c) Sanal gerçeklik örnek uygulama görüntüsü [80], (d) Karma gerçeklik örnek uygulama görüntüsü [41]

((a) Augmented reality diagram, (b) Augmented reality sample application image, (c) Virtual reality sample application image, (d) Mixed reality sample application image)

Şekil 2.a'daki diyagramda gösterildiği gibi XR, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR) ve karma gerçeklik (MR) teknolojilerinin gerçek dünyaya uyarlaması ve bütünü kapsayan bir teknolojidir. Metaverse konsepti içerisinde gerçek dünya ile sanal dünyaların bir arada bulunması, diğer bir deyişle gerçek dünyadaki bir kullanıcının sanal dünyadaki bir ortamda aktiviteler gerçekleştirilmesi üzerine uygulamalar geliştirildiği için, XR teknolojileri metaverse için çok önemli bir teknoloji olarak açıklanabilir. Şekil 2.b'de gösterilen AR teknolojisi, gittikçe yaygınlaşan kullanım alanlarına sahiptir. Metaverse için de önemli bileşenlerden birisidir. AR sayesinde gerçek dünya üzerinde sanal katmanlar oluşturulabilir ve eğitimden pazarlamaya, oyun dünyasından iş dünyasına kadar pek çok farklı alanda metaverse uygulamaları gerçekleştirilebilir. Gerçekçi metaverse uygulamaları için AR sayesinde görüntüler, sesler ve metinler gibi veriler etkili kullanılabilir ve farklı alanlarda daha verimli bir metaverse ortamı yaratılabilir. Şekil 2.c'de gösterilen VR teknolojisi ise tamamen dijital dünyalar yaratmak için metaverse'in çok önemli bir bileşenidir. Sanal gerçeklik sayesinde gerçek dünyadaki ev ortamları, iş ortamları, sosyal ortamlar, spor ortamları vs. dijital evrende tasarlanarak modellenilebilir. Fiziki ortamların modellenmesinin mümkün olduğu kadar, tamamen tasarım ürünü ortamlar da modellenilebilir. Böylece metaverse evrenini mümkün kılan tüm tasarımların önü açılmış olur. Son

olarak Şekil 2.d'de gösterilen MR teknolojisi sayesinde çok amaçlı uygulamalar gerçekleştirilebilir. Metaverse uygulamalarının hem sanal hem de fiziki ortamlarda bileşenleri olacağını unutmamak gerekir. Farklı alanlarda gerçekleştirilecek olan farklı uygulamaların her birinde ihtiyaç duyulabilecek olan AR ve VR teknolojilerinin ayrı ayrı veya birlikte kullanılması için MR uygulamalarının da öneminin bir göstergesi durumundadır.

3.1.5. Yapay zekâ (Artificial intelligence)

Yapay zekâ, insan deneyimlerden faydalanarak, büyük miktarda veri kullanımı ile örüntü tanıma ve öğrenme yoluyla makinelerin öğrenmesini ve insan zekâsını taklit etmesini sağlayan bir teknolojidir [93]–[95]. Son yıllarda, doğal dil işleme, bilgisayarla görme, hareket tanıma, karar verme, tıbbi tanı, siber güvenlik gibi alanlarda makine öğrenmesi, derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme uygulamaları ile yüksek başarılı sonuçlar elde etmiştir [96]–[100]. Metaverse platformlarında AR/VR, blok zinciri ve ağ oluşturma gibi teknolojilerin yapay zekâ ile kullanımı, metaverse platformlarının güvenli ve ölçeklenebilir olmasını sağlayacağı için insanları metaverse platformlarını kullanmalarını için motive etmektedir [101], [102].

3.1.6. Blokzincir teknolojisi (Blockchain technology)

Blokzincir teknolojisi, merkezi bir otoriteye sahip olmayan, kriptografi teknikleri kullanılarak dijital varlıkları, dijital para birimlerini, bir iş ağında birbirine bağlanan kayıtlı işlemlerin ve izlenen varlıkların bir listesini içeren, yalnızca izinli ağ üyeleri tarafından erişilebilen, değişmez ve aşılmaz, merkezi olmayan bir dijital defter olarak tanımlanır [101], [102]. Metaverse platformlarında, blokzinciri tabanlı kripto para birimlerinin ve takas edilemeyen jetonların (NFT'ler) kullanımı ile dijital varlıkların, sanal ekonomi işlemlerinin ve mimarilerinin, metaverse dünyasında daha güvenli ve güvenilir olarak gerçekleşmesi sağlanır [91], [95].

3.1.7. Nesnelerin interneti (internet of things)

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT), kablosuz internet ve giyilebilir teknolojilerin gelişimi ile birlikte, elle veri girişine gerek olmadan, sensörler, kameralar vb. algılayıcı cihazlar ile toplanan verilerin toplandığı, adreslenebilir makinelerin kendi aralarında toplanan veriler ile internet üzerinden iletişim yaptığı ve karar verdiği bir ağ yapısıdır [103]–[105]. Metaverse platformlarında, fiziksel dünyadan veri toplayarak, sanal ve fiziksel dünya arasındaki bağlantının kurulması, IoT cihazları kullanımı ile sağlanmaktadır [106]. Bu sayede gerçek zamanlı simülasyonların üretilmesi ile daha etkili bir metaverse dünyası oluşturulur.

3.1.8. Web 3.0 teknolojisi (Web 3.0 technology)

Web 3.0 teknolojisi, yapay zekâ ile geliştirilmiş, makine öğrenme yöntemleri ile kendini geliştiren, merkezi olmayan ve kullanıcı gizliliğini koruyan, blok zincir ve uç bilişim teknolojilerini kullanan üçüncü nesil internet hizmetleridir [107]. Uç bilişim, uzak konumlarda bulunan cihazları, veri kaynaklarına yakınlaştıran, veri işlemeyi ve veri depolamayı sunucunun yanında işlemlerini sağlayan, bu sayede işlem sürecini ve veri trafiğini azaltan bir teknolojidir [89]. Web nesilleri incelendiği zaman, Web 1.0, düşük bant genişliğinde salt okunur olarak adlandırılacak bir internet hizmetidir. Web 2.0 ise içerik üreticileri ve kullanıcılar arasında etkileşimin sağlandığı, kullanıcıların aracı platformlar ile içeriğe katkıda bulunduğu internet hizmetleridir. Web 3.0 ile merkezi olmayan blok zinciri protokolünü etkinleştirerek kullanıcılara doğrudan işbirliği yapma ve işlem yapma yeteneği veren sistemler geliştirilmiştir [107], [108].

Metaverse ve web 3.0 terimleri insanlar tarafından aynı olarak anlaşılrsa da farklı terimleri ifade etmektedir. Metaverse platformlarının amacı kullanıcıların 3 boyutlu arkadaşlar, nesnelere, yerler ile etkileşime girebilecekleri, sağlık, oyun, film, konser, eğlence, sosyal platformlar, eğitim, sanal eğitim vb. faaliyetlere katılabilecekleri ve zaman geçirebilecekleri sosyal bir sanal dünya oluşturmaktır [109]. Web 3.0 teknolojisinde ise amaç demokratik ve merkezî olmayan bir internet ortamı ile platform üreticilerinin değil kullanıcıların içerik geliştirmesinee, sahibi olmasında, kendi belirledikleri bir ücret üzerinden satın alıp satabilmesine imkan sağlamaktır [106]. Bu açıdan baktığımız zaman, metaverse platformlarındaki bağlantının temelini web 3.0 teknolojisinin oluşturduğu görülmektedir [110]. İnsanların bu terimleri karıştırmalarının ya da aynı olarak anlamasının altında yatan sebeplerden birisi

de web 3.0 teknolojisinin desteklediği blok zincir, kripto para birimi ve NFT'lerin, metaverse platformları tarafından iş, oyun, eğlence, sosyalleşme ve öğrenme için de kullanılmasıdır [111]. Sonuç olarak birer cümle ile özetlemek istersek; metaverse insanların dijital bir platformda özgürce zaman geçirdikleri sanal bir dünyadır, web 3.0 ile kullanıcıların özgürce zaman geçirecekleri metaverse platformlara bağlanmak için kullanacakları merkezi olmayan ağ sistemidir.

3.2. Metaverse benzeri platformların öncül örnekleri (Premise examples of metaverse-like platforms)

Metaverse platformları, geliştiricilerin metaverse bileşenlerini kullanarak internet üzerinden çevrimiçi tasarladıkları 3 boyutlu sanal platformlardır. Kullanıcılar farklı hizmetler için tasarlanmış bu platformlarda gerçek dünyada olduğu gibi oyun oynayabilir, arsa alıp satabilir, dijital nesne yaratabilir, kendi ürünlerini satabilir, eğitim alabilir, sosyal aktivitelere katılabilir. Metaverse terimi hayatımıza yeni girmiş gibi görünse de yıllardır insanların aktif olarak kullandıkları birçok metaverse platformu mevcuttur ancak bu platformlar oyun oynamak, ürün pazarlamak vs. gibi tekil amaçlar için tasarlanmıştır. Bu platformlar özellikle son yıllarda daha popüler olmuştur. Bu bölümde kullanılmakta olan metaverse benzeri platformların bazı öncülleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3.2.1. Second life

2003 yılında Linden Araştırma Merkezi tarafından piyasaya sürülen, 3 boyutlu karakterlerin olduğu, çevrimiçi çalışan, açık kaynaklı ve görsel sosyal bir dünya platformudur [112]. Kullanıcılar kendilerine bir avatar yaratarak Second Life platformuna ücretsiz giriş yaparlar. Kullanıcılar gerçek hayatta olduğu gibi platform içerisinde arkadaşlar edinebilir, çevrimiçi mesajlaşma sayesinde sosyal bir ortama sahip olabilir, gayrimenkul alıp satabilir, tasarım yapabilir, eğitim alabilir ve bu sanal dünyada kazanılan paraları gerçeğe dönüştürebilirler.

3.2.2. SandBox

2011 yılında Pixowl oyun firması tarafından geliştirilen blok zincir temelli, oyunculara kendi dünyalarını inşa etmelerine ve oynayarak para kazanmalarına olanak sağlayan merkeziyetsiz bir metaverse oyun platformudur [113]. SandBox metaverse platformu oyuncuların metaverse sistemde kendi oyun ve dijital nesnelere oluşturmalarına, bu nesnelere NFT olarak sahibi olmalarına ve sistemde vakit geçirerek, ürün alıp satarak gelir elde etmelerine olanak sağlamaktadır. Oyuncular çeşitli aracı programlar ile SandBox platformu için 3 boyutlu modeller, nesnelere tasarlayıp, NFT haline getirip oyun içinde pazarlayabilir. Ayrıca kullanıcılar oyun programları ile kendi geliştirdikleri oyunları SandBox platformunda test edebilirler.

3.2.3. DecentraLand

Decentraland, 2015 yılında blokzincir teknolojisi üzerine inşa edilmiş, kullanıcıların oyun içerisinde arazi satın alabildikleri, bu arazi üzerinde kendi dünyalarını inşa edebildikleri ve bundan kâr sağlayabildikleri merkezi olmayan 3 boyutlu sanal dünya platformudur [114]. Oyun içerisinde dijital para olarak MANA adı verilen token kullanılır. Decentraland platformuna yalnızca masaüstü bilgisayarlardan erişim sağlanabiliyor. Mobil cihazlar için erişim imkânı henüz mevcut değildir.

3.2.4. Roblox

Roblox, 2004 yılında kurulmuş bir oyun şirkettir. Roblox çevrimiçi bir oyun platformu ve oyun geliştirme stüdyosudur [115]. Oyuncuların kendi oyunlarını programlamasına ve diğer kullanıcılar tarafından oluşturulan oyunları oynamasına olanak tanır. Roblox'ta Meepcity ve Bloxburg gibi oyunlar, kullanıcıların sanal evler oluşturmalarına ve iş aramak veya sanal dünyada maceralara çıkmak gibi günlük görevleri yerine getirmesine olanak tanır. Roblox metaverse platformunun bir parçası olarak, kullanıcılar dijital avatarlar oluşturabilir, kıyafetler ekleyebilir, evler inşa edebilir, arkadaşlarla sohbet edebilir ve maceralara atılabilir. Kullanıcılar Robux adı verilen sanal para birimi üzerinden oyun içi gelir elde edebilirler.

3.2.5. HyperVerse

HyperVerse, milyonlarca gezegenden oluşan, kullanıcılara dünyanın dört bir yanından sosyalleşmeleri

ve gelir elde etmeleri için oynayabilecekleri merkezi olmayan sanal bir platformdur [116]. HyperVerse içerisinde gezginler olarak da bilinen oyuncular arkadaşlarıyla bağlantı kurabilir, farklı kültürleri ve yaşam tarzlarını deneyimleyebilir, tokenize edilmiş öğeler oluşturabilir, iş kurabilir ve evreni keşfedebilir.

3.2.6. Epic games

1991'de kurulan video oyunu ve yazılım geliştirme şirketi Epic Games, Fortnite'ın, Unreal'ın, Gears of War'un, Shadow Complex'in ve Infinity Blade serisinin yaratıcısıdır [117]. Unreal Engine teknolojisi ile bilgisayarlara, konsollara, mobil cihazlara, artırılmış gerçeklik uygulamalarına, sanal gerçekliğe ve internete üstün görsellik sağlayan etkileşimli deneyimler getirmektedir. Epic Games, kendi metaverse platformunu kurarak, kullanıcıların birbirleriyle ve markalarla iletişim kurmasını, sanal olarak etkileşime girmesini amaçlamaktadır.

3.2.7. NAKAverse

Nakamoto Games firması tarafından duyurulan metaverse platformu olan NAKAverse, merkezi olmayan oyun içi ekonomisine sahip, NAKA isimli para birimi ile kullanıcıların sanal araziler satın almasını ve elinde tutmasını, binalar inşa etmesini, yükseltmesini sağlayan sanal dünya platformudur [118].

3.2.8. Metahero

Metahero, gerçek dünyadaki nesnelere 3 boyutlu bir tarama teknolojisi ile oyunlarda, sanal gerçeklikte, sosyal medyada ve çevrimiçi uygulamalarda kullanılmak üzere gerçekçi 3 boyutlu avatarlar ve sanal öğelere dönüştüren bir teknoloji kullanır [119]. Bu teknoloji ile fiziksel nesnelere sanal dünyaya NFT'ler olarak tanıtılmaktadır.

3.2.9. Star atlas

Star Atlas, blok zincir tabanlı ve merkezi olmayan uzay temalı çok oyunculu bir video oyun platformudur [120]. Kullanıcılar, Star Atlas uzayında şehirler inşa edebilir, belirli bölgeleri yönetmek için merkeziyetsiz otonom organizasyonlar kurabilirler. Kullanıcılar, oyun içerisinde topladıkları NFT özellikli gemiler, mürettebat üyeleri, arazi ve donanım gibi sanal varlıkların ile oyun içinde ve gerçek hayatta kazanç sağlayabilirler.

3.2.10. Oculus

Sanal gerçeklik kaskı ve yazılımı üreten bir teknoloji şirketi olan Oculus firması. 2014 yılında Facebook şimdiki adıyla Meta firması tarafından satın alınmıştır. Meta firması sanal gerçeklik teknolojisini oluşturmayı planladığı metaverse platformunun temeli olarak görüyor [2]. Piyasada en çok satın alınan sanal gerçeklik başlığı Oculus cihazı, son teknoloji ve en çok satan cihaz haline geldi. Yeni teknolojiler için gereken yetenekler Meta firmasında kısmen mevcut olsa da, Oculus'un satın alınması ile metaverse platformlarının teknolojik zorluklarına hazırlanmak için çok önemli bir adım atılmış oldu. Meta firmasının kullanıcıların ve ağ yapısının donanım arayüzünde gerekli yeterliliklere sahip olacağına güvenebileceği anlamına gelmektedir [121].

3.3. Gelecekte metaverse (metaverse in future)

Gerçek hayatın kendisi haline dönüşmeye başlayan metaverse dünyası, gün geçtikçe daha da yaygın kullanılmakta ve farklı alanlara uyarlanmaktadır. Literatür çalışmasında da belirtildiği üzere bu güne kadar özellikle eğitim, oyun ve eğlence teknolojileri, mimari alanlarında yoğun olarak kullanılmaktayken, Covid-19 salgını sürecinde de iş dünyasında metaverse uygulamaları yaygınlaşmaya başlamıştır.

Metaverse uygulamalarının eğitim ortamlarında okul öncesi [122], ilk [123]-[126], orta, lise [39], [127], [128], yükseköğretim [36], [37], [129], [130] ve hatta hayat boyu öğrenme kademelerinin her birinde farklı amaçlarla kullanıldığı görülmektedir. Metaverse teknolojilerinin eğitim ortamlarındaki en önemli katkısı, gerçeklik algısı ile kalıcı öğrenme sağlamasıdır. Farklı araştırmalarda metaverse

teknolojilerinin öğrenci motivasyonlarına katkıları araştırılmıştır. Bu araştırmalarda öğrencilerin, klasik yöntemlere oranla daha başarılı oldukları ve öğretimin amacı olan kalıcı öğrenme sağlanmasına katkı sağladığı görülmüştür [124], [125], [127], [131], [132].

Eğitim ortamlarında yoğunlukla kullanılan metaverse teknolojileri arasında 3 boyutlu öğretim [84], [133], sanal gerçeklik [18], [22], [30], [36], [37], artırılmış gerçeklik [38], [39], [119], [129] ve oyun teknolojileri [17], [39], [42], [134] sayılabilir. Bu teknolojilerle öğrencilerin eğitim öğretim ortamlarına aktif katılımları desteklenmektedir. Yapararak yaşayarak öğrenme, deney ile öğrenme ya da oyun ile öğrenme gibi öğrenme yöntemleri sayesinde öğrencilerin daha etkin ve kalıcı öğrenmesi amaçlanmaktadır. Daha fazla duyuya hitap eden öğretim teknikleriyle daha kalıcı öğrenmeler sağlandığı, farklı araştırmalarda kanıtlandığı için metaverse teknolojileriyle de temel olarak bu husus sağlanmaya çalışılmaktadır. Eğitim öğretim süreçlerinin farklı kademelerinde farklı amaçlarla metaverse teknolojileri kullanılmaktadır. Bu amaçlar fen ve kimya öğretiminden [135]–[137] din öğretimine [138], [139], bilişim teknolojileri eğitiminden [134] sağlık uygulamalarına [140]–[142] kadar çeşitlilik göstermektedir. Yabancı dil eğitimi, tarih, coğrafya, mimarlık, astronomi gibi çok geniş yelpazede eğitim öğretim uygulamalarında kullanılmaktadır.

Covid-19 salgını ile birlikte tüm dünyada sınıf ortamlarına alternatif olarak uzaktan eğitim yöntem ve teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu süreç yenilikçi öğretim yöntem ve tekniklerinin eğitim öğretim süreçlerine dâhil edilmesini hızlandırmış hatta katlanarak artırmıştır. Bu teknolojiler sadece eğitim faaliyetlerinin kullanacağı iletişim araçları ve ortamları ile sınırlı kalmamıştır. Bununla beraber eğitim içeriklerinin güncellenmesi, yenilikçi teknolojilerle donatılması ve bazı içeriklerin baştan tasarlanması gerekmiştir. Metaverse teknolojileri de bu ihtiyaçlara çözüm olarak daha da kuvvetlenmiştir. 3 boyut, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve oyun teknolojileri her geçen gün daha fazla eğitim öğretim ortamına dâhil olmaya başlamıştır. Bu dâhil olma sürecinin devam edeceği ve gelecekte daha da artacağı düşünülmektedir. Özellikle yenilikçi eğitim teknolojilerinin her geçen gün daha da fazla okul ve sınıf ortamlarına aktarılması bunun en önemli göstergelerinden bir tanesidir. Bir diğer gösterge ise dijital yerliler [143] olarak adlandırılan öğrencilerin öğrenme alışkanlıklarının dijital öğretim yöntem ve tekniklerine yakınlıklarıdır [144]. Metaverse platformlarının gelecekte sağlayacağı bir diğer katkı maliyetlerle ilgilidir. Gerçek dünyada bilim laboratuvarları, gezegen evi, tarih müzeleri ve yeni bina inşa etmek çok pahalı ve maliyetli işlerdir. Ayrıca insan işgücü, sanat eserleri, masalar, bina inşa etmek için malzemeler ve diğer somut öğrenme nesnelere bir maliyeti vardır ve bu maliyet oldukça pahalıdır. Dijital platformlardaki dijital ikizler vasıtasıyla bu maliyetler %1'e kadar düşürülebilmektedir. Ayrıca bu platformlar hem zaman hem de maliyetlerde kazanç sağlarken öğrencilere ve ailelerine de çevrimiçi fırsatlar sunabileceklerdir [89].

Metaverse platformlarının eğitim öğretim faaliyetlerine sağlayacağı diğer katkılar şöyle sıralanabilir [145-147]:

- Disiplinler arası öğrenmeyi teşvik etme,
- Çapraz iş birliği ve ekip çalışmasını teşvik etme,
- Kişiselleştirilmiş öğrenme fırsatları,
- Öğrenmeyi sürükleyici, eğlenceli ve ilgi çekici kılma,
- Gerçekçi tasarlanmış ve ilgi çekici öğrenme alanları oluşturma,
- İletişimi teşvik etme,
- Oyunlaştırılmış öğrenme,
- Müfredatın güncellenebilirliği,
- Test sonuçlarını analiz ve iyileştirme.

Metaverse platformlarının yaygınlaşmasını en çok hızlandıran sektör olarak, oyun sektöründen bahsedilebilir. Zaman içerisinde oyun deneyiminin daha gerçekçi hale gelmesi için verilen uğraşlar sonucunda çözüm; 3 boyutlu oyunlar, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik oyunlarında bulunmuştur. Gerek çevrimiçi gerekse çevrimdışı oyunların pek çoğu, oyuncularla oyun arasında farklı etkileşim imkânları sağlamıştır. Böylece, sadece oyuncu ile rakip arasında değil, aynı zamanda oyuncu ile platform arasında da etkileşim boyutu kullanıma sunulmuştur. 3.2 Metaverse platformları bölümünde aktarılan platformların pek çoğu, oyun ve eğlence sektörü üzerinden kullanıcıları sisteme dâhil etmektedir. Ayrıca para birimleri, ürünler, alışveriş, sanal yaşam gibi tüm bileşenler, oyun ve eğlence faktörü üzerinden yürütülmektedir. Sosyal medya devi Facebook başta olmak üzere Instagram ve

Whatsapp gibi tüm diğer platformların Meta adıyla yeni bir yapılanmaya bürünmesiyle birlikte dünyada Metaverse ortamlarına olan ilgi katlanarak artmıştır. Oyun teknolojilerine ilgi de her geçen gün daha da artmaktadır. Çevrimiçi oyun sitelerinde anlık 20 Milyondan fazla kullanıcının eş zamanlı oyun oynaması, günlük oyun oynama saatlerinin 5 ile 7 saat arasında değişmesi ise bunun göstergeleri arasında yer almaktadır [144]. Oyun ve eğlence platformlarına olan bu ilginin metaverse yansımaları da benzer ölçüde büyük olacaktır. Gelecekte oyun teknolojileri, oyun içi satın almalar, karakterler, para birimleri ve daha pek çok bileşen metaverse üzerinden şekillendirilecektir. Daha gerçekçi oyun deneyimleri, sınır tanımayan sanal evrenler ve her yaşa hitap edecek oyun seçenekleri ile birlikte metaverse ortamları, geleceğin oyun teknolojileri belirleyicisi olacak gibi görünmektedir. Dijital oyunlar teknolojik gelişmelere hızlıca entegre olabilmektedir. Bu sebeple dijital oyunlar ve metaverse teknolojisinin iç içe bir yapıda olması beklenmektedir. Metaverse teknolojileri gelecekte oyun sektörüne; içerik açısından, iş modelleri açısından, oyun tasarımı açısından ve pazarlama açısından katkılar sağlayacaktır [148]. Sanal gerçeklik teknolojisindeki istikrarlı gelişmeler ve bulut oyunlarının ortaya çıkmasıyla sektörün 2026'ya kadar 314 milyar dolarlık bir piyasa değerine ulaşacağı öngörülmektedir [149].

Mimari alanda metaverse teknolojilerinin önemi gelecekte daha da artacaktır. 3 boyutlu modellemeler, 3 boyutlu sanal mekânlar (kampüs ortamları, müzeler, binalar, parklar, şehirler vb.), artırılmış gerçeklik ile tasarım, modelleme ve benzer pek çok özellik sayesinde her geçen gün daha da fazla metaverse teknolojisi insan hayatına dâhil olacaktır. Mimari alanda sadece dijital platformlar inşa etmek için değil aynı zamanda gerçek dünya üzerinde düzenlemeler de yapılabilmektedir. Örneğin bir boya firması ev duvarlarını boyamadan önce farklı renkleri gerçek duvar üzerinde görüntülemeyi sağlayacak artırılmış gerçeklik uygulaması sunmaktadır. Dünyanın farklı yerlerindeki konferanslar sanal mimari ile hazırlanmış salonlarda katılımcıların dâhil olmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Katılımcılar gerçeğiyle birebir aynı inşa edilmiş salonlarda ilerleyebilmekte, diğer kullanıcılarla etkileşim kurabilmektedirler. İlk başlarda uzay boyutlarında oyunlarla gerçekleştirilen metaverse uygulamaları, günümüzde gerçek dünyadaki gerçek mekânların modellenmesiyle devam etmektedir. Artık insanlar kendi şehirlerinden ya da yaşamak istedikleri başka bir şehirden arsa ve/veya mekân satın almaktadırlar. Bu talep sonucunda bilişim firmalarının her biri fırsatları değerlendirme anlayışı içerisinde peş peşe metaverse dünyasına dâhil olmaktadır. Herhangi bir sosyal medya platformunda artık, "dijital ofis" reklamıyla karşılaşılabılır hale gelmiştir. Özellikle Covid-19 salgını sırasında uzaktan çalışma stratejileri, metaverse mekânlara olan ilgiyi katlayarak artırmıştır. Bunun mimariye olan yansımaları gelecekte de katlanarak artacaktır. Mimarlar, kullanıcıları için sanal eğlence parklarına, sinema salonlarına, sanat merkezlerine, okullara ve akla gelebilecek her türlü mekânın sanal versiyonuna ihtiyaç duyacak olan metaverse evreninde ölçeklenebilen ürünler/hizmetler, yeniden kullanılabilen ve yalnızca bir müşteriye değil milyonlarca kullanıcıya fayda sağlayabilecek çözümler sağlamak için yeni bir iş modeli geliştirebilecekler. Ayrıca benzersiz eserleri toplamaktan hoşlanan dijital koleksiyonerler için NFT ile desteklenen tasarımlar oluşturabilecek; şehirler, binalar, mobilyalar, heykeller, dokular gibi dijital varlıklar tasarlayabilecek ve üstelik bunları defalarca sanal dünyalara, oyunlara ve filmlere satabilecekler [150]. Metaverse sayesinde mimarlık eğitiminde de önemli değişimler olması kaçınılmazdır. Mimarlık eğitiminde farklı evrenler yaratmanın olumlu kullanımlara yol açması muhtemeldir. Mimarlık eğitimi veren kurumlar kendi evrenlerini yaratarak deneyimleme yoluyla eğitim yapabilir. Daha görsel ve deneyim tabanlı daha az zaman harcayarak, tasarım öğretimi yapılabilir. Öğrenenler için farklı evrenlerden farklı deneyimler edinme şansı olabilir. Bu deneyimler; metaverse'ün eğlence, spor, çalışma, ticaret gibi faaliyetleri sanal ve fiziksel ortamda bağlayıcılığı doğrultusunda, mesleki eğitimin profesyonel ve uygulama olanlarıyla aktif şekilde bir araya gelmesiyle mümkün olabilir. Araçlar bağlamında mimarlık eğitiminin, elle çizim döneminden bilgisayara geçiş ve modelleme, parametrik tasarım noktalarına hızla geldiği görülmüştür. Bu değişimler araçlar bağlamında olmuş ve öğrenen sadece tasarladığı ürünü deneyimlemiştir. Metaverse dünyasında ise tasarladığı ürünü kendisi yaşayarak deneyimleyebilme imkânına sahip olabilir. Dijital dünyaya alışkın Z kuşağı için bu uygulamalar çok daha kolay olacaktır [151].

Endüstri 4.0 birlikte teknolojik olarak gelişmekte olan fabrikalarda insan gücüne olan ihtiyaç azalacak, tüm iş ve işlemler otonom sistemler tarafından gerçekleştirilecektir. Karanlık fabrikalar olarak adlandırılan bu sistemlerde, insan gücüne olan ihtiyaç kalmayacak, bu sistemlerin bakım onarımlarını yapabilenler için iş imkânları olacaktır. Karanlık fabrikalarla birlikte insan faktörü iş dünyasında daha nitelikli işlere yönlendirilmeye başlayacaktır. Bu da çalışma stratejilerini, çalışma süreci yönetimini ve çalışma platformlarını etkileyecektir. Bu platformlar için metaverse ortamları düşünülmektedir. Farklı konumlardaki pek çok kişinin metaverse üzerinden aynı ortamda çalışır gibi hareket etmesi,

birbirleriyle iletişime geçmesi, iş süreçlerini buradan yönetmesi ve yürütmesi planlanmaktadır. Bu teknolojilerin kullanımı henüz başlangıç düzeyinde dahi olmasa bile kurgulanmaya başlaması demek, gelecekte böyle çalışma stratejilerinin hayatımızın bir parçası haline gelmesi anlamı taşımaktadır.

Günümüz teknolojisinde siber uzay olarak bilinen, tüm dünyaya ve uzaya yayılmış durumda bulunan bilişim sistemlerinden ve bunları birbirine bağlayan ağlardan oluşan ortama sadece bireylerin kullandığı bilgisayarlar değil, cep telefonları, tabletler, oyun konsolları, sanal gerçeklik gözlükleri gib. her türlü teknolojik alet ile bağlantı sağlayabiliriz [152]. Özetle metaverse ortamları sanal gerçeklik ve artırılmış gözlüklerin internet bağlantısı ile kullanımına destek vererek, beşinci boyut olarak gündelik hayatımızda yerini almış olan siber uzayın içerisine daha da yoğun girmemizi sağlayacak şekilde yapılandırılmaktadır. İnsanların dijital platformlarda harcadığı günlük zaman dilimindeki artış göz önüne alındığında, metaverse dünyalarının gündelik hayatımızda yerini alarak normalleşmesi de yakın görünmektedir.

4. Tartışma ve Sonuçlar (Discussion and Results)

İlk olarak 1992 yılında bir bilim kurgu romanıyla tanınan metaverse terimi, 2021 yılında Facebook'un sahibi Mark Zuckerberg'in sahibi olduğu dijital platformların tamamını Meta markası altında birleştireceğini açıklamasıyla birlikte daha da popüler bir hale gelmiştir. Hatta tüm dünyanın metaverse evrenine ilgisini artırmıştır. Metaverse evreninde insanlar çevrimiçi 3 boyutlu ortamlarda dijital kimliklerle dijital varlıklar kullanarak ticaret, eğlence, oyun, eğitim gibi faaliyetlere katılmakta ve etkileşimde bulunmaktadır.

Metaverse evreni ilk başlarda insanların oyun oynadığı, sosyalleştiği ve vakit geçirdiği bir ortam olarak algılanırken, tüm dünyada etkisini gösteren Covid-19 salgını bu algı üzerinde de değişim yarattı. Salgın sürecinde insanların iş yerlerinden uzak kalması ve evden çalışma sürecine girmesiyle birlikte kurumlar alternatif çözümler üretmek zorunda kaldı. Dünya genelinde eğitim (her kademedeki) başta olmak üzere, konferanslar, seminerler, iş toplantıları, etkinlikler ve iş uygulamaları çevrimiçi gerçekleştirilmeye başladı. Bunun sonucunda da gerçek dünyaya paralel ikinci dünyanın gelişmesi de hızlandı. Mark Zuckerberg'in Meta adını atmasında önemli faktörlerden birisi de bu süreci gözlemesi olabilir.

Çevrimiçi platformların bu denli yaygınlaşmasının bir diğer nedeni artık internet teknolojilerinin tüm cihazlarda yaygın olarak kullanılması olmuştur. Evde, cep telefonlarında, iş dünyasında, mobil veya sabit ortamlarda ve hatta nesnelerin interneti ile ağa bağlı tüm cihazlarda internetin kullanılabilir hale gelmesi, süreci hızlandıran etkenlerden bir tanesi olmuştur. Atılan adımlarla birlikte insanlar gelecekte metaverse evreni üzerinde daha fazla zaman geçirecek ve gündelik hayatta bulunan tüm bileşenler bu evrene aktarılacaktır. Teknolojideki gelişmeler, insanların talebi, firmaların arzı ve teknoloji liderlerinin yönlendirmeleri gözlemlendiğinde bu sürecin daha da hızlı ilerleyeceği düşünülmektedir.

Geçmişten günümüze metaverse çalışmaları eğitimden turizme, araştırma ve geliştirmeden iletişim ve sanata kadar pek çok farklı alanda gerçekleştirilmiştir. Mimari çalışmalar, oyun ve eğlence sektörü, iş dünyası ve sağlık sektörü çalışmaları da her geçen gün metaverse evrenine aktarılmaktadır. Bu alanların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu alanlarda kullanılan bileşenleri; genişletilmiş gerçeklik, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, karma gerçeklik, yapay zekâ, blokzincir teknolojisi, nesnelerin interneti ve web 3.0 teknolojisi olarak sıralamak mümkündür.

Günümüzde en yaygın kullanılan metaverse platformları arasında şu platformlar sayılabilir:

- Second Life
- SandBox
- DecentraLand
- Roblox
- HyperVerse
- Epic Games
- NAKAverse
- Metahero
- Star Atlas

Bu platformların sayısı daha da artırılabilir. Üstelik metaverse teknolojileri yaygınlaştıkça buraya dâhil

olan platform sayısı da artmaktadır. Kara, hava, deniz ve uzay boyutlarına ek olarak beşinci boyut olarak adlandırılan siber uzay boyutları giderek genişlemektedir. Bu boyutta metaverse ile yeni bir evren yaratılmaktadır. Bu evrende bireyler avatarlar yoluyla temsil edilmekte, harcamalar dijital paralarla yapılmakta ve nesnelere, ürünler, eserler NFT'ler ile temsil edilmektedir. Üstelik insanlar buralarda ticaret yaparak kazanç sağlama imkânına da sahip olmaktadır. Böylece metaverse evreni her geçen gün daha fazla insanı kendisine çekmektedir. Teknoloji liderlerinin de bu yönde yönlendirmeleri bulunmaktadır. Mark Zuckerberg Meta evreni üzerinden yönlendirme yaparken, bir diğer teknoloji önderi Elon Musk ise hemen hemen her gün kripto paralar üzerinden yönlendirmeler ve açıklamalar yapmaktadır. Böylece insanların farkındalıkları ve hazırbulunuşluk seviyeleri de artmaktadır.

Metaverse platformları geleceğin en önemli teknoloji yapılanması arasında yer alacakları için teknolojik ilerlemelerin gerisinde kalmak istemeyen ülkelerde de bu adımların atılması gerekmektedir. Özellikle son yıllarda sosyal medya uygulamalarının ulaştığı kullanıcı sayıları göz önüne alındığında, metaverse için de benzer bir kullanım olacağı tahmin edilebilir. Bu nedenle ülkelerin stratejik adımlar atması ve "kullanıcı" veya "üretici" durumlarından hangisi içerisinde yer alacağına karar vermesi gerekmektedir. Milyarlarca kullanıcının sanal bir platform üzerinde bir araya getirilmesi demek, bu evrenin sahibine çok büyük avantajlar sağlamak anlamına gelmektedir. Daha önce Time dergisinin Mark Zuckerberg için atmış olduğu "500 Milyon Kişilik Sanal Devletin Başkanı" başlığının metaverse evreni ile "Milyarlarca Kullanıcılı Sanal Evrenin Sahibi" şekline evrilmesi kuvvetle muhtemeldir. Beşinci boyutta söz sahibi olmak isteyen devletlerinin bunları öngörerek gerekli adımları atması, gerçek dünyadaki yer alan boyutlarda hâkimiyet kadar büyük önem arz etmektedir.

Metaverse araştırmaları için de pek çok potansiyel bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi, teknolojik altyapıyı geliştirme çalışmalarıdır. 3 Boyut teknolojilerindeki görüntü kalitesini artırmaya yönelik araştırmalar, araştırmacılar için gelecek çalışmaların temelini oluşturabilecektir. Çünkü metaverse için en önemli özelliklerden birisi, gerçeklik algısı yaratmaktır. Gelecek çalışmalar için önerilecek bir diğer konu, alan bazlı çalışmalardır. Her bir alana yönelik metaverse potansiyellerinin araştırılması ve geliştirilmesi, yakın gelecekte bütünleşik platformlar oluşturmanın ve farklı alanları bu platformlara entegre etmenin yolunu açacaktır. Oyun teknolojileri, eğitim, mimari ve pazarlama, metaverse için önde gelen alanlar durumunda iken gelecekte sosyal ağların da metaverse platformunda aktif olarak yer alma potansiyeli büyüktür. Hâlihazırda çevrimiçi oyun platformlarında insanlar arası iletişim ve etkileşim unsurları birer bileşen olarak sunulmaktadır. Sosyal ağlardan öncül olarak metaverse evrenine dâhil edilecek olanlar için önemli potansiyeller bulunmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar(References)

- [1] O. Kuş, "Metaverse: 'Dijital Büyük Patlamada Fırsatlar Ve Endişelere Yönelik Algılar," *Intermedia International e-journal*, vol. 8, no. 15, pp. 245–266, Dec. 2021. doi:10.21645/intermedia.2021.109
- [2] R. Cheng, N. Wu, S. Chen, and B. Han, "Will Metaverse be NextG Internet? Vision, Hype, and Reality," *arXiv preprint arXiv:2201.12894*, 2022
- [3] S. Savaş and N. Topaloğlu, "Crime intelligence from social media: A case study," in *2017 IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics, INFORMATICS 2017 - Proceedings*, 2017, vol. 2018-Janua. doi:10.1109/INFORMATICS.2017.8327266
- [4] L.-H. Lee, T. Braud, P. Zhou, L. Wang, D. i Xu, Z. Lin, A. Kumar, C. Bermejo and P. Hui, "All one needs to know about metaverse: A complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda," *arXiv preprint arXiv:2110.05352*, 2021
- [5] N. G. Narin, "A Content Analysis of the Metaverse Articles," *Journal of Metaverse*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, Dec. 2021, Accessed: Mar. 04, 2022. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jmv/issue/67581/1051382>
- [6] J. Kim, "Advertising in the Metaverse: Research Agenda," *Journal of Interactive Advertising*, vol. 21, no. 3. Taylor & Francis, pp. 141–144, 2021.
- [7] J. Han, J. Heo, and E. You, "Analysis of Metaverse Platform as a New Play Culture: Focusing on Roblox and ZEPETO," 2021.
- [8] K. G. Nalbant and Ş. Uyanık, "Computer Vision in the Metaverse," *Journal of Metaverse*, vol. 1, no. 1, pp. 9–12, 2021.
- [9] N. A. Jennings and C. Collins, "Virtual or virtually U: Educational institutions in Second Life," *International Journal of Social Sciences*, vol.2, no.3, 2008. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/292156918>

- [10] M. N. K. Boulos, L. Hetherington, and S. Wheeler, "Second Life: An overview of the potential of 3-D virtual worlds in medical and health education," *Health Information and Libraries Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 233–245, Dec. 2007. doi:10.1111/j.1471-1842.2007.00733.x
- [11] A. de Lucia, R. Francese, I. Passero, and G. Tortora, "Development and evaluation of a virtual campus on Second Life: The case of SecondDMI," *Computers and Education*, vol. 52, no. 1, pp. 220–233, Jan. 2009. doi:10.1016/j.compedu.2008.08.001
- [12] F. M. Schaf, D. Müller, F. W. Bruns, C. E. Pereira, and H. H. Erbe, "Collaborative learning and engineering workspaces," *Annual Reviews in Control*, vol. 33, no. 2, pp. 246–252, Dec. 2009. doi:10.1016/j.arcontrol.2009.05.002
- [13] S. Warburton, "Second Life in higher education: Assessing the potential for and the barriers to deploying virtual worlds in learning and teaching," *British Journal of Educational Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 414–426, May 2009. doi:10.1111/j.1467-8535.2009.00952.x
- [14] D. M. Barry, H. Kanematsu, Y. Fukumura, N. Ogawa, A. Okuda, R. Taguchi, and H. Nagai, "International comparison for problem based learning in metaverse," *The ICEE and ICEER*, vol. 6066, 2009.
- [15] S. C. Baker, R. K. Wentz, and M. M. Woods, "Using Virtual Worlds in Education: Second Life® as an Educational Tool," *Teaching of Psychology*, vol. 36, no. 1, pp. 59–64, 2009, doi:10.1080/00986280802529079
- [16] Y. C. Huang, S. J. Backman, and K. F. Backman, "Student attitude toward virtual learning in second life: A flow theory approach," *Journal of Teaching in Travel and Tourism*, vol. 10, no. 4, pp. 312–334, Oct. 2010. doi:10.1080/15313220.2010.525425
- [17] K. Getchell, I. Oliver, A. Miller, and C. Allison, "Metaverses as a platform for game based learning," in *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2010, pp. 1195–1202.
- [18] P. D. Ariyadewa, W. v Wathsala, V. Pradeepan, R. Perera, and D. A. S. Atukorale, "Virtual learning model for metaverses," in *2010 International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, 2010, pp. 81–85.
- [19] M. Tamai, M. Inaba, K. Hosoi, R. Thawonmas, M. Uemura, and A. Nakamura, "Constructing Situated Learning Platform for Japanese Language and Culture in 3D Metaverse," in *2011 Second International Conference on Culture and Computing*, 2011, pp. 189–190. doi: 10.1109/Culture-Computing.2011.59.
- [20] M. Esteves, B. Fonseca, L. Morgado, and P. Martins, "Improving teaching and learning of computer programming through the use of the Second Life virtual world," *British Journal of Educational Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 624–637, Jul. 2011, doi: 10.1111/j.1467-8535.2010.01056.x.
- [21] N. S. H. N. Ahmad, T. R. Wan, and P. Jiang, "Health course module in Virtual World," in *Procedia Computer Science*, 2011, vol. 3, pp. 1454–1463. doi: 10.1016/j.procs.2011.01.031.
- [22] X. Liu and J. Zhang, "Foreign Language Learning through Virtual Communities," *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 737–740, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.165.
- [23] C. González-González and F. Blanco-Izquierdo, "Designing social videogames for educational uses," *Computers and Education*, vol. 58, no. 1, pp. 250–262, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.compedu.2011.08.014.
- [24] D. Xanthopoulou and S. Papagiannidis, "Play online, work better? Examining the spillover of active learning and transformational leadership," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 79, no. 7, pp. 1328–1339, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.techfore.2012.03.006.
- [25] A. Vernaza, V. I. Armuelles, and I. Ruiz, "Towards to an open and interoperable virtual learning environment using Metaverse at University of Panama," in *2012 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAAE)*, 2012, pp. 320–325. doi: 10.1109/TAAE.2012.6235458.
- [26] R. González Crespo, R. F. Escobar, L. Joyanes Aguilar, S. Velazco, and A. G. Castillo Sanz, "Use of ARIMA mathematical analysis to model the implementation of expert system courses by means of free software OpenSim and Sloodle platforms in virtual university campuses," *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 18, pp. 7381–7390, 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.06.054.
- [27] M. M. A. González, B. S. N. Santos, A. R. Vargas, J. Martín-Gutiérrez, and A. R. Orihuela, "Virtual worlds. Opportunities and challenges in the 21st century," in *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 25, pp. 330–337. doi: 10.1016/j.procs.2013.11.039.
- [28] H. Kanematsu, T. Kobayashi, N. Ogawa, D. M. Barry, Y. Fukumura, and H. Nagai, "Eco car project for japan students as a virtual PBL class," in *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 22, pp. 828–835. doi: 10.1016/j.procs.2013.09.165.
- [29] T. Amorim, L. Tapparo, N. Marranghello, A. C. R. Silva, and A. S. Pereira, "A multiple intelligences theory-based 3D virtual lab environment for digital systems teaching," in *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 29, pp. 1413–1422. doi: 10.1016/j.procs.2014.05.128.
- [30] H. Kanematsu, T. Kobayashi, D. M. Barry, Y. Fukumura, A. Dharmawansa, and N. Ogawa, "Virtual STEM class for nuclear safety education in metaverse," in *Procedia Computer Science*, 2014, vol. 35, no. C, pp. 1255–1261. doi: 10.1016/j.procs.2014.08.224.
- [31] D. M. Barry, N. Ogawab , A. Dharmawansac , H. Kanematsud , Y. Fukumurae , T. Shiraif , K.Yajimag and T. Kobayashii, "Evaluation for students' learning manner using eye blinking system in Metaverse," in *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 60,

no. 1, pp. 1195–1204. doi: 10.1016/j.procs.2015.08.181.

- [32] M. G. Badilla Quintana and S. Meza Fernández, “A pedagogical model to develop teaching skills. the collaborative learning experience in the Immersive Virtual World TYMMI,” *Computers in Human Behavior*, vol. 51, pp. 594–603, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.chb.2015.03.016.
- [33] H. Kanematsu, N. Ogawa, T. Shirai, M. Kawaguchi, T. Kobayashi, and D. M. Barry, “Blinking Eyes Behaviors and Face Temperatures of Students in YouTube Lessons-For the Future E-learning Class,” in *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 96, pp. 1619–1626. doi: 10.1016/j.procs.2016.08.209.
- [34] H. Kanematsu, D. M. Barry, T. Shirai, M. Kawaguchi, N. Ogawa, K. Yajima, K. T. Nakahira, T. Kobayashi and M. Yoshitake, “Measurements of eye movement and teachers’ concentration during the preparation of teaching materials,” in *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 159, pp. 1499–1506. doi: 10.1016/j.procs.2019.09.320.
- [35] K. Maccallum and D. Parsons, “Teacher Perspectives on Mobile Augmented Reality: The Potential of Metaverse for Learning,” in *World Conference on Mobile and Contextual Learning*, 2019, pp. 21-28.
- [36] J. Diaz, “Virtual world as a complement to hybrid and mobile learning,” *International Journal of Emerging Technologies in Learning (ijET)*, vol. 15, no. 22, pp. 267–274, 2020.
- [37] J. Diaz, C. Saldaña, and C. Avila, “Virtual world as a resource for hybrid education,” *International Journal of Emerging Technologies in Learning (ijET)*, vol. 15, no. 15, pp. 94–109, 2020.
- [38] A. Estudante and N. Dietrich, “Using Augmented Reality to Stimulate Students and Diffuse Escape Game Activities to Larger Audiences,” *Journal of Chemical Education*, vol. 97, no. 5, pp. 1368–1374, May 2020, doi: 10.1021/acs.jchemed.9b00933.
- [39] Y. Tang, “Help first-year college students to learn their library through an augmented reality game,” *Journal of Academic Librarianship*, vol. 47, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.acalib.2020.102294.
- [40] A. Siyaev and G.-S. Jo, “Neuro-Symbolic Speech Understanding in Aircraft Maintenance Metaverse,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 154484–154499, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3128616.
- [41] A. Siyaev and G.-S. Jo, “Towards Aircraft Maintenance Metaverse Using Speech Interactions with Virtual Objects in Mixed Reality,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, 2021, doi: 10.3390/s21062066.
- [42] S. Park, K. Min, and S. Kim, “Differences in Learning Motivation among Bartle’s Player Types and Measures for the Delivery of Sustainable Gameful Experiences,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021, doi: 10.3390/su13169121.
- [43] R. Schroeder, A. Huxor, and A. Smith, “Activeworlds: geography and social interaction in virtual reality,” *Futures*, vol. 33, no.7, pp. 569-587. 2001.
- [44] C. Jaynes, W. B. Seales, K. Calvert, Z. Fei, and J. Griffioen, “The Metaverse-A networked collection of inexpensive, self-configuring, immersive environments”, in *Proceedings of the workshop on Virtual environments*, 2003.
- [45] C. Jaynes, R. M. Steele, and S. Webb, “Rapidly Deployable Multiprojector Immersive Displays,” *Presence*, vol. 14, no. 5, pp. 501–510, 2005, doi: 10.1162/105474605774918723.
- [46] M. R. Cagnina, M. Poian, and M.-S. Crowley, “How to Compete in the Metaverse: The Business Models in Second Life,” *U of Udine Economics Working Paper*, 2005. [Online]. Available: <http://ssrn.com/abstract=1088779><http://ssrn.com/abstract=1088779>
- [47] S. Kumar, J. Chhugani, C. Kim, D. Kim, A. Nguyen, P. Dubey, C. Bienia and Y. Kim, “Second Life and the New Generation of Virtual Worlds,” *Computer*, vol. 41, no. 9, pp. 46–53, 2008, doi: 10.1109/MC.2008.398.
- [48] S. Papagiannidis, M. Bourlakis, and F. Li, “Making real money in virtual worlds: MMORPGs and emerging business opportunities, challenges and ethical implications in metaverses,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 75, no. 5, pp. 610–622, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.techfore.2007.04.007.
- [49] T. Chesney, S. H. Chuah, and R. Hoffmann, “Virtual world experimentation: An exploratory study,” *Journal of Economic Behavior and Organization*, vol. 72, no. 1, pp. 618–635, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.jebo.2009.05.026.
- [50] M. Bourlakis, S. Papagiannidis, and F. Li, “Retail spatial evolution: Paving the way from traditional to metaverse retailing,” *Electronic Commerce Research*, vol. 9, no. 1–2, pp. 135–148, 2009, doi: 10.1007/s10660-009-9030-8.
- [51] E. Schlemmer, D. Trein, and C. Oliveira, “The Metaverse: Telepresence in 3D Avatar-Driven Digital-Virtual Worlds,” *@tic. revista d’innovació educativa*, 2009. [Online]. Available: <http://www.unisinos.br/pesquisa/educacao-digital/>
- [52] A. Davis, J. D. Murphy, D. Owens, D. Khazanchi, and I. Zigurs, “Avatars, people, and virtual worlds: Foundations for research in metaverses,” *Journal of the Association for Information Systems*, vol. 10, no. 2, p. 90, 2009.
- [53] E. Ayiter, “Becoming Creative through Self Observation: A (Second Order) Cybernetic Learning Strategy for the Metaverse,” *International Journal of Art, Culture and Design Technologies (IJACDT)*, 2011, vol.1, no.1, pp. 22-35.

- [54] S. van der Land, A. Schouten, and F. Feldberg, "Modeling the metaverse: a theoretical model of effective team collaboration in 3D virtual environments," *Journal of Virtual Worlds Research*, vol. 4, no. 3, 2011.
- [55] S. G. Lee, S. Trimi, W. K. Byun, and M. Kang, "Innovation and imitation effects in Metaverse service adoption," *Service Business*, vol. 5, no. 2, pp. 155–172, Jun. 2011, doi: 10.1007/s11628-011-0108-8.
- [56] D. Owens, A. Mitchell, D. Khazanchi, and I. Zigurs, "An Empirical Investigation of Virtual World Projects and Metaverse Technology Capabilities," *The DATA BASE for Advances in Information Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 74–101, 2011.
- [57] M. Leone, "The semiotics of religious space in Second Life®," *Social Semiotics*, vol. 21, no. 3, pp. 337–357, 2011, doi: 10.1080/10350330.2011.564385.
- [58] A. Arroyo, F. Serradilla, and O. Calvo, "Adaptive fuzzy knowledge-based systems for control metabots' mobility on virtual environments," *Expert Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 339–352, 2011, doi: 10.1111/j.1468-0394.2011.00595.x.
- [59] J. Terrace, E. Cheslack-Postava, P. Levis, and M. J. Freedman, "Unsupervised Conversion of 3D Models for Interactive Metaverses," in *2012 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2012, pp. 902–907. doi: 10.1109/ICME.2012.186.
- [60] E. Ayiter, "Further Dimensions: Text, Typography and Play in the Metaverse," in *2012 International Conference on Cyberworlds*, 2012, pp. 296–303. doi: 10.1109/CW.2012.50.
- [61] C. Kim, S.-G. Lee, and M. Kang, "I became an attractive person in the virtual world: Users' identification with virtual communities and avatars," *Computers in Human Behavior*, vol. 28, pp. 1663–1669, 2012, doi: 10.1016/j.chb.2012.04.004.
- [62] T. D. Parsons, "Virtual Simulations and the Second Life Metaverse: paradigm shift in neuropsychological assessment," in *Virtual worlds and metaverse platforms: New communication and identity paradigms*. IGI Global, 2012. pp. 234-250.
- [63] Y. Chandra and M. A. A. M. Leenders, "User innovation and entrepreneurship in the virtual world: A study of Second Life residents," in *Technovation*, Jul. 2012, vol. 32, no. 7–8, pp. 464–476. doi: 10.1016/j.technovation.2012.02.002.
- [64] E. Gadalla, K. Keeling, and I. Abosag, "Metaverse-retail service quality: A future framework for retail service quality in the 3D internet," *Journal of Marketing Management*, vol. 29, no. 13–14, pp. 1493–1517, Oct. 2013, doi: 10.1080/0267257X.2013.835742.
- [65] J. D. N. Dionisio, W. G. Burns, and R. Gilbert, "3D virtual worlds and the metaverse: Current status and future possibilities," *ACM Computing Surveys*, vol. 45, no. 3, Jun. 2013, doi: 10.1145/2480741.2480751.
- [66] S.-V. Rehm, L. Goel, and M. Crespi, "The Metaverse as Mediator between Technology, Trends, and the Digital Transformation of Society and Business," *Journal of Virtual Worlds Research*, vol. 8, no. 2, 2015.
- [67] M. Berger, A. H. Jucker, and M. A. Locher, "Interaction and space in the virtual world of Second Life," *Journal of Pragmatics*, vol. 101, pp. 83–100, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.pragma.2016.05.009.
- [68] C. Girvan, "What is a virtual world? Definition and classification," *Educational Technology Research and Development*, vol. 66, no. 5, pp. 1087–1100, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11423-018-9577-y.
- [69] M. Zhou, M. A. A. M. Leenders, and L. M. Cong, "Ownership in the virtual world and the implications for long-term user innovation success," *Technovation*, vol. 78, pp. 56–65, 2018, doi: 10.1016/j.technovation.2018.06.002.
- [70] K. J. L. Nevelsteen, "Virtual world, defined from a technological perspective and applied to video games, mixed reality, and the Metaverse," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 29, no. 1, 2018, doi: 10.1002/cav.1752.
- [71] B. Ryskeldiev, Y. Ochiai, M. Cohen, and J. Herder, "Distributed metaverse: Creating decentralized blockchain-based model for peer-To-peer sharing of virtual spaces for mixed reality applications," in *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, 2018. p. 1-3. doi: 10.1145/3174910.3174952.
- [72] J.-M. Jot, R. Audfray, M. Hertensteiner, and B. Schmidt, "Rendering Spatial Sound for Interoperable Experiences in the Audio Metaverse," in *2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA)*, 2021, pp. 1–15. doi: 10.1109/I3DA48870.2021.9610971.
- [73] J. D. Bolter, M. Engberg, and B. MacIntyre, "8 The Myth of Total VR: The Metaverse," in *Reality Media: Augmented and Virtual Reality*, 2021, pp. 137–146.
- [74] S.-M. Park and Y.-G. Kim, "A Metaverse: Taxonomy, Components, Applications, and Open Challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4209–4251, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3140175.
- [75] S. Hazan, "Musing the metaverse," *Heritage in the Digital Era, Multi-Science Publishing, Brentwood, Esse, UK*, 2010.
- [76] U. B. Tasa and T. Görgülü, "Meta-art: art of the 3-D user-created virtual worlds," *Digital Creativity*, vol. 21, no. 2, pp. 100–111, 2010, doi: 10.1080/14626261003786251.
- [77] Y. Ando, R. Thawonmas, and F. Rinaldo, "Inference of Viewed Exhibits in a Metaverse Museum," in *2013 International Conference on Culture and Computing*, 2013, pp. 218–219. doi: 10.1109/CultureComputing.2013.73.

- [78] L. Sequeira and L. Morgado, "Virtual archaeology in second life and opensimulator," *Journal of Virtual Worlds Research*, vol. 6, no. 1, 2013.
- [79] B. L. S. Loong, "Tourism and Simulacrum: The Computational Economy of Algorithmic Destinations," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 144, pp. 237–246, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.292.
- [80] H. S. Choi and S. H. Kim, "A content service deployment plan for metaverse museum exhibitions—Centering on the combination of beacons and HMDs," *International Journal of Information Management*, vol. 37, no. 1, pp. 1519–1527, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2016.04.017.
- [81] I. Hughes, "Virtual worlds, augmented reality, blended reality," *Computer Networks*, vol. 56, no. 18, pp. 3879–3885, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.comnet.2012.09.016.
- [82] R. Nishihara and M. Okubo, "A Study on Personal Space in Virtual Space based on Personality," *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 2183–2190, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.359.
- [83] S. Park, S. P. Kim, and M. Whang, "Individual's Social Perception of Virtual Avatars Embodied with Their Habitual Facial Expressions and Facial Appearance," *Sensors*, vol. 21, no. 17, 2021, doi: 10.3390/s21175986.
- [84] J. Han, J. Yun, J. Jang, and K. Park, "User-friendly home automation based on 3D virtual world," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 1843–1847, 2010, doi: 10.1109/TCE.2010.5606335.
- [85] S. K. Kim, Y. S. Joo, M. Shin, S. Han, and J. J. Han, "Virtual world control system using sensed information and adaptation engine," *Signal Processing: Image Communication*, vol. 28, no. 2, pp. 87–96, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.image.2012.10.006.
- [86] Y. Han and S. Oh, "Investigation and Research on the Negotiation Space of Mental and Mental Illness Based on Metaverse," in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2021, pp. 673–677. doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9621118.
- [87] Z. Fang, L. Cai, and G. Wang, "MetaHuman Creator The starting point of the metaverse," in *2021 International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS)*, 2021, pp. 154–157. doi: 10.1109/ISCTIS51085.2021.00040.
- [88] M. Damar, "Metaverse Shape of Your Life for Future: A bibliometric snapshot", *Journal of Metaverse*, vol. 1, no.1, pp. 1-8, 2021.
- [89] M. Damar, "Metaverse ve Eğitim Teknolojisi", Eğitimde Dijitalleşme ve Yeni Yaklaşımlar içinde. Ed. Talan, T. Efe Akademi Yayınevi, pp. 169-192, 2021.
- [90] M. Damar, H. T. Damar, "Artırılmış Gerçeklik, Sanal Gerçeklik Ve Metaverse: Hemşirelik Disiplini İçin Önemi Ve Geleceği" SAĞLIK & BİLİM: Hemşirelik-3 içinde. Ed. Varışoğlu, T. Efe Akademi Yayınevi, pp. 207-226, 2021.
- [91] S. Mystakidis, "Metaverse," *Encyclopedia*, vol. 2, pp. 486–497, 2022, doi: 10.3390/encyclopedia2010031.
- [92] N. Xi, J. Chen, F. Gama, M. Riar, and J. Hamari, "The challenges of entering the metaverse: An experiment on the effect of extended reality on workload," *Information Systems Frontiers 2022*, vol. 1, pp. 1–22, Feb. 2022, doi: 10.1007/S10796-022-10244-X.
- [93] J. McCarthy, M. L. Minsky, N. Rochester, and C. E. Shannon, "A proposal for the Dartmouth summer conference on artificial intelligence," Mar. 1955.
- [94] A. M. Turing, "I.—Computing Machinery and Intelligence," *Mind*, vol. LIX, no. 236, pp. 433–460, 1950, doi: 10.1093/mind/LIX.236.433.
- [95] H. Jeon, H. Youn, S. Ko, and T. Kim, "Blockchain and AI Meet in the Metaverse," *Blockchain Potential in AI*, Aug. 2021, doi: 10.5772/INTECHOPEN.99114.
- [96] S. Buyrukoğlu, "New hybrid data mining model for prediction of Salmonella presence in agricultural waters based on ensemble feature selection and machine learning algorithms," *Journal of Food Safety*, vol. 41, no. 4, p. e12903, Aug. 2021, doi: 10.1111/JFS.12903.
- [97] Y. Yılmaz and S. Buyrukoğlu, "Hybrid Machine Learning Model Coupled with School Closure For Forecasting COVID-19 Cases in the Most Affected Countries," *Hittite Journal of Science and Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 123–131, Jun. 2021, doi: 10.17350/HJSE19030000222.
- [98] O. Güler and İ. Yücedağ, "Hand Gesture Recognition from 2D Images by Using Convolutional Capsule Neural Networks," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 3, pp. 1211–1225, 2022, doi: 10.1007/s13369-021-05867-2.
- [99] S. Savaş, "Detecting the Stages of Alzheimer's Disease with Pre-trained Deep Learning Architectures," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 2, pp. 2201–2218, 2022, doi: 10.1007/s13369-021-06131-3.
- [100] M. J. Nodeh, M. H. Calp, and İ. Şahin, "A Novel Hybrid Model for Vendor Selection in a Supply Chain by Using Artificial Intelligence Techniques Case Study: Petroleum Companies," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 43, pp. 226–251, Apr. 2019, doi: 10.1007/978-3-030-36178-5_19.
- [101] Q. Yang, Y. Zhao, H. Huang, Z. Xiong, J. Kang, and Z. Zheng, "Fusing Blockchain and AI with Metaverse: A Survey," *arXiv*, Jan.

2022, doi: 10.48550/arxiv.2201.03201.

[102] T. Huynh-The, Q.-V. Pham, X.-Q. Pham, T. T. Nguyen, Z. Han, and D.-S. Kim, "Artificial Intelligence for the Metaverse: A Survey," *arXiv*, Feb. 2022, doi: 10.48550/arxiv.2202.10336.

[103] S. Savaş, "The Effects of Artificial Intelligence on Industry: Industry 4.0," in *Current Studies in Basic Sciences, Engineering and Technology 2021*,

[104] M. Z. Gündüz and R. Daş, "Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 24, no. 2, pp. 327–335, 2018.

[105] M. H. Calp, R. Butuner, U. Kose, A. Alamri, and D. Camacho, "IoT-based deep learning controlled robot vehicle for paralyzed patients of smart cities," *Journal of Supercomputing*, pp. 1–36, Feb. 2022, doi: 10.1007/S11227-021-04292-4/TABLES/13.

[106] T. Zhang, L. Gao, C. He, M. Zhang, B. Krishnamachari, and S. Avestimehr, "Federated Learning for Internet of Things: Applications, Challenges, and Opportunities," *arXiv*, Nov. 2021, doi: 10.48550/arxiv.2111.07494.

[107] P. Treleaven, A. Greenwood, H. Pithadia, and J. Xu, "Web 3.0 Tokenization and Decentralized Finance (DeFi)," *SSRN Electronic Journal*, Feb. 2022, doi: 10.2139/SSRN.4037471.

[108] F. A. Alabdulwahhab, "Web 3.0: The Decentralized Web Blockchain networks and Protocol Innovation," *1st International Conference on Computer Applications and Information Security, ICCAIS 2018*, Aug. 2018, doi: 10.1109/CAIS.2018.8441990.

[109] A. Abrol, (2022). Web 3.0 vs. Metaverse: A detailed comparison. Çevrimiçi: <https://www.blockchain-council.org/metaverse/web-3-0-vs-metaverse/>, Erişim Tarihi: 08.06.2022

[110] H. Centieiro, (2023). The Insane Future of Web 3.0 and the Metaverse. Çevrimiçi: <https://medium.datadriveninvestor.com/the-insane-future-of-web-3-0-and-the-metaverse-4cec3f13895a>, Erişim Tarihi: 08.06.2022

[111] B. Marr, (2022). The Important Difference Between Web3 And The Metaverse. Çevrimiçi: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/02/22/the-important-difference-between-web3-and-the-metaverse/?sh=3ff624d35af3>, Erişim Tarihi: 08.06.2022

[112] Inc. Linden Research, "Second Life," *Second Life*, 2022. Çevrimiçi: <https://secondlife.com/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[113] Sandbox, "The Sandbox Game — User-Generated Crypto & Blockchain Games," 2022. Çevrimiçi: <https://www.sandbox.game/en/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[114] Decentraland, "Decentraland," 2022. Çevrimiçi: <https://decentraland.org/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[115] Roblox, "Roblox," 2022. Çevrimiçi: <https://www.roblox.com/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[116] Hypervers, "Hypervers," 2022. Çevrimiçi: <https://thehypervers.net/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[117] Epic Games, "Epic Games," 2022. Çevrimiçi: <https://www.epicgames.com/site/en-US/home>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[118] Nakaverse, "Nakaverse | Nakamoto Games | Experience the biggest play-to-earn crypto gaming selection," 2022. Çevrimiçi: <https://nakaverse.games/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[119] Metahero, "The Gateway Into The Metaverse," 2022. Çevrimiçi: <https://metahero.io/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[120] Star Atlas, "Experience | Star Atlas," 2022. Çevrimiçi: <https://staratlas.com/>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.

[121] S. Kraus, D. K. Kanbach, P. M. Krysta, M. M. Steinhoff, & N. Tomini, "Facebook and the creation of the metaverse: radical business model innovation or incremental transformation?," *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 2022.

[122] B. Tanrıverdi, "Artırılmış gerçeklik teknolojisi ile desteklenmiş kitap okumanın okul öncesi dönemdeki çocukların dil gelişimine etkisi (Durum çalışması)," Denizli, 2022. Accessed: Mar. 15, 2022. Çevrimiçi: <http://acikerisim.pau.edu.tr/xmlui/handle/11499/39001>

[123] L. O. Lopes and V. Goncalves, "Evaluation of the Augmented Reality Educational Application for the 2nd cycle of primary school," Jun. 2021. doi: 10.23919/CISTI52073.2021.9476454.

[124] Ü. İ. Onbaşlı, "Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarının İlkokul Öğrencilerinin Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarına Yönelik Tutumlarına ve Fen Motivasyonlarına Etkisi," *Ege Eğitim Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 320–337, Jul. 2018, doi: 10.12984/EGEEFD.390018.

[125] F. Özbek ve Ş. Ak, "İlkokul 4. Sınıf Türkçe Dersinde Artırılmış Gerçeklik Uygulaması: Başarı ve Motivasyona Etkisi," *Kastamonu Eğitim Dergisi*, vol. 28, no. 4, pp. 1668–1679, Jul. 2020, doi: 10.24106/KEFDERGI.4003.

[126] S. Altok, "Artırılmış Gerçeklik Destekli Simetri Öğretiminin İlkokul Öğrencilerinin Akademik Başarılarına Etkileri ve Öğrenci Görüşleri," *Eğitim Teknolojisi Kuram ve Uygulama*, vol. 10, no. 1, pp. 177–200, Jan. 2020, doi: 10.17943/ETKU.622871.

- [127] M. Sırakaya and D. Alsancak Sırakaya, "Artırılmış Gerçekliğin Fen Eğitiminde Kullanımının Tutum ve Motivasyona Etkisi," *Kastamonu Eğitim Dergisi*, vol. 26, no. 3, pp. 887–905, May 2018, doi: 10.24106/KEFDERGL415705.
- [128] A. Durak and F. G. Karaoğlan Yılmaz, "Artırılmış Gerçekliğin Eğitsel Uygulamaları Üzerine Ortaokul Öğrencilerinin Görüşleri," *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, vol. 19, no. 2, pp. 468–481, Jul. 2019, doi: 10.17240/AIBUEFD.2019.19.46660-425148.
- [129] C. E. George Reyes, "Perception of high school students about using Metaverse in augmented reality learning experiences in mathematics," *Pixel-Bit, Revista de Medios y Educacion*, vol. 58, pp. 143–159, May 2020, doi: 10.12795/pixelbit.74367.
- [130] A. Alvaro-Farfan, J. Sánchez-Guerrero, W. Gavilanes-Lopez, and N. Santiago-Chávez, "Application of Metaverses as an Evaluation Tool in the Baccalaureate," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1135 AISC, pp. 598–606. doi: 10.1007/978-3-030-40271-6_59.
- [131] N. Önal, "Artırılmış Gerçeklik Eğitim Uygulamaları İlköğretim Matematik Öğretmen Adaylarının Akademik Motivasyonlarını Etkiler mi?," *İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 5, pp. 2847–2857, 2017.
- [132] H. Ersoy, E. Duman, and S. Öncü, "Artırılmış Gerçeklik ile Motivasyon ve Başarı: Deneysel Bir Çalışma," *Öğretim Teknolojileri ve Öğretmen Eğitimi Dergisi*, vol. 5, no. 1, pp. 39–44, Mar. 2016.
- [133] O. Güler and S. Savaş, "Stereoscopic 3D teaching material usability analysis for interactive boards," *Computer Animation and Virtual Worlds*, p. e2041, 2022, doi: 10.1002/CAV.2041.
- [134] Serkan Savaş, Osman Güler, Kemal Kaya, Gürhan Çoban, and Mehmet Suat Güzel, "Bilişim Teknolojileri Alanında Oyun ile Öğrenme Uygulaması," *XXI. Akademik Bilişim Konferansı – AB2019*, 2019.
- [135] S. Sarıçam, "Fen Bilimleri Dersinde Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Dolaşım Sistemi Kavramlarının Öğretimi Üzerine Etkisinin İncelenmesi," İstanbul, 2019.
- [136] B. Çankaya and S. Girgin, "Artırılmış Gerçeklik Teknolojisinin Fen Bilimleri Dersi Akademik Başarısına Etkisi," *Journal of Social And Humanities Sciences Research*, vol. 5, no. 30, pp. 4283–4290, 2018.
- [137] A. F. Avcı and Ş. Taşdemir, "Artırılmış ve Sanal Gerçeklik ile Periyodik Cetvel Öğretimi," *Selçuk-Teknik Dergisi*, vol. 18, no. 2, pp. 68–83, 2019.
- [138] R. Demir, "'Din Kültürü ve Ahlak Bilgisi Öğretimi Dersinde Artırılmış Gerçeklik Uygulamalarının Öğrenci Görüşleri Doğrultusunda Değerlendirilmesi," *Çukurova Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi (ÇÜİFD)*, vol. 20, no. 1, pp. 201–219, Jun. 2020, doi: 10.30627/CUILAH.728433.
- [139] R. Demir, "Sanal Gerçeklik Gözlüğüne Dayalı Din Öğretimine Yönelik Öğretmen Adaylarının Tutumu," *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, vol. 8, no. 1, pp. 847–861, Feb. 2019, doi: 10.33206/MJSS.498303.
- [140] H. Gündoğdu and Y. Dikmen, "Hemşirelik Eğitiminde Simülasyon: Sanal Gerçeklik ve Haptik Sistemler," *Journal of Human Rhythm*, vol. 3, no. 4, pp. 173–176, 2017, Accessed: Mar. 15, 2022. Çevrimiçi: <https://dergipark.org.tr/pub/johr/issue/33484/373543>
- [141] R. Aslan and S. Erdoğan, "21. Yüzyılda Hekimlik Eğitimi: Sanal Gerçeklik, Artırılmış Gerçeklik, Hologram," *Kocatepe Veterinary Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 204–212, 2017.
- [142] G. Sarıkoç, "Sağlık Çalışanlarının Eğitiminde Sanal Gerçekliğin Kullanımı," *Hemşirelikte Eğitim ve Araştırma*, vol. 13, no. 1, pp. 11–15, 2016.
- [143] M. Prensky, "Digital Natives, Digital Immigrants Part 1," *On the Horizon*, vol. 9, no. 5, pp. 1–6, Sep. 2001, doi: 10.1108/10748120110424816/FULL/XML.
- [144] S. Savaş, O. Güler, K. Kaya, G. Çoban, and M. S. Güzel, "Eğitimde Dijital Oyunlar ve Oyun ile Öğrenme," *International Journal of Active Learning (IJAL)*, vol. 6, no. 2, pp. 117–140, 2021.
- [145] N. Demirel, (2022). Metaverse eğitim dünyası nasıl etkileyecek? MediaTrend. Çevrimiçi: <https://mediatrend.mediamarkt.com.tr/metaverse-egitim-dunyasi-nasil-etkileyecek/>, Erişim Tarihi: 28.05.2022
- [146] Cybermagonline, (2022). Metaverse Online Eğitim Dünyasını Nasıl Dönüştürebilir? Çevrimiçi: <https://www.cybermagonline.com/metaverse-online-egitim-dunyasini-nasil-donusturebilir>, Erişim Tarihi: 28.05.2022
- [147] İ. Deviren, İ. (2022). Metaverse ve Eğitim – 2. Eğitimheryerde. Çevrimiçi: <https://egitimheryerde.net/metaverse-ve-egitim-2/>, Erişim Tarihi: 28.05.2022
- [148] Y. Yoğun, Y. (2022). Dijital Oyunlar ve Metaverse. Güvenliyoyna. Çevrimiçi: <https://www.guvenliyoyna.org.tr/blog-detay/dijital-oyunlar-ve-metaverse>, Erişim Tarihi: 28.05.2022.
- [149] Cudos, (2021). Metaverse'de oyun oynamanın onu destekleyen altyapıya nasıl bağlı olacağı. Çevrimiçi: <https://www.cudos.org/tr/blog/%F0%9F%8E%AE-metaversede-oyun-oyunamanin-onu-destekleyen-altyapiya-nasil-bagli-olacagini-%F0%9F%95%B8%E%F%B8%8F/>, Erişim Tarihi: 28.05.2022.

[150] Y. Şener, (2022). Geleceğin Mimarlığı Metaverse’te mi? Yapı Dergisi. Çevrimiçi: <https://yapidergisi.com/gelecegin-mimarligi-metaversete-mi/>, Erişim Tarihi: 28.05.2022.

[151] Ş. Yüksel, S. Yıldız, “Metaverse dünyasında değişen sanal-gerçek mekânlar ve tasarımcının rolü”, 7. Uluslararası Zeugma Bilimsel Araştırmalar Kongresi. Gaziantep, 2022.

[152] K. Tarhan, “Siber uzayda realist teorinin değerlendirilmesi”, *Cyberpolitik Journal*, vol. 1no.2, pp. 292-311. 2016.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Energy Economy and Carbon Emission Potential Comparison of Heating Systems by using Multi-Criteria Decision Making Methods

Mirac Oztok^a, Tayfun Menlik^b

Submitted: 28.12.2021 Revised: 05.07.2022 Accepted: 25.07.2022 doi:10.30855/gmbd.0705012

ABSTRACT

The aim of this study is to create a decision making methodology for fuel performances and greenhouse gas emissions of heating systems by considering combination of financial and non-financial criteria which are dependent on the region and the people, and to show logical choices numerically. For this purpose, a specific building with its architectural drawings was specified and heat loss equations were observed by using MS Excel according to TS 825. Calculations of heat loss were performed separately for four different types of heating zones in our country by selecting different cities in these zones. Bu using heat losses which were calculated based on placing the building in different zones, different types of heating strategies were determined. Moreover, fuel costs, installation cost and greenhouse gas emissions were determined based on different fuel usage ratios. These calculations and observed criteria were investigated by Analytical Hierarchy Process (AHP) and VIKOR, which are merged under Multi Criteria Decision Making Methods and an effort for showing the mathematical aspect of comparison of these selections was given in this study.

Keywords: Heating systems, Fuel calculation and Greenhouse gas emissions, Analytical Hierarchy Process, VIKOR, TOPSIS

^a Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6798-8784

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0970-6600

*Corresponding author:
mirac.oztok@gazi.edu.tr

Isıtma Sistemlerinin Enerji Ekonomileri ve Karbon Salınım Potansiyellerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Karşılaştırılması

ÖZ

Çalışmanın amacı, bir ısıtma sistemi seçerken bölgeye ve kişisel isteklere uygun, finansal ve finansal olmayan kriterleri bir arada değerlendirerek, yakıt performansları ve sera gazı salınımı özelinde bir karar verme metodolojisi oluşturmak ve mantıklı seçimleri sayısal olarak göstermektir. Bu amaçla mimari çizimi olan bir bina belirlenmiş, MS Excel kullanılarak TS 825'e uygun ısı kaybı hesabı denklemleri oluşturulmuş, ülkemizde yer alan 4 tip ısıtma bölgesi için şehirler belirlenerek ayrı ayrı hesaplanmıştır. Binanın farklı bölgelere oturtulması esasına göre yapılan ısı kayıpları kullanılarak farklı ısıtma tipleri seçimi ve farklı yakıt kullanımı üzerinden yakıt maliyeti, kurulum maliyeti ve sera gazı salınımı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar ve belirlenen diğer kriterler ise Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve VIKOR ile incelenmiş, seçimlerin birbirleri ile karşılaştırılmasının matematiksel yönü ortaya konmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıtma sistemleri, Yakıt hesabı ve sera gazı salınımı, Analitik Hiyerarşi Prosesi, VIKOR, TOPSIS

1. Introduction

Space heating, or more generally, air conditioning has evolved due to increased prosperity in the last century. In the period until the beginning of the 20th century, the only aim of humanity is to withstand the harsh winter conditions and to warm up, while it had been started to talk about staying in thermal comfort at the end of the same century. Because of this new demand and industrial development, the energy consumption was increased, and the primary energy consumption of the world reached from 3.701,6 million TEP in 1965 to 13.511,2 million TEP in 2017 [1].

Turkey is one of the countries where energy import dependency is high. According to the given data of the General Directorate of Renewable Energy affiliated to the Ministry of Industry and Technology, the ratio of imported energy sources of primary energy use has reached 76% in recent years. Considering the same data, it was seen that primary energy consumption has reached 153 million TEP and the highest rate of consumption with 32% of the total consumption belongs to the Housing and Service sector [2].

Efficient use of energy has gained importance with the increase in energy consumption and the tendency of fossil resources to be depleted rapidly. Energy efficiency is the reduction of energy consumption per unit service or amount of product, without increasing the quality of production and quantity in industrial enterprises, while it increases the standard of living and service quality in buildings [3]. Efficiency allows to reduce emissions by improving energy security, thereby maintaining economic growth. True efficiency policy can achieve more than 40% reduction in world greenhouse gas emissions without requiring any new technology [4]. For example, in the period between 2000 and 2017, energy consumption in residences increased by 21% and reached to 120 exajoules (EJ). Thanks to the expanded energy efficiency policies, technological developments and investment trends, 14 EJ energy was saved. The effectiveness of these savings can be noticed by considering the economic growth, population and residential area increase since the beginning of the 21st century [5].

According to the research carried out by the Ministry of Energy in Turkey, it has been determined that there is a significant energy saving potential up to 30% in the energy building industry, 20% in the industrial sector and 15% in the transportation sector [6]. The 30% energy saving in the building sector can be achieved through the processes such as thermal insulation in the construction phase of the buildings in accordance with the standards (Turkish Standard 825), and the energy efficiency of the heating, cooling and lighting devices used in the residence [7]. The first major movement in the field of energy efficiency in Turkey after the TS 825, Standards of Thermal Insulation in Buildings, is the Energy Efficiency Law (ENVER) which was published in 2007 [8]. This law was followed by the "Regulation on the Sharing of Heating and Sanitary Hot Water Expenses in Central Heating and Sanitary Hot Water Systems" published in 2008 and the "Regulation on the Amendment of the Energy Performance Regulation in Buildings" published in 2010. These law and regulations aimed to use heating systems in a more efficient way depending on the size of the usage. "National Action Plan for Energy Efficiency", which was published in 2018, brought energy efficiency between 2017-2023 to forefront and aimed that "Turkey's Energy Density" (energy consumed per GDP) by 2023, should reduce at least 20% compared to 2011 [9].

One of the most important areas to take precautions to achieve this intended energy efficiency target is residential heating and the energy spent in it. It is estimated that approximately 40% of the emission arising from energy consumption worldwide is caused by the building sector [5].

Aim of the study is to emphasize the importance of efficient use of energy and to demonstrate the logical direction of heating system selection, especially under the criteria of fuel cost and greenhouse gas emissions. For this purpose, mathematical ways of decision making in engineering science have been used. At first, the Analytical Hierarchy Process (AHS) was used in criterion weighting, and the final result was obtained by using TOPSIS and VIKOR in system selection.

2. Literature Review

There are different studies in the literature where energy efficiency and multi-criteria decision making methods are discussed together;

Topoyan et al. [10] had decided using the Fuzzy AHS method to select the air conditioning system to be purchased for faculty of Economics and Administrative Sciences in Dokuz Eylül University. Four different brands were examined under the criteria of installation time, cost, cooling efficiency, heating efficiency, cooling energy cost, heating energy cost, outdoor unit sound level, indoor unit sound level and the area that the outdoor unit would occupy. As a result of the questionnaire, filled by the decision maker, the sound level of the indoor unit and the occupied area by the outdoor unit were the highest weighted criteria. Therefore, option 1 that was best result approaching to 99.25% was selected.

Chinese et al. [11] used Analytical Hierarchy Process (AHP), which is a multi-criteria decision-making method for the selection to be used in the area heating of an industrial facility. The mentioned facility is a hangar type building with a volume of approximately 15000 m³ in Treviso-Italy. Outside temperature was accepted as -5oC and heating day duration was determined as 183 days/year. Different alternatives were determined for heating such as high temperature radiant heating system, hot water air and panel heating system, low temperature wall and floor heating system. These systems were examined under 9 different criteria which are reliability, technical service support, installation time, variable resource usage possibility, suitability of the system for additions to change, thermal comfort, cost, operating cost and fuel cost. The most important criteria were operating cost and fuel cost. They concluded that the best alternative is low temperature wall and floor heating.

Ertuğrul and Aytaç [12] tried to evaluate the combi selection for a apartment in Denizli by using one of the Multi-Critical Decision Making methods, Analytical Network Process (AAS), which is a larger version of the Analytical Hierarchy Process (AHP). The criteria taken into consideration in the evaluation were brand image, customer service, after-sales service, warranty period, continuity of campaigns and campaigns, environmental impact, advertising effect and pricing, respectively. These criteria were weighted with AAS and it is concluded that the criterion with the highest weight is brand image with 37%. Brands A, B and C were successful at 78.82%, 69.72% and 78.78%, respectively.

Ertuğrul and Özçil [13] tried to make an order of preference for A energy class air conditioners with equivalent heating and cooling capacity by using TOPSIS and VIKOR, which are multi-criteria decision making methods. The aim is to compare the methods and results by using two different multi-criteria decision making methods. When results of TOPSIS and VIKOR were compared with respect to providing acceptable advantage and acceptable stability conditions, while the results of TOPSIS method can be assorted as reliable, VIKOR method can not be assorted as reliable since required conditions for the results were not met. The best result among companies A, B, C, D, E, F, G and H, has given firm A by TOPSIS and firm C by VIKOR.

Kontu et al. [14] chose renewable energy based heating systems for the city of Loviisa-Finland under technical, economic, environmental and usage criteria suitable for use in detached houses. 11 different alternatives were evaluated under 15 different criteria by SMAA Method (The Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis). SMAA is an extended version of AHP and is based on the superiority of the criteria with each other. As a result of the evaluation, the biomass fueled local heating system with cogeneration system producing heat and electricity gave the best result. Ground source heat pump is also accepted as the second logical choice.

Omurbek and Aksoy [15] evaluated the performance of a petroleum company, engaged in production in Turkey, between the years 2002-2014 under different criteria; such as the amount of processed crude oil, investment expenditures, production amount, sales amount, product foreign purchase (import) amount, product export (export) amount, net sales amount, operating profit and number of employees. AHP and ENTROPİ methods were used for criterion weighting; and TOPSIS and ELECTRE II were used for evaluation. The year in which the company performed best was found as 2011.

Sağır and Doğanalp [16] have set various criteria for the evaluation of energy resources. These criteria are weighted and alternatives were evaluated by fuzzy TOPSIS method. The energy sources taking into consideration for this selection are renewable energy, fossil energy and nuclear energy. Four academicians with energy expertise took part in this study as decision makers. By choosing four cost-based and eight benefit-based criteria, evaluation was made for a total of twelve criteria. Among these criteria, cost-based ones are impact on cost, environmental impact, risk and impact on climate change. On the other hand, benefit-based criteria are reliability, reserve amount, production capacity,

contribution to sustainability, support by government policies, importance for the economy of the country, simplicity and public acceptance. Renewable energy sources achieved the closest score for the perfect selection for these criteria.

Wang et al. [17] aimed to develop a methodology for decision-making, specifically for local heating systems. They used the fuzzy AHP method to make decisions for local heating systems, which have an important place in efficient heating worldwide. They developed a method based on evaluations including total of eight sub-criteria based on four main criteria.

Arslan [18] uses AHP and ORESTE methods to determine the most effective fuel type for the use of heating fuel in a public building. He choose five different criteria including calories, price, ash amount, storage, labor fees and four different alternatives as hazelnut shell, coal, fuel oil and natural gas. While AHP method is performed through The analysis were performed by both methods and the best result was obtained for the use of natural gas fuel, which was supported by both method's results.

Yang et al. [19] conducted a study for systems used for heating purposes in Denmark. Within the framework of the Danish government's energy strategy plan by 2050, renewable energy-based systems will replace boilers where all oil and its derivatives would be used until 2035. When it was considered that approximately 205.703 houses will switch to the individual renewable energy heating system, it can be seen how major a decision will be taken in Denmark. Solar powered, heat pump sourced and biomass based systems are considered as alternatives for renewable energy-based systems. Eleven criteria have been determined in terms of economical, environmental and technological aspects, and in the light of these criteria, decisions have been made with the TOPSIS method. The best choice among the alternatives is the solar energy based system, while the heat pump is second and the biomass based system is in the third place.

Yan et al. [20] conducted a study on the heating needs of distant communities in Canada. In the examination, it was observed that petroleum and its derivatives were used as primary fuel for heating. Instead of fossil sources, the need for heating was met using three types of biomass-based combustion systems, and the results were examined by the PROMETHEE method. As a result of the examination performed under environmental, social and economical criteria, the best results were obtained in the heating system where wood based biomass was used as fuel.

3. Material and Method

The aim of this study is to create a methodology for making the most accurate heating-fuel choices in heating systems for the residential buildings in Turkey. For this purpose, in the first part of the study, the architectural design of a building that is the most common type constructed in Turkey is selected as baseline. Necessary calculations are performed through the project, that has been chosen as baseline. With this calculation, a basis has been established for the decision making process to be performed in the following parts of this study. The data obtained from the calculation are analyzed by Multi-Criteria Decision Making methods and the most appropriate choice among different alternatives is expressed.

The architectural plan, which is chosen as the main material, is a hypothetical building which is built in accordance with today's construction technique. The hypothetical building consists of an unheated basement, an entrance floor consisting of relatively smaller apartments, 11 similar upper floors and 48 flats in total.

An example apartment in the building is shown in Figure 1.

The criteria determined for the selection of a suitable heating system for this building are listed below;

1. Fuel Cost,
2. Amount of Greenhouse Gas Emission
3. Installation Cost
4. Maintenance Cost
5. Simpleness of Operation
6. Fuel Storage Status

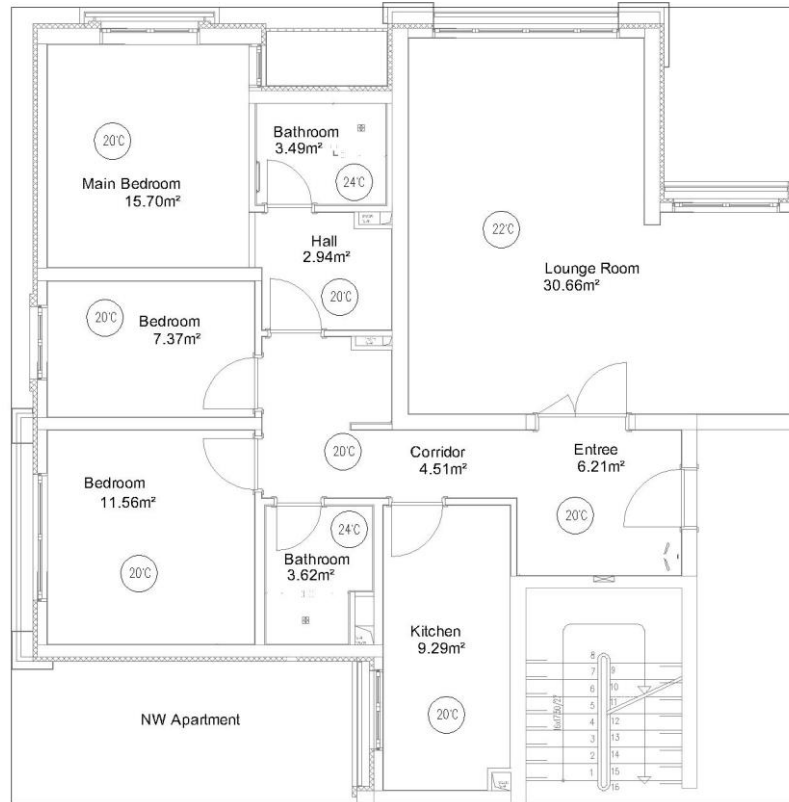


Figure 1. Architectural appearance and acceptable temperatures for locations

The heat loss of the building whose independent areas are determined through the architectural project is calculated. According to this calculation, the associated fuel consumption is found and the fuel cost will be obtained by using the rate of fuel consumption. "Fuel Cost" is the first criterion that is used to examine the alternatives. Greenhouse gas emissions are determined based on fuel consumption calculations; therefore, "Greenhouse Gas Emissions" is the second calculated criterion. The selection of radiator and correspondingly heating system equipment and installation elements for the building, whose thermal load is calculated, are determined and the third criterion, "Installation Cost" is calculated. Marketing survey was carried out for the determination of "Maintenance Cost", which is considered as the fourth criterion. It is determined that the annual maintenance prices would be used for "Maintenance Cost". The fifth criterion "Fuel Storage Status" and the sixth criterion "Simpleness of Operation" are relativistic values. Thereby, these criteria were graded by the method used for weighting at the end of the study. These values are calculated separately for each climate zone where the hypothetical building is located.

Heating system-fuel pairs that are determined as alternatives are as follows;

1. Natural Gas-Combi Boiler (Individual System) A1
2. Natural Gas-Boiler (Central Heating System) A2
3. Fuel Oil-Boiler (Central Heating System) A3
4. Coal-Boiler (Central Heating System) (Three different types of coal) A4, A5, A6
5. LPG Propane-Boiler (Central Heating System) A7

The Heat Loss Calculation Sheet obtained by using MS Excel is given in Table 1. Here, the heat loss of each independent area inside the apartment was calculated separately. Thermal transmittance value of each building component (walls, windows, ceiling, flooring etc.) has been determined. Average outside temperature and heating-cooling day values are obtained from the database of the General Directorate of Meteorology. Room dimensions are obtained by using AutoCAD. The remaining values are obtained from the standard TS-825: Heat Insulation Rules in Buildings.

Table 1. Heat loss account for independent space

HEAT LOSS ACCOUNT SCHEDULE														
Northwest Ground Floor Flat														
Mark	Direction	Surface Calculation					Heat Loss Account							
		Length	Ht & Wd	Surface	Number of area	Disregarded	Considered	K	Temperature Difference (Dt)	K x Dt	Heat Loss	Z: Total Addition	Qh: Heat Req.	
		m	m	m ²	Ad	m ²	m ²	Watt/m ² K	K	Watt/m ²	Watt	1+%	Watt	
		Z01		Main Bedroom		20	oC							
EW1	NW	3,6	3,0	10,8	1									
DGW1	NW	1,6	2,0	3,2	1									
EW1	NW	3,5	3,0	10,5	1	3,2	7,3	0,51	20	10,1		73,9		
DGW1	NW	0,7	1,7	1,2	1		1,2	2,80	20	56,0		66,6		
EW1	NW	1,0	3,0	3,0	1	1,2	1,8	0,51	20	10,1		18,3		
RO2				15,8	1		15,8	2,10	0	0,0		0,0		
FL2				15,8	1		15,8	2,10	10	21,0		31,9		
												779,2	1,12	873
	Qe =	2	x	12,0	x	0,90	x	0,97	x	23	x		1,2	+ 578
														1.451

Radiator lengths are determined for each climate zone and for two different heating system conditions, based on the heat loss values of the building, and then installation costs are calculated. Installation costs are given in Table 2. While calculating the installation costs, "2019 Construction and Installation Unit Price Book" of the Ministry of Environment and Urbanization is used. The installation costs provided in Table 2 are for one climate zone. In parallel with the increase in heat demand, the installation cost of other climatic zones would be higher.

Table 2. Installation cost (for climate zone 1)

Fuel-System Combination	Installation Cost
Natural Gas-Combi Boiler	48.713,31 USD
Natural Gas-Boiler	30.865,84 USD
Fuel Oil-Boiler	28.899,34 USD
Lignite +18 mm. Boiler	29.045,94 USD
Lignite +20 mm. Boiler	29.045,94 USD
Imported Coal-Boiler	29.045,94 USD
LPG-Propane-Boiler	31.615,84 USD

Depending on the radiator lengths, thermal loads that the system will use are calculated. The amount of annually consumed fuel is obtained depending on the fuel lower heat value and system efficiency. In order to calculate the annual amount of fuel, it is necessary to know unit cost of the fuel. In this calculation, needed data for the fuel are taken from the 277th issue of Tesisat Magazine published at 17.01.2019. The unit costs have also been checked from the websites of the specified energy companies. Annual fuel consumption is calculated by using Equation 1.

$$T_{YYT} = \frac{(Q_h \times z \times Z)}{(2 \times H_u \times n_k)} \text{ USD} \quad (1)$$

Q_h = Heat requirement in one hour (kcal/hour)

z = Daily working time (hour)

Z = Annual working time according to climatic conditions (day)

H_u = Lower heat value of fuel (kcal/m³ or kg)

n_k = Heat generator efficiency

The annual fuel cost of the alternatives for the 1st Region obtained from Equation 1 are given in Table 3.

Table 3. Annual fuel consumption costs (for climate zone 1)

Fuel-System Combination	Annual Fuel Consumption Costs
Natural Gas-Combi Boiler	15.654,96 USD
Natural Gas-Boiler	9.275,04 USD
Fuel Oil-Boiler	30.453,04 USD
Lignite +18 mm. Boiler	15.576,77 USD
Lignite +20 mm. Boiler	16.036,89 USD
Imported Coal-Boiler	21.517,17 USD
LPG-Propane-Boiler	41.890,01 USD

Using the annual fuel consumption, TS EN ISO 14064-1,2,3 Greenhouse Gas Calculation Standards [21] and the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5. Evaluation Report [22], the greenhouse gas emission amount is calculated by using Equation 2 for each alternative.

$$E = B \times H_u \times e_f \times 4186,6 \times 10^{-12} \times 10^{-3} \quad (2)$$

E = Greenhouse gas emission amount (ton*emission)

B = Annual fuel amount (m³ or kg/year)

H_u = Fuel's lower thermal value (kcal\ m³ or kg)

e_f = Emission factor (kg\Tj)

Emission factors and emission conversion coefficients are taken with respect to the assumptions in the 5th Evaluation Report and these emission values are given in Table 4 as CO₂.

Table 4. Annual greenhouse gas emission amount (for climate zone 1)

Fuel-System Combination	Annual Greenhouse Gas Emission Amount
Natural Gas-Combi Boiler	133,104 ton CO ₂
Natural Gas-Boiler	78,859 ton CO ₂
Fuel Oil-Boiler	145,913 ton CO ₂
Lignite +18 mm. Boiler	253,318 ton CO ₂
Lignite +20 mm. Boiler	271,931 ton CO ₂
Imported Coal-Boiler	238,552 ton CO ₂
LPG-Propane-Boiler	89,506 ton CO ₂

Maintenance costs for the central system using different fuels and for the individual system with natural gas are determined by the offerings received from the companies serving in this field available in the market. The received offerings are collected under the chamber of the market price research report and the average values of these offerings are taken. Average maintenance costs are given in Table 5. To compare, individual system maintenance has been taken as total for all apartments.

Table 5. Annual maintenance costs (for climate zone 1)

Fuel-System Combination	Annual Maintenance Costs
Natural Gas-Combi Boiler	1.200 USD
Natural Gas-Boiler	500 USD
Fuel Oil-Boiler	750 USD
Lignite +18 mm. Boiler	625 USD
Lignite +20 mm. Boiler	625 USD
Imported Coal-Boiler	625 USD
LPG-Propane-Boiler	675 USD

As the simpleness of operation and fuel storage status are not quantitative observations, it is not possible to make a comparison as in the first four criteria. For these criteria, Analytical Hierarchy Process, which is one of the multi-criteria decision making methods, is used by assigning a value for the evaluation.

4. Evaluation

Up to this part of the study, the first four criteria which are fuel cost, greenhouse gas emission, installation cost and maintenance cost are calculated. For the other two criteria, alternatives would be listed. While making this ranking and then classifying the criteria among themselves, the Analytical Hierarchy Process, which is a multi-criteria decision making method, is used. In the first part of

evaluation, criteria weights are determined by Analytical Hierarchy Process. Criterion weights play an important role in decision making since the result will change if weights change. Therefore, in order to make a proper selection, binary comparisons of the Analytical Hierarchy Process are presented as a questionnaire and the geometric mean of the results of this questionnaire is calculated.

4.1. Criterion weighting with analytical hierarchy process

Analytical Hierarchy Process is a multi-criteria decision making method developed by Thomas L. Saaty in the 1970s and nowadays it is widely used for the solution of complex decision problems [23].

The hierarchical structure of the Analytical Hierarchy Process is shown in Figure 2.

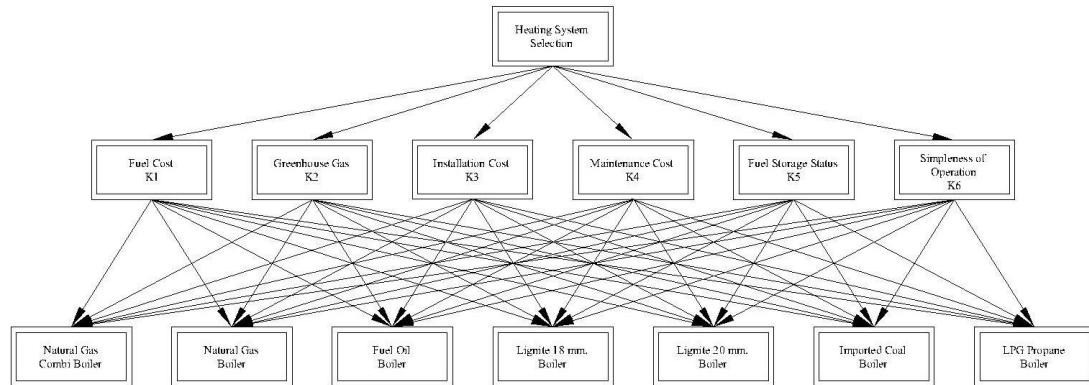


Figure 2. The Relationship between criteria and alternatives according to AHP

In the Analytical Hierarchy Process, the decisions of the decision maker are taken as basis for determining the relative significance of all the criteria. To make this assessment, Saaty questionnaire is created as having 1-9 scale. The relationship of each criterion with another criterion is scored in this questionnaire with respect to the degree of importance. Questionnaire results are examined in matrices to determine the order of importance of the criteria [24].

The definition of the scale 1-9 used in the Analytical Hierarchy Process is given in Table 6. While this evaluation scale is used in binary comparisons, it gives 1/9 as the lowest value and 9 as the highest value [25]. The questionnaire which is carried out for binary ratings based on the scale specified in this study is given in Table 7.

Table 6. Scale of relative importance

Importance Level	Definition	Explain
1	Equal Importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate Importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
5	Strong Importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Very Strong Importance	An activity is favored very strongly over another
9	Extreme Importance	The evidence favoring one activity over another is one of the highest possible order
2,4,6,8	Intermediate Values	Used to represent compromise between the priorities listed above

After the binary ratings of the criteria are accomplished, the matrix operations of AHS are performed and the criteria weights are found. The binary ratings of the criteria are used for the geometric mean of these values which are obtained as a result of the surveys conducted by mechanical engineers working in this field. AHS procedures are finally completed and the criteria weights obtained within acceptable limits as a result of consistency analysis are given in Table 8.

Similar AHP operations are repeated for the purpose of assigning a value for simplicity of operation and fuel storage status criteria, where quantitative calculations are not possible. The numerical values obtained for these criteria are given in Table 9.

Table 7. Binary rating survey of criteria on Saaty Scale

Criteria	Saaty Scale																	Criteria
Fuel Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Installation Cost
Fuel Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fuel Storage Status
Fuel Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Amount of Emission
Fuel Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Simpleness of Operation
Fuel Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maintenance Cost
Installation Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fuel Storage Status
Installation Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Amount of Emission
Installation Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Simpleness of Operation
Installation Cost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maintenance Cost
Fuel Storage Status	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Amount of Emission
Fuel Storage Status	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Simpleness of Operation
Fuel Storage Status	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maintenance Cost
Amount of Emission	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Simpleness of Operation
Amount of Emission	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maintenance Cost
Simpleness of Operation	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Maintenance Cost

Table 8. Criterion weights resulting from AHP

Fuel-System Combination	Criterion Weights Resulting from AHP
Fuel Cost	35,145%
Installation Cost	10,117%
Fuel Storage Status	4,140%
Amount of Emission	30,011%
Simpleness of Operation	8,036%
Maintenance Cost	12,552%

Table 9. Values of simpleness of operation and fuel storage status criteria achieved with AHP

Simpleness of Operation			Fuel Storage Status		
Alternatives	Percentage	Preference Rate	Alternatives	Percentage	Preference Rate
A1	35,431 %	7,43	A1	38,879 %	9,65
A2	21,957 %	4,60	A2	20,168 %	5,01
A3	10,447 %	2,19	A3	4,028 %	1,00
A4	4,772 %	1,00	A4	6,555 %	1,63
A5	4,772 %	1,00	A5	6,555 %	1,63
A6	4,772 %	1,00	A6	6,555 %	1,63
A7	17,849 %	3,74	A7	17,260 %	4,29

In the study so far, the numerical values of the alternatives under the criteria and the hierarchical structure (weights) of the criteria among themselves are determined. Under the criteria discussed at the beginning of this study, TOPSIS and VIKOR methods are used to find the optimum result by choosing from the alternatives.

4.2. Making selection with TOPSIS method

The TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method is one of the multi-criteria decision making methods and developed by Hwang and Yoon in 1981 [26]. It is established based on the assumption that the alternative solution point is the shortest distance to the positive-ideal solution and the farthest distance to the negative-ideal solution. TOPSIS method does not make a qualitative conversion, it can be applied directly on the data [27].

For example, if the goal is making profit, the proximity to the ideal solution means maximizing the profit, and the distance to the negative ideal solution means minimizing the cost. If the ideal solution is not implemented or achieved, the point closest to the ideal solution must be selected [28].

TOPSIS method also has implementation steps and matrix solutions similar to AHP. In the flow chart given in Figure 3, the steps of the TOPSIS method are given in order. It is clearly seen from the flow chart where AHP is involved in the transaction.

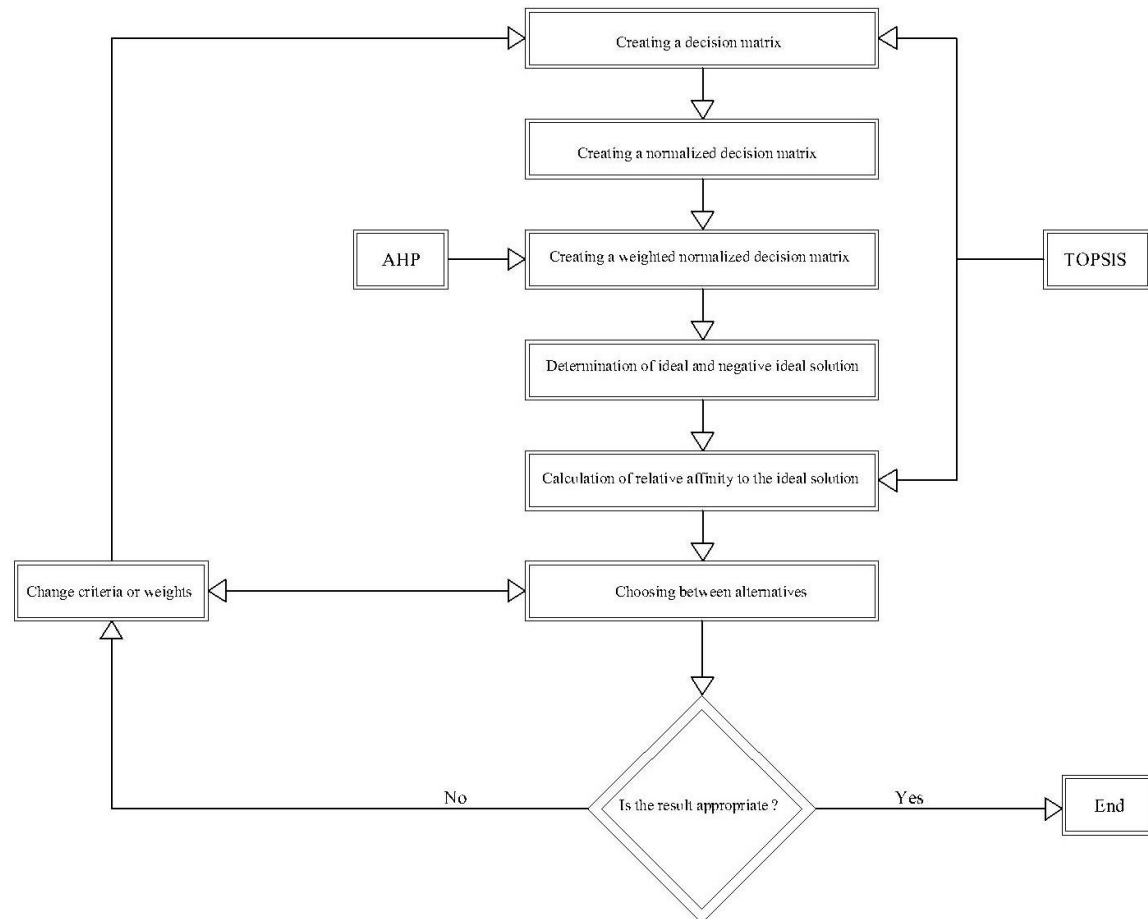


Figure 3. TOPSIS flow chart

When the related matrix operations are solved by following the flow chart above, the results in Table 10 is obtained by using the TOPSIS method. TOPSIS method determines the best result (ideal) and the worst result (non-ideal) by getting the best and the worst results under each criterion among the alternatives. Then, a result has been accomplished by looking at the proximity to the best result and distance to the worst result, that are obtained by using TOPSIS. The values in Table 10 are the ideal proximity values of the selection.

As a result of the selection with the TOPSIS method, the ideal solution, which is the closest result to the value of "1", is the Natural Gas-Boiler system with approximately 88%. The second result is the Natural Gas-Combi, or individual system, with about 75%. This calculation is repeated for all climatic zones where the hypothetical building is located.

4.3. Making selection with VIKOR method

The VIKOR method, designed by Serafim Opricovic and Gwo-Hshiung Tzeng (2004), is one of the multi-criteria decision analysis methods [29]. It is designed to offer a compromised solution set, that targets maximum group benefit and minimum individual regret in decision problems with opposite criteria. The VIKOR (The Vise Kriterjumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) method has been developed for the optimization of complex systems [30].

Table 10. TOPSIS ideal solution proximity value

Fuel-System Combination	Ci* (Ideal Solution Proximity Value)	Ranking
Natural Gas-Combi Boiler	0,749662	2
Natural Gas-Boiler	0,876127	1
Fuel Oil-Boiler	0,448229	6
Lignite +18 mm. Boiler	0,512380	3
Lignite +20 mm. Boiler	0,487274	4
Imported Coal-Boiler	0,451017	5
LPG-Propane-Boiler	0,420294	7

Like the TOPSIS method, the VIKOR method requests weight vectors from the decision maker. Therefore, the weight vectors were determined by the Analytical Hierarchy Process at the beginning of this study. The operating logic of AHP and VIKOR method working together is shown in Figure 4 [31]. The operating logic of AHP and TOPSIS method working together is the same.

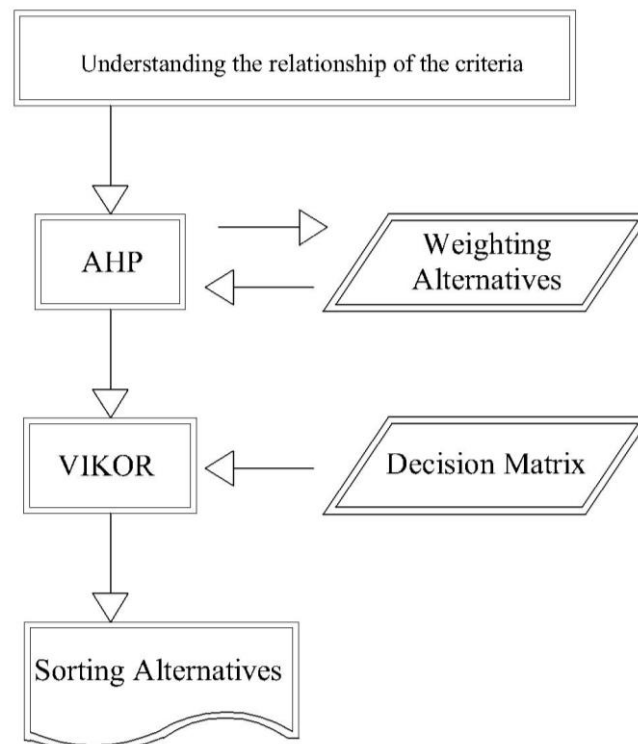


Figure 4. VIKOR flow chart

The aim of using VIKOR method is to reach a compromised solution. It targets the minimum individual regret based on the maximum group benefit. The compromise solution is the closest solution to the ideal, and compromise is to reach an agreement on common acceptance. According to the VIKOR method, the closest option to the ideal solution is the first choice. The values in Table 11 are obtained by repeating the relevant matrix operations by using VIKOR method. Maximum group benefit is calculated according to veto, consensus and majority status; and alternatives are ranked. The ranking is given in Table 12. The control of the conditions (advantage and acceptable stability) of the VIKOR method and its results are shown in Table 13.

According to veto, consensus and majority conditions, the best alternative is the Natural Gas-Boiler central system, while the second best alternative is the Natural Gas-Combi individual system. As a result of VIKOR Analysis for the Problem of Selecting the Best Heating System, it is shown that the Natural Gas-Boiler system is the most suitable one for the conditions of $q = \{0,00; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00\}$, since the acceptable advantages and stability conditions are provided at the same time.

Table 11. Qi Values calculated by VIKOR Method

q:{0,00;0,25;0,50;0,75;1,00} Parameters					Fuel-System Combination
q>0,50 "Majority"					
q=0,50 "Consensus"					
q<0,50 "Veto"					
0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	
Qi	Qi	Qi	Qi	Qi	
(q=0,00)	(q=0,25)	(q=0,50)	(q=0,75)	(q=1,00)	
0,285	0,386	0,486	0,586	0,687	Natural Gas-Combi Boiler
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Natural Gas-Boiler
0,610	0,689	0,767	0,846	0,925	Fuel Oil-Boiler
0,746	0,787	0,828	0,868	0,909	Lignite +18 mm. Boiler
0,838	0,874	0,911	0,948	0,984	Lignite +20 mm. Boiler
0,673	0,755	0,837	0,918	1,000	Imported Coal-Boiler
1,000	0,977	0,955	0,932	0,910	LPG-Propane-Boiler

Table 12. Sorting alternatives with VIKOR Method

Parameters					Fuel-System Combination
Qi	Qi	Qi	Qi	Qi	
(q=0,00)	(q=0,25)	(q=0,50)	(q=0,75)	(q=1,00)	
2	2	2	2	2	Natural Gas-Combi Boiler
1	1	1	1	1	Natural Gas-Boiler
3	3	3	3	5	Fuel Oil-Boiler
5	5	4	4	3	Lignite +18 mm. Boiler
6	6	6	7	6	Lignite +20 mm. Boiler
4	4	5	5	7	Imported Coal-Boiler
7	7	7	6	4	LPG-Propane-Boiler

Table 13. Control of the conditions

Parameters	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Q(A2)	0,285	0,386	0,486	0,586	0,687
Q(A1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Q(A2)-Q(A1)	0,285	0,386	0,486	0,586	0,687
DQ	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Condition 1	Correct	Correct	Correct	Correct	Correct
Condition 2	Correct	Correct	Correct	Correct	Correct

5. Results and Discussion

The structure of Turkey are generally composed of multiple residential structures or in other words, apartments. From this point of view, an insulated building manufactured in accordance with general construction techniques in Turkey is considered. This study is carried out on the assumption that this building is placed in various cities selected from 4 different climate zones, taking place in the scope of TS 825. Structural and thermal load analysis are performed on the building and its parts by using MS Excel. The most commonly used two heating systems, individual and central heating systems, are tackled for total of 7 alternatives including individual system having single fuel and central system having 6 different fuels. The main reason why all of the alternatives are fossil fuel is that they are used with overwhelming superiority in space heating. The aim of this study is to select the best option from these fuels and heating systems, which which are not likely to be abandoned in the near future. Therefore, energy efficiency which is the most important point for reducing the fossil-related climatic damages is emphasized.

The performance of the building is tried to be evaluated in terms of these alternatives for different climatic regions. Firstly, under what criteria it should be evaluated is considered; and then, the most sought-after features in heating systems are examined. The six most important criteria are identified while choosing a heating system. Four of these criteria are based on numerical data and two of them on experience. The mentioned criteria are fuel cost, greenhouse gas emission amount, installation cost, maintenance cost, simpleness of operation and fuel storage status. Numerical data are used at decision making phase. Relative assessment based on experience has been a different decision mechanism. While weighting these determined criteria, Fuel Cost and Greenhouse Gas Emission are wanted to be prioritized.

The results obtained by using AHP + TOPSIS are given in Figure 5 in visual and detailed form. When these data are analyzed, it is the Natural Gas-Boiler system that achieves the best results in 86-88% band among all regions. While the second best alternative, the Natural Gas-Individual system, has 75% in the province of Izmir in the 1st Climate Region, this rate reaches 81% when it comes to Erzurum, located in the 4th Climate Region. Therefore, it is concluded that as the outdoor temperature and heating time increase, the difference between the two best alternatives decreases. There is no such increase between in other alternatives. After the natural gas fired alternatives, there are coal fired alternatives in the ranking. The success rate of Soma Lignite alternatives, which gives almost the same results in all 4 Climate Zones, is around 50%. The main reason why lignite coal comes after natural gas within alternatives is the effect of the fuel cost criterion. Coal fuel has given the worst results among alternative fuels in greenhouse gas emission criteria, although its performance in fuel cost is good. For this reason, the success rate remained around 50%. When the lignite coal systems, import coal system and fuel-oil system, which have almost the same installation cost, are compared and it is seen that, imported coal comes after lignite fuel system, and fuel oil comes after imported coal. By using TOPSIS, imported coal and fuel oil systems, whose success performances are very close to each other, are examined. It is seen that the imported coal system has better results in fuel cost comparing to the fuel-oil system in greenhouse gas emission. LPG-Propane central system has the worst score among the alternatives. The main reason is that although it gives the second best result in greenhouse gas emission, the fuel cost is very high.

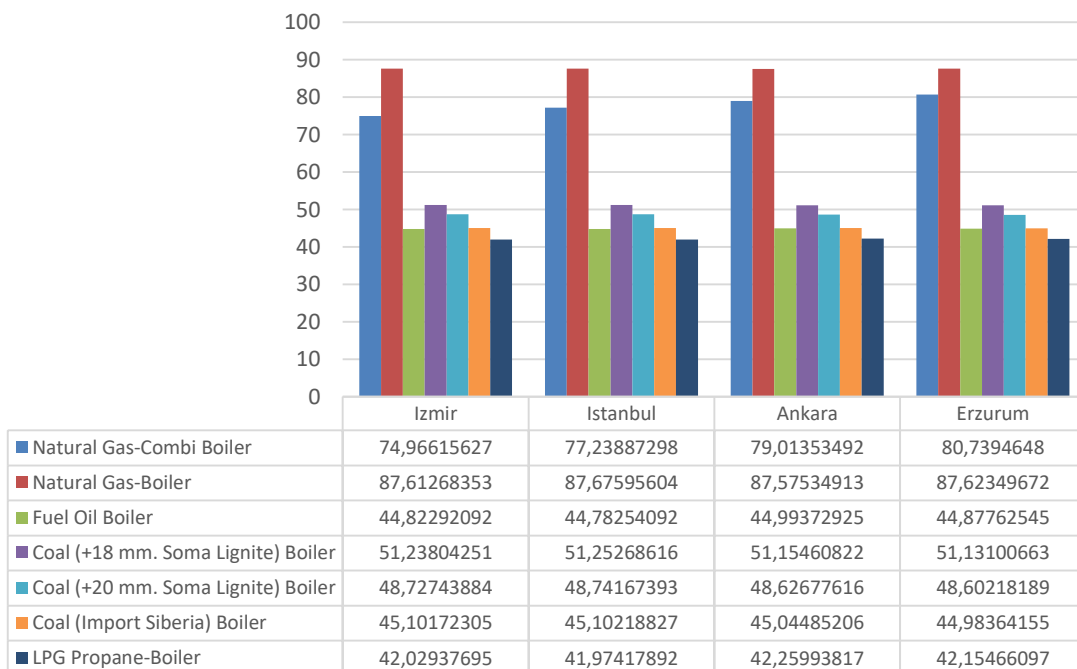


Figure 5. Status of alternatives across climate zones

Ranking of the criteria is obtained in the evaluation with AHP + VIKOR method, but no data can be obtained to determine how far they achieved the desired perfect result. VIKOR method is focused on the exact solution more than sequencing. It aims to select alternatives at an acceptable level in terms of the given criteria. According to VIKOR, there is a clear selection or a cluster of possible choices. VIKOR method gives exactly the same results with TOPSIS.

For this reason, the solution desired to be found in this study is obtained clearly. In the evaluation performed with two different multi-criteria decision making mechanisms, Natural Gas fueled central heating system provided the best result under the specified criteria for all climatic regions.

Another point to be evaluated in this study is to test the same fuel type for each province in different systems. In this way, the mathematical infrastructure of the importance of the energy economy can be clearly seen. For future directions in energy investment decisions, especially for countries with serious energy importers like Turkey, the term of "Energy Efficiency" should also be considered as a source of energy at this present time. Energy efficiency has already taken a part among the energy sources as "Sixth Fuel" after coal, oil, natural gas, nuclear energy and renewable energy [32]. When this study is examined in terms of energy efficiency, the fuel difference between the systems of individual or central system, that have been designed for the same building as heating systems, within a specified climate zone, is 40.75% for Izmir, 37.47% for Istanbul, 34.78% for Ankara and 32.15% for Erzurum. Turkey, where the majority of the population lives at rivage and which is highly dependent on imported energy, can save large amount of energy with the efficient use of heating energy. The profit rate that can be obtained in the central system is given in Figure 6 for Fuel Cost. While analyzing these data, it should not be forgotten that Erzurum is located in the 4th Climate Region; therefore, it consumes longer heating time and consequently more energy consumption. Thus, although profitability percentage tends to decrease towards Erzurum, savings would be higher on a building basis if consumption figures are taken into consideration. Population ratio of the provinces has been ignored since this study is conducted for a specific building. It is clear that the highest energy saving would belong to Istanbul if population ratio of the provinces has been considered.

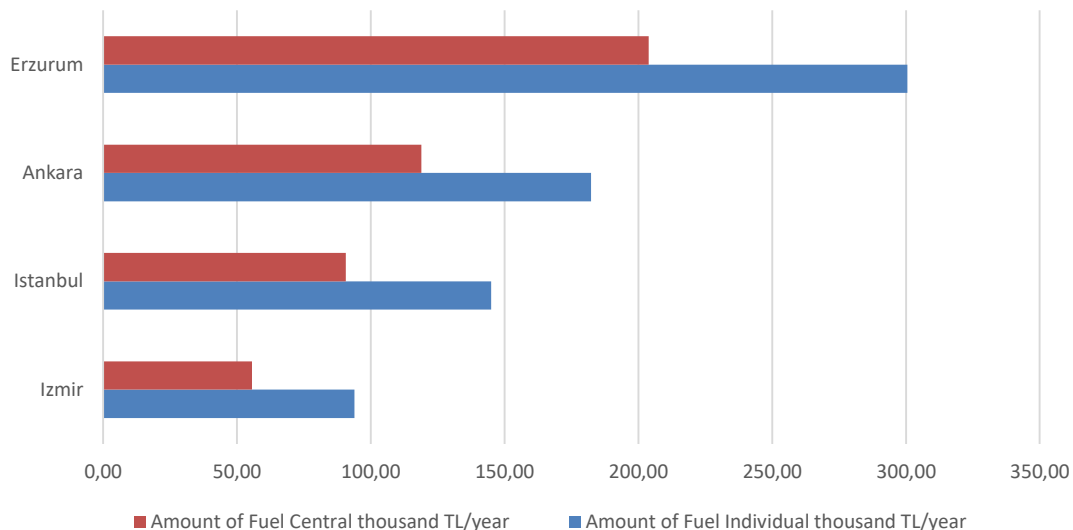


Figure 6. Comparison of fuel costs of the same fuel and different systems

People who live in Turkey, do not prefer warm with the central heating system. Within the scope of the Energy Efficiency Law (ENVER) and Regulation on Increasing Efficiency in the Use of Energy Resources and Energy Released, although it is obligatory to install suitable heating systems for energy efficiency in buildings that are built over a certain square meter in space heating, people still continue to return to the individual system by taking advantage of legal gaps [33]. The main reason is that sufficient heat value in the environment is a relative concept. In addition, in the buildings heated by the central heating system, the sensed temperature changes according to the location of the apartments. Although the direction coefficients are taken into account in heat calculations, the effect of the sun is undeniable. Even if the ambient temperature in the residences is equal to the temperature determined in the project, users consider the ambient temperature is insufficient [7]. For example, the apartment which is located the upper floor of the building on the north side, to the system is operated more to reach the specified temperature, while there is more heat than desired in the apartments on the lower floors. This is a problem among the hosts since fair heating cannot be provided in exchange for the price they pay. For this reason, it is required to raise the awareness of the public on the heat share meter system, which provides to pay as much as the amount of energy consumed.

This study can be expanded for different criteria or varying alternatives. The fossil-based systems used in this study can be combined with renewable energy sources whose use is increasing day by day. In this case, different criteria such as energy continuity, establishment, use and control of system automation should be taken into consideration. From another point of view, how much energy efficiency can be achieved by using passive heating techniques in architecture and its effects can be studied. Lignite coal-based alternatives will be on higher position if the study is carried out with respect to cyclical economy and consequently if a criterion that will prioritize the use of domestic fuel is added. These possibilities and possible scenarios can be further illustrated. The main objective is to reduce the damage to the environment with less consumption by establishing an energy efficient system. This study has also been completed for this purpose and a selection methodology has been developed for building heating between fossil-based systems.

Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- [1] BritishPetroleum, "Primary Energy Consumption," *BP Stat. Rev. World Energy*, vol. 67, ss. 8–51, 2018.
- [2] Ş. Yalçın, "Türkiye'nin Enerji Gerçeği", *bau.edu.tr*, 2012. [Çevrimiçi]. Available at: <https://bau.edu.tr/icerik/1312-turkiyenin-enerji-gercegi>. [Erişim: 23-Nis-2019].
- [3] H. Doğan ve N. Yılankırkan, "Türkiye'nin Enerji Verimliliği Potansiyeli ve Projeksiyonu", *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, cilt 3, sayı 1, ss. 375–383, 2015.
- [4] F. Birol, "Energy Efficiency 2018", 2018. [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.iea.org/efficiency2018/>. [Erişim: 21-Nis-2019].
- [5] International Energy Agency, *Energy Efficiency Report 2018*, Paris: IEA Publications, 2018.
- [6] Z. Yumurtacı ve A. H. Dönmez, "Konutlarda Enerji Verimliliği", *Mühendis ve Makina Derg.*, cilt 637, sayı 54, ss. 38–43, 2013.
- [7] A. Özsoy, "Merkezi Isıtma Sistemlerinde Isınma Problemleri ve Yakıt Paylaşımı", *SDU Int. Technol. Sci.*, c. 1, sayı 1, ss. 10–17, 2009.
- [8] T.C. Resmi Gazete, "Enerji Verimliliği Kanunu," *resmigazete.gov.tr*, 02.05.2007, [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/05/20070502-2.htm>. [Erişim: 07-Jul-2022].
- [9] S. Uzun ve H. Kazan, "ÇKKV AHP, TOPSIS ve PROMETHEE Karşılaştırılması-Gemi İnşada Ana Makine Seçimi Uygulaması," *J. Transp. Logist.*, cilt 1, sayı 1, ss. 100–113, 2016. doi:10.22532/jtl.237889
- [10] M. Topoyan, M. E. Güler, ve İ. Gürler, "İklimlendirme Sistemi Seçiminde Bulanık AHS Uygulaması," VIII. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 2008, ss. 71–79.
- [11] D. Chinese, G. Nardin, ve O. Saro, "Multi-Criteria Analysis for the Selection of Space Heating Systems in an Industrial Building," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 556–565, 2011. doi:10.1016/j.energy.2010.10.005
- [12] İ. Ertuğrul ve E. Aytaç, "Analitik Ağ Süreci Yöntemi ve Kombi Seçim Probleminde Uygulanabilirliği," *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Derg.*, cilt 27, sayı 2, ss. 79–92, 2012.
- [13] İ. Ertuğrul ve A. Özçil, "Çok Kriterli Karar Vermede TOPSIS ve VIKOR Yöntemleriyle Klima Seçimi," *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Derg.*, cilt 4, sayı 1, ss. 267–282, 2014.
- [14] K. Kontu, S. Rinne, V. Olkkonen, R. Lahdelma, and P. Salminen, "Multicriteria Evaluation of Heating Choices for a New Sustainable Residential Area," *Energy Build.*, vol. 93, pp. 169–179, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.024
- [15] N. Ömürbek ve E. Aksoy, "Bir Petrol Şirketinin Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri İle Performans Değerlendirmesi," *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, cilt 21, sayı 3, ss. 723-756, 2016. doi:10.21076/vizyoner.657718
- [16] H. Sağır ve B. Doğanalp, "Bulanık Çok-Kriterli Karar Verme Perspektifinden Türkiye İçin Enerji Kaynakları Değerlendirmesi," *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, cilt 11, sayı 1, ss. 233–256, 2016. doi:10.51551/verimlilik.663721
- [17] H. Wang, L. Duanmu, R. Lahdelma, and X. Li, "A Fuzzy-Grey Multicriteria Decision Making Model for District Heating System," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 1051–1061, 2018. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.048
- [18] H. M. Arslan, "AHP ve ORESTE Yöntemleri İle En Etkin Yakıt Türünün Belirlenmesi," *Dicle Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, cilt 21, ss. 161–170, 2018.

- [19] Y. Yang, J. Ren, H. S. Solgaard, D. Xu, and T. T. Nguyen, "Using Multi-Criteria Analysis to Prioritize Renewable Energy Home Heating Technologies," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 29, pp. 36–43, 2018. doi:10.1016/j.seta.2018.06.005
- [20] C. Yan, D. Rousse, and M. Glaus, "Multi-Criteria Decision Analysis Ranking Alternative Heating Systems for Remote Communities in Nunavik," *J. Clean. Prod.*, c. 208, ss. 1488–1497, 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.104
- [21] TSE, Türk Standardları Enstitüsü, *Sera Gazları - Bölüm 1 Sera gazı emisyonlarının ve uzaklaştırmalarının kuruluş seviyesinde hesaplanmasına ve rapor edilmesine dair kılavuz ve özellikler*, Kabul 05.06.2007, TS EN ISO 14064-1 (Eski no: TS ISO 14064-1).
- [22] The Core Writing Team, R. K. Pachuri, ve L. Meyer, *IPCC Fifth Assessment Report of the Climate Change*, Geneva, Switzerland, 2014.
- [23] T. L. Saaty ve G. L. Vargas, *Model, Methods, Concepts & Applications of The Analytic Hierarchy Process*, Massachusetts, USA: Kluwer's International Series, 2001.
- [24] B. F. Yıldırım ve E. Önder, *Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*. 3. baskı. Bursa: Dora Yayıncılık, 2018.
- [25] M. Timor, *Yöneylem Araştırması*. İstanbul: Türkmen Kitabevi, 2010.
- [26] A. Eleren ve M. Karagül, "1986-2006 Türkiye Ekonomisinin Performans Değerlendirmesi," *Celal Bayar Üniversitesi İ.İ.B.F Derg.*, cilt 15, sayı 1, s. 6, 2008.
- [27] N. Ömürbek, Y. Makas, ve V. Ömürbek, "AHP ve TOPSIS Yöntemleri İle Kurumsal Proje Yönetim Yazılımı Seçimi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, cilt 21, ss. 59–83, 2015.
- [28] D. N. Ghosh, "Analytic Hierarchy Process & TOPSIS Method to Evaluate Faculty Performance in Engineering Education," *UNIASCIT*, cilt 1, ss. 63–70, 2011.
- [29] E. Çevik ve Y. Gökşen, "Yatırım Projelerinin Değerlendirilmesinde AHP-VIKOR Entegrasyonu ile Bir KDS Önerisi," *Ege Strat. Araştırmalar Derg.*, cilt 7, sayı 2, s. 219, 2016.
- [30] G. H. Tzeng ve J. J. Huang, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. USA: CRC Press, 2011.
- [31] M. Khezrian, W. M. N. W. Kadir, S. İbrahim, ve A. Kalantari, "A Hybrid Approach for Web Service Selection", *Int. J. Comput. Eng. Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 190–198, 2012.
- [32] Y. A. Çengel, "Enerji Kaynağı Olarak Enerji Verimliliği," 2018. [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.yunuscengel.com/enerji-kaynagi-olarak-enerji-verimliliği/>. [Erişim: 07-May-2019].
- [33] T.C Resmi Gazete, "Enerji Kaynaklarının Ve Enerjinin Kullanımında Verimliliğin Artırılmasına Dair Yönetmelik (Regulation on Increasing Efficiency in the Use of Energy Resources and Energy)," resmigazete.gov.tr, 25.10.2018, [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2008/10/20081025-4.htm>. [Erişim: 07-Jul-2022].

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of The Effect of Processing Parameters on Air Fluid Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance by Taguchi Method

Ramazan Çakıroğlu^{a*}, Abdusselam Eken^b, Adem Acır^c

Submitted: 02.05.2022 Revised: 05.07.2022 Accepted: 25.07.2022 doi:10.30855/gmbd.0705013

ABSTRACT

Keywords: Vortex tube, Taguchi, ANOVA, Temperature difference

^{a*} Gazi University,
Vocational School of Technical Sciences
06374 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3120-1599
e mail: rcakiroglu@gazi.edu.tr

^b Gazi University,
Institute of Science and Technology,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6025-1288

^c Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9856-3623

*Corresponding author:
rcakiroglu@gazi.edu.tr

In this study, the feasibility of maximum temperature gradient performance in an air flow Ranque-Hilsch vortex tube was investigated with the help of the Taguchi method. 27 experiments were conducted using three different nozzle types (Inclined, Flower and S type), three different nozzle numbers (4, 5 and 6) and three different system inlet pressure (100, 200 and 300 kPa) parameters. The experiments were carried out using different nozzle types, number of nozzles and inlet pressure to the system. Depending on the determined parameters, maximum temperature differences (ΔT) were obtained. Depending on the experimental data obtained, the highest ΔT values were determined for the most suitable process parameters with the help of the Taguchi method. As a result, for maximum ΔT , the most suitable operating parameters in the Ranque-Hilsch vortex tube with air flow were obtained as A1B1C3 with nozzle type inclined, nozzle number "4" and inlet pressure "300 kPa". In addition, with the ANOVA statistical analysis, the parameter that most affected the ΔT maximum temperature difference was the nozzle type with approximately 92%, while the vortex pressure input was the second parameter with approximately 6%. This study made a significant contribution to the determination of the effects of different types of designed nozzles on ΔT .

Akışkanlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü Performansına İşlem Parametrelerinin Etkisinin Taguchi Metodu ile İncelenmesi

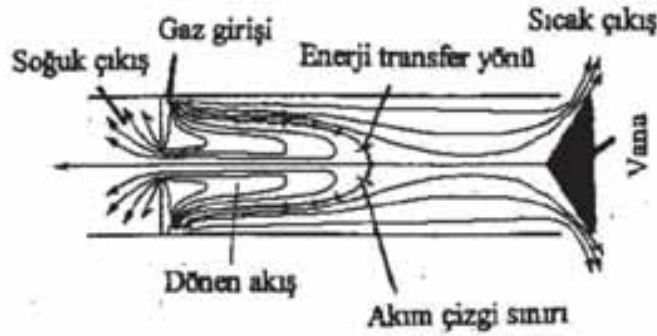
ÖZ

Bu çalışmada, Taguchi metodu yardımıyla hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde maksimum sıcaklık gradyan performansı elde edilebilirliği incelenmiştir. Üç farklı nozul tipi (Eğimli, Çiçek ve S tipi), üç farklı nozul sayısı (4, 5 ve 6) ve üç farklı sisteme giriş basınç (100, 200 ve 300 kPa) parametreleri kullanılarak 27 deney yapılmıştır. Belirlenen parametrelere bağlı olarak maksimum sıcaklık farkları (ΔT) elde edilmiştir. Elde edilen deney verilerine bağlı olarak en yüksek ΔT değerleri Taguchi metodu yardımıyla en uygun işlem parametreleri için belirlenmiştir. Sonuç olarak, maksimum ΔT için hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde en uygun işlem parametreleri nozul tipi eğimli, nozul sayısı "4" ve giriş basıncı "300 kPa" olmak üzere A1B1C3 olarak elde edilmiştir. Ayrıca ANOVA istatistiksel analiz ile ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametre yaklaşık % 92'lik oranla nozul tipi olurken, vorteks basınç girişi yaklaşık % 6 ile ikinci etki eden parametre olmuştur. Bu çalışma, farklı tiplerde tasarlanan nozulların ΔT üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde önemli katkı sağlamıştır.

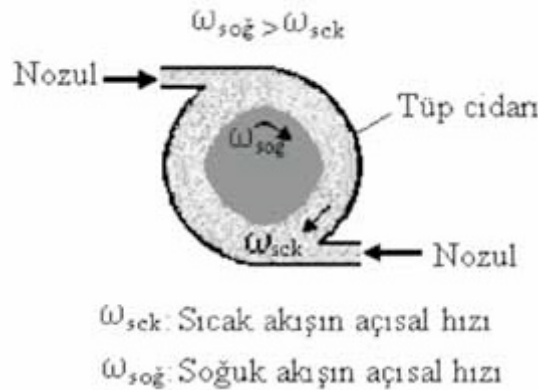
Anahtar Kelimeler: Vortex tüp, Taguchi, Varyans analizi, Sıcaklık farkı

1. Giriş (Introduction)

Vorteks tüpü 1931 yılında George Joseph Ranque tarafından bulunmuş sonrasında Rudolph Hilsch tarafından geliştirilmiş ve bu iki araştırmacının ismini alarak Ranque-Hilsch vorteks tüpü olarak adlandırılmıştır [1]. Vorteks tüpü, kontrol vanası dışında herhangi bir hareketli parçası olmayan sadece tüpe giren basınçlı gaz akışkan kullanılarak çalışan basit bir sistemdir. Bu sistem tüpe teğetsel olarak giren basınçlı gaz akışkanı, sıcak ve soğuk iki farklı akışa ayırarak aynı anda hem ısıtma hem de soğutma işlemi gerçekleştirmektedir [2-4]. Vorteks tüpünün ısıtma ve soğutma fonksiyonunu temel çalışma prensibi Şekil 1 ve 2 'de görüleceği üzere basınçlı akışkan tüpe teğetsel olarak girmektedir. Tüp girişinde basıncın düşürülerek akış hızının artması amacıyla nozul kullanılır. Akış nozuldaki hızdan geçtikten sonra hızın artmasıyla akış tüpün silindirik yapısından dolayı dönmeye başlar. Merkezde yüksek açısız hızla dönen akış merkezkaç kuvvetine bağlı olarak tüp cidarına doğru açılır. Böylelikle tüp merkezindeki akışkan ile tüp cidarındaki akışkan arasında basınç farkı oluşur. Momentumun korunumu ilkesi gereği merkezdeki akışın açısız hızı daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla vorteks tüp içerisinde iki farklı hızda dönen akış oluşmaktadır. Merkezdeki akışın daha yüksek hızda olması nedeniyle cidardaki akışı ivmelendirmeye zorlamaktadır. Bu şekilde merkezdeki akıştan cidardaki akışa doğru mekanik enerji transferi gerçekleşir. Mekanik enerjisi azalan merkezdeki akış soğuk akış, merkezden aldığı mekanik enerjiden dolayı cidardaki akış sıcak akış olmaktadır [5].



Şekil 1. Karşıt akışlı vorteks tüp (Counter flow vortex tube) [5]



Şekil 2. Vorteks tüp içerisindeki sıcak ve soğuk akış hareketleri (Hot and cold flow movements in the vortex tube) [5]

Literatürde vorteks tüp performansını etkileyen bazı parametreler üzerinde birden fazla çalışmalar yapılmıştır. Mohammadi ve Farhadi [6] tarafından yapılmış olduğu çalışmada vorteks tüpte performansa etki eden optimum nozul sayısı ve nozul çapının performansa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda, nozul çapları 2, 2.5, 3, 4 mm giriş çaplarına sahip nozullar arasında ise en yüksek performansı sağlayan nozul giriş çapı 2mm olan vorteks tüpün en yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür. Pinar vd [7] tarafından yapılan çalışmada Ranque- Hilsch Vorteks tüp performansı Taguchi metodu ile analiz optimize edilmiştir. Yapılan optimizasyonda oksijen, argon ve nitrojen akışkanları için performansa etki eden en iyi vorteks tüp parametreleri belirlenmiştir. Kırmacı [8] tarafından yapılan çalışmada farklı nozul sayısı ve giriş basınçlarında oksijen ve hava için Ranque-Hilsch Vorteks tüplerinde enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda sıcak ve

soğuk çıkışlar için faydalanılabilir enerji parametreleri tespit edilmiştir. Sarifudin ve arkd. [9] tarafından yapılan çalışmada vorteks tüpünün soğuk ve sıcaklık parametrelerini, performans soğutma katsayısını (COP) ve parametrelerin performansa etkisi incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, analizler sonrasında, en optimum soğuk çıkış sıcaklığının basınçlı soğutma uygulanan tüpte 1,5 bar basınç, % 30 ayırışma değerinde 14,07 °C olduğu, optimum COP değerinin basınçlı soğutma uygulanan tüpte 0,5bar basınç ve % 70 ayırışma değerinde 0.119227 olduğu tahmin edilmiştir. Liang vd. [10] tarafından yapılan çalışmada vorteks tüpünde farklı parametreler, nozul sayısı, valf konik açısı ve nozul malzemelerinin soğutma, ısıtma kapasitesi ve ekserji verimliliğini incelenmiştir. Deneysel sonuçlar paslanmaz çelik, alüminyum alaşım malzemelerden üretilen vorteks üreticilerin verimliliğe etkisi, basınç için 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MPa, nozul sayısı 2, 3, 4, 5, 6 , soğuk koni açısı 0°, 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, parametreleri uygulanarak en optimum değer gözlemlenmiştir. Subudhi ve Şen [11] tarafından vorteks tüpler üzerine yapılan çalışmalarla ilgili bir derleme yapılmış ve vorteks tüpün optimum performansına yönelik en uygun geometrik ve çalışma parametrelerine (sıcaklık farkı, soğuk kütle fraksiyonu, performans katsayısı ve izentropik verimlilik gibi) göre korelasyonlar sunulmuştur. Dinçer vd. [12] tarafından yapılan çalışmada Ranque- Hilsch Vorteks tüplerde performans analizi yapılmış ve inceleme sonucunda performansa etki eden parametreler belirlenmiştir. Gökçe çalışmasında polyamid ve pirinç malzemelerinden üretilmiş farklı nozul tipi (3, 4, 5 ve 6) ve farklı basınç (200, 350, 500 ve 650 kPa) parametreleri kullanarak deneyler yapmıştır. Deney sonuçlarına göre optimum parametre olarak pirinç malzemedeki 500 kPa basınçta ve 6 nozul sayısında ΔT değerini (68.4) elde etmiştir. Ayrıca çalışmasında ANOVA ile yaklaşık %92 oranında en etkili parametre olarak basınç parametresinin etki ettiğini ifade etmiştir [13]. Kaya çalışmasında Taguchi metodu yardımıyla üç farklı akışkan türü (hava, oksijen ve karbondioksit), üç farklı giriş basıncı (150, 300 ve 450 kPa) ve üç farklı pirinç ve poliamid malzemeye sahip nozul (3, 4 ve 5) kullanılarak vorteks tüpünün performans göstergesi $\Delta T'$ i hesaplamıştır. Yapılan çalışma sonucunda vorteks tüpünün performansına çalışma basıncı %79.50 oranında etki ettiği belirlenmiştir [14]. Mohammad O. Hamdan vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, boru uzunluğu, çapı ve iç konik açısı vb. parametrelerin vorteks tüpünün enerji ayırışma performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde hava akışkanlı bir vorteks tüpte, hava girişi basıncı 3, 4, 5 ve 6 bar, boru çapları D=9, 16, ve 26 mm ve boru uzunluğu L=66, 113 ve 158 mm için optimum performans araştırılmıştır. Yapılan çalışma şartları için optimum performansın 113 mm uzunluk, 16 mm çap ve 4°den küçük iç konik açı için elde edilmiştir [15]. Kaya (2020) tarafından Taguchi yöntemi kullanılarak paralel bağlı vorteks tüpü sisteminin performansını etkileyen faktörler için optimizasyon prosedürü içeren deneysel çalışmada basınçlı akışkan olarak hava, oksijen ve karbondioksitin kullanılmıştır. 3,4 ve 5 nozul numarasına sahip polyamid ve pirinç malzemedeki oluşan nozullarla giriş basınç değerleri 150, 300 ve 450 kPa olarak uygulanmıştır. Bu parametreler kontrol parametreleri olarak seçilmiş ve deney tasarımında Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Vorteks tüpünün performans göstergesi olarak ΔT değeri için Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyon çalışmasında yüzde 79.5 değerle en önemli kontrol faktörünün çalışma basıncı olduğu belirtilmiştir. ΔT değeri üzerine etki eden diğer parametrelerin önem sırasıyla; basınçlı akışkan tipi, nozul sayısı ve nozul malzemesi olduğu görülmüştür [14]. Pinar vd (2009) tarafından Taguchi yöntemi ile karşı akışlı bir girdap tüpündeki proses parametrelerinin sıcaklık farkı üzerindeki etkisi ve optimizasyonunun araştırıldığı deneysel çalışmada, giriş basıncı 150, 400, 650kPa, nozul sayısı 2,4, 6 ve 0.5 , 0.6 , 0.7 soğuk kütle fraksiyonu koşulları altında gerçekleştirilen deneyler Taguchi'nin L27 ortogonal dizisine göre planlanmıştır. Varyans analizi ve regresyon analizi ile faktörlerin ve etkileşimlerinin sıcaklık farkı üzerindeki etkileri belirlenmiş ve %93.5 korelasyon katsayısı ile modellenmiştir. Sıcaklık farkının giriş basıncındaki artışla birlikte arttığı, nozul sayısındaki artışla soğuk kütle fraksiyonu ile azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık farkı değeri için optimum parametrelerin 650 kpa'lık bir giriş basıncı, 2'lik bir nozul sayısı ve 0.7'lik bir soğuk kütle fraksiyonu olması gerektiğini ifade etmişlerdir [16]. Gokce (2020) Ø10 mm iç çapa ve 100 mm gövde uzunluğuna sahip sıcak sıvı çıkışı tamamen açık bırakılmış ters akışlı vorteks tüp kullandığı deneysel çalışmasındaki 50 kPa artışlarla 200-550 kPa değerleri arasında değişen basınç değerleri paralel ve seri bağlantı tipi, pirinç ve polyamid malzemedeki vorteks üretici, 4 ve 6 nozul sayısı parametreleri ile yaptığı optimizasyonda Taguchi L16 mix tipi deney seti kullanılmıştır. Performans göstergesi olan ΔT değeri için yapılan ANOVA uygulaması sonucunda, ΔT değerinin en çok giriş basıncı değerinden etkilendiği bu değeri etkileyen diğer parametreler bağlantı türü, nozul sayısı ve malzeme türü olarak sıralandığı tespit edilmiştir [17].

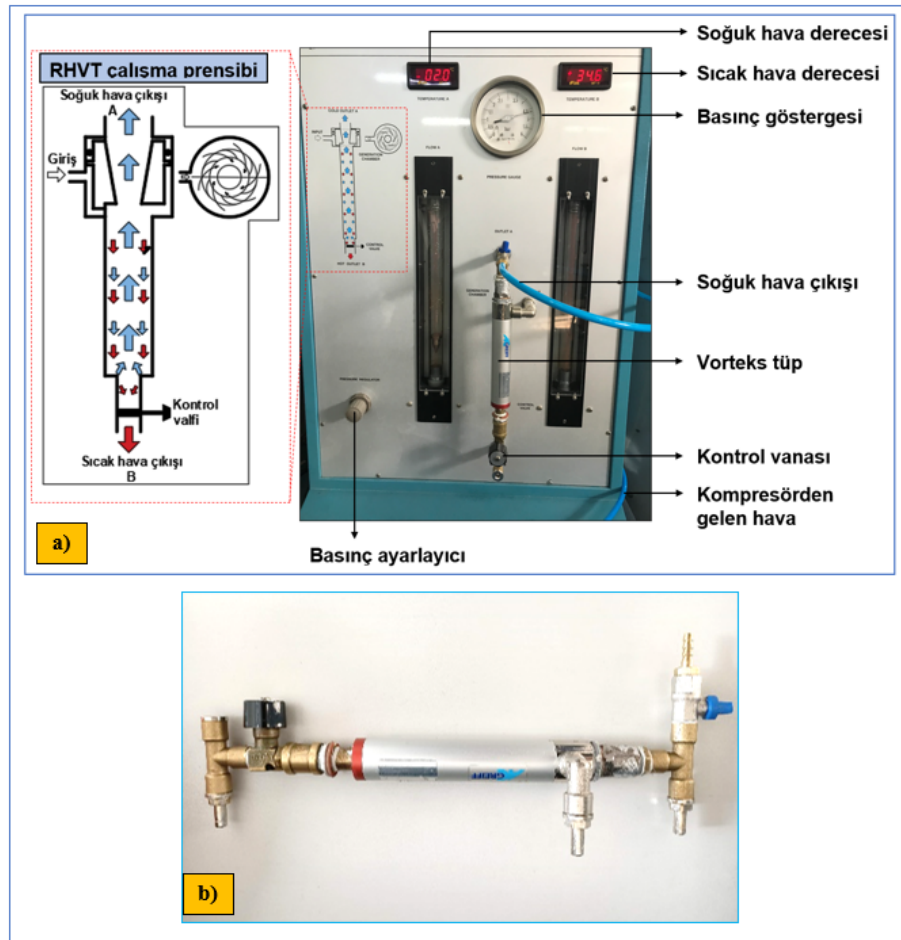
Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı yenilikçi yön olarak eğimli, çiçek ve "S" yapılı nozullar tasarlanmıştır. Literatürde verilen yaygın tip nozullara göre yeni tip bir yaklaşım olarak çiçek ve "S" yapılı nozulların vortex tüp performansı üzerindeki etkisi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Hava

akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüpünde yeni tip farklı nozul tipi (eğimli, çiçek ve "S" yapılı), farklı nozul sayısı (4,5 ve 6) ve sisteme giriş basıncı (1,2 ve 3 bar) kullanılarak Taguchi metodu yardımıyla maksimum sıcaklık gradyan performansı (ΔT) araştırılmıştır. Belirlenen parametrelere bağlı olarak, en uygun işlem parametreleri ANOVA analizi ile belirlenmiştir.

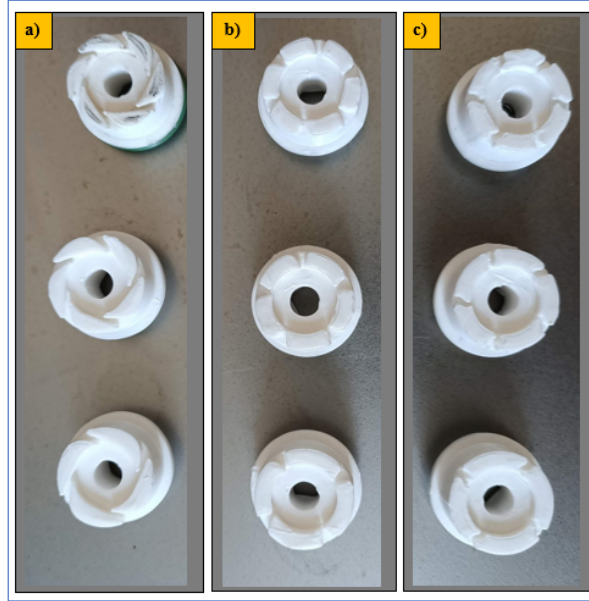
2. Materyal Metot (Material Method)

2.1. Deneysel çalışma (Experimental study)

Deneyler Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde Şekil 1'de gösterilen $\varnothing 10$ mm iç çapı ve 320 mm gövde uzunluğunda karşıt akışlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü deney seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada Şekil 2'de görüldüğü gibi vorteks üreteç olarak üç farklı tip yapı kullanılmıştır. Bu yapı tipleri literatüre bağlı olarak eğimli, çiçek ve "S" yapılı olarak belirlenmiştir. Polyamid plastik kullanılarak vorteks üreteçler 3-D printer aracılığıyla üretilmiştir. Belirlenen bu yapı tiplerinin Ranque-Hilsch vorteks tüpü performansına etkisi amaçlanmıştır. Ranque-Hilsch vorteks tüpünde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Hava sisteme farklı basınçlarda kompresör yardımıyla iletilmiştir. Bunun yanı sıra, farklı sisteme giriş basınçları (1, 2 ve 3 bar) ve nozul sayıları (4, 5 ve 6) değiştirilerek farklı yapıdaki vorteks üreteçlere bu parametrelerin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde, vorteks tüpünden çıkan sıcak ve soğuk akışkan sıcaklıkları deney sistemi üzerinde bulunan ± 1 °C hassasiyetteki dijital termometreler yardımıyla ölçülmüştür. Deney sistemindeki debileri kontrol edebilmek amacıyla bir kontrol vanası kullanılmaktadır. Kontrol vanası çalışma şartları (açma-kapama) yardımıyla, Vorteks tüpü sıcak (T_h) ve soğuk (T_c) akışkanın sıcaklıkları arasındaki fark ($T_h - T_c$) incelenmiştir. Deneylerde sıcak ve soğuk çıkış sıcaklık ölçüm değerleri sabitlenene kadar uygulanmış ve deneysel sonuç verileri elde edilmiştir.



Şekil 1. a) Vorteks cihazı, b) Kullanılan Ranque-Hilsch vorteks tüpü (a) Vortex device, b) Ranque-Hilsch vortex tube used)



Şekil 2. 4, 5 ve 6 nozula sahip, a) eğimli, b) çiçek ve c) "S" yapılı tipteki vorteks üreteçleri (Vortex generators with 4, 5 and 6 nozzles, a) inclined, b) flower and c) "S" structure type)

2.2. Metot (Method)

Ranque-Hilsch vorteks tüpünde soğutma (ΔT_{sgk}) ve ısıtma (ΔT_{sck}) etkileri sırasıyla eşitlik 1,2 ve 3'te verilmiştir [7, 8, 11, 12, 18, 19]:

$$\Delta T_{sgk} = T_{gir} - T_{sgk} \quad (1)$$

$$\Delta T_{sck} = T_{sck} - T_{gir} \quad (2)$$

burada T_{gir} vorteks tüpü giriş sıcaklığı, T_{sgk} vorteks tüpünde soğuk ucun çıkış sıcaklığı ve T_{sck} vorteks tüpün sıcak ucun çıkış sıcaklığıdır. Genel olarak Ranque-Hilsch vorteks tüp performansı, ısıtma etkisi ile soğutma etkisi arasındaki fark olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak, Ranque-Hilsch vorteks tüp performans denklemini aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\Delta T = T_{sck} - T_{sgk} \quad (3)$$

Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını tanımlayan sıcaklık gradyanı, " T_{sck} " sıcak çıkış sıcaklığı ile " T_{sgk} " soğuk çıkış sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı olarak tanımlanmıştır [7, 8, 11, 12, 19].

3. Taguchi Metodu ile Analiz (Analysis with the Taguchi Method)

3.1. Sinyal/Gürültü (S/N) analizi (Signal/Noise (S/N) analysis)

Tablo 1'de verilen işlem parametrelerine bağlı olarak her bir deneyden elde edilen en yüksek sıcaklık farkı (ΔT) elde edilmiştir. Tasarıma bağlı olarak elde edilen deneysel ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel tasarım işlem parametre seviyeleri (Experimental design process parameter levels)

Sembol	Parametreler	Seviyeler		
		1	2	3
A	Nozul tipi	Eğimli	Çiçek	S tipi
B	Nozul sayısı	4	5	6
C	Basınç (kPa)	100	200	300

Tablo 1'de verilen işlem parametrelerine bağlı olarak her bir deneyden elde edilen en yüksek sıcaklık

farkı (ΔT) değerleri Taguchi metodu yardımıyla optimize edilmiştir. En uygun işlem parametrelerinin belirlenmesinde S/N (Signal/Noise) sinyal gürültü oranı Eşitlik (4)'de belirtildiği gibi, "en büyük en iyi" fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır [20-25].

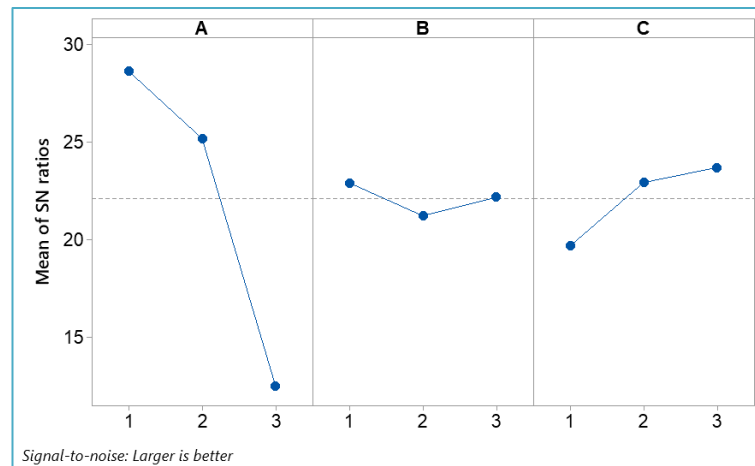
$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

Bu eşitlikte y_i : Performans yanıtının i . gözlem değeri, n : bir denemede test sayısını tanımlamaktadır. Elde edilen deney sonuçları yardımıyla işlem parametreleri için optimum değişkenler S/N oranlarına bağlı olarak tahmin edilmiştir. Şekil (3)' de maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranı verilmiştir.

Tablo 2. Deney sonuçları ve S/N oranları (Experiment results and S/N ratios)

Deney numarası	Nozul tipi	Nozul sayısı	Basınç	Sıcaklık farkı (ΔT)	S/N oranı (dB)
1	1	1	1	21.3	26.5676
2	1	1	2	31	29.8272
3	1	1	3	36.4	31.2220
4	1	2	1	18.4	25.2964
5	1	2	2	25.6	28.1648
6	1	2	3	29	29.2480
7	1	3	1	21.3	26.5676
8	1	3	2	30.5	29.6860
9	1	3	3	35.1	30.9061
10	2	1	1	14.1	22.9844
11	2	1	2	20.3	26.1499
12	2	1	3	22.1	26.8878
13	2	2	1	13.7	22.7344
14	2	2	2	20	26.0206
15	2	2	3	23.4	27.3843
16	2	3	1	12.9	22.2118
17	2	3	2	18.5	25.3434
18	2	3	3	21.7	26.7292
19	3	1	1	3.9	11.8213
20	3	1	2	5.2	14.3201
21	3	1	3	6.5	16.2583
22	3	2	1	2.5	7.9588
23	3	2	2	4	12.0412
24	3	2	3	4	12.0412
25	3	3	1	3.5	10.8814
26	3	3	2	5.4	14.6479
27	3	3	3	4.2	12.4650

Şekil (3)' de maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için işlem parametreleri için yapılan optimizasyonla yapılacak test çalışmalarında en iyi çalışma performans parametresi belirlenmiştir. " ΔT " maksimum sıcaklık farkı için yapılan optimizasyonda Şekil 3'den yararlanarak uygun çalışma parametreleri "A1B1C3" olarak bulunur. Burada, eğimli nozul tipi "A1", nozul sayısı "B1" (4 kanal) ve vorteks giriş basıncı "C3" (300 kPa) tür.



Şekil 3. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için S/N oranları ana etki grafiği (S/N ratios main effect plot for maximum temperature difference (ΔT) values)

3.2. Sıcaklık gradyanı (ΔT) için ANOVA sonuçları (ANOVA results for temperature gradient (ΔT))

ANOVA, istatistiksel varyans analizi yapan bir yöntem olup deneysel tasarımlarda belirlenen çalışma parametrelerinin etki durumlarının hangi faktör ve seviyeleri cinsinden ne derece etkili olduğunun belirlenmesini ortaya koymaktadır. Hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını etkileyen parametrelerin faktör ve seviyeleri cinsinden belirlemek amacıyla yapılan deneysel tasarımda 27 deney yapılmış ve her bir ölçüm sonucunda Eşitlik (3) te tanımlandığı gibi ΔT maksimum sıcaklık farkı ölçülmüştür. İşlem parametrelerinin Ranque-Hilsch vorteks tüp performansına etki seviyesi (PCR) Eşitlik (4) kullanılarak hesaplanmıştır [20–25].

$$PCR = \left(\frac{SS_A - (V_e) \cdot (V_A)}{SS_T} \right) \times 100 \quad (4)$$

Tablo 3 incelendiğinde ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametrenin yaklaşık % 92'lik oranla nozul tipi belirlerken, vorteks basınç girişi yaklaşık %6 ile takip etmektedir. Nozul yapıları kendi aralarında ΔT maksimum sıcaklık farkı için değerlendirildiğinde eğimli nozul, çiçek ve S tipi nozula göre daha iyi değerlere sahip olmasının nedeni olarak teğetsel hızlarla olan ilişki olarak açıklanabilecektir.

Tablo 3. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for maximum temperature difference (ΔT) values)

Parametre	SD	KT	KO	F	P	% PCR
Nozul tipi	2	1296.36	648.178	726.43	0	91.9
Nozul sayısı	2	12.82	6.41	7.18	0.004	0.783
Basınç	2	81.63	40.816	45.74	0	5.668
Hata	20	17.65	0.892			1.646
Toplam	26	1408.65				

SD: Serbestlik Derecesi; KT: Kareler Toplamı; KO: Karelerin Ortalaması PCR:Yüzde Katkı Oranları

3.3. Doğrulama test verileri (Validation test data)

Deneysel tasarımlarda Taguchi metodu yardımıyla ANOVA analiz sonuçlarına göre, en iyi işlem parametreleri belirlenmektedir. Yapılan analizlere göre tahmin edilen en uygun parametreler belirlenerek, sonrasında deney tasarım optimizasyonuna doğrultusunda doğrulama testleri gerçekleştirilmekte ve belirlenen optimum parametrelerin doğruluğu kontrol edilmektedir. ANOVA analizlerine göre elde edilen ΔT maksimum sıcaklık farkı için "A1B1C3" parametreleri kullanılarak, tekrarlayan (3 adet) kontrol deneyleri deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilen sonuçların güvenilirliği incelenmiştir [26, 27] ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Maksimum sıcaklık farkı (ΔT) için doğrulama test sonuçları (Confirmation test results for maximum temperature difference (ΔT))

	Başlangıç parametresi	Optimum parametreleri	
		Tahmin	Deney
Seviye	A2B3C1	A1B1C3	A1B1C3
ΔT (°C)	18.5	32.0889	36.4
S/N oranı (dB)	25.3434	31.0098	31.2220
İyileştirme oranı S/N	5.8786 dB (%18.83)		

Doğrulama deneyleri sonunda ΔT maksimum sıcaklık farkı için iyileştirme oranı 5.8786 dB (%18.83) olarak elde edilmiştir.

4. Sonuçlar (Consequences)

Hava akışkanlı Ranque-Hilsch vorteks tüp performansını belirlemek üzere ΔT maksimum sıcaklık farkı için deneysel bir çalışma yapılmış olup, bu araştırma bulguları aşağıda verilmiştir:

- Eğimli nozul tipi, çiçek ve S tipi nozul yapısına göre daha fazla maksimum sıcaklık farkı (ΔT) değerleri elde edilmiştir. S tipi nozul yapısında en düşük sıcaklık farkı (ΔT) elde edilmiştir.
- Nozul tipleri için vorteks giriş basıncı ve nozul sayısı arttıkça maksimum sıcaklık farkı (ΔT)

değerleri artış kendi arasında göstermiştir.

- Taguchi deney tasarımına bağlı olarak en iyi çalışma parametresi “ ΔT ” maksimum sıcaklık farkı için eğimli nozul tipi “A1”, nozul sayısı “B1” (4 kanal) ve vorteks giriş basıncı “C3” (300 kPa)’da “A1B1C3” olarak hesaplanmıştır.
- ΔT maksimum sıcaklık farkını en fazla etkileyen parametre yaklaşık % 92’lik oranla nozul tipi belirlerken, vorteks basınç girişi yaklaşık % 6 ile takip etmektedir. En yüksek sıcaklık farkı sonucu eğimli tip nozul yapısı vermiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] V. Kirmaci, “Seri ve Paralel Bağlı Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpün Isıtma- Soğutma Performansının Karşılaştırılması,” The Comparison of Heating and Cooling Performance of a Serial and Parallel Connected Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube, 2017, doi:10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.332249.
- [2] V. Kirmaci, “Altı Nozullu Vorteks Tüpünün Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, c. 10, s. 4, ss. 377-381, 2007.
- [3] M. Yılmaz, Ö. Çomaklı, M. Kaya, ve S. Karşı, “Vorteks tüpleri: 1 Teknolojik gelişim,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s 553, ss. 46-54, 2006.
- [4] M. Yılmaz, Ö. Çomaklı, M. Kaya, ve S. Karşı, “Vorteks tüpleri: 2 enerji ayrışma mekanizması ve performans,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s. 554, ss. 42-51, 2006.
- [5] K. Dincer, Ş. Başkaya, V. Kirmaci, H. Usta, ve B. Z. Uysal, “Akışkan olarak hava, oksijen, karbondioksit ve azot kullanılan vorteks tüpün performansının incelenmesi,” *Mühendis ve Makina*, c. 47, s. 560, ss. 36-40, 2006.
- [6] S. Mohammadi and F. Farhadi, “Experimental analysis of a Ranque-Hilsch vortex tube for optimizing nozzle numbers and diameter,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 500-506, 2013. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.07.043
- [7] A. M. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, “Optimization of counter flow Ranque-Hilsch vortex tube performance using Taguchi method,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 6, pp. 1487-1494, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.02.018
- [8] V. Kirmaci, “Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 7, pp. 1626-1633, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.04.007
- [9] A. Sarifudin, D. S. Wijayanto, and I. Widiastuti, “Parameters optimization of tube type, pressure, and mass fraction on vortex tube performance using the Taguchi method,” *International Journal of Heat and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 597-604, 2019. doi:10.18280/ijht.370230
- [10] F. Liang, G. Tang, C. Xua, and vd, “Experimental investigation on improving the energy separation efficiency of vortex tube by optimizing the structure of vortex generator,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 195, pp. 117222, 2021. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117222
- [11] S. Subudhi and M. Sen “Review of Ranque-Hilsch vortex tube experiments using air,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 172-178, 2015, doi:10.1016/J.RSER.2015.07.103
- [12] K. Dinçer, S. Baskaya, B. Z. Uysal and I. Uçgul, “Experimental investigation of the performance of a Ranque-Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet,” *International journal of refrigeration*, vol. 32, no. 1, pp. 87-94, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.06.002
- [13] H. Gokce, “Evaluation and Optimization of O2 Used Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 43, no. 13, pp. 1566-1576, 2021, doi:10.1080/15567036.2020.1817188
- [14] H. Kaya, “Evaluation of performance of parallel connected vortex tubes using air, oxygen and carbondioxide with Taguchi method,” *Heat Mass Transfer*, vol. 57, no. 1, pp. 165-174, 2021. doi:10.1007/s00231-020-02968-w
- [15] M. O. Hamdan, S.-A. B. Al-Omari, and A. S. Oweimer, “Experimental study of vortex tube energy separation under different tube design,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 91, pp. 306-311, 2018. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.034
- [16] A. M. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, “Statistical Assessment of Counter-Flow Vortex Tube Performance for Different Nozzle Numbers, Cold Mass Fractions, and Inlet Pressures Via Taguchi Method,” *Experimental Heat Transfer*, vol. 22, no. 4, pp. 271-282, 2009. doi:10.1080/08916150903099058
- [17] H. Gökçe, “Optimization of Ranque-Hilsch vortex tube performances via Taguchi method,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, no. 11, pp. 1-11, 2020, doi:10.1007/s40430-020-02649-z
- [18] S. Eiamsa-ard and P. Promvong, “Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 7, pp. 1822-1842, 2007. doi:10.1016/j.rser.2007.03.006

- [19] P. K. Singh, R. G. Tathgir, D. Gangacharyulu and G. S. Grewal, "An experimental performance evaluation of vortex tube," *IE(I) J-MC*, vol. 84, pp. 149-153, 2004.
- [20] W. H. Yang and Y. S. Tarn, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 84, no 1, pp. 122-129, 1998, doi:10.1016/S0924-0136(98)00079-X
- [21] R. Çakıroğlu and A. Acır, "Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method," *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3525-3531, 2013. doi:10.1016/j.measurement.2013.06.046
- [22] A. Acır, M. E. Canlı, İ. Ata and R. Çakıroğlu, "Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis," *Applied Thermal Engineering*, vol. 122, pp. 330-338, 2017.
- [23] İ. Ata ve A. Acır, "Hava akışkanlı güneş kolektöründe ısı transferi iyileştirmesine etki eden parametrelerin taguchi metodu ile optimizasyonu," *Politeknik Dergisi*, vol. 23, no.2, pp. 527-535, 2020. doi:10.2339/politeknik.525884
- [24] O. K. Çinici, M. E. Canlı, R. Çakıroğlu and A. Acır, "Optimization of melting time of solar thermal energy storage unit containing spring type heat transfer enhancer by Taguchi based grey relational analysis," *Journal of Energy Storage*, vol. 47, pp. 103671, 2022. doi:10.1016/j.est.2021.103671
- [25] M. B. Özdemir and A. Acır, "Optimization of the effective parameters on ground-source heat pumps for space cooling applications using the taguchi method," *Heat Transfer Research*, vol. 51, no. 6, 2020.
- [26] N. Yaşar, M. Günay, E. Kılık, and H. Ünal, "Multiresponse optimization of drillability factors and mechanical properties of chitosan-reinforced polypropylene composite," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, s. 0892705720939163, 2020, doi:10.1177/0892705720939163
- [27] R. Çakıroğlu and M. Günay, "Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7305-7317, 2020. doi:10.1016/j.jmrt.2020.04.060

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Reduction of emissions of toxic and greenhouse gases with AOA algorithm in power systems containing distributed generation system: Nevşehir-Kozaklı case study

Ozan Akdağ^a

Submitted: 15.12.2021 Revised: 21.05.2022 Accepted: 22.07.2022 doi:10.30855/gmbd.0705014

ABSTRACT

Keywords: ORC, Monte carlo simulation, AOA, Green energy

^{a,*} Turkish Electricity Transmission Corporation, 44100, Malatya, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8163-8898
e mail: d3615190253@ogr.inonu.edu.tr

*Corresponding author:
d3615190253@ogr.inonu.edu.tr

This study presents the Archimedes Optimization Algorithm (AOA) to solve the optimal power flow (OPF) with an object function that reflects minimizing toxic/greenhouse gas emissions in power systems containing distributed production system (DUS). AOA is tested on IEEE 30-bus, 13-bus sample Nevşehir distribution system, respectively. The effectiveness of the AOA algorithm is first tested on the IEEE 30-bus and obtained results are compared with those of other techniques published in the literature. In this study, organic rank cycle (ORC) geothermal power plant is integrated into the 13-bus test system as DUS. In this context, firstly, geothermal resources in Nevşehir province are examined and the site where ORC plant will be established is determined. Next, the potential heat energy and electricity generation are determined by Monte Carlo simulation and compared with the apparent heat and electric out calculated in this paper. In this paper, based on the comparison results, an ORC model with the 2.351 MW installed capacity is proposed for the relevant location. Subsequently, the ORC model and regional distribution system are modeled using DigSilent software. In this virtual model, with the integration of ORC, load flow analysis is performed according to Newton Raphson and AOA methods, and the amount of reduction of greenhouse gas emissions is interpreted.

Dağıtık üretim sistemi içeren güç sistemlerinde AOA algoritması ile zehirli ve sera gaz emisyonlarının azaltımı: Kozaklı vaka çalışması

ÖZ

Bu makale, Dağıtık Üretim Sistemi (DUS) içeren güç sistemlerinde zehirli/sera gaz emisyonunu en aza indirmeyi hedefleyen amaç fonksiyonuyla, Optimum Güç Akışı (OGA) sorununu çözmek için Arşimet Optimizasyon Algoritmasını (AOA) sunmaktadır. Bu çalışmada AOA algoritmasının etkinliği, IEEE 30- test bara ve 13-bara örnek Nevşehir dağıtım sisteminde test edilmiştir. Öncelikle AOA algoritması, IEEE 30-bara test sistemine uygulanmış ve elde edilen simülasyon sonuçları son yıllarda literatürde yayınlanan farklı tekniklerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada modellenen 13-bara test sistemine Organik Rank Çevrimli (ORÇ) jeotermal santral, DUS olarak entegre edilmiştir. Bu bağlamda, Türkiye’de önemli orta derecede jeotermal kaynak potansiyeline sahip ve herhangi bir jeotermal enerji santrali bulunmayan Nevşehir ilinde, bir ORÇ jeotermal santralinin kurulum aşamaları analiz edilmiştir. Öncelikle, Nevşehir ilinde bulunan jeotermal kaynaklar incelenerek, ORÇ santrali kurulacak saha belirlenmiştir. Daha sonra bu sahadaki jeotermal kaynağın (sıcaklık, vb.) özelliğine göre bu sahanın üretilebilir ısı ve elektrik potansiyeli Monte Carlo simülasyonu ile belirlenerek, bu çalışmada hesaplanan görünür kapasite ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu karşılaştırma sonucu, ilgili sahada 2,351 MW’lık bir ORÇ santral kurulabileceği ön görülmüştür. Devamında ORÇ santral ile bölgesel dağıtım şebekesinin sanal modellenen DigSilent yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bu sanal modelde ORÇ’nin devreye girmesiyle Newton Raphson ve AOA yöntemlerine göre yük akışı analizi yapılarak, sera gazı emisyonlarının azaltım miktarı yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ORÇ, Monte carlo simülasyonu, AOA, Yeşil enerji

1. Giriş (Introduction)

Enerji sektörü dünyadaki diğer sektörler göre daha yüksek yakıt emisyonu üretmektedir. Bu sektör dünyadaki toplam yakıt emisyonunun yaklaşık üçte ikisine denk yakıt emisyonu üretir[1]. Özellikle termik enerji santralleri çevre kirliliğine, ozon tabakasının incelmeye ve küresel ısınmaya neden olan CO_x, CO, NO_x ve SO_x gibi gazların üretilmesine neden olur [1]. Bu gazlardan olan NO_x ve SO_x hem çevre hem de insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Termik santrallerden yayılan diğer bir gaz olan CO₂ gazı ise küresel ısınmada önemli bir role sahiptir. Dünyada enerji kullanımı sürekli arttığından, kullanılmakta olan teknoloji kısa dönemde değişse bile, enerji sektörü kaynaklı atmosferik karbondioksit artışı devam etmektedir. Bunun bir sonucu olarak, dünya genelinde yakıt emisyonlarının düşürülmesi önemli bir konu olmuştur. Son yıllarda modern güç sistemlerinde yakıt maliyeti ve emisyonların minimize edilmesinde uygun OGA sağlanmasının yanı sıra güç sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunun artırılmasına yönelik çalışmalar artmıştır. OGA modern güç sistemlerinin planlanmasında önemli rol oynamaktadır. OGA, yakıt maliyeti ve emisyonu gibi farklı amaç fonksiyonlarını, eşitlik/eşitsizlik kısıtlarını dikkate alarak çözmeyi hedefler. OGA probleminin çözümü literatürde araştırmacıların dikkatini çeken önemli güç sistemi mühendisliği problemlerinden biridir [2]. OGA probleminin çözümü son 60-65 yılda literatürde önemli bir mühendislik problemi haline gelmiştir. Son yıllarda güç sistemlerinde OGA probleminin çözümünde sezgisel algoritmalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Sezgisel algoritmaların OGA problemine uygulanması literatürde oldukça geniş yer tutmaktadır. Örneğin, literatürde sezgisel algoritmalar kullanılarak, yenilenebilir enerji kaynakları entegre edilen enerji sistemlerinde fosil bazlı termik santrallerin yakıt emisyonlarının optimize edildiği birçok çalışma vardır. Örneğin; kuş sürüsü algoritması [3], yapay arı koloni algoritması [4], hibrid kuş sürüsü-genetik algoritma [5], adaptif grup arama algoritması [6], güve sürüsü algoritması [7], modifiye harris şahini algoritması [8] OGA probleminin çözümünde kullanılmıştır. Bu çalışmada, termik santrallerden kaynaklanan yakıt emisyonlarını azaltmak için literatürde yeni yayınlanmış olan fizik temelli Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA) kullanılmıştır [9]. AOA algoritması, [9]'da dört mühendislik tasarım probleminde başarılı sonuç ürettiği için bu çalışmada OGA problemine uygulanmıştır. Çalışmada 2 güç sistemi ele alınmıştır. Bunlardan ilki IEEE 30 test bara sistemidir. Bu güç sisteminde AOA algoritmasının etkinliği göstermek için yakıt emisyonunun minimizasyonuna uygulanmış ve daha sonra bulunan sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ikinci güç sistemi olarak 13- baralı gerçek bir güç sisteminin yaklaşık modeli kullanılmıştır. Bu güç sistemi modelinde ise AOA ile OGA probleminin çözümü incelenmiştir. 13-baralı güç sisteminde öncelikle bu güç sistemine entegre edilecek, ORÇ jeotermal santralin lokasyonu belirlenmiştir. Sonrasında bu lokasyonda bulunan jeotermal sahanın ısı ve elektrik potansiyeli Monte Carlo simülasyonu ile tahmin edilerek, bu çalışmada hesaplanan (bu sahaya ait) görünür kapasite ile karşılaştırılmıştır. Devamında bu verilere göre, bu sahada kurulacak ORÇ jeotermal santralin tahmini kurulu gücü hesaplanmıştır. Ardından, önerilen ORÇ santral ile bölgenin yaklaşık elektrik dağıtım şebeke modeli DigSilent PowerFactory [10] yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Bu modelde Newton Raphson metoduna göre yük akış analizi yapılarak, bölge için yakıt emisyonlarının azaltılma miktarı (önerilen ORC jeotermal santralinin faaliyete geçirilmesi halinde) tahmin edilmiştir. Daha sonra bu modelde AOA algoritması ile bölgesel yakıt emisyonlarının azaltılması sağlanmıştır. Daha sonra elde edilen yakıt emisyonu verileri gerçek güç sisteminde kullanılan Newton Raphson metodu ile karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Böylece bu yayın ile küresel yakıt emisyonlarının azaltılması çalışmalarına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. OGA'nın Matematiksel Formülasyonu (Mathematical Formulation Of The OPF)

OGA probleminin genel yapısı Eşitlik 1, 2 ve 3'te verilmiştir [2]:

$$\min f(x, u) \quad (1)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

Burada $\min f(x, u)$ güç sistemine ait amaç fonksiyonunu, $g(x, u)$ eşitlik kısıtlarını, $h(x, u)$ ise eşitsizlik kısıtlarını temsil eder. OGA probleminde u ve x sırasıyla kontrol ve bağımlı değişkenleri temsil eder. Bu değişkenler aşağıda verildiği gibidir (Eş. 4-5).

$$u_T = [P_{G2} \dots P_{GNG}, V_{G1} \dots V_{GNG}, T_1 \dots T_{NT}, Q_{C1} \dots Q_{CNC}] \quad (4)$$

Burada NT, NG, NC sırasıyla güç sistemlerinde transformatör, jeneratör ve şönt kapasitörü (sayısını) belirtir.

$$x_T = [P_{Gx}, V_{L1} \dots V_{LNPQ}, Q_{G1} \dots Q_{QNG}, S_{L1} \dots S_{LNL}] \quad (5)$$

Burada Gx güç sistemlerinde kullanılan salınım barasını belirtmektedir. NPQ, NG ve NL ise sırasıyla yük barası, üretim barası ve enerji iletim hattı sayısını belirtir. Q_C : i. baraya ait şönt kapasitör; T : i. baraya eklenen kademe değiştirici; V_G : i. jeneratör barasına ait voltaj değeri V_L : i. yük barasına ait voltaj değeri; S_L : i. enerji iletim hattının taşıma kapasitesi; P_G : i. jeneratörün aktif gücü; Q_G : i. jeneratörün reaktif gücü temsil eder.

2.1. Kısıtlar (Constraints)

Eşitlik Kısıtları (Equality Constraints): Güç sistemlerinde üretim ve tüketim dengesinin sağlanması gerekir. Bu durum Eşitlik 6 ve 7'de belirtilen aktif/reaktif güç dengesi kısıtları ile sağlanır.

$$P_{G,i} - P_{D,i} - V_i \sum_{j=1}^{Nb} [V_j (g_{h(i,j)} \cdot \cos(\theta_{(i,j)}) + b_{h(i,j)} \cdot \sin(\theta_{(i,j)}))] = 0 \quad (6)$$

$$Q_{G,i} + Q_{ci} - Q_{D,i} - V_i \sum_{j=1}^{Nb} [V_j (g_{h(i,j)} \cdot \sin(\theta_{(i,j)}) - b_{h(i,j)} \cdot \cos(\theta_{(i,j)}))] = 0 \quad (7)$$

Burada Nb bara sayısı, v_i, v_j belirtilen baralara ait (i ve j) voltaj değeri, $P_{D,i}$ güç sisteminde talep edilen aktif güç, $Q_{D,i}$ talep edilen reaktif güç değerini temsil eder. $b_{h(i,j)}, \theta_{(i,j)}, g_{h(i,j)}$ sırasıyla güç sistemindeki süseptans, faz farkı ve kondüktans değerlerini temsil eder.

Eşitsizlik kısıtları (Inequality Constraints): Eşitsizlik kısıtları güç sisteminin nominal şartlarda işletilmesini sağlar. Bu kısıtlar Eşitlik 8-13'de verildiği gibidir.

$$\text{Aktif güç sınır değerleri } P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Ng \quad (8)$$

$$\text{Reaktif güç sınır değerleri } Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Ng \quad (9)$$

$$\text{Bara voltajı limit değeri } V_i^{min} \leq |V_i| \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Nb \quad (10)$$

$$\text{Kademe değiştirici limit değeri } t_k^{min} \leq |t_k| \leq t_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots, Nt \quad (11)$$

$$\text{Enerji iletim hattı kapasite limit değerleri } S_{Li} \leq S_{Li}^{max} \quad L_i = 1, 2, \dots, Nb \quad (12)$$

$$\text{Reaktif güç tüketimi } Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, Nc \quad (13)$$

3. Arşimet Optimizasyon Algoritması (Archimedes Optimization Algorithm)

Arşimet Optimizasyon Algoritması (AOA), Arşimet prensibinin fizik kanunlarından ilham alınarak tasarlanmıştır. Arşimet prensibi temelde sıvıların kaldırma kuvvetini formülize ederek açıklar. Arşimet prensibi, bir sıvıya daldırılan bir nesne ile suyun kaldırma kuvveti arasındaki ilişkiye dayanır [9].

AOA'da birçok nesnenin aynı sıvıya daldırıldığı ve her birinin dengeye ulaşmaya çalıştığı varsayılır. Bu batan nesnelere farklı hacim ve yoğunluklara sahip olduğu için farklı hızlara sahiptir. Kaldırma kuvveti (F_b) nesnenin ağırlığına (w_o) eşit ise nesne dengede duracaktır.

$$F_b = w_o \\ p_b v_b a_b = p_o w_o a_o \quad (14)$$

burada p yoğunluk, a yerçekimi yada ivme ve v hacimi temsil eder. b ve o sıvı ve sıvıya batırılmış nesnedir. Burada, Eş. 14 yeniden düzenlenerek Eş. 15 elde edilmiştir:

$$a_o = \frac{p_b v_b a_b}{p_o v_o} \quad (15)$$

Nesneye etki eden başka bir kuvvet var (r) ise yeni denge durumu Eşitlik 16'daki gibi yeniden sağlanır.

$$\begin{aligned} w_b - w_r &= w_o \\ p_b v_b a_b - p_r v_r a_r &= p_o w_o a_o \end{aligned} \quad (16)$$

AOA popülasyon temelli bir algoritmadır. Popülasyon bireyleri, sıvıya batırılmış nesnelere dir. AOA'da ilk popülasyon rastgele hacim, yoğunluk ve ivmeler ile başlatılır. Ayrıca, her nesne akışkan içindeki rastgele konum vektörüyle başlatılır. İlk popülasyonun uygunluğu değerlendirildikten sonra sonlandırma koşuluna kadar iterasyon çalışır. Her iterasyonda nesnenin hacmi ve yoğunluğu güncellenir. Nesnenin ivmesi başka herhangi bir komşunun çarpılmasıyla güncellenir. Güncellenen yoğunluk, hacim ve ivme ile AOA'da yeni konum belirlenir.

AOA global bir optimizasyon algoritmasıdır.

Adım 1-Başlatma: Tüm nesnelere Eşitlik 17'de yerine koyulur.

$$o_i = lb_i + randx(ub_i - lb_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

N popülasyondaki nesne sayısını belirtir. ub_i ve lb_i değerleri sırasıyla i . nesnenin alt ve üst limitleri belirtir.

Her nesne için hacim (vol) ve yoğunluk (den) Eşitlik 18 ile başlatılır.

$$den_i = rand; vol_i = rand \quad (18)$$

Rand [0-1] arası rastgele değer üreten bir sayıdır. Sonuç olarak, i . nesnenin ivmesi Eşitlik 19 ile hesaplanır.

$$acc_i = lb_i + randx(ub_i - lb_i) \quad (19)$$

Bu adımda başlangıç popülasyonu değerlendirilir ve en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip nesne seçilir. Sonrasında, x_{best} , den_{best} ve acc_{best} değerleri atanır.

Adım 2-Yoğunluk ve hacmi güncelleyin: $T + 1$ iterasyon için i . nesnenin yoğunluğu ve hacmi Eşitlik 20 kullanılarak güncellenir.

$$\begin{aligned} den_i^{t+1} &= den_i^t + randx(den_{best} - den_i^t) \\ vol_i^{t+1} &= vol_i^t + randx(vol_{best} - vol_i^t) \end{aligned} \quad (20)$$

vol_{best} ve den_{best} şimdiye kadar bulunan en iyi nesneye ait hacim ve yoğunluk değerlerini temsil eder.

Adım 3-Transfer operatörü ve yoğunluk faktörü: Başlangıçta nesnelere arası çarpışma olur ve sonra bu nesnelere dengeye gelir. Bu durum aramayı keşiften sömürüye dönüştüren Eşitlik 21 ile sağlanır (transfer operatörü).

$$TF = \exp\left(\frac{t - t_{max}}{t_{max}}\right) \quad (21)$$

Burada TF , 1'e ulaşana kadar zamanla artar. t ve t_{max} sırasıyla mevcut iterasyon sayısı ve maksimum iterasyon sayısıdır. Benzer şekilde yoğunluk azaltma faktörü (d) globalden yerel aramaya yardım eder ve Eşitlik 22 ile hesaplanır. d^{t+1} zamanla azalarak, keşif ve sömürü arasındaki dengeyi sağlar.

$$d^{t+1} = \exp\left(\frac{t_{max} - t}{t_{max}}\right) - \left(\frac{t}{t_{max}}\right) \quad (22)$$

Adım 4.1-Keşif aşamaları: Nesnelere çarpıştığı evredir. $TF \leq 0.5$ olursa nesnelere çarpışır. Rastgele bir materyal seçilir (mr) ve $t + 1$ yineleme için nesnenin ivmesi Eşitlik 23 kullanılarak güncellenir.

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{mr} + vol_{mr} \times acc_{mr}}{den_i^{t+1} + vol_i^{t+1}} \quad (23)$$

Burada den_i , vol_i ve acc_i sırasıyla i . nesnenin yoğunluk, hacim ve ivme değeridir. Rastgele malzeme için, den_{mr} , vol_{mr} ve acc_{mr} sırasıyla i . nesnenin yoğunluğu, hacmi ve ivmesidir.

Adım 4.2-Sömürü aşamaları: Nesnelere birbiriyle bu aşamada çarpışmaz. Bu durum $TF > 0.5$ olmasıyla sağlanır. $t + 1$ iterasyonda nesnenin ivmesi Eşitlik 24 kullanılarak bulunur.

$$acc_i^{t+1} = \frac{den_{best} + vol_{best} \times acc_{best}}{den_i^{t+1} + vol_i^{t+1}} \quad (24)$$

Burada acc_{best} en iyi nesneye ait ivme değeridir.

Adım 4.3-İvmelenmenin normalleştirilmesi: Normalize yüzdesi Eşitlik 25 ile bulunur.

$$acc_{i-norm}^{t+1} = ux \frac{acc_i^{t+1} - \min(acc)}{\max(acc) - \min(acc)} + l \quad (25)$$

Burada u ve l sırasıyla 0,9 ve 0,1'dir. acc_{i-norm}^{t+1} her nesnenin değiştireceği adım yüzdesidir. Eğer i nesnesi genel optimumdan uzak ise ivme değeri yüksek olur, bu safha keşif aşamasıdır. i . nesne genel optimuma yakın ise ivme değeri küçük olur, bu safhada sömürü safhasıdır. Bu aramanın keşiften sömürüye dönüştüğünü gösterir. Normal durumda ivme büyük değer alır. Ama zamanla bu değer azalır. Bu arama ajanlarının yerel çözümden uzaklaşmasını sağlar. Böylece, AOA keşif ve sömürü arasındaki dengeyi sağlar.

Adım 5-Pozisyon güncelleme: $TF \leq 0,5$, nesnenin $t+1$ iterasyondaki pozisyonu Eşitlik 26 kullanılarak güncellenir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + c_1 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times dx(x_{rand} - x_i^t) \quad (26)$$

Burada c_1 , 2'dir.

$TF > 0.5$ 'de ise nesnenin pozisyonu Eşitlik 27 kullanılarak güncellenir.

$$x_i^{t+1} = x_{best}^t \times F \times c_2 \times rand \times acc_{i-norm}^{t+1} \times dx(T \times x_{best} - x_i^t) \quad (27)$$

Burada c_2 , 6'dir. T zamanla TF ile orantılı biçimde azaltılır ($TF = c_3 \times TF$). T , $[c_3 \times 0.3, 1]$ aralığında artar ve başlangıçta en iyi pozisyondan belli yüzde alır. T , en iyi pozisyon ile mevcut konum arasında büyük bir farka neden olabileceği için düşük bir yüzde ile başlatılır. Arama sayısı arttıkça bu yüzde değeri, en iyi konum ile geçerli konum arasındaki farkı azaltmak için kademeli olarak artar. Bu, keşif ve sömürü arasında uygun bir denge sağlar. F Bayrağı eşitlik 28 ile hareket yönünü değiştirir.

$$F = \begin{cases} +1 & \text{if } P < 0,5 \\ -1 & \text{if } P > 0,5 \end{cases} \quad (28)$$

Burada $P = 2 \times rand - c_4$. Burada c_4 0.5'dir.

Adım 6-Değerlendirme: Şimdiye kadar bulunan en iyi çözüm hatırlanır. Sonra x_{best} , den_{best} , vol_{best} ve acc_{best} değerleri sırasıyla atanır. AOA algoritmasının sözde kodu Şekil 1'de verilmiştir.

```

Procedure AOA(population size  $N$ , max iteration  $t_{max}$ ,  $C_1, C_2, C_3, C_4$ )
Initialize object population with random positions, densities and volumes using 16, 17, and 18, respectively.
Evaluate initial population and select one with the best fitness value.
Set iteration counter  $t = 1$ 
while  $t < t_{max}$  do
  for each object  $i$  do
    Update density, volumes of each object using 19
    Update transfer and density decreasing factor  $TF$  and using 20 and 21 respectively.
    if  $TF \leq 0.5$  then –Exploration phase
      Update acceleration using 22 and normalize Acceleration using 24
      Update position using 25
    else—Exploitation phase
      Update acceleration using 23 and normalize Acceleration using 24
      Update direction flag  $F$  using 27
      Update position using 26
    end if
  end for
  Evaluate each object and select the one with the best fitness value.
  Set  $t = t + 1$ 
end while
Return object with best fitness value.
end procedure.

```

Şekil 1. AOA'nın sözde kodu (Pseudocode of the AOA algorithm)

4. OGA Problemine AOA'NIN Adaptasyonu (Adapting The AOA Algorithm To The OPF Problem)

AOA algoritmasında, OGA probleminin ilgili amaç fonksiyonundaki tüm değişkenleri $opf_i(t)$ ile belirtilir. AOA yönteminin OGA problemine adaptasyon adımları aşağıda sıralanmıştır.

Adım a: Jeneratör, kondansatör, trafo, baralar ve hat verilerini içeren parametreler ile AOA algoritması başlatılır.

Adım b: Algoritmada, OGA problemi için $opf_i(t)$, Popülasyon Büyüklüğü (N), maksimum iterasyon sayısı (t_{max}), C_1, C_2, C_3 ve C_4 seçilir

Adım c: Optimizasyon probleminde Pg, Vg, T, Qc değerleri optimize edilir ve bu optimize edilmiş değerler Adım d'e gönderilir.

Adım d: Yük akışı için Newton-Raphson yöntemi uygulanır.

Adım e: Ardından, Eş. 17, 18 (yoğunluk) ve 19 (hacim) kullanılarak, popülasyon rastgele konumlarla başlatılır.

Adım f: İlk popülasyon değerlendirilir ve ardından en iyi amaç fonksiyonuna sahip olan nesne seçilir.

Adım g: Eşitlik 20 ile i . nesnesinin hacmi ve yoğunluğu ($t + 1$). iterasyonda güncellenir.

Adım h: Transfer operatörü (Eş. 21) ile arama, keşiften sömürüye geçişi sağlar. Yoğunluk azaltma faktörü (d), globalden yerel arama yapmaya yardımcı olur ve Eşitlik 24 kullanılarak hesaplanır.

Adım i: Ardından, TF 'nin durumuna göre Keşif aşaması ($TF \leq 0,5$) veya Sömürü aşaması ($TF > 0,5$) güncellenir.

Adım j: Keşif aşaması ($TF \leq 0,5$):

- Eşitlik 23'u kullanarak ivmeyi güncelleyin,
- normalize hızlanma yüzdesi Eşitlik 25 kullanılarak hesaplanır,
- Eşitlik 26'yı kullanarak konumu güncelleyin.

Adım k: Sömürü aşaması ($TF > 0,5$)

- Eşitlik 24'i kullanarak ivmeyi güncelleyin
- normalize ivme yüzdesi Eşitlik 25 kullanılarak hesaplanır.
- Eşitlik 28'i kullanarak yön bayrağı F 'yi güncelleyin

- Eşitlik 27'ü kullanarak konumu güncelleyin.

Adım l: Her nesneyi değerlendirin ve en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olanı seçin.

Adım m: Popülasyon güncellenir, algoritma maksimum yineleme sürelerini yineler ve sonra durur. Sonrasında optimal kontrol değişkenleri sıralanır.

5. Sonuç ve Tartışma (Result And Discussion)

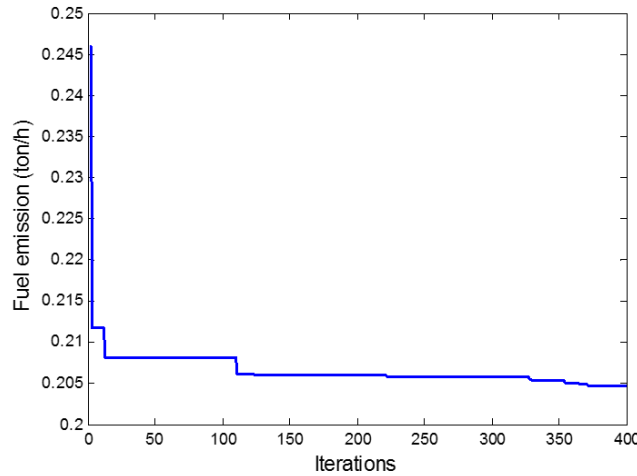
AOA ile yakıt emisyonlarının minimizasyonu problemi önce IEEE 30 test bara sisteminde daha sonra gerçek güç sistemi benzetimi olan 13-bara dağıtım sisteminde test edilerek, incelenmiştir.

5.1. IEEE-30 Test bara sistemi (IEEE-30 Test systems)

IEEE 30-bara test sistemine ait tüm veriler, bu test sistemine ait veri sayfasından alınmıştır [14]. Termik santraller, SO_x, NO_x, CO, CO_x vb. gazların atmosfere yayılmasına neden olur. Eşitlik 29'da NO_x, SO_x gazlarının emisyonu dikkate alınır (literatürde alındığı için) [8].

$$\text{ObjF1} = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{Gi})) \text{ ton/saat} \quad (29)$$

burada a_i ; β_i ; γ_i ; ξ_i ve λ_i emisyon katsayılarıdır (i. jeneratöre ait). AOA ile yakıt emisyonlarının minimize edilmesine ait yakınsama eğrisi Şekil 2'de verilmiştir. IEEE 30 test bara sisteminde AOA kullanılarak elde edilen yakıt emisyonu 0,2047 ton/saat'tir. AOA elde edilen optimal parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen ilk duruma göre AOA ile yakıt emisyonları oldukça iyileştirilmiştir (5,822'den 0,2047 yapılmıştır). AOA kullanılarak elde edilen optimum parametreler, literatürde (son yıllarda yayınlanan) ABC [4], ND-HHO [8], ESDE [11], ABCBBO [12], ABC [12], BSA [13], AGSO [14], GA [15], EBBO [16], MPSO [7] ve PSO [17] algoritmalar ile Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. AOA literatürde sunulan tüm tekniklerden daha iyi yakıt emisyonu sağlamıştır (saatlik bazda).



Şekil 2. AOA'nın yakıt emisyonları için yakınsaması (The convergence characteristics of AOA)

Bu makale, ilgili sahada kurulabilecek ORÇ santralin potansiyelini tahmin ederek, bu ORÇ santrali mevcut bir dağıtım sistemine entegre edip, sonrasında bu ORÇ'nin mevcut dağıtım sistemi/çevre üzerindeki etkilerini analiz etmek için bir model sunmaktadır. Bu modelin amacı, yenilenebilir enerji kullanımının artırılmasına teşvik ederek, sera gazları ve diğer hava kirleticilerin emisyonlarının azaltılmasını sağlamaktır. Bu nedenle, bu çalışmada AOA algoritması sera ve zehirli gaz emisyonlarını azaltmak için 13-bara Nevşehir dağıtım sisteminde (örnek model) test edilmiştir.

5.2.1. ORÇ güç santrali kurulum aşamaları (ORC power plant installation stages)

Türkiye'de jeotermal enerji kullanımı ve Nevşehir ili jeotermal enerji potansiyelinin değerlendirilmesi: Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli, Alp - Himalaya orojenik (dünyanın genç orojenik kuşaklarından) kuşağında yer almasının yanı sıra ülke genelinde yaygın olarak gözlenen fay zonları ve kırık sistemlerinin etkisi altındadır. Bu durumlardan dolayı Türkiye'nin jeotermal enerji potansiyeli yüksektir [18]. Pek çok araştırmaya konu olmuş Batı Anadolu graben sistemleri ülkenin en önemli

jeotermal sahalarıdır. Yüksek akışkan sıcaklıklarına sahip sahaların yanında orta dereceli ve daha düşük sıcaklıklardaki birçok saha bulunmaktadır (Şekil 3) [19].

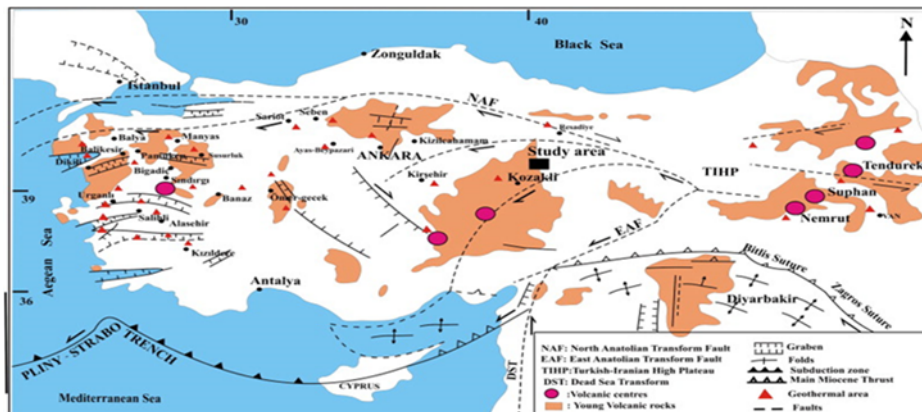
Tablo 1. AOA için kontrol değişkenleri (Control variables for AOA)

Kontrol değişkenleri	Min	Maks	ilk durum	AOA
PG1(MW)	50	200	99,22	64,3669
PG2(MW)	20	80	80	67,5538
PG5(MW)	15	50	50	49,9883
PG8(MW)	10	35	20	34,9757
PG11(MW)	10	30	20	29,9967
PG13(MW)	12	40	20	39,9744
V1(PU)	0,95	1,1	1,05	1,0896
V2(PU)	0,95	1,1	1,04	1,0856
V5(PU)	0,95	1,1	1,01	1,0897
V8(PU)	0,95	1,1	1,01	1,078
V11(PU)	0,95	1,1	1,05	1,0927
V13(PU)	0,95	1,1	1,05	1,0875
T11(PU)	0,9	1,1	1,078	1,0685
T12(PU)	0,9	1,1	1,069	1,083
T15(PU)	0,9	1,1	1,033	1,0827
T36 (PU)	0,9	1,1	1,0681	1,0906
QC10(MVAR)	0	5	0	4,0423
QC12(MVAR)	0	5	0	4,8263
QC15(MVAR)	0	5	0	4,237
QC17(MVAR)	0	5	0	4,6324
QC20(MVAR)	0	5	0	4,6582
QC21(MVAR)	0	5	0	4,4553
QC23(MVAR)	0	5	0	4,2239
QC24(MVAR)	0	5	0	4,5966
QC29(MVAR)	0	5	0	4,7307
OF1(ton/h)			5,822	0,2047

Tablo 2. IEEE 30-test bara sistemi için literatürün karşılaştırılması (Comparison of literature for OPF of IEEE 30 system)

Metot	AOA	Method	AOA
AOA	0,2047	BSA [13]	0,2425
ABC [4]	0,2048	AGSO [14]	0,2059
ND-HHO [8]	0,21749	GA [15]	0,20723
ESDE [11]	0,2056	EBBO [16]	0,226
ABCBBO [12]	0,2048	MPSO [7]	0,23246
BSA [13]	0,2425	PSO [17]	0,377

5.2. 13-bara Nevşehir bölgesel dağıtım sisteminin örnek modeli (10-bus Nevşehir regional distribution systems)



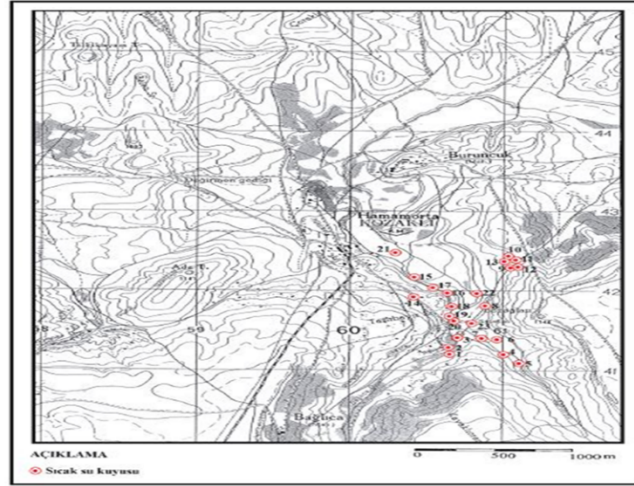
Şekil 3. Türkiye'nin genel tektonik, volkanik ve jeotermal özellikleri haritası (Tectonic, volcanic and geothermal characteristics map of Turkey) [18,19]

Türkiye, Nisan 2021 itibariyle 1624 MW jeotermal kurulu güce ulaşmıştır [20]. Bu çalışmada, özellikle düşük-orta sıcaklıktaki jeotermal kaynaklardan elektrik üretiminin artırılması hedeflenmektedir. Bu nedenle bu çalışma için düşük-orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklara sahip Nevşehir ili seçilmiştir. Nevşehir'in jeotermal kaynaklarının haritası Şekil 4'de verilmiştir [21]. Nevşehir'de çeşitli lokasyonlarda açılan bazı jeotermal kuyuların (en önemlileri) derinlik, sıcaklık ve akış bilgileri Tablo

3'de verilmiştir. Bu jeotermal kaynaklar ısıtma, turizm ve seracılık faaliyetlerinde kullanılmaktadır (jeotermal santral bulunmamaktadır). Kozaklı jeotermal akışkanlarının ölçülen görünür sıcaklığı, kaynaklarda 45–52°C ve sondaj kuyularında 80–100°C arasında değişmektedir [21]. Bu jeotermal akışkanın sıcaklığının ileride açılacak sondaj kuyuları ile 1200 C'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada Kozaklı lokasyonunda ORÇ santral kurulması incelenmiştir.

Tablo 3. Kozaklı jeotermal kuyularındaki başlıca jeotermal sahaların özelliği (Feature of major geothermal fields in Kozaklı/Geothermal wells) [22]

Lokasyon	q (lt/s)	C ⁰	Lokasyon	q(lt/s)	C ⁰
Kozaklı	247	93	Acıgöl	2.5	28
Yigitler	10	29			



Şekil 4. Nevşehir iline ait jeotermal kaynaklar (Geothermal resources of Nevşehir province (red dots, geothermal wells)) [21]

Tablo 3'de verilen Nevşehir iline ait jeotermal sahalarından en iyi potansiyele, Kozaklı lokasyonunun sahip olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu lokasyonda ORÇ jeotermal santral kurulmasına karar verilmiştir. 90°C'nin üzerinde ki 3 jeotermal kuyudan elde edeceği 247 lt/sn'lik Jeotermal Kaynak ile Elektrik Enerjisi Üretimi planlanmıştır. Bu çalışmada Kozaklı kuyusu verileri ile Monte Carlo simülasyonu kullanılarak, jeotermal elektrik potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır. Simülasyonlar Microsoft Excel ile kullanılan bir sayfada yapılmıştır. Jeotermal potansiyelin belirlenmesi çalışmalarında hacimsel yöntem ve rezervuar simülasyonu kullanılır. Rezervuar simülasyonu genelde jeotermal kaynağa ait eksik bilgiler olduğunda kullanılır. Hacimsel yöntemde ise rezervuar kaynağa depolanan ısı baz alınır. Bu çalışmada hacimsel yöntem kullanılmıştır. Yer altındaki depolanmış ısı enerjisi Eşitlik 30-32 ile ifade edilir [23,24].

$$H_{sum} = H_1 + H_2 \quad (30)$$

$$H_1 = (1 - \theta) \rho_r c_r p_r V (T - T_{ref}) \quad (31)$$

$$H_2 = (1 - \theta) \rho_f c_f p_f V (T - T_{ref}) \quad (32)$$

Burada θ gözeneklilik (%), c_r kayaya ait özgül ısı (kj/kg0C), c_f kayac özgül ısı (kj/kg0C), p_r kayac yoğunluğu (kg/m³), p_f akışkan yoğunluğu (kg/m³), V jeotermal bölge hacmi (m³), H_1 kayacın içerdiği ısı (kj), H_2 akışkanın içerdiği ısı (kj), T kayacın sıcaklık derecesi (0C), T_{ref} referans sıcaklığıdır. Kozaklı sahasına ait veriler Tablo 4'de verildiği gibidir. Düşük sıcaklıktaki kurulan santrallerde, santral ömrü genelde 20-25 yıl alınır [24]. 20 yıldan sonra kayacın sıcaklığında düşüş yaşanır. Bu çalışmada literatüre uygun olarak santral ömrü 25 yıl olarak alınmıştır. Depolanan ısı düşük ve yüksek sıcaklıklı rezervuarlar için ulaşılabilir kaynak olarak da bilinmektedir [24]. Düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuara ait ısı enerjisi Eşitlik 33 ile bulunur [24]. Burada referans sıcaklığı olarak terk etme sıcaklığı alınmıştır. Bu çalışmada ORC santralinin terk etme sıcaklığı 60 0C olarak alınmıştır [23,24].

$$ısı \text{ üretimi (IÜ)} = \frac{H_{sum} \rho_f c_f V}{L_f \rho_f L} \quad (33)$$

Burada P_F üretilebilirlik faktörü, C_E dönüşüm verimliliği, L_f yük faktörü, P_L santral ömrüdür. Bu verilere ait yaklaşık değerler Tablo 4'de verilmiştir [24]. Bu çalışmada Hacimsel yöntemde en iyi tahmin için stokastik yöntem kullanılmıştır. Bu yüzden olasılıklı çözüm için Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Monte Carlo simülasyonuna ait girdiler Tablo 4'de verilmiştir. Jeotermal kaynaklarda var olan ama varlığı kanıtlanamayan potansiyel enerjiye sahiptir. Bu potansiyel enerji belirsizliğe bağlı olarak 3 kategoride sınıflandırılır. Bunlar: P10, bir sahanın işletilip işletilemeyeceğine karar verilmesinde kullanılan en küçük ölçüttür. Depolanan enerjinin %90 olasılık ile alacağı en küçük değerdir. P50; %50 olasılıkla alacağı en küçük değerdir. P90; %10 olasılık ile alacağı en küçük değerdir [25]. Monte Carlo bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak bağımlı bir değişken içeren matematiksel model sağlar. Bağımlı değişkenler geri kazanımlıdır. Bu çalışmada normal, log normal ve üçgen dağılım kullanılmıştır [25]. Örnek olarak, minimum değer, ortalama değer ve maksimum değer, üçgen dağılım için kullanılan üç parametredir. Üç parametre rastgele seçilir ve bağımlı değişkeni hesaplamak için matematiksel modele eklenir. Dolayısıyla, bağımlı değişkenin birçok değeri, bağımsız değişkenlerin farklı değerleri ile bulunur. Kozaklı lokasyonunda yapılan simülasyona göre elektriksel üretilebilir güçler Tablo 5'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4. Kozaklı için Monte Carlo simülasyonu için giriş verileri (Input datas for Monte Carlo simulation for Kozaklı)

Parametre	Tip	Min değer	Ort değer	Maks değer	Dağılım
Referans °C	sabit	-	-	60	60
Rezervuar kayacın ısı kapasitesi (kJ/kg °C)	Üçgen	0.85	0.9	0.95	0.9
Akışkanın ısı kap. (kJ/kg °C)	sabit	4.18	4.18	4.18	4.18
Akışkan yoğunluğu (kg/m ³)	bağımlı				950
Kayaç yoğunluğu (kg/m ³)	üçgen	2500	2550	2650	2550
Sic. °C	üçgen	80	93	125	99.54
gözeneklilik	üçgen	0.052	0.078	0.121	0.0791
Alan m ²	düzgün	2.20E+0.6	-	4.20E+0.6	3.20E+0.6
kalınlık, m	düzgün	200	500	1000	566
c_e	Bağımlı	-	-	-	0.0636
Yük faktörü	üçgen	0.421	0.522	0.622	0.5221
Santral ömrü (yıl)	üçgen	25	25	25	25

Table 5. Kozaklı lokasyonu için üretilebilir elektriksel güçler (Table of results (electricity capacity) for Kozaklı location)

Lokasyon	P10	P50	P90
Kozaklı	2.321 MWt	4.32 MWt	7.72 MWt

Literatürde jeotermal (elektrik üretimi için) dönüşüm verimliliği %10-20 olarak alınmaktadır. Bu çalışmada, jeotermal dönüşüm verimliliği için Eşitlik 34 dikkate alınmıştır [23]. Bu dönüştürme verimliliği, literatürde bildirilen en düşük dönüştürme oranıdır. Jeotermal dönüşüm verimi Kozaklı lokasyonu için % 6,36 olarak hesaplanmıştır.

$$c_e = 0.0935T - 2.3266 \quad (34)$$

Kozaklı'nın Monte Carlo simülasyonu ile elektriksel güç kapasitesi 2.321 MWt olarak tahmin edilmektedir. Bu çalışmada, Kozaklı lokasyonunda Monte Carlo simülasyonu haricindeki literatürde bildirilen Eşitlik 35 ile elektriksel güç kapasitesi hesaplanmıştır [23]. Daha sonra bu 2 değer karşılaştırılmıştır. Sonrasında bu 2 değerlerin ortalaması alınarak Kozaklı lokasyonuna kurulacak olan ORÇ santralin tahmini kurulu güç kapasitesi belirlenmiştir.

$$Q(MW) = \frac{1}{1000} x m x Ca * \Delta t * c_e \quad (35)$$

Burada m akışkan akışı (l/sn), jeotermal akışkanın Ca ısı kapasitesi (kJ/kg oC) (4.2), Δt kuyu sıcaklığı ile referans sıcaklığı arasındaki farktır. Kozaklı lokasyonunun elektrik gücü Eşitlik 35 ile 2.383 MWt

olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada bu 2 verinin ortalaması alınarak kurulu güç 2.351 MW olarak hesaplanmıştır.

ORÇ güç santrali için uygun organik akışkanın belirlenmesi: Dizayn edilecek ORÇ santralde kullanılacak organik akışkanın doğru belirlenmesi önemlidir. ORÇ santrallerde en çok kullanılan organik akışkanlar ve özellikleri Tablo 6'de verildiği gibidir. Öncelikle organik akışkanın kritik sıcaklığı ile jeotermal kaynağa ait akışkanın sıcaklığının uyumluluğu belirlenir. Jeotermal kaynağın sıcaklığı, organik akışkanın sıcaklığından küçük olmalıdır (Tablo 4'de Kozaklı jeotermal sahasında maksimum sıcaklık 125°C'dir). Sonraki adımda GWP değerine bakılacaktır. Maksimum GWP değeri bu çalışmada 1300 (100 yıllık zaman dilimi için) olarak belirlenmiştir. GWP, bir organik akışkanın küresel ısınmaya yaptığı etkiyi ifade eder. Avrupa birliği tarafından yapılan çalışmalarda 2022 yılı itibariyle ticari amaçlı sistemlerde GWP değeri 1500'den az olan gazların kullanılması gerektiği öngörülmüştür [26]. Bu çalışmada küresel sera gazlarının azaltılması hedeflendiğinden, GWP değeri 300'ün altında olan gazların seçilmesine karar verilmiştir [27]. Ardından Ozon tabakasını delme potansiyeline sahip akışkanlar da seçim dışında bırakılarak, organik akışkan seçimi yapılır. Son adımda ise kuru tipli organik akışkanların seçilmesi düşünülmüştür. Kuru tip akışkanların ön ısıtıcıya ihtiyacı olmaması ve sıvı akışkanlara göre korezyona neden olmaması, ısıyı az olan kaynaklarda verimliliği artırdığından dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. Ayrıca düşük sıcaklıktaki ORÇ santrallerde kullanılacak akışkanın kritik basıncında düşük olması tercih sebebidir. Genellikle 45-50 bara kadar olan organik akışkanlar seçilir. Özetle bu çalışmada organik akışkan seçimi aşağıda sıralanan adımlara göre yapılması önerilmiştir;

- Kritik sıcaklık 125 °C'den düşük olmalı, GWP değeri 300'den az olmalı, ODP değeri 0 olmalı, Organik akışkan kuru tip olmalı, Organik akışkanın kritik basıncı 50 barın altında olmalıdır.

Yukarıda belirtilen hususlara göre bu çalışmada ORC santralinde kullanılacak organik çalışma sıvısı olarak izopentan seçilmiştir.

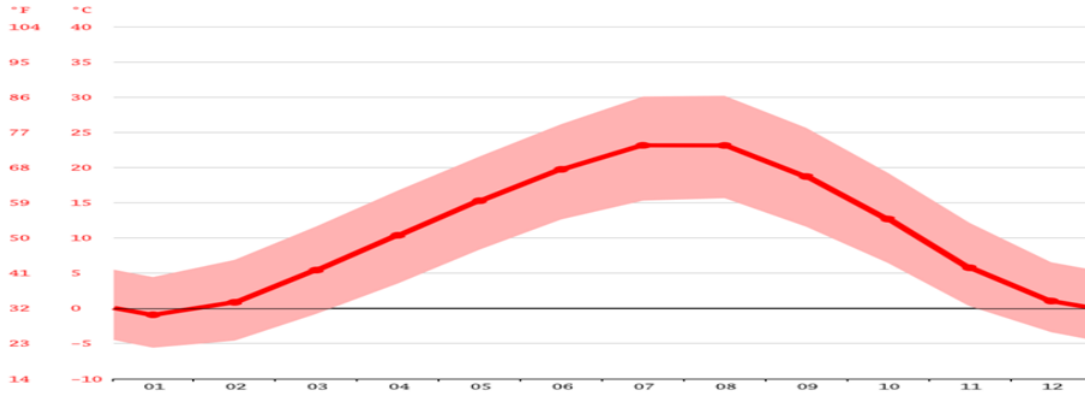
Tablo 6. Organik akışkanlara ait özellikler (Features type of an organic working fluid)

No	Organik akışkan	Kritik Sıcaklık	Kritik Basıncı	ODP	GDP	Tip
1	R152a	113,26	45,1	0	124	Islak-sıvı
2	R134a	101,1	40,59	0	1430	Islak-sıvı
3	R124	122,28	36,2	0,04	550	izentropik
4	R1234zc	109,37	36,3	0	7	izentropik
5	R245fa	154,01	36,51	0	1030	izentropik
6	R141b	204,2	42,	0,086	700	izentropik
7	R263fa	124,92	32	0	9810	izentropik
8	İsobutane	134,66	36,29	0	3,3	Kuru
9	İsopentane	187,2	33,8	0	11	Kuru
10	Pentane	196,5	33,71	0	3	Kuru
11	Octane	296,17	24,97	0	3	kuru
12	transbutane	155,46	40,27	0	3	izentropik

Temel ORÇ jeotermal santral tasarımı: Modellenmesi düşünülen ORÇ santral üç ana bölümden oluşur. Bunlardan ilki jeotermal kuyudan gelen akışkana ait döngü, ikincisi izopentana ait döngü, üçüncüsü soğutma akışkanına ait döngüdür. Soğutma suyu olarak kullanılan şebeke su ile izopentan gazı soğutucu döngüsünde tekrar ilk hale gelmesi istenilir. Bu yüzden soğutma suyunun sıcaklığı ve debisi iyi seçilmelidir [21]. Soğutma suyu sıcaklığı seçimi için Kozaklı ilçesinin aylara göre sıcaklık ortalaması incelenir. Şekil 5'de Kozaklı ilçesine ait sıcaklık ortalaması görülmektedir. Özellikle Haziran-Eylül arası sıcaklık arttığından soğutma suyunun bu aylarda debisi artırılmalıdır. Debi sıcaklık ile doğru orantılı artırılmalıdır. Kozaklı ilinin ortalama sıcaklığı 10 °C olduğundan soğutma suyunun giriş sıcaklığı 10 °C alınmıştır. Soğutma suyunun giriş/ çıkış sıcaklığı 10-21 °C olarak alınmıştır. Bu lokasyonda toplam ısı güç 34 MWt iken, bu lokasyona kurulacak santralin kurulu 2.35 MW olarak tahmin edilmiştir.

Dağıtım sistemi modeli: Nevşehir ili Kozaklı lokasyonuna ait dağıtım şebekesinin tahmini bir kesiti (Türkiye dağıtım sisteminin tahmini modeli) DigSilent yazılımı ile modellenmiştir. Modellenen güç sistemine ait tek hat şeması Şekil 6'de görüldüğü gibidir. Bu güç sistemi 2 transformator, 13 bara ve 11 iletim hattından oluştuğu varsayılarak kurgulanmıştır. 1 ve 2 nolu baraların arasında 154 / 34.5 kV (62.5 MVA-% 10.62 uk, X=0,00438 PU) 2 güç transformatorü bulunmaktadır. Bu elektrik şebeke

modelinde dağıtım hattının yaklaşık parametreleri Tablo 7’de verilmişken, jeneratör ve yük verileri Tablo 8’de verilmiştir. Bara 1’den anaşebeke1’e (slak bara), Bara 12’den anaşebeke2’ye entegrasyon vardır. Kurulu gücü 2.351 MW olarak hesaplanan ORÇ jeotermal santrali bu şebekeye bara 8’den eklenmiştir. ORÇ santral, dağıtım seviyesinden ilgili baraya entegre edilmiştir. Düşük kurulu güç kapasitesinden dolayı ORÇ santral dağıtık üretim sistemi olarak düşünülmüştür. Dağıtık üretim sistemleri güneş, hidroelektrik, bio atık güç sistemleri gibi kullanılacağı yerde veya yakınında elektrik üretimi yapan sistemler olarak adlandırılır [28, 29].



Şekil 5. Kozaklı lokasyonuna ait aylara göre ortalama sıcaklık değeri (Average temperature value in months of Kozaklı location) [21]

Tablo 7. Kozaklı dağıtım sistemine ait hat parametreleri (The line (approximate) data of this distribution system)

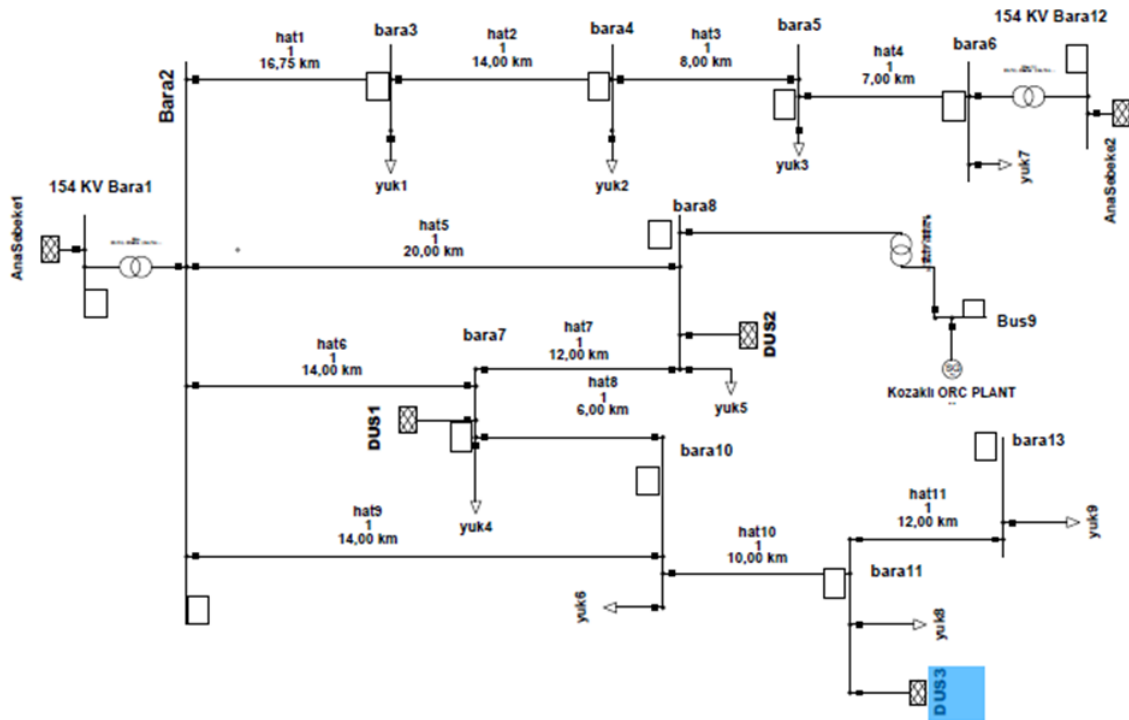
No	NI	Nr	R	X	B	No	NI	Nr	R	X	B
1	Bara2	Bara3	0,473	0,372	0,0351	7	Bara7	Bara8	0,338	0,375	0,0252
2	Bara3	Bara4	0,395	0,438	0,0294	8	Bara7	Bara10	0,168	0,187	0,0126
3	Bara4	Bara5	0,226	0,25	0,0168	9	Bara2	Bara10	0,395	0,438	0,0294
4	Bara5	Bara6	0,197	0,219	0,0147	10	Bara10	Bara11	0,282	0,313	0,021
5	Bara2	Bara8	0,565	0,626	0,042	11	Bara11	Bara13	0,338	0,375	0,0252
6	Bara2	Bara7	0,395	0,438	0,0294						

Tablo 8. 13 bara örnek dağıtım sistemine ait veriler (Bara kod 1= slak bara, 2= üretim barası, 3= yük barası)
(Bus data of distribution system of 13 buses)

Bara No	Bara kod	P (MW)	Q (MVAR)	Jeneratör No	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Qmin (MVAR)	Qmax (MVAR)
1	1	-	-	(PG1)	2	15	-5	5
2	3	-	-		-	-	-	-
3	3	2	0,04		-	-	-	-
4	3	1,5	0,05		-	-	-	-
5	3	0,9	0,1		-	-	-	-
6	3	3,2	0,2		-	-	-	-
7	2	2,5	0,8	(PG2)	1	5	-1	5
8	2	2,9	0,2	(PG3)	0	5	-2	5
9	2	-	-	(PG4)	0	2,4	-1	4
10	3	2,8	0,2		-	-	-	-
11	2	3	0,02	(PG5)	1	5	-	-
12	2	-	-	(PG6)	-	-	-	-
13	3	3,02	-0,8		2	10	-1	4

5.2.2. ORÇ’li dağıtım sisteminin analizi ve simülasyonu (Power system analysis an simulation)

Bu çalışmada verilen dağıtım sisteminde anaşebeke1 ve 2’den gelen aktif/reaktif güç fosil bazlı jeneratörler tarafından üretilmektedir (kurgulanmıştır). Bu dağıtım sisteminde, fosil yakıt santralinin ürettiği aktif/reaktif güce göre yıllık/günlük emisyon miktarı tahmin edilebilir. Fosil yakıtlı santrallerden kaynaklanan NO_x, SO_x, CO₂ gibi yakıt emisyonlarının ton/saat emisyonu Eşitlik 36 ile hesaplanır [29].



Şekil 6. Kozaklı lokasyonuna ait dağıtım sisteminin bir kesiti (Single line scheme of distributed system (for kozaklı location))

$$\text{Toplam emisyon} \left(\frac{\text{ton}}{\text{saat}} \right) = \sum_{i=1}^n ((a_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2) + \xi_i \exp(\lambda_i P_{Gi}) + \mu_i P_{Gi}) \quad (36)$$

Burada μ_i (1/MW), CO2 emisyon katsayısını temsil eder [30]. Tahmini emisyon katsayıları (saatlik) Tablo 9'da verilmiştir. Bu dağıtım şebekesinde ORÇ güç santrali dağıtım şebekesine bağlı değilken gerçek güç sisteminde kullanılan Newton Raphson yöntemine göre yük akış analizi yapılmıştır. Tablo 10'de ORÇ, dağıtım şebekesine bağlı olmadığında Anaşebeke 1'de 11.1 MW / -1.1 MVAR aktif/reaktif güç üretilirken, Anaşebeke 2'de 5 MW / 1 MVAR aktif/reaktif güç üretilmiştir. Eşitlik 36'ya göre, atmosfere salınan gazın toplam emisyonu, bu dağıtım sistemi için 0,0918 ton/saat (SOx/NOx için) ve 13,036 ton/saat (CO2 için)'dir. Daha sonra bu dağıtım şebekesinde ORÇ santrali dağıtım şebekesine bağlandığında gerçek güç sisteminde kullanılan Newton Raphson yöntemine göre yük akış analizi yapılmıştır. Dağıtım şebekesine bağlı olduğunda Anaşebeke 1'de 8,8 MW / -2,4 MVAR aktif/reaktif güç üretilirken, Anaşebeke 2'de 5 MW / 1 MVAR aktif/reaktif güç üretilmiştir. ORÇ ana şebekeye bağlandığında, atmosfere salınan gazın toplam emisyonu sırasıyla 0,089 ton/saat (SOx/NOx için) ve 11,173 ton/saat (COx için) hesaplanmıştır. Böylece yıllık olarak 16319,8 ton/saat CO2, 24,528 ton/saat SOx/NOx azaltılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada, ORÇ santralin devrede olduğu durumda, AOA algoritması ile SOx, NOx ve CO2 emisyonları en aza indirilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum kontrol parametreleri Tablo 11'de verilmiştir. Tablo 11 incelendiğinde, AOA algoritması ile reel güç sistemlerinde (genelde) kullanılan Newton Raphson metoduna göre (ORÇ devrede iken) saatlik bazda 0,003 ton/saat (SOx/NOx için) ve 7,58 ton/saat (CO2 için) atmosfere daha az salınım yapmıştır. Böylece güç sistemlerinde sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak, hedef amaç fonksiyonları ile daha optimum sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada AOA algoritması ile günümüzün en önemli çevre sorunlarında biri olan yakıt emisyonlarının minimizasyonu başarı ile sağlatılmıştır. Sonuç olarak bir model dahilinde uygun tasarlanan santraller enerji verimliliği adına önemli potansiyele sahiptir [30, 31].

Tablo 9. Tahmini emisyon katsayıları (Estimated emission coefficients)

	a_i	β_i	γ_i	ξ_i	λ_i	μ_i
Anaşebeke1	0.0412	-0.0000056	0.0000647	0.0002	0.02859	0.81
Anaşebeke2	0.0412	-0.0000056	0.0000647	0.0002	0.02859	0.809

Tablo 10. Dağıtım şebekesi için yük akış analizi sonuçları (Load flow results for distribution network)

ORÇ santral dağıtım şebekesine bağlı değil iken				ORÇ santral dağıtım şebekesine bağlı iken			
PG1/QG1	11,1/-3,3	V7(pu)	1	PG1/QG1	8,8/-2,4	V7(pu)	1
PG2/QG2	1,8/1	V8(pu)	1	PG2/QG2	1,8/1	V8(pu)	1
PG3/QG3	2,1/1	V9(pu)	1	PG3/QG3	2,1/1	V9(pu)	1
PG4/QG4	0/0	V10(pu)	1	PG4/QG4	2,4/-1,1	V10(pu)	1
PG5/QG5	2,1/2	V11(pu)	0,99	PG5/QG5	2,1/2	V11(pu)	0,99
PG6/QG6	5/1	V12(pu)	1	PG6/QG6	5/1	V12(pu)	1
V1(pu)	1	V13(pu)	0,98	V1(pu)	1	V13(pu)	0,99
V2(pu)	1,01	SOx(top) +NOx(top)	0,0918	V2(pu)	1	SOx(top) +NOx(top)	0,089
V3(pu)	1	CO2(top)	13,036	V3(pu)	0,99	CO2(top)	11,173
V4(pu)	1	Pkayıp	0.34 MW	V4(pu)	0,99	Pkayıp	0.31 MW
V5(pu)	1	Qkayıp	0.88 MVAR	V5(pu)	1	Qkayıp	0.78 MVAR
V6(pu)	1			V6(pu)	1		

PG1 (MW), QG1(MVAR) – (ana şebeke1); PG6 (MW), QG6(MVAR) – (ana şebeke1); PG4, QG4 –ORÇ GÜÇ SANTRALI;

Tablo 11. AOA ile hesaplanan optimum kontrol parametreleri (Load flow analysis results with AOA)

ORÇ santral dağıtım şebekesine bağlı iken (AOA ile)			
PG1	2,0025	V1(pu)	1,022
PG2	5	V2(pu)	1,0231
PG3	5	V3(pu)	1,0373
PG4	2,4	V4(pu)	1,0441
PG5	5	V5(pu)	1,0395
PG6	2,4407	V6(pu)	1,0303
QG1	-5	V7(pu)	1,045
QG2	-1	V8(pu)	1,0255
QG3	-2	V9(pu)	1,025
QG4	-1	V10(pu)	1,0485
QG5	-1	V11(pu)	1,07
QG6	4	V12(pu)	1,02
Qkayıp	-6,81	V13(pu)	1,0733
Pkayıp	0,023	SOx(top) +NOx(top)	0,086
		CO2(top)	3,59

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, güç sistemlerinde yakıt emisyonunu minimize etmeyi amaç edinen OGA sorununun çözümü için AOA algoritması sunulmuştur. AOA'nın etkinliği, IEEE 30 test sisteminde ve 13-bara örnek Nevşehir dağıtım sisteminde test edilmiştir. IEEE 30 test bara sisteminde, AOA algoritması ile yakıt emisyonunu en aza indirmeyi sağlayan amaç fonksiyonu test edilmiştir. Daha sonra AOA algoritmasından elde edilen simülasyon sonuçları, son yıllarda literatürde bildirilen diğer algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu AOA, diğer yöntemlere göre etkili bir performans göstermiştir. Bu makalede ayrıca 13-bara Nevşehir dağıtım sistemine entegre edilecek, ORÇ santralinin kurulmasını değerlendirmektedir. Bu çalışmada öncelikle ORÇ santral kurulumu için uygun yer/lokasyon belirlenir. Daha sonra bu lokasyonun teknik ve coğrafi özelliklerine göre MONTE CARLO simülasyonu ile ısı ve elektrik potansiyelleri belirlenir. Daha sonra aynı lokasyonda görünen ısı ve elektrik kapasitesi hesaplanmıştır. Kurulacak olan ORÇ santralinin kurulu gücü (2.351 MW) bu iki verinin yorumlanmasıyla hesaplanır. Ardından ORÇ santralinde kullanılacak organik çalışma sıvısının seçimi için basit bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle göre, bu çalışmada organik çalışma sıvısı olarak izopentan seçilmiştir. Ardından, önerilen ORÇ enerji santralinin, 13 bara Nevşehir dağıtım sistemine entegrasyonu yapılarak, DigSilent programı ile modellenmesi yapılmıştır. Bu modelde, önerilen ORÇ santralinin yakıt emisyonu ve dağıtım sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Önerilen ORÇ santrali işletmeye alındığında Kozaklı lokasyonundaki tahmini CO2 emisyonu 114195 tondan (yılıda) 97875 tona düşürülebileceği gösterilmiştir (Newton Raphson metodu ile yapılan yük akış analizine göre). Ayrıca aynı modelde AOA algoritması ile yakıt emisyonlarının minimizasyonu sağlatılmıştır. Bu güç sisteminde AOA algoritması ile Newton Raphson metoduna göre yıllık bazda (yaklaşık) 66427 ton CO2 gazının doğaya daha az salınım yapacağı tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, küresel sera/zehirli

gaz emisyonu hedeflerine katkı sağlayarak Türkiye'nin önemli çevre dostu yatırımları için katkı sağlayabilir. Gelecekte araştırmacılar bu çalışmada uygulanan metodu farklı lokasyonlara uygulayarak, ORÇ jeotermal santral tasarlayabilir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı şu şekilde özetlenebilir;

- Yeni yayınlamış algoritma olan AOA, IEEE 30 test bara ve 13 bara Nevşehir/Kozaklı dağıtım sistemlerine başarıyla uygulandığından OGA sorununun çözümü için önerilmiştir.
- Bu yazıda, benzer çalışmalar için kullanılacak 13 bara dağıtım sistemi test edilmiş ve mevcut tüm verilerle sunulmuştur.
- Bu çalışmada, dünyada yeni yaygınlaşan ORÇ santralleri için bir kurulum modeli sunularak, daha sonra bu modele göre Kozaklı mevkiinde (jeotermal santrali olmayan) bir ORC santral kurulumu gerçekleştirilmiştir.
- Bu çalışmada literatürden farklı olarak yakıt emisyonlarının minimizasyonunun SO_x ve NO_x gazlarının yanında CO₂ gazıda dikkate alınmıştır.
- Bu çalışmada hem yenilenebilir enerji kaynaklarının hem de optimizasyon algoritmalarının toksik ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasındaki etkisi güç sistemlerinde aynı anda gösterilmiştir. Sonuçların, küresel sera gazı emisyonlarının en aza indirildiği çalışmalara katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] N. Singh and Y. Kumar, "Multiobjective Economic Load Dispatch Problem Solved by New PSO," *Hindawi Publ. Corp*, vol. 2015, pp. 1-7, February 2015. doi:10.1155/2015/536040
- [2] T. Niknam, N. M. Rasoul, M. Jabbari, A.R. Malekpour, "A modified shuffle frog leaping algorithm for multi-objective optimal power flow," *Energy*, vol. 36, no.11, pp. 6420-6432, November 2011. doi:10.1016/j.energy.2011.09.027
- [3] A. Gupta, K. K. Swarnkar, K. Wadhvani, "Combined economic emission dispatch problem using particle swarm optimization," *International Journal of Computer Applications*, vol.49, no. 6, pp. 1-6, 2012.
- [4] M. R. Adaryani and A. Karami, "Artificial bee colony algorithm for solving multi-objective optimal power flow problem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 219-230, 2013. doi:10.1016/j.ijepes.2013.04.021
- [5] K. Teeparthi and D. V. Kumar, "Multi-objective hybrid PSO-APO algorithm based security constrained optimal power flow with wind and thermal generators," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol.20, no.2, pp. 411-426, 2017. doi:10.1016/j.jestch.2017.03.002
- [6] N.Daryani, M. T. Hagh, S. Teimourzadeh, "Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem," *Applied soft computing*, vol.38, pp. 1012-1024, 2016. doi:10.1016/j.asoc.2015.10.057
- [7] A. A. A. Mohamed, Y. S. Mohamed, A. A. El-Gaafary, A. M. Hemeida, "Optimal power flow using moth swarm algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol.142, pp.190-206, 2017. doi:10.1016/j.epsr.2016.09.025
- [8] O. Akdag, A. Ates, C. Yeroğlu, "Modification of Harris hawks optimization algorithm with random distribution functions for optimum power flow problem," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no. 6, pp. 1959-1985, 2021 doi:10.1007/s00521-020-05073-5
- [9] F. A. Hashim, K. Hussain, E. H. Houssein, M. S. Mabrouk, W. Al-Atabany, "Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems," *Applied Intelligence*, vol. 51, pp. 1-21, 2020. doi:10.1007/s10489-020-01893-z
- [10] D. PowerFactory, "User Manual", [digsilent.de](https://www.digsilent.de/en/downloads.html/), Sept. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/downloads.html/>. [Accessed: Sept. 10, 2021].
- [11] H. Pulluri, R. Naresh, V. Sharma, "An enhanced self-adaptive differential evolution based solution methodology for multiobjective optimal power flow," *Applied Soft Computing*, vol. 54, pp. 229-245, 2017. doi:10.1016/j.asoc.2017.01.030
- [12] A. R. Kumar, L. Premalatha, "Optimal power flow for a deregulated power system using adaptive real coded biogeography-based optimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, pp. 393-399, 2015. doi:10.1016/j.ijepes.2015.05.011
- [13] A. E. Chaib, H. R. E. H. Bouchekara, R. Mehasni, M. A. Abido, "Optimal power flow with emission and non-smooth cost functions using backtracking search optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 64-77, 2016. doi:10.1016/j.ijepes.2016.02.004

- [14] N. Daryani, M. T. Hagh, S. Teimourzadeh, "Adaptive group search optimization algorithm for multi-objective optimal power flow problem," *Applied soft computing*, vol. 38, pp. 1012-1024, 2016. doi:10.1016/j.asoc.2015.10.057
- [15] T. Niknam, M.R. Narimani, J. Aghaei, "Azizipahan-Abarghoee, R., Improved particle swarm optimisation for multi-objective optimal power flow considering the cost, loss, emission and voltage stability index," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 6, pp. 515-527, 2012. doi:10.1049/iet-gtd.2011.0851
- [16] V.Raviprabakaran and R.C. Subramanian, "Enhanced ant colony optimization to solve the optimal power flow with ecological emission," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 9, pp. 58-65, 2018. doi:10.1007/s13198-016-0471-x
- [17] S. Khunkitti, A. Siritariwat, S. Premrudeepreechacharn, R. Chatthaworn, N.R. Watson, "A hybrid DA-PSO optimization algorithm for multiobjective optimal power flow problems" *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018.
- [18] S.Pasvanoğlu and D. Chandrasekharam, "Hydrogeochemical and isotopic study of thermal and mineralized waters from the Nevşehir (Kozaklı) area, Central Turkey," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 202, pp. 241-250, 2011. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.03.003
- [19] A.Galip, "Yozgat İlinin Jeotermal Kaynakları ve Özellikleri," *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 37, pp. 100-112, 2016.
- [20] Teiaş, "Turkish elektrik iletim AŞ. Elektrik üretim raporları," www.teias.gov.tr, Sept. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>. [Accessed: Sept. 10, 2021].
- [21] R. Özer, "Kozaklı (Nevşehir) Sahası Jeotermal Enerji Kapasitesinin Belirlenmesi," MSC Thesis, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, Türkiye, 2015.
- [22] MTA, *Evaluation Report on Geothermal Energy Opportunities of Kozaklı (Nevşehir) Area*, MTA Yayınları, Ankara, 1999.
- [23] L. P. J. Muffler ve R. Cataldi, "Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources," *Geothermics*, vol. 2, pp. 53-89, 1978.
- [24] E. D. K. Başel, "Türkiye Jeotermal Enerji Potansiyelinin Araştırılması," Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [25] J. Ren é van Dorp, S. A. Kotz, "novel extension of the triangular distribution and its parameter estimation," *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, vol. 51, pp. 63-79, 2002.
- [26] EUROPA, "İklim raporu," www.eea.europa.eu, Sept. 11, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/sites/default/files/f-gas/legislation/docs/c_2017_5230_en.pdf 2017. [Accessed: Sept. 16, 2021].
- [27] C. Yang, S. Seo, N. Takata, K. Thu, T. Miyazaki, "The life cycle climate performance evaluation of low-GWP refrigerants for domestic heat pumps," *International Journal of Refrigeration*, vol. 121 pp. 33-42, 2021.
- [28] T. E. K. E. Ahmet, and E. Yıldırım, "Dağıtık üretimde güneş enerjisi uygulamalarının kısa devre koruması üzerindeki etkileri ve dağıtık üretimde kısa devre koruması için yeni teknikler," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 34 pp. 2141-2158, 2019. doi:10.17341/gazimmfd.425947
- [29] O. Akdağ and C. Yeroglu, "An evaluation of an offshore energy installation for the Black Sea region of Turkey and the effects on a regional decrease in greenhouse gas emissions," *Greenhouse Gases: Science and Technology*, vol. 10, pp. 531-544. 2020. doi:10.1002/ghg.1963
- [30] D. Kaya, "Energy exergy efficiencies and environmental effects of mixed fuelled (solid+ gas) industrial facility steam boiler," *Journal of the Energy Institute*, vol. 86, pp. 194-201, 2013.
- [31] A. S. Önal, A. B. Etemoğlu, C. A. N. Muhiddin, "Düşük Sıcaklıklı Atık Akışkan Destekli Organik Rankine Çevrimlerinin Optimizasyonu," *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*. vol. 22, pp. 35-52, 2017.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Performance Analysis of Counterflow Ranque – Hilsch Vortex Tube with Linear Regression, Support Vector Machines and Gaussian Process Regression Method

Murat Korkmaz^a, Ayhan Dogan^b, Volkan Kirmaci^c

Submitted: 30.04.2022 Revised: 18.05.2022 Accepted: 07.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705015

ABSTRACT

Keywords: Vortex tube, Linear regression, Support vector machines, Gaussian process regression, Machine learning

^a, Hacettepe University, Başkent OSB Vocational Higher School of Technical Sciences, Department of Electrical and Energy, 06909, Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-3721-2854

^b, Hacettepe University, Başkent OSB Vocational Higher School of Technical Sciences, Department of Computer Technologies, 06909 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-9872-8889

^c Bartın University
Faculty of Engineering,
Architecture and Design,
Department of Mechanical Engineering,
74110-Bartın, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7076-1911
e mail: volkankirmaci@bartin.edu.tr

*Corresponding author:
volkankirmaci@bartin.edu.tr

Ranque-Hilsch Vortex Tube (RHVT) is a system that consists of a simple pipe with no moving parts except for the control valve, working with pressurized fluid and performing both heating and cooling processes at the same time. In the study, air with an inlet pressure of 150 to 700 kPa at 50 kPa intervals was used in RHVT with an internal diameter of 7 mm and a body length of 100 mm. In RHVT, nozzles with two, three, four, five and six orifices made of aluminum, steel, brass and polyamide were used. During the experimental study, the control valve on the hot fluid outlet side was left in the fully open position and the performance of the RHVT was calculated by calculating the difference (ΔT) between the outlet hot flow temperature (T_h) and the leaving cold flow temperature (T_c). The data obtained from the experimental setup were used separately with the machine learning methods Linear Regression (LR), Support Vector Machines (SVM) and Gaussian Process Regression (GPR) methods, and the performance of RHVT was optimized and it was aimed to fill the gap in the literature. During the machine learning methods in the study, 80% of all data was used as training and 20% as test data. Tests were made with the models obtained at the end of the study and the results were compared.

Karşıt Akışlı Ranque – Hilsch Vorteks Tüpünün Lineer Regresyon, Destek Vektör Makineleri ve Gauss Süreç Regresyonu Yöntemi ile Performans Analizi

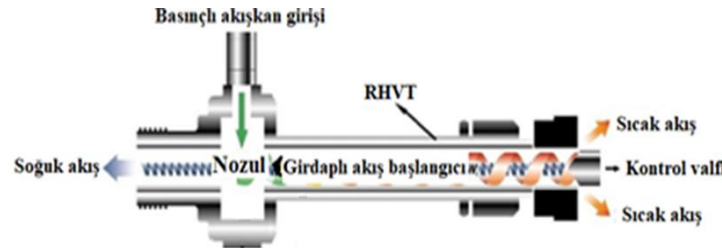
ÖZ

Ranque-Hilsch Vorteks Tüp (RHVT) kontrol valfi haricinde hareketli parçası olmayan, basit bir borudan oluşan, basınçlı akışkan ile çalışarak ısıtma soğutma işlemini aynı anda yapan bir sistemdir. Çalışmada iç çapı 7 mm, gövde uzunluğu 100 mm olan RHVT’de giriş basıncı 50 kPa aralıklarla 150 ile 700 kPa basınç değerinde hava kullanılmıştır. RHVT’de alüminyum, çelik, pirinç ve polyamid malzemeden üretilmiş iki, üç, dört, beş ve altı orifslü nozzullar kullanılmıştır. Deneysel çalışma esnasında sıcak akışkan çıkışı tarafındaki kontrol valfi tam açık konumda bırakılarak, RHVT’ünün performansı çıkan sıcak akış sıcaklığı (T_{sck}) ile çıkan soğuk akışın sıcaklığı (T_{sgk}) arasındaki fark (ΔT) hesaplanarak veriler alınmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler makine öğrenimi yöntemlerinden Lineer Regresyon (LR), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GSR) yöntemleri ile ayrı ayrı kullanılarak RHVT’nin performansının optimizasyonu yapılmış ve literatürdeki eksikliğin tamamlanması amaçlanmıştır. Çalışmada makine öğrenme yöntemleri esnasında tüm verinin %80’i eğitim, %20’si test verisi olarak kullanılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen modeller ile testler yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Vorteks tüp, Lineer regresyon, Destek vektör makineleri, Gauss süreç regresyonu, Makine öğrenimi

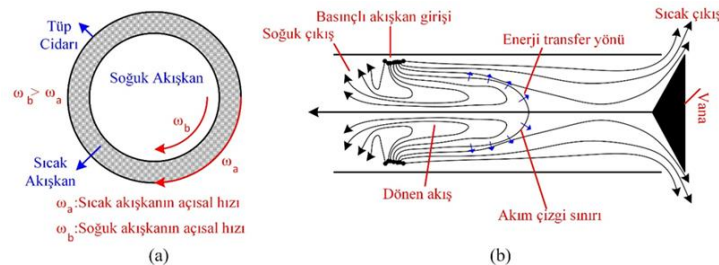
1. Giriş (Introduction)

Kontrol valfi hariç hiçbir hareketli bir parçası olmayan, soğutma ve ısıtma işlemini aynı anda yapan ebatları küçük ama hızlı rejime giren vorteks tüpler ilk kez 1931 yılında Ranque tarafından ilk kez icat edilmiş ve daha sonra 1947 yılında Hilsch tarafından geliştirilmiştir [1, 2]. Vorteks tüp, Ranque-Hilsch Vorteks Tüp (RHVT) olarak adlandırılmasının nedeni kendisini bulan ve geliştiren kişilerin adlarını almasından kaynaklanmaktadır [3]. RHVT, boyutlarının küçük oluşu, ağırlıklarının hafif oluşu, çok hızlı bir şekilde rejime ulaşması, kloroflorokarbon kullanılmadığından çevresel açıdan zararlı olmaması sebebi ile birçok soğutma ve ısıtma işlemlerinde kullanılabilir. Ayrıca RHVT'ler elektriksel ve kimyasal güç ile bakım gerektirmezler [4, 5]. Çalışmada kullanılan karşıt akışlı RHVT şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Karşıt akışlı RHVT (Counterflow RHVT)

RHVT'lerde sıcak ve soğuk akışkanların oluşturulmasının temeli Şekil 2'de verilmiştir. RHVT çalışma prensibi, giriş kısmında bulunan nozula uygulanan basınçlı akışkan, tüpe teğet olacak şekilde giriş yapar. Girişinde nozul ile basınçlı akışkan basıncı düşürülür ve buna bağlı olarak akışkan hızı artar. Yüksek hızlarda dönen akışkanın tüp cidarındaki sürtünmeden dolayı, tüp cidarı ile merkezindeki akışkan arasında basınç farkı meydana gelir. Tüp cidarındaki akışın hızı sürtünmenin etkisi ile tüp merkezindeki akışın hızına göre daha düşüktür. Merkezdeki akış cidarındaki akışa ivmelendirmeye çalışır ve merkezdeki akışkan cidarındaki akışa enerji transfer eder. Sistemde çalışma esnasında kontrol vanası sayesinde oluşan bir durgunluk noktası ile sıcak akışkanın bir kısmı geri döner. Bunun sonucunda, RHVT'de eş zamanlı olarak bir tarafından soğuk akış, diğer tarafından ise sıcak akış elde edilir (Şekil 2) [6,7].



Şekil 2. (a) RHVT içerisindeki sıcak ve soğuk akışın hareketi (b) RHVT içerisindeki akış ((a) The movement of hot and cold flow in the RHVT (b) The flow in the RHVT)

Bovand v.d. (2014) 7-11 mm orifis çapı aralığında değiştirerek farklı soğuk akış debisinde deneyler yapmışlardır. Sıcaklık, debi ve basınç değerlerinin ölçüldüğü deneysel sonuçlar ANOVA yöntemi ile istatistiksel analiz yapılarak optimizasyon çalışması yapmışlardır [8]. Thakare ve Parekh (2014) ANSYS Fluent programı ile yaptıkları nümerik hesaplamalarla sekiz değişik gaz ile ayrı ayrı çalışarak ısı iletkenlik, ısı yayılım, prandtl sayısı ve gaz sabiti parametrelerinin vorteks tüpü enerji ayrıştırma etkilerini incelemişlerdir [9]. Gökçe v.d. (2019), giriş basıncı 300, 400 ve 500 kPa basınç değerinde hava kullanılarak karşıt akışlı RHVT'de çıkan sıcak akış ile soğuk akışın sıcaklıkları arasındaki fark cinsinden RHVT'nin performansının optimizasyonu yapmışlardır. Optimizasyon için Taguchi L9 dikey dizini kullanılarak testler yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen RHVT performansı için kalite karakteristiği, çıkan sıcak ile soğuk akışın sıcaklığı arasındaki fark (ΔT) olarak belirlemişler ve önem seviyelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Yaptıkları ANOVA analizine göre, ΔT için en önemli kontrol faktörleri sırasıyla giriş basıncı, nozul orifis sayısı ve nozul malzemesi olduğu belirlemişlerdir [10]. Kaya ve Gökçe (2019), giriş basıncı 150 ile 650 kPa basınç değerinde 100 kPa aralıklarla oksijen gazı kullanarak RHVT'den çıkan sıcak ile soğuk akışın sıcaklığı arasındaki fark cinsinden RHVT'nin performanslarının optimizasyonunu yapmışlardır. Bu bağlamda, Taguchi L18 dikey dizini kullanılarak testler yapılmıştır. Testler sonucunda elde edilen RHVT performansı ΔT olarak

belirlenmişlerdir. Bu amaçla, önem seviyelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Sinyal/Gürültü oranları kullanılarak elde edilen kontrol faktörlerinin optimum değerleri ΔT için farklı seviyelerde bulunmuştur. ANOVA analizine göre, ΔT için en önemli kontrol faktörleri sırasıyla giriş basıncı, nozul malzemesi ve nozul sayısı olduğu belirlenmiştir [11].

Bir deney düzeneğinin asıl performansını iyi tespit edebilmek için o düzeneğin kurularak test edilmesiyle doğru sonuçlar verilebilir. Fakat günümüzde laboratuvar kurulum maliyetlerinin yüksek olabilmemesinden dolayı tasarım ve test edilmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Ayrıca, bu düzeneklerin yeterli sayıda test edilmesi de önemli bir zaman gerektirebilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek ve gerçek saha testlerini en aza indirgeyebilmek için günümüzde yapay zekânın bir alt dalı olan makine öğrenimi yöntemleri giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu ve benzeri zorlukları aşabilmek ve gerçek laboratuvar testlerini en aza indirgeyebilmek için günümüzde çeşitli makine öğrenimi yöntemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, RHVT deney sisteminde alüminyum, çelik, pirinç ve polyamid malzemeden üretilmiş iki, üç, dört, beş ve altı orfislilik nozullarda, giriş basıncı 50 kPa aralıklarıyla 150 ile 700 kPa basınç değerinde hava kullanılarak, RHVT'de çıkan T_{sck} ile T_{sgk} arasındaki fark ΔT cinsinden RHVT'nin performansının optimum olarak gerçekleşmesi ve çıkışlarını en doğru şekilde tahmin edebilmek amacıyla makine öğrenimi yöntemlerinden Lineer Regresyon (LR), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GSR) kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and method)

2.1. Deneysel sistem (Experimental system)

Çalışmada, gövde uzunluğu 100 mm, iç çapı 7 mm olan karşıt akışlı RHVT yüksekliği 330 mm, genişliği 550 mm, kalınlığı 2 mm olan metal levha üzerine şekil 3'teki gibi yerleştirilmiştir. RHVT giren havanın basıncını ölçmek için PAKKENS tipi %5 hassasiyetindeki manometre, hacimsel debileri okunak için %3 hassasiyetinde TSI marka debimetreler karşıt akışlı RHVT'ün çıkışlarına sabitlenmiştir. RHVT çıkan soğuk ve sıcak akış sıcaklıklarını ölçmek üzere $\pm 1^\circ\text{C}$ hassasiyetindeki dijital termometre problemleri kullanılmıştır. Deneylerde RHVT'de alüminyum, çelik, pirinç ve polyamid malzemeden üretilmiş iki, üç, dört, beş ve altı nozul kullanılmıştır (Şekil 3). Hava kompresörü ve RHVT akışkan girişindeki vana kullanılarak deneylerde başlangıç basıncı olan 150 kPa basınç sağlanmış ve RHVT'nün soğuk ve sıcak akış çıkışında bulunan ölçüm cihazlarında ölçülen sıcaklık değerleri sabitleninceye kadar 150 kPa basınçta hava gönderilerek RHVT girişteki basınç, çıkan sıcak ve soğuk akışkanın sıcaklık değerleriyle ve hacimsel debileri kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışmada belirlenen diğer basınç değerleri için 150 kPa basınçta yapılan işlemler tekrarlanarak farklı malzemelerden imal edilen tüm nozullar kullanılmıştır. Tüm deneyler ortam sıcaklığı 21°C 'lik ortamda yapılmıştır. Deney sonuçlarının doğruluğu için yapılan deneylerin her biri üçer kez tekrarlanmış olup ortalamaları alınarak çalışmada kullanılmıştır.

RHVT'ler, bir girişe ve iki farklı akışa sahip açık sistemler olarak kabul edilirler. Tüp içerisinde giriş akışının ne kadarının soğuk akışa dönüştüğünü ifade eden ξ değeri denklem 1 verilmiştir.

$$\xi = \frac{\text{soğuk akışın kütleli debisi}}{\text{giriş akışının kütleli debisi}} \quad (1)$$

RHVT'lerde girişteki akış sıcaklığı (T_{gir}) ile çıkan soğuk akış sıcaklık (T_{sgk}) farkı, soğuk akış sıcaklık farkı (ΔT_{sgk}) olarak tanımlanır ve denklem 2 de ifade edilmiştir.

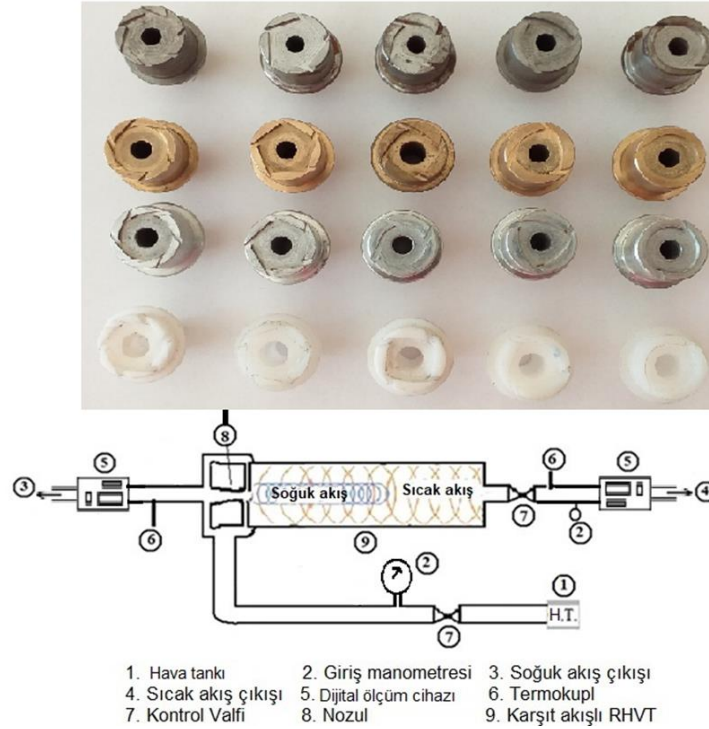
$$\Delta T_{sgk} = T_{gir} - T_{sgk} \quad (2)$$

RHVT'lerde girişteki akış sıcaklığı (T_{gir}) ile çıkan sıcak akış sıcaklık (T_{sck}) fark, sıcak akış sıcaklık farkı (ΔT_{sck}) olarak tanımlanır ve denklem 3 de verilmiştir.

$$\Delta T_{sck} = T_{sck} - T_{gir} \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3 birleştirilip sadeleştirildiğinde, RHVT performansı (ΔT) denklem 4 de verilmiştir [1, 3, 4, 12].

$$\Delta T = T_{sck} - T_{sgk} \quad (4)$$



Şekil 3. Deneysel çalışmada kullanılan Karşıt akışlı RHVT ve kullanılan nozullar (Counterflow RHVT and nozzles used in the experimental study)

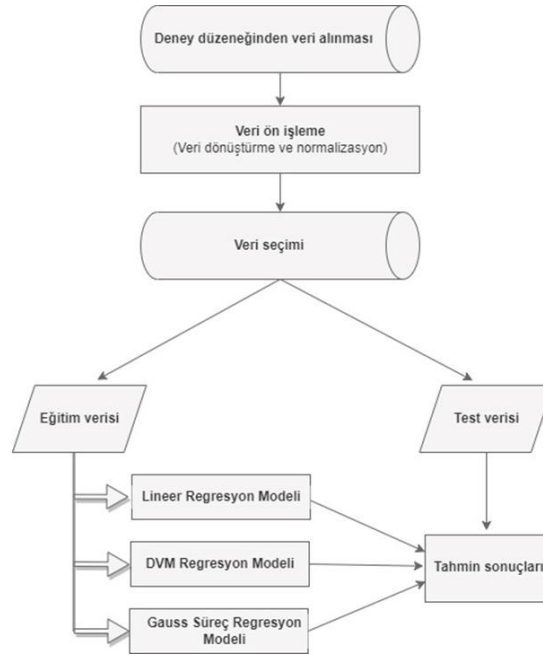
2.2. Makine öğrenme yöntemleri (Machine learning techniques)

Yapay zekânın bir dalı olan makine öğrenimi, sorunların çözümünde konuya ilişkin verileri eğitim, test ve doğrulama amaçlı kullanarak çözüme yönelik tahminler üreten algoritmalarıdır. Bunun için eğitim modelleri oluşturulur. Farklı makine öğrenimi yöntemleri farklı oranda veriye ihtiyaç duysa da genellikle modelleri sürekli olarak optimize etmek ve algoritmaları kullanarak en iyi tahminleri yapmak için büyük miktarda veri kullanılır [13]. Makine öğrenimi için çok sayıda farklı algoritma ve yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; lineer regresyon, gauss süreç regresyonu, karar ağaçları, destek vektör makineleri, rastgele orman ve yapay sinir ağları olarak sayılabilir. Makine öğrenimi yöntemleri kümeleme, sınıflandırma, tahmin, örüntü tanıma, bilgi çıkarımı gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilir [14].

Bu çalışmada kurulu deney düzeneği ile elde edilen sonuçlardan RHVT'nin ΔT değerlerini tahmin etmek için makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Şekil 4'te makine öğrenimi işlem süreçlerinin akış şeması verilmektedir. İşlemler ilk olarak deney düzeneğinin oluşturulması ve bu düzenden gerekli verilerin toplanmasıyla başlar. Toplanan verilerdeki ölçüm ve diğer hatalar giderilir. Hatalardan arındırılmış veriler makine öğreniminde kullanılacak şekilde düzenlenir. Bu düzenleme esnasında gerekli olan bazı veriler makine öğreniminde kullanılan matematiksel modellere de uygun olacak şekilde sayısal değerlere dönüştürülür. Yine bu değerlerin makine öğrenimi yöntemlerinde doğru bir şekilde kullanılabilmesi için veriler üzerinde standartlaştırma işlemi yapılır. Veriler eğitim verisi ve test verisi olarak iki grup halinde kullanılır. Bu çalışmada eğitim verisi için tüm verinin %80'ni, test verisi için %20'si kullanılmıştır. İlk olarak makine öğrenimi yöntemlerinden üç farklı regresyon yöntemi olan DVM, LR ve GSR yöntemleriyle eğitim süreci gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerle elde edilen eğitim modelleri kullanılarak test verisi ile tahminler üretilmiştir.

Yapılan regresyon analizlerinden elde edilen tahminlerin doğruluğunun bir ölçüsü determinasyon katsayısı R^2 'dir. Bu katsayı ölçülen verilerle tahmin edilen verilerin birbiri ile ne kadar uyumlu

olduğunun bir ölçütüdür. $R^2=1$ olması tam uyumlu olduğunu gösterir. Veri sayısı arttıkça R^2 'nin güvenilirliği de artmaktadır.



Şekil 4. Makine öğrenimi işlem akış şeması (Machine learning operations flowchart)

2.2.1. Lineer regresyon (Linear regression)

Lineer regresyon (LR) bağımlı bir değişken ile bir veya daha çok bağımsız değişken arasındaki neden-sonuç ilişkisini ortaya koyabilmek amacıyla kullanılan temelde istatistik bilimine dayalı bir yöntemdir. Regresyon modeli, bir fonksiyon aracılığıyla bağımlı değişkeni bağımsız değişken veya değişkenlerle ilişkilendirir [15]. LR yönteminde tek bir bağımsız değişken kullanılabilir gibi birden çok bağımsız değişken de kullanılabilir. Birden çok bağımsız değişken kullanıldığında çoklu lineer regresyon (ÇLR) adını alır [16, 17]. LR yöntemi denklem 5 ile ifade edilebilir.

$$y = a_0 + a_1X + \varepsilon \quad (5)$$

Denklem 5'te, y bağımlı değişken, X bağımsız değişken ve ε hata terimidir. a_0 sabit terim olup, regresyon doğrusunun düşey eksendeki kesişimini, a_1 ise regresyon doğrusunun eğimini veren regresyon katsayısıdır. Burada a_1 bir sabit olup değişimin yönünü ve miktarını verir. a_1 'in değerinin pozitif olması değişimin arttığını, değerinin negatif olması ise değişimin azaldığını gösterir [18]. ÇLR yöntemine ait eşitlik denklem 6 da verilmektedir.

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + \varepsilon \quad (6)$$

Denklem 6 da birden çok regresyon katsayısı (a_1, a_2, \dots, a_n) ve birden çok bağımsız değişken (X_1, X_2, \dots, X_n) bulunmaktadır. Genellikle en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak tahmindeki olası hata sıfıra yaklaştırılmaya çalışılır [19].

2.2.2. Destek vektör makineleri (Support vector machines)

Destek Vektör Makineleri (DVM), Vapnik tarafından 1990'lı yıllarda ortaya konuldu [20]. DVM algoritması, veriyle ilgili birleşik dağılım fonksiyonu bilgisine ihtiyaç duymadığından dağılımdan bağımsız çalışabilen bir öğrenme algoritmasıdır [21]. DVM'nin amacı sınıfların birbirinden ayrılması için optimum ayırma hiper düzleminin bulunmasıdır. Yani farklı sınıfların destek vektörleri arasındaki uzaklığı en büyükmektir [22]. Bir destek vektör makinesi, verileri optimum bir şekilde iki gruba ayıran n -boyutlu bir hiperdüzlem oluşturur. DVM'ler istatistik ve makine öğrenimi yöntemlerinden sinir ağlarının çeşitli tekniklerini birlikte kullanırlar [23, 24]. DVM, yüksek genelleme yeteneğine

sahiptir ve yüz tanıma, ses tanıma, el yazısı tanıma metin sınıflandırma gibi bir çok farklı alanda kullanılmaktadır [25, 26].

DVM yöntemi ilk önceleri doğrusal verilerin iki sınıfa ayrılması için tasarlanmış olsa da günümüzde doğrusal olmayan ve çok sınıflı veriler üzerinde tahminler üretmek için de kullanılmaktadır. Doğrusal ayrılabilen veriler için genellikle iki sınıfa ayrılabilen örnek veriler kullanılarak yapılan eğitimler sonucu elde edilen karar fonksiyonu sayesinde verilerin birbirinden ayrılması amaçlanır [27]. Optimum hiperdüzleme ait denklem 7 ve 8 de verilmektedir.

$$w \cdot x_i + b \geq +1, y = +1 \quad (7)$$

$$w \cdot x_i + b \leq -1, y = -1 \quad (8)$$

Bu denklemlerde $x \in \mathbb{R}^N$ N-boyutlu uzayı, $y \in \{-1, +1\}$ sınıf etiketlerini, b eğilim değerini, w ağırlık vektörünü gösterir [28, 29].

Bazı durumlarda verileri doğrusal olarak ayırmak mümkün olmayabilir. Bu durumda doğrusal ayıramayan verilerin yanlış sınıflandırılmaması için düzenleme parametresi ve yapay değişken kullanılarak optimizasyon problemi çözülmeye çalışılır [27].

2.2.3. Gauss süreç regresyonu (Gaussian process regression)

Gauss süreç regresyonu (GSR), genellikle doğrusal olmayan regresyon problemlerini çözmek için olasılıklı, parametrik olmayan problemlerde daha çok tercih edilen başarılı bir makine öğrenme yöntemidir [30, 31]. GSR, küçük verilerde bile başarılı sonuçlar üretebilir ve tahminlerde belirsizlik ölçümleri yapılabilecek özelliklere sahiptir [32]. GSR ile en doğru seçeneğin belirlenebilmesine imkân verebilecek farklı kovaryans fonksiyonları kullanılabilir [33]. Gauss süreç fonksiyonu $f(x)$ denklem 9 da verilmektedir [34].

$$f(x) = GP(m(x), k(x, x')) \quad (9)$$

Burada $m(x)$ ortalama fonksiyonu, $k(x, x')$ kovaryans fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu denklem 10 da, kovaryans fonksiyonu ise denklem 11 de verilmektedir.

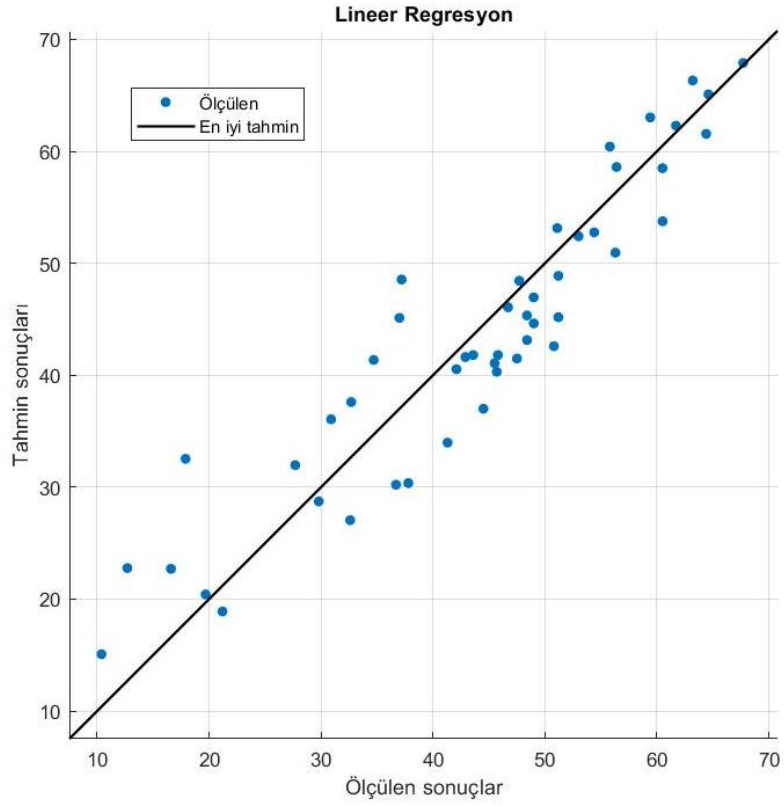
$$m(x) = E[f(x)] \quad (10)$$

$$k(x, x') = E[(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')))] \quad (11)$$

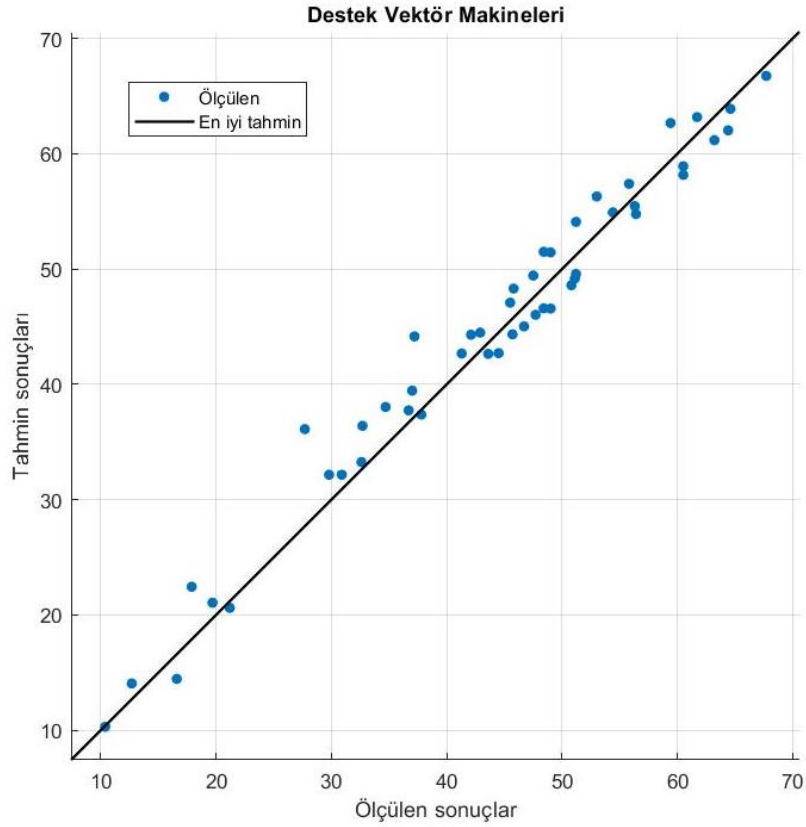
Gauss sürecinin hiper-parametreleri ortalama fonksiyonu ve kovaryans fonksiyonudur. Ortalama fonksiyonu, x girdisine sahip $\mathbb{R}(\mathbb{R})$ fonksiyonunun beklenen değerini gösterir ve genelde basitleştirme amacıyla sıfır olarak alınmaktadır. Ortalama fonksiyonu için güven düzeyinin bir ölçüsü kovaryans fonksiyonudur [35].

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

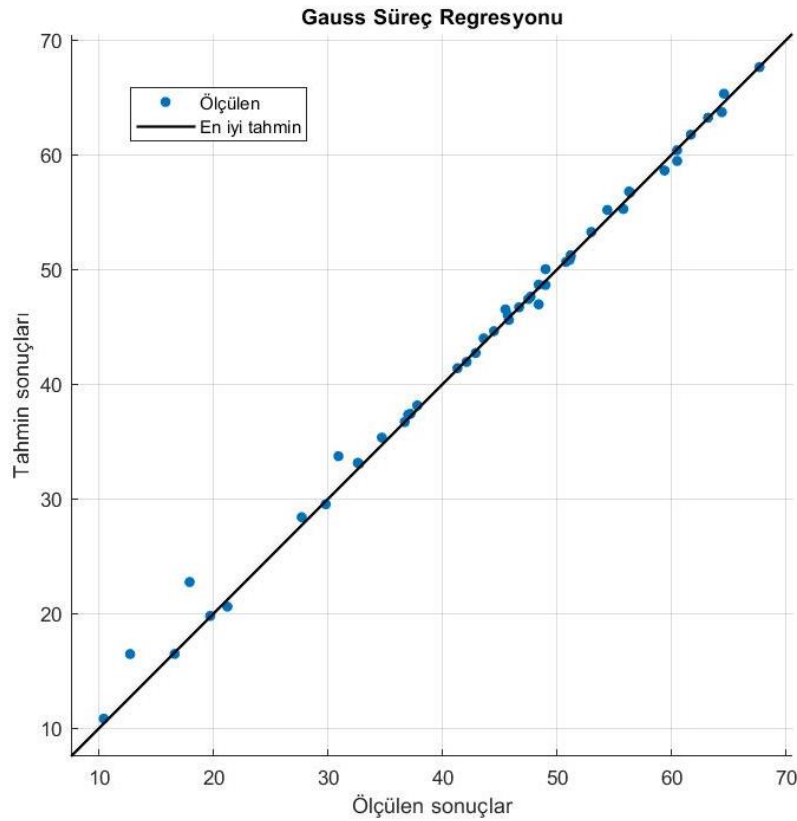
Kurulan RHVT deney düzenekleri ile elde edilen verilerle makine öğrenimi eğitim ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Makine öğrenimi yöntemlerinden LR, DVM ve GSR yöntemleriyle yapılan çalışmalardan elde edilen testlere ait sonuç grafikleri sırasıyla Şekil 5-7 de verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi LR yönteminde düşük ΔT değerlerinde ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki farklılık daha fazlayken daha yüksek değer aralığında birbirine daha yakın çıkmıştır. Benzer durum Şekil 6 ve Şekil 7'deki DVM ve GSR yöntemlerinde de görülmekle birlikte onlardaki farklılık çok daha azdır. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde LR yönteminin başarısının diğer yöntemlere göre daha düşük olduğu, ancak bununla birlikte yine de kullanılabilir düzeyde sonuçlar üretebildiği değerlendirilmektedir. DVM ve GSR yöntemleriyle elde edilen tahmin sonuçlarının çok iyi olduğu Şekil 6 ve Şekil 7'de görülmektedir. Uygulanan makine öğrenimi yöntemleri içerisinde en yüksek doğruluğa sahip yöntemin GSR yöntemi olduğu şekillerden, doğruluk ve uyumluluk ölçütlerinden (R^2 , RMSE, MSE, MAE) anlaşılmaktadır. Yöntemlerin ürettiği tahmin sonuçlarına ait doğrulukların farklı seviyelerde olması, kullanılan yöntemlerin algoritmasından, veri sayılarından ve uygulanan alandan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5. LR yöntemi ile ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık farkları (ΔT) grafiği (Graph of temperature differences (ΔT) measured and estimated by the LR method)



Şekil 6. DVM yöntemi ile ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık farkları (ΔT) grafiği (Graph of temperature differences (ΔT) measured and estimated by the SVM method)



Şekil 7. GSR yöntemi ile ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık farkları (ΔT) grafiği (Graph of temperature differences (ΔT) measured and estimated by the GPR method)

Kullanılan makine öğrenimi yöntemleriyle yapılan test tahmin sonuçlarına ait doğruluk değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak elde edilen test tahmin sonuçlarının doğruluk değerleri (Accuracy values of test prediction results obtained using machine learning methods)

	LR	DVM	GSR
Determinasyon Katsayısı (R^2)	0.87	0.97	0.99
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	5.30	2.56	1.09
Ortalama Kare Hata (MSE)	28.11	6.56	1.18
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	4.32	2.09	0.59

Yapılan çalışmada, RHVT deneylerinden elde edilen verilerle öncelikle makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak eğitimler gerçekleştirilmiştir. Eğitimlerden elde edilen modeller kullanılarak yapılan makine öğrenimi testlerinde RHVT sıcaklık farkına (ΔT) ait R^2 değerleri; LR yönteminde 0.87, DVM yönteminde 0.97, GSR yönteminde ise 0.99 olarak bulunmuştur. Bu çalışmalar makine öğrenimi yöntemi ile yapılan çalışmaların gerçek deney düzeneklerinde ölçülen sıcaklık farkı değerlerine çok yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Kullanılan üç farklı makine öğrenimi yönteminden GSR yönteminin RHVT performansına ait sıcaklık farkının (ΔT) R^2 değeri, LR ve DVM yöntemlerine ait sıcaklık farklarının (ΔT) R^2 değerlerinden daha yüksek doğruluk değeri vermiştir (Tablo 1). Makine öğrenimi yöntemlerinin karşıt akışlı RHVT sistemlerinin deney düzeneklerinin oluşturulmasında zaman ve maliyet kaybını azaltmak için önemli bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur. Makine öğrenimi yöntemleri ile karşıt akışlı RHVT performans analizlerinin bu çalışmadaki değer aralıklarında çalışıldığında, istenilen gerçek değerlere ulaşılmasının tahmin edilebilmesi için doğrulayıcı bir yaklaşım olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışma ile makine öğrenimi yöntemlerinden Lineer Regresyon (LR), Destek Vektör Makineleri (DVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GSR) yöntemleri kullanılarak yapılan makine öğrenme yöntemlerinden oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebileceği ve yöntemin tüm deneysel çalışmalara uyarlanabileceği önerilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] A. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, "Optimization of counter flow ranque-hilsch vortex tube performance using taguchi method," *International Journal of Refrigeration*, vol. 32, no. 6, pp. 1487-1494, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.02.018
- [2] F. Günver, "Paralel bağlı karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüpün enerji-ekserji analizlerinin deneysel olarak incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın Üniversitesi, 2018
- [3] A. Pinar, O. Uluer, and V. Kirmaci, "Statistical assessment of counter-flow vortex tube performance for different nozzle numbers, cold mass fractions, and inlet pressures via taguchi method," *Experimental Heat Transfer*, vol. 22 no. 4, pp. 271-282, 2009. doi:10.1080/08916150903099058
- [4] H. Kaya, O. Uluer, E. Kocaoğlu, and V. Kirmaci, "Experimental analysis of cooling and heating performance of serial and parallel connected counter-flow Ranquee-Hilsch vortex tube systems using carbon dioxide as a working fluid," *Int. J. Refrig.*, vol. 106, pp. 297-307, 2019. doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.07.004
- [5] H. Gökçe, "Optimization of ranque-hilsch vortex tube performances via taguchi method," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, no. 11, 2020. doi:10.1007/s40430-020-02649-z
- [6] W. Fröhlingsdorf and H. Unger, "Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the ranque-hilsch vortex tube," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 3, pp. 415-422, 1998. doi:10.1016/S0017-9310(98)00191-4
- [7] K. Dincer, S. Baskaya, B. Z. Uysal, and I. Ucgul, "Experimental investigation of the performance of a ranque-hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet," *Int. J. Refrig.*, vol. 32, no. 1, pp. 87-94, 2009. doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.06.002
- [8] M. Bovand, M. S. Valipour, S. Eiamsa-Ard, and A. Tamayol, "Numerical analysis for curved vortex tube optimization," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 50, pp. 98-107, 2014. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012
- [9] H. R. Thakare and A. D. Parekh, "CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 78, pp. 360-370, 2014. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.083
- [10] H. Gökçe, H. Kaya, and V. Kirmaci, "Karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüpün performansının taguchi metodu ile analizi," *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress 2019*, pp. 414-421, 2019.
- [11] Kaya. H and Gökçe. H, "oksijen kullanılan karşıt akışlı vorteks tüpünün taguchi yöntemi ile analizi," *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, pp. 588-595, 2019.
- [12] H. Kaya, H. Gökçe, and V. Kirmaci, "Effect of cold outlet diameter on thermal performance and exergy analysis of ranque-hilsch vortex tube with copper nozzles," *Heat Transf. Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 59-70, 2022. doi:10.1615/HeatTransRes.2021039907
- [13] J. Wei, X.Chu, X. Sun, K. Xu, H. Deng, J. Chen, Z. Wei and M. Lei "Machine learning in materials science," *InfoMat*, vol. 1, no. 3, pp. 338-358, 2019.
- [14] T. E. Kalaycı, "Kimlik hırsız web sitelerinin sınıflandırılması için makine öğrenmesi yöntemlerinin karşılaştırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 24, no. 5, pp. 870-878, 2018.
- [15] Q.-H. Luu, M. F. Lau, S. P. H. Ng, and T. Y. Chen, "Testing multiple linear regression systems with metamorphic testing," *Journal of Systems and Software*, vol. 182, p. 111062, 2021.
- [16] D. S. Memnun ve Ş. Kalaycı, "SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri," Ankara: *Asil Yayın Dağıtım*, İlköğretim Online, cilt 12, sayı 1, 2006.
- [17] S. Rong and Z. Bao-Wen, "The research of regression model in machine learning field," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 176, pp. 1033, 2018.
- [18] M. Bayazit and B. Oğuz, *Mühendisler için istatistik*, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 197, 1994.
- [19] Y. Aslan, S. Yavasca, and C. Yasar, "Long term electric peak load forecasting of Kutahya using different approaches," *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 87-91, 2011.
- [20] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.*, vol. 20, no. 3, pp. 273-297, 1995.
- [21] K. P. Soman, R. Loganathan, and V. Ajay, *Machine learning with SVM and other kernel methods*, PHI Learning Pvt. Ltd., New Delhi, 2009.
- [22] S. Ayhan and Ş. Erdoğmuş, "Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Derg.*, cilt 9, sayı 1, ss. 175-201, 2014.

- [23] S. Haykin, *Neural Networks, a comprehensive foundation*, Prentice-Hall Inc, New Jersey, pp. 161–175, 1999.
- [24] S. Tolun, “Destek vektör makineleri: Banka başarısızlığının tahmini üzerine bir uygulama,” Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [25] B. Schölkopf, J. C. B. Christopher, and J. A. Smola, *Advances in kernel methods*, England: The MIT Press, vol. 53., Cambridge, 1999.
- [26] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor, *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge university press, Cambridge, 2000.
- [27] T. Kavzoğlu ve İ. Çölkesen, “Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi,” *Harit. Derg.*, cilt 144, sayı 7, ss. 73–82, 2010.
- [28] E. E. Osuna, “Support vector machines: Training and applications,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1998.
- [29] S. Huang, N. Cai, P. P. Pacheco, S. Narrandes, Y. Wang, and W. Xu, “Applications of support vector machine (SVM) learning in cancer genomics,” *Cancer Genomics Proteomics*, vol. 15, no. 1, pp. 41–51, 2018.
- [30] K. Liu, X. Hu, Z. Wei, Y. Li, and Y. Jiang, “Modified Gaussian process regression models for cyclic capacity prediction of lithium-ion batteries,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 1225–1236, 2019.
- [31] M. Acı ve A. G. Doğanşoy, “Makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak e-perakende sektörüne yönelik talep tahmini,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 37, no. 3, pp. 1325–1340, 2022.
- [32] B. Ateş, “Gemi yapılarında gerilme yığılması öngörülerinin kaba ağ yapısı ve makine öğrenmesi ile gerçekleştirilmesi,” Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.
- [33] Y. Heo and V. M. Zavala, “Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings,” *Energy Build.*, vol. 53, pp. 7–18, 2012.
- [34] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, “Gaussian processes formachine learning,” USA: MIT Press, Cambridge, 2006.
- [35] K. Yazıcı, “Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak kısa dönem rüzgar gücü tahmini,” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2021.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Comparison of Turbulence Models and Wall Layer Mesh in a Solar Air Heater

Özgür Erol^a

Submitted: 22.02.2022 Revised: 04.08.2022 Accepted: 09.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705016

ABSTRACT

Keywords: Turbulence models, Wall layer mesh structure, Solar air heater

^a Başkent University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
06790 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8824-4290
e-mail: erol@baskent.edu.tr

*Corresponding author:
erol@baskent.edu.tr

Turbulence models and the wall layer mesh thickness that are given to the walls are two important parameters for the solution of the fluid mechanics problems in Computational Fluid Dynamics. For different problems in engineering, different turbulence models are efficient. Also the thickness of the wall layer, which is determined before the solution, is another parameter which affects the result of the solution for a selected turbulence model. In this study, three turbulence models, which are k- ϵ , Renormalization-Group k- ϵ (RNG) and Low Reynolds Number k- ϵ models, were compared for 3, 6 and 9 levels of wall layer on a flat solar air heater. The results were compared with the results given in the literature. In the analysis of the solar air heater, solar radiation calculations were made for a better simulation. According to the comparison of the results that were acquired from the CFD solutions and the results in the literature, Renormalization-Group k- ϵ using six wall layers is found to be the best method and wall layer thickness among the alternatives that were investigated.

Hava Akışkanlı Bir Güneş Toplacında Türbülans Modellerinin ve Duvar Tabaka Ağ Yapısının Karşılaştırması

ÖZ

Türbülans modelleri ve duvarlara atanan duvar tabaka ağ kalınlığı, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanıldığı akış problemlerinin iki önemli parametresini oluşturmaktadır. Mühendislikteki farklı problemler için farklı türbülans modelleri etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca duvar ağ yapısı oluşturulurken belirlenen duvar tabaka ağ kalınlığı da seçilmiş olan türbülans modelinden elde edilecek sonucu etkileyen bir parametredir. Bu çalışmada, hava akışkanlı bir güneş toplacı için üç farklı türbülans modeli, k- ϵ , RNG k- ϵ ve düşük Reynolds sayısı için k- ϵ modelleri, 3, 6 ve 9 kademe duvar tabaka ağ kalınlıklarında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, incelemesi yapılan modeller arasındaki en iyi sonucun altı seviye duvar tabaka ağ yapısına sahip RNG metodu olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Türbülans modelleri, Duvar tabaka ağ yapısı, Güneş toplacı

1. Introduction

Computational Fluid Dynamics (CFD) methods are powerful tools in the design of the fluid systems in various places of the industry and science. They are relatively cheap and fast tools for the scientists and engineers to make decisions and direct their research or design to an appropriate way without spending high amounts of money and effort. One of the drawbacks of CFD methods is that one can get any result if inappropriate methods and parameters are selected for the definition of the problem. Selection of the turbulence model is one of the most important parameter among these parameters. The accuracy of the simulation changes with the turbulence model that was chosen.

Different kinds of turbulence models are used for different kinds of CFD problems. In the literature, there are studies which compare these turbulence models for different types of problems. Mishra and Aharwal [1] made a review on the turbulence models used in the cold storage air flow problems. Bartosiewicz et. al. [2], Gagan et. al. [3] and Varga et. al. [4] made comparative studies on the selection of turbulence models for steam and gas ejectors.

Also for different cases in aeronautics, turbulence model comparison studies were made by different researchers, such as for the supersonic separated flows [5], low Reynolds number flow on delta wings [6] or flow on different airfoils [7].

Turbulence model comparisons were also made for turbomachinery applications, which have rotating parts like the studies made by Bharanitharan and Sentilkumar [8], Tog et.al. [9], Gibson et. al. [10] and Han and Huachen [11]. Also turbulence models were compared for the vertical-axis turbine applications like the studies made by Rezaeiha et. al. [12], Meana-Fernandez [13], Marsh et. al. [14].

Nuclear energy and various industrial applications are also application areas for CFD and turbulence model comparisons were also made in the literature, such as Kim et.al. [15], Guardo et.al. [16], Brown et.al. [17] and Mirzaei et.al. [18].

Wall layer mesh thickness is also a parameter that has to be defined before the simulation according to the turbulence model that is selected. Wall layer parameter adds elements to the solid-fluid border and produces a smooth and appropriate mesh distribution, which is critical for the solution [19]. Therefore assessment of the thickness of the wall layer for a particular turbulence model and geometry is an important factor in the solution of the problem.

In the literature, different CFD studies were made for various solar air heater problems and geometries. Very close solutions with respect to the experimental data can be found by using these methods, especially with radiation calculations. In their study, Vivekanandan et. al. made experimental and CFD investigation of the flow in a solar air heater [20]. Singh et. al. [21, 22], numerically investigated the performance of a solar air heaters coupled with buildings. They also [23] used CFD methods to estimate the performance of a curved double-pass solar air heater. The flow characteristics and performance analysis of different types of rib geometries used in the solar air heaters [24-27] were made by using the numerical methods.

In this study, three turbulence models, standard $k-\varepsilon$ model ($k-\varepsilon$), Renormalization group $k-\varepsilon$ (RNG) and Low Reynolds $k-\varepsilon$ (LowRe) models with 3 (prefix 3), 6 (prefix 6) and 9 (prefix 9) wall layer cell levels were compared for a flat plate solar air heater (SAH) problem. The problem is defined by using the experimental flat plate SAH study made by Kalaiarasi et. al. [28]. Test cases were solved by using Autodesk CFD software using solar radiation calculations.

2. Numerical Model

In this study, steady state flow simulations for a SAH were made by using Autodesk CFD software, which solves Navier-Stokes Equations of continuity, momentum and energy equations using Finite Element Method [29, 30].

Continuity;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

x-, y- and z-Momentum;

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2(\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(2(\mu + \mu_t) \frac{\partial W}{\partial z} \right) + S_\omega + S_{DR} \quad (4)$$

Energy;

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial x} + \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial y} + \rho C_p W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left((k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((k + k_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((k + k_t) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (5)$$

where U, V and W are average velocities, SDR is the distributed resistance term, S_ω is the source term for the rotating flow and q_v is the volumetric heat source term. Also, μ_t and k_t terms given in the equations are defined as the eddy viscosity and eddy conductivity, respectively.

For the k- ϵ turbulence models that were examined in this study, two different equations of Turbulent Kinetic Energy (TKE) and Turbulent Energy Dissipation (TED) equations were added to the solution of the Navier-Stokes equations. There are slight differences in these equations according to the turbulence model that is used.

The k- ϵ turbulence model and the RNG model, which are high Reynolds number methods, use the same equations, except some constant values. In these models, TKE and TED equations are [31];

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U \frac{\partial K}{\partial x} + \rho V \frac{\partial K}{\partial y} + \rho W \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \epsilon + \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right] - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K} + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{K} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (7)$$

where K is the turbulent kinetic energy term, ϵ is the turbulent energy dissipation term. C_1 and C_2 are constants, whose values are 1.44 and 1.92 for the k- ϵ turbulence model, respectively. Also σ_K (= 1.0 for k- ϵ) and σ_ϵ (= 1.3 for k- ϵ) are turbulent Schmidt numbers. Also the eddy viscosity (μ_t), and eddy conductivity (k_t) can be defined as;

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (8)$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} \quad (9)$$

where σ_t is the turbulent Prandtl number (= 1.0) and C_μ is a constant (= 0.09).

RNG turbulence model is a modified version of the standard model. This model also uses the same equations that standard method uses, except the constant values. In this model, C_1 is a constant, and it is defined as;

$$C_1 = C_0 - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta\eta^3} \quad (10)$$

where η is;

$$\eta = \frac{\sqrt{G}K}{\varepsilon} \quad (11)$$

The G value defined in Equation 11 can be written as;

$$G = 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \quad (12)$$

Other terms that are used for RNG turbulence model are; $C_\mu = 0.085$, $C_0 = 1.42$, $C_2 = 1.68$, $\beta = 0.015$, $\eta_0 = 4.38$, $\sigma_K = 0.7179$ and $\sigma_\varepsilon = 0.7179$.

For the LowRe turbulence model TKE and TED equations are modified by adding a viscosity term (μ) which take the form;

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho U \frac{\partial K}{\partial x} + \rho V \frac{\partial K}{\partial y} + \rho W \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_K} + \mu \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] - \rho \varepsilon + \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (13)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho W \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{K} \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (14)$$

some constants and terms that are used in these equations are the same as the k- ε model. The terms which are different than the k- ε model in this method are;

$$C_\mu = C_{\mu\infty} e^{\frac{-0.25}{(1+R_t/50)}} \quad (15)$$

$$C_2 = C_{2\infty} \left[1 - 0.3e^{-R_t^2} \right] \quad (16)$$

where $C_{\mu\infty}$ and $C_{2\infty}$ are C_μ and C_2 values for the high Reynolds number turbulence model, respectively. Also the turbulence Reynolds number (R_t) value is defined as;

$$R_t = \frac{\rho K^2}{\mu \varepsilon} \quad (17)$$

LowRe turbulence model in Autodesk CFD does not use the wall functions, therefore it is recommended to use more than five levels of wall layer [32]. In order to check this for this turbulence model, three levels of wall layer cell simulation is also investigated in the further sections.

In the comparison of the turbulence models eight different hours were simulated and their outlet temperature values are investigated as the comparison parameter. In order to add all these points into the comparison the average of the deviations of the results from the experimental values given in the literature [28]. This is defined as;

$$D_{avg} = \frac{\sum |T_i - T_{exp_i}|}{n} \quad (18)$$

where T_i is the simulated outlet temperature, T_{exp_i} experimentally measured outlet temperature for that hour in the literature and n is the number of hours that are simulated. It is accepted that, the lower the deviation average, the better the model is.

3. Problem Definition

The numerical setup is defined according to the experimental setup used in the study of Kalaiarasi et al. [28]. This setup is composed of a simple flat plate SAH whose dimensions are given in Figure 1. Since the experiment is made in Madurai/India ($9^\circ 56' N$; $78^\circ 7' E$; GMT 5.5) on 2nd of June, all the test cases were made with respect to this location and day of the year.

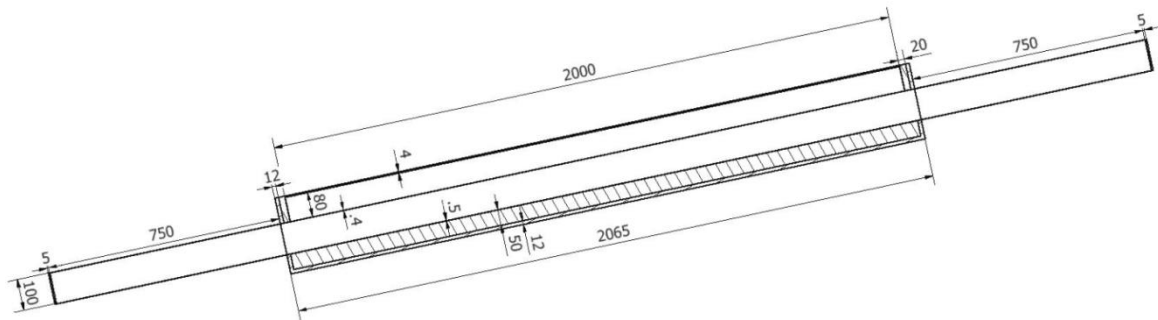


Figure 1. Full section of the numerical model

Three-dimensional model of the SAH used in the simulations is located to the south making an angle of 12° with respect to the ground surface as it is given in Figure 2. Boundary conditions, materials that are used in the SAH were also given in the same figure. The film coefficients were calculated by Designbuilder software and are given in the studies made by Erol [33, 34]. In the design of the SAH, extra inlet and outlet volumes having entrance lengths of 5 mm were added to the model in order to get stable results.

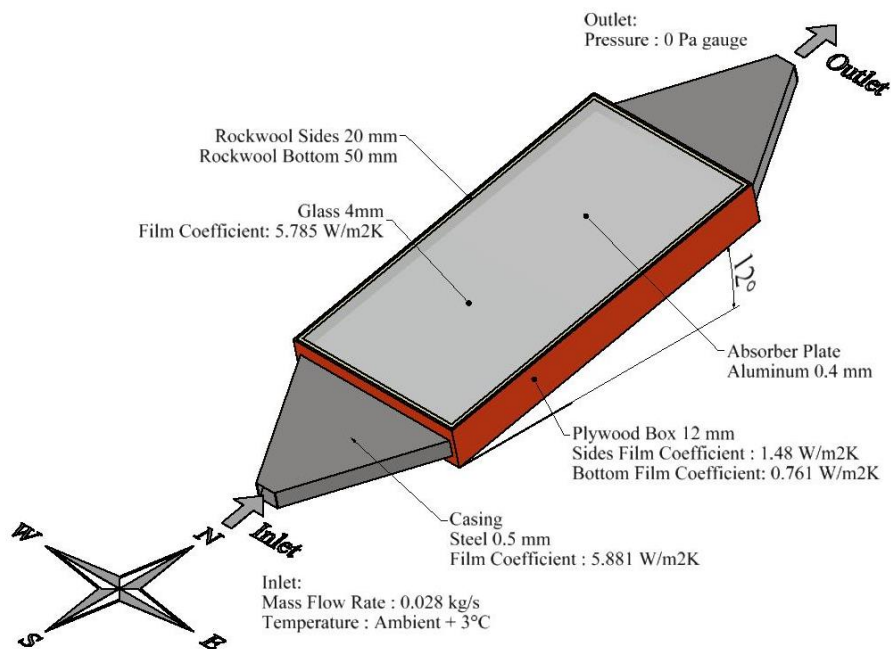


Figure 2. Numerical setup, materials and boundary conditions

In the inlet part of the SAH, inlet boundary condition is defined as mass flow rate of 0.028 kg/s, whose temperature is always 3°C higher than the ambient temperature for each test case. In the simulation of the results steady state calculations were made for every hour between 10:00 and 16:00. For each of the tests, 3, 6 and 9 layers of wall layers were used for each turbulence model as it is given in Figure 3.

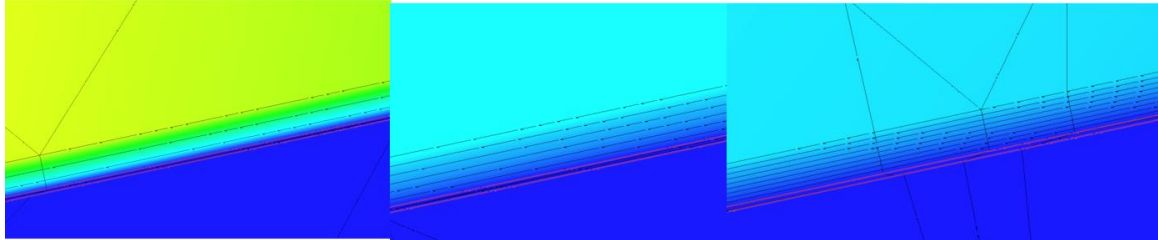


Figure 3. 3, 6 and 9 levels of wall layer

4. Results

In this section, the results that were acquired from the CFD simulations for each turbulence models were presented and the comparisons were made between the experimental results and the simulated values. In the first three subsections, mesh dependence tests and the outlet temperature results for different wall layer thickness of the same models were presented.

In the next section, best results that were selected from these methods were compared separately and the other parameters like the streamlines and the temperature distributions in the flow were investigated.

4.1. k-ε Method

In the mesh dependence tests of this study, the solution is considered to be accepted as mesh independent if the control parameter changes about 1% for a node number increase of over 50% [33]. In this study, outlet temperature of the SAH is accepted as the control parameter. After a series of simulations, outlet temperatures for different node numbers of each wall layer cell number were acquired. The change in outlet temperature with respect to the node number is given in Figure 4. The results that were acquired from the simulations showed that for 3, 6 and 9 levels of wall layer thicknesses of the k-ε turbulence model, 30487, 44635 and 58796 nodes were selected for the rest of the simulations, respectively.

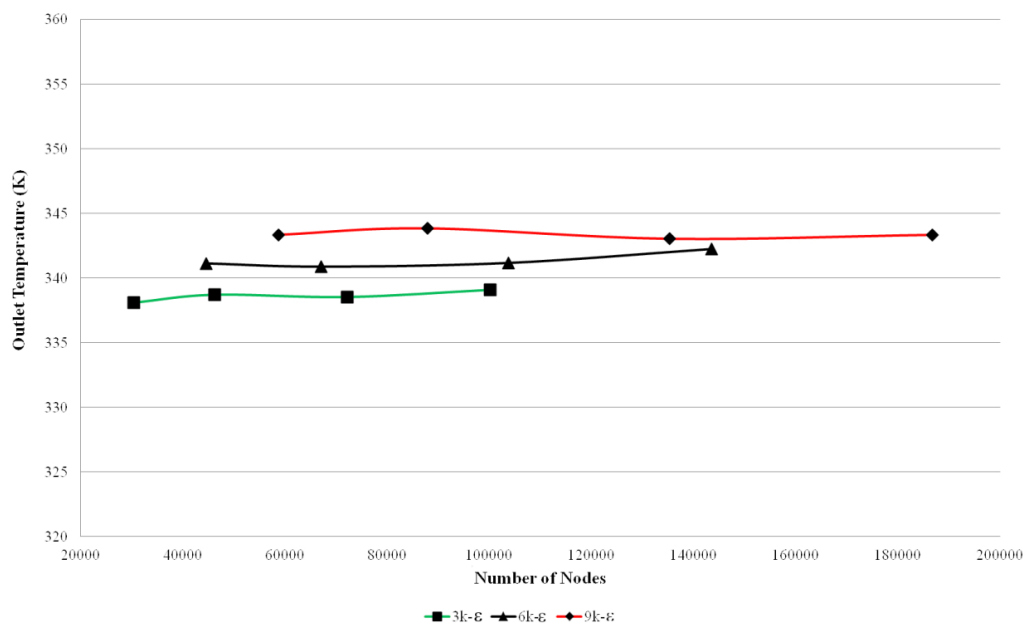


Figure 4. Outlet Temperature vs. Node Number for k-ε

Figure 5 and Table 1 shows the outlet temperature of the reference experimental study [28] and the simulation results of $k-\epsilon$ turbulence model for three different wall layers. The average deviation from the experimental results for 3, 6 and 9 layers of wall layer thickness were found as 3.77, 4.22 and 4.42 K. According to the results, 3 $k-\epsilon$ simulation has the lowest deviation average compared to the experimental results. Therefore, it can be said that three layers can be accepted as the best wall layer value for the $k-\epsilon$ turbulence model for this problem.

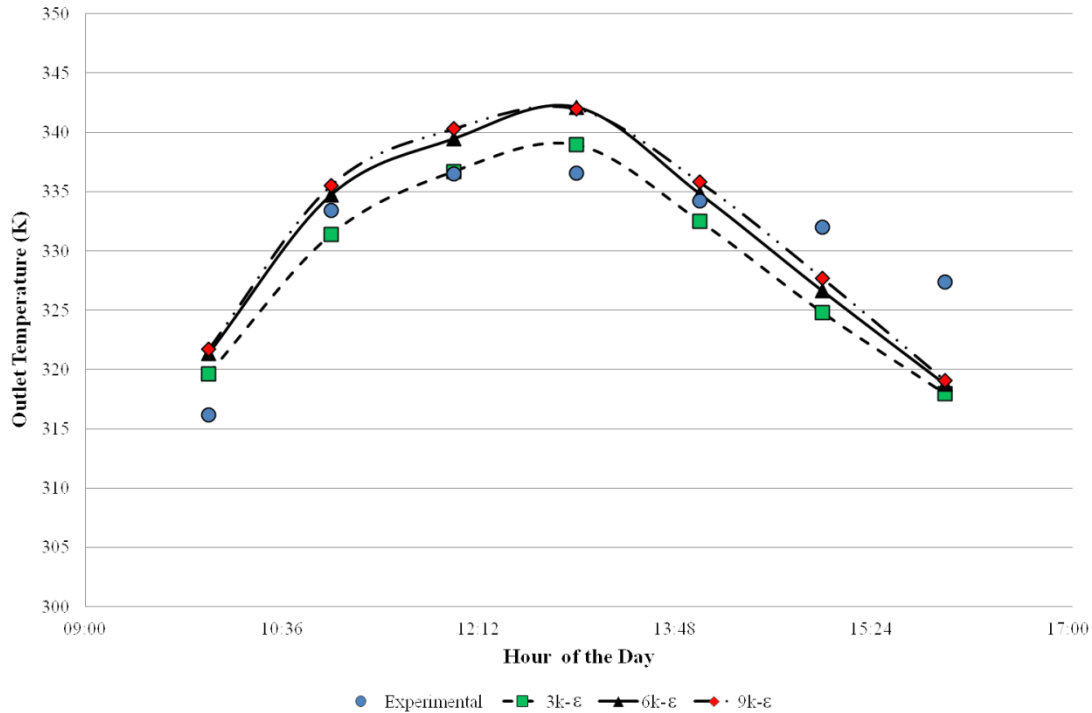


Figure 5. Comparison of outlet temperatures of $k-\epsilon$ model of three different levels of wall layers with experimental [28] results

Table 1. Comparison of outlet temperatures of $k-\epsilon$ model of three different levels of wall layers with experimental [28] results and ambient conditions

Hour	Irradiation (W/m ²)	Inlet Temp (K)	Ambient	Experimental (K)[20]	3k-ε (K)	6k-ε (K)	9k-ε (K)
10:00	518.39	308.77	305.769	316.18	319.65	321.34	321.71
11:00	788.13	311.05	308.049	333.44	331.41	334.74	335.53
12:00	853.85	312.67	309.665	336.53	336.71	339.47	340.3
13:00	818.75	316.35	313.348	336.58	338.93	342.12	341.97
14:00	695.91	316.1	313.102	334.25	332.51	334.82	335.81
15:00	573.57	313.6	310.587	331.99	324.82	326.63	327.7
16:00	476.01	311.7	308.714	327.4	317.97	318.75	319.08

4.2. Low Reynolds $k-\epsilon$ Method

For the Low Reynolds $k-\epsilon$ turbulence model, Figure 6 shows the mesh dependence test. According to the results that were acquired, for 3, 6 and 9 levels of wall layers, 30487, 44635 and 87867 nodes are accepted as mesh independent test cases, respectively. Since this turbulence model do not use wall functions, wall layer numbers lower than five layers is not recommended [32], but in order to see the effect, a three layer solution was also added to the investigation.

For these node numbers, using LowRe turbulence model for three different levels of wall layers, results that were given in Figure 7 and Table 2 was acquired. Average deviations for this turbulence model for 3, 6 and 9 levels of wall layers were calculated as 7.94, 4.01 and 4.56 K, respectively. These results make the 6LowRe as the best solution for the LowRe turbulence model.

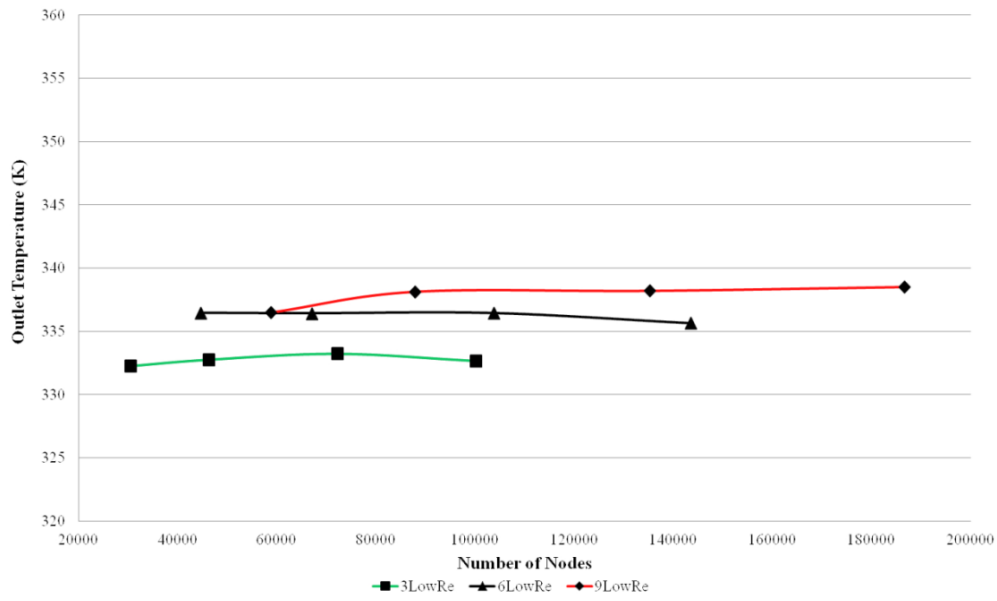


Figure 6. Outlet Temperature vs. Node Number for LowRe

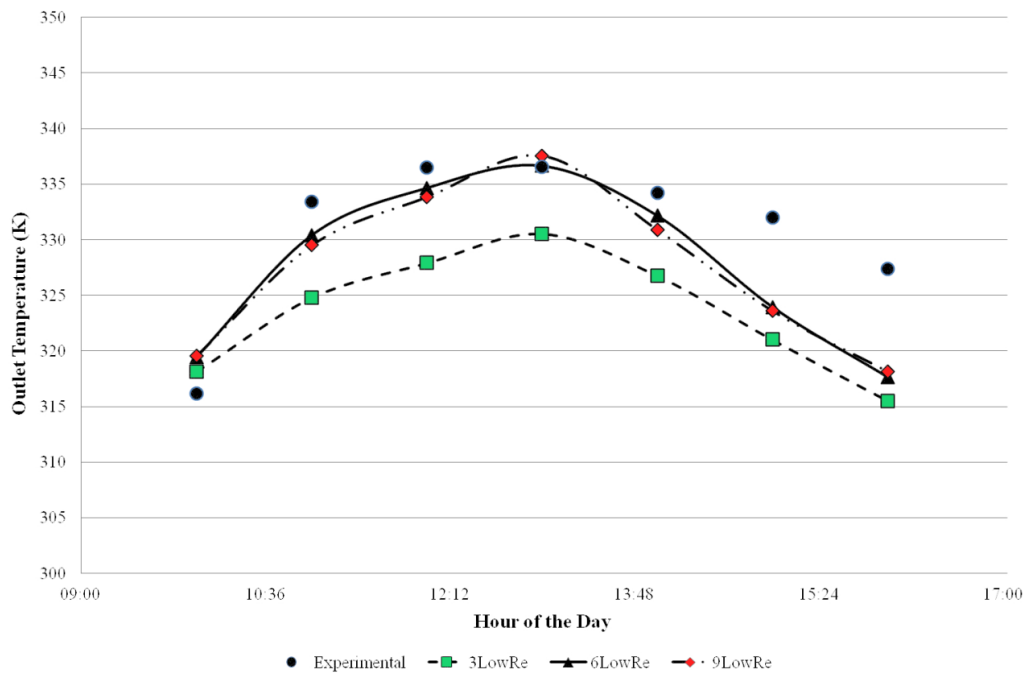


Figure 7. Comparison of outlet temperatures of LowRe for three different levels of wall layers with experimental [28] results

Table 1. Comparison of outlet temperatures of LowRe model of three different levels of wall layers with experimental [28] results and ambient conditions

Hour	Irradiation (W/m ²)	Inlet Temp (K)	Ambient	Experimental (K)[20]	3LowRe (K)	6LowRe (K)	9LowRe (K)
10:00	518.39	308.77	305.77	316.18	318.14	319.45	319.57
11:00	788.13	311.05	308.05	333.44	324.79	330.43	329.51
12:00	853.85	312.67	309.67	336.53	327.91	334.68	333.85
13:00	818.75	316.35	313.35	336.58	330.54	336.66	337.56
14:00	695.91	316.1	313.1	334.25	326.76	332.18	330.91
15:00	573.57	313.6	310.6	331.99	321.01	323.95	323.62
16:00	476.01	311.71	308.71	327.4	315.52	317.65	318.18

4.3. RNG k- ϵ Method

For the RNG turbulence model, mesh dependence tests are given in Figure 8. According to the simulations, for 3, 6 and 9 levels of wall layers, 46260, 67071 and 87867 nodes are accepted as mesh independent for the test cases, respectively.

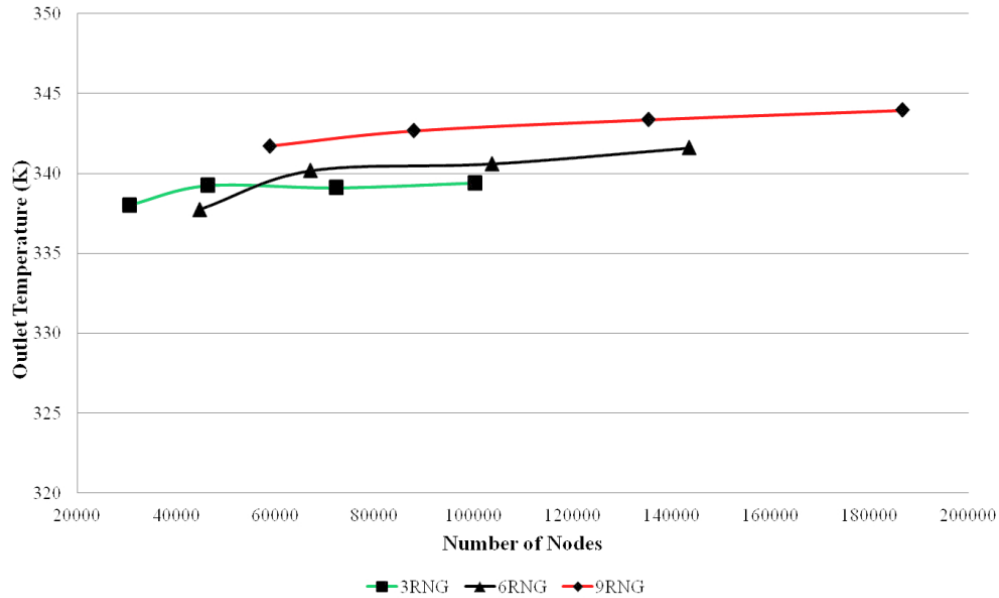


Figure 8. Outlet Temperature vs. Node Number for RNG

By using these node numbers for each wall layer thickness, solar calculations were made between hours 10:00 and 16:00. According to the simulations that were made, results were given in Figure 9 and Table 3. The average deviations of 3, 6 and 9 levels of wall layer for the RNG model were calculated as 4.07, 3.41 and 4.73K, respectively. The lowest average deviation value for RNG was found to be the six layers of wall layer thickness.

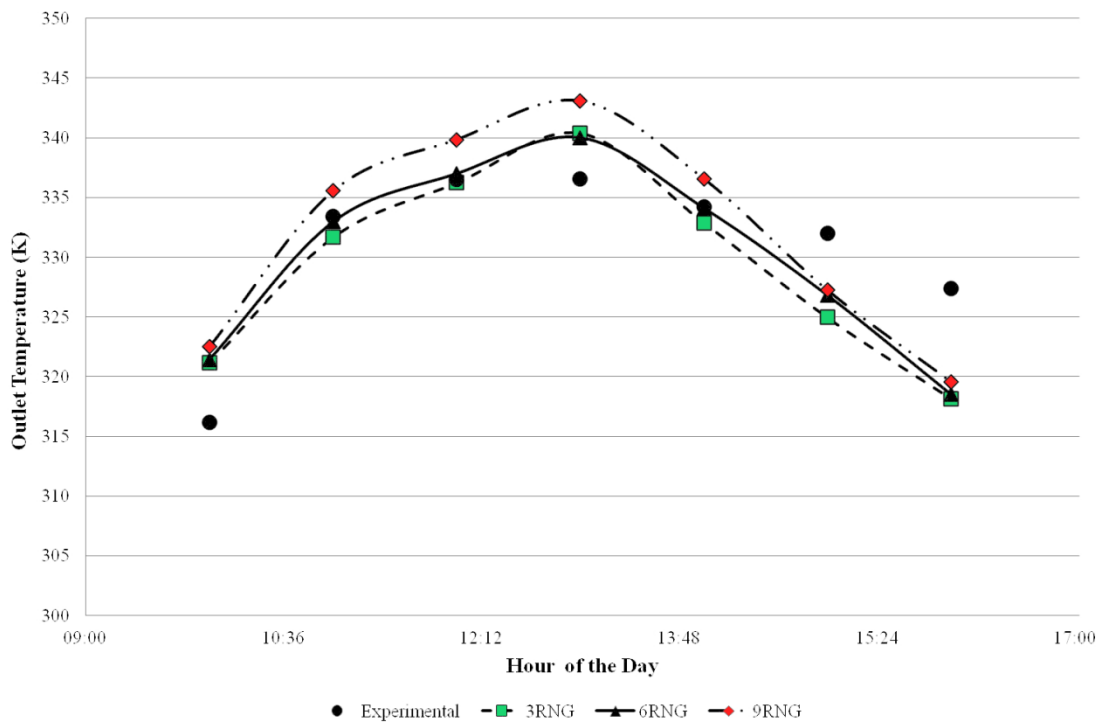


Figure 9. Comparison of outlet temperatures of RNG for three different levels of wall layers -with experimental [28] results

Table 3. Comparison of outlet temperatures of LowRe model of three different levels of wall layers with experimental [28] results and ambient conditions

Hour	Irradiation (W/m ²)	Inlet Temp (K)	Ambient	Experimental (K)[20]	3RNG (K)	6RNG (K)	9RNG (K)
10:00	518.39	308.77	305.77	316.18	321.16	321.44	322.53
11:00	788.13	311.05	308.05	333.44	331.67	332.98	335.55
12:00	853.85	312.67	309.67	336.53	336.24	337.02	339.85
13:00	818.75	316.35	313.35	336.58	340.39	340.04	343.08
14:00	695.91	316.10	313.10	334.25	332.89	334.13	336.56
15:00	573.57	313.59	310.59	331.99	324.96	326.81	327.26
16:00	476.01	311.71	308.71	327.4	318.17	318.49	319.59

4.4. Computation Cost of the Turbulence Models

For every analysis, different turbulence models with different wall layer levels results in different number of iterations to convergence. Also this change the analysis time required to get a converged solution. Method and the node numbers used in the solution are the two main factors that are affecting the computation costs. Table 4 shows the node numbers that are used in the comparison process. The higher the node number the longer the iteration time is.

Table 4. Node numbers used in the comparison process calculations

	3k- ϵ	6k- ϵ	9k- ϵ	3LowRe	6LowRe	9LowRe	3RNG	6RNG	9RNG
Node Number	30487	44635	58796	30487	44635	87867	46260	67071	87867
% difference wrt. 3k-ϵ node number	-	46,41	92,86	0,00	46,41	188,21	51,74	120,00	188,21

But the node number is not the only parameter. The calculation method and the formulations that are used is also an important parameter in the computational cost. Figure 10 shows the iteration number and analysis time required for convergence of the solution at 13:00. When these results were studied it can be said that LowRe turbulence model has the biggest iteration numbers and the analysis time. Although RNG method has a computation cost similar to the LowRe turbulence model, because of the shorter convergence iterations its cost seems lower than the LowRe turbulence model.

k- ϵ turbulence model has the lowest computation cost among the turbulence models that were compared. Not only the mesh independent node number is the lowest, but also the analysis time is lower than the other two turbulence models, even if the convergence iteration number is higher than the RNG turbulence method.

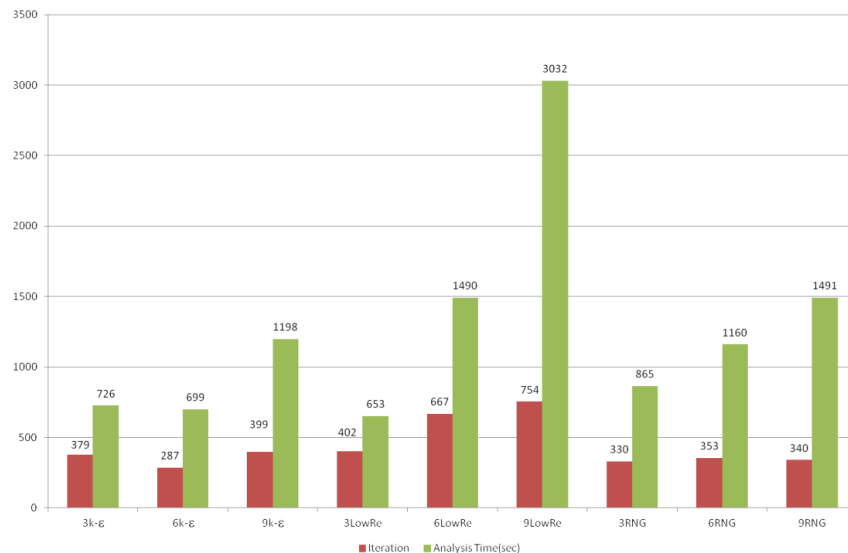


Figure 10. Iteration and analysis time to convergence of turbulence models for 3, 6 and 9 levels of wall layer at 13:00.

4.5. Comparison of Turbulence Models

In this section, since the best results were acquired from these wall layer levels, comparison of 3k- ϵ , 6LowRe and 6RNG cases were made. Figure 11 shows the results that were acquired by the simulations and the experimental results that are in the literature for eight hours of the day beginning from 10:00 until 16:00. According to the deviation average values for each of these turbulence model it is found that 6RNG turbulence model is the best choice among these three turbulence layers.

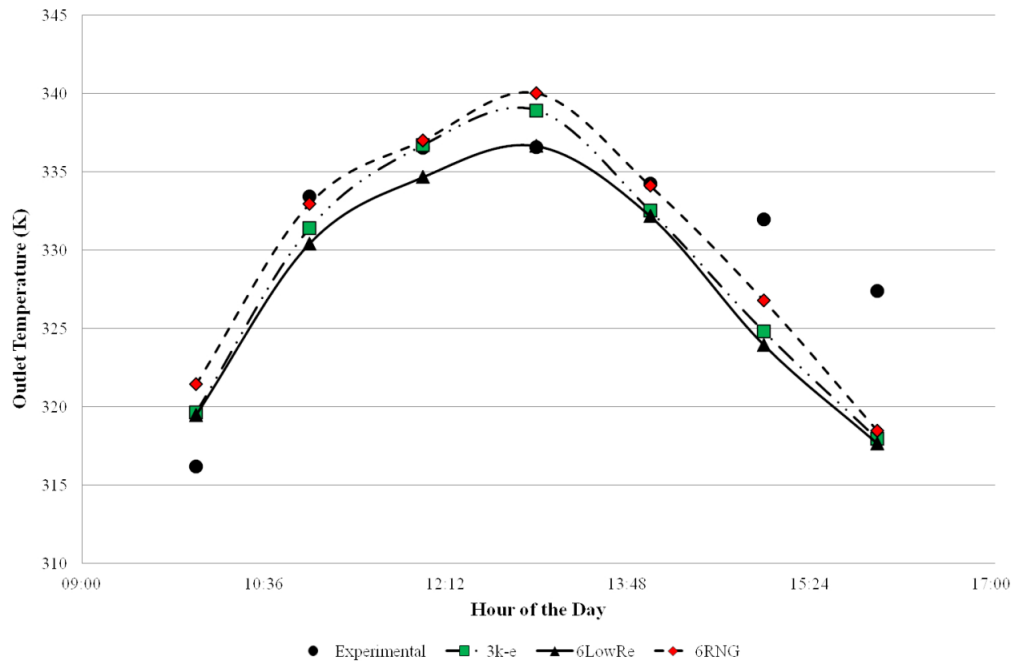


Figure 11. Comparison of outlet temperatures of three turbulence model with experimental [28] results

Figures 12, 13 and 14 show the streamlines and the temperature contours of the flow in the SAH for 10:00, 13:00 and 16:00 hours. These three hours were selected in order to see the effect of the sun in the east, azimuth and west. When the streamlines were investigated it can be seen that for every model the flow begins as a jet and the flow then distributes in the channel. This distribution is more visible for the 6RNG model. When it is compared with the RNG model, distribution of the streamlines for the k- ϵ and LowRe models are very small and concentrated on the outlet side.

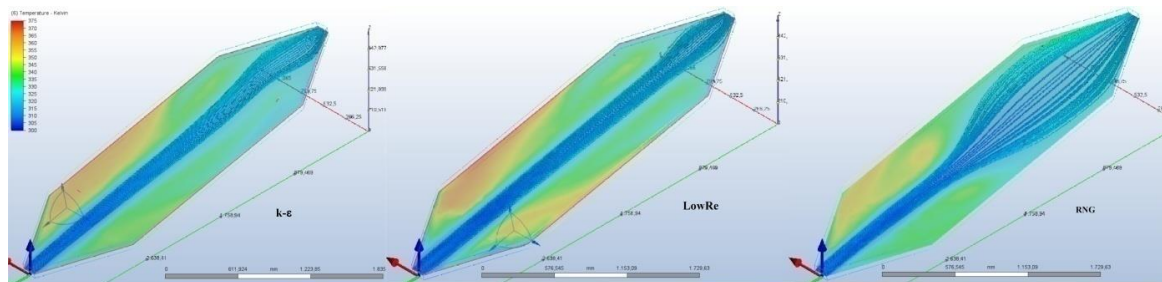


Figure 12. Temperature contours and streamlines for different turbulence models on 10:00

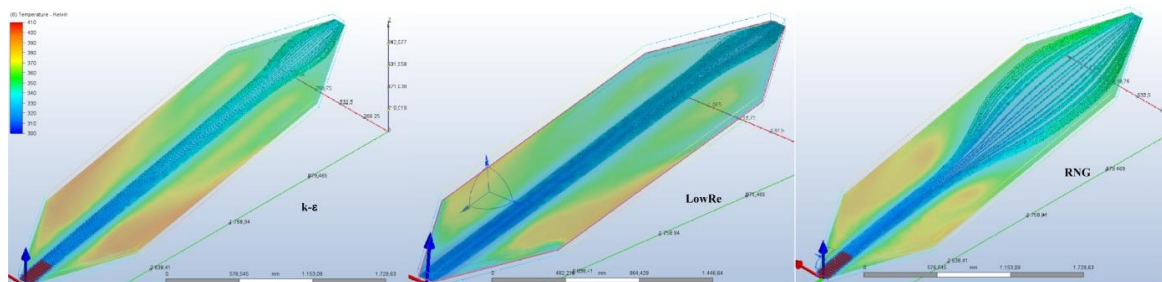


Figure 13. Temperature contours and streamlines for different turbulence models on 13:00

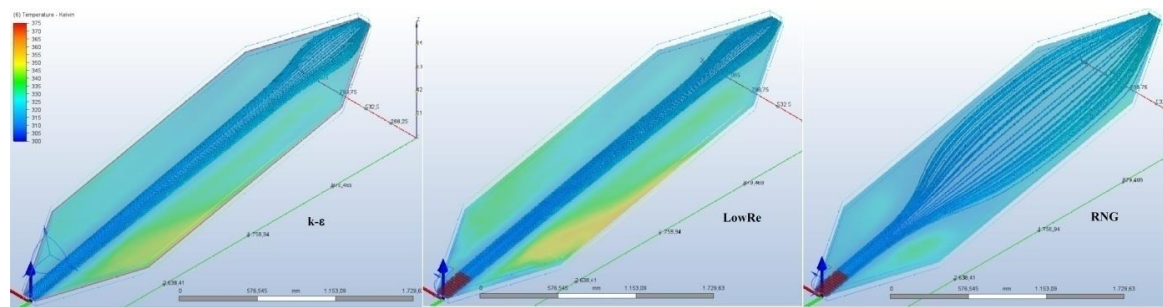


Figure 14. Temperature contours and streamlines for different turbulence models on 16:00

Because of this distribution, 6RNG model found higher outlet temperature values compared to the other turbulence models. Especially for 11:00, 12:00 and 14:00, this method is in a good agreement with the experimental values given in the literature, compared with the other turbulence models.

5. Discussion and Conclusion

With this study, the effect of three turbulence models and three wall layer thicknesses on each of these models were investigated on a flat plate SAH. Calculations were made by using Autodesk CFD software and radiation calculations were added to the simulations. After investigating the results that were acquired from the simulations, following conclusions can be reached;

- Using more wall layer does not guarantee the successful simulation results.
- k- ϵ method has the lowest computation cost among all other turbulence models.
- Worst results were acquired by using LowRe turbulence model with 3 layers of wall layer mesh structure as it is expected.
- Although 3k- ϵ and 6RNG have nearly the same daily average deviation, on hourly basis RNG model calculates the outlet temperature much closer than the k- ϵ method.

When one focuses on the hourly simulations, 6RNG method is found to be the best method in this study. But when the computation cost is added to the comparison parameters it can be said that k- ϵ turbulence model with three levels of wall layer can be chosen as a better alternative than RNG turbulence model with six levels of wall layer.

Conflict of Interest Statement

The author declare that there is no conflict of interest

References

- [1] P. Mishra and K. Aharwal, "A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 402, pp. 012145, September 2018. doi:10.1088/1757-899X/402/1/012145
- [2] Y. Bartosiewicz, Z. Aidoun, P. Desevaux and Y. Mercadier, "CFD-Experiments Integration in the Evaluation of Six Turbulence Models for Supersonic Ejectors Modeling," 2004. [Online]. Available: http://cfd4aircraft.com/int_conf/IC1/papers/Bartosiewicz.pdf. [Accessed: February,03,2022].
- [3] J. Gagan, K. Smierciew, D. Butrymowicz and J. Karwacki, "Comparative study of turbulence models in application to gas ejectors," *International Journal of Thermal Sciences*, vol 78, pp. 9-15, 2014. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2013.11.009
- [4] S. Varga, J. Soares, R. Lima and A. Oliveira, "On the Selection of a Turbulence Model for the Simulation of Steam Ejectors Using CFD," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 12, no. 3, pp. 233-243, June 2017. doi:10.1093/ijlct/ctx007
- [5] M. Bulat and P. Bulat, "Comparison of Turbulence Models in the Calculation of Supersonic Separated Flows," *World Applied Sciences Journal*, vol. 27, no. 10, pp. 1263-1266, January 2013. doi:10.5829/idosi.wasj.2013.27.10.13715
- [6] D. Monk and E. Chadwick, "Comparison of Turbulence Models Effectiveness for a Delta Wing at Low Reynolds Numbers," in *7th european conference for aeronautics and space sciences, Eucass*, July, 03-07, 2017, Milan, Italy [Online]. Available: <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2017-653.pdf> [Accessed: February, 22, 2022]. doi:10.13009/EUCASS2017-653
- [7] S. Aftab, A. Rafie, N. Razak and K. Ahmad, "Turbulence Model Selection for Low Reynolds Number Flows," *PLoS ONE*, vol 11,

no. 4, pp. e0153755, 2016. doi:10.1371/journal.pone.0153755

[8] K. Bharanitharan, S. Senthilkumar and B. Dadhich, "Numerical Investigation on Effect of Turbulence Model Selection for Aerodynamic Prediction of Axial Flow Fan," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1130, no. 1, p. 012055, 2021. doi:10.1088/1757-899X/1130/1/012055

[9] R. Tog, A. Tousi and A. Tourani, "Comparison of Turbulence Methods in CFD Analysis of Compressible Flows in Radial Turbomachines," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, vol. 80, no. 6, pp. 657-665, 2008. doi:10.1108/00022660810911608

[10] L. Gibson, L. Galloway, S. i. Kim and S. Spence, "Assessment of Turbulence Model Predictions for a Centrifugal Compressor Simulation," *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, vol. 1, pp. 142-156, 2017. doi:10.22261/JGPPS.2II890

[11] L. Han and P. Huachen, "The Influence of Turbulence Model Selection and Leakage Considerations on CFD Simulation Results for a Centrifugal Pump," *Advanced Materials Research*, vols. 594-597, pp. 1940-1944, November, 2012. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1940

[12] A. Rezaeiha, H. Montazeri and B. Blocken, "On the Accuracy of Turbulence Models for CFD Simulations of Vertical Axis Wind Turbines," *Energy*, vol. 180, pp. 838-857, May 2019. doi:10.1016/j.energy.2019.05.053

[13] A. Meana-Fernandez, J. Oro, K. Diaz and S. Velarde-Suarez, "Turbulence-Model Comparison for Aerodynamic-Performance Prediction of a Typical Vertical-Axis Wind-Turbine Airfoil," *Energies*, vol. 12, no. 3, pp. 488, February, 2019. doi:10.3390/en12030488

[14] P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis and G. Thomas, "The Influence of Turbulence Model and Two and Three-Dimensional Domain Selection on the Simulated Performance Characteristics of Vertical Axis Tidal Turbines," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 106-116, December, 2017. doi:10.1016/j.renene.2016.11.063

[15] M.-H. Kim, N.-i. Tak and J.-M. Noh, "Study on Influence of Turbulence Model Selection on Prediction of Flow Distribution and Hot Spot Fuel Temperature in Prismatic HTGR Cores," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 8, no. 2, pp. 263-273, November, 2014. doi:10.1080/19942060.2014.11015512

[16] A. Guardo, M. Coussirat, M. Larrayoz, F. Recasens and E. Egusquiza, "Influence of the Turbulence Model in CFD Modeling of Wall-to-Fluid Heat Transfer in Packed Beds," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 6, pp. 1733-1742, January, 2005. doi:10.1016/j.ces.2004.10.034

[17] G. Brown, D. Fletcher, J. Leggoe and D. Whyte, "Investigation of the Turbulence Model Selection on the Predicted Flow Behaviour in and Industrial Crystallizer - RANS and URANS Approaches," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 140, pp. 205-220, October, 2018. doi:10.1016/j.cherd.2018.10.007

[18] F. Mirzaei, F. Mirzaei and E. Kashi, "Turbulence Model Selection for Heavy Gases Dispersion Modeling in Topographically Complex Area," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 6, pp. 1745-1755, November, 2019. doi:10.29252/jafm.12.06.29685

[19] Autodesk, "Wall Layers", May 27, 2021. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/The-CFD-Process/Setup-Tasks/Meshing/GUID-F9C4DDB4-8111-4F25-8EDE-D7C38B3BAD99.html>. [Accessed: May, 04, 2022].

[20] M. Vivekanandan, D. Jagadeesh, A. Natarajan, N. Mohan and M. Dineshkumar, "Experimental and CFD Investigation of Fully Developed Flow Solar Air Heater," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, part 2, pp. 2158-2163, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2020.07.638

[21] A. P. Singh, A. Kumar, Akshayveer and O. P. Singh, "Natural Convection Solar Air Heater: Bell-Mouth Integrated Converging Channel for High Flow Applications," *Building and Environment*, vol. 187, pp. 107367, January 2021. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107367

[22] A. P. Singh, A. Kumar, Akshayveer and O. P. Singh, "Effect of Integrating High Flow Naturally Driven Dual Solar Air Heaters with Trombe Wall," *Energy Conversion and Management*, vol. 249, pp. 114861, December 2021. doi:10.1016/j.enconman.2021.114861

[23] A. Kumar, A. P. Singh, Akshayveer and O. P. Singh, "Performance Characteristics of a New Curved Double-Pass Counter Flow Solar Air Heater", *Energy*, vol. 239, part A, pp. 121886, January 2022. doi:10.1016/j.energy.2021.121886

[24] K. D. Yadav and R. K. Prasad, "Performance Analysis of Parallel Flow Flat Plate Solar Air Heater Having Arc Shaped Wire Roughened Absorber Plate," *Renewable Energy Focus*, vol. 32, pp. 23-44, March 2020. doi:10.1016/j.ref.2019.10.002

[25] R. Kumar and V. Goel, "Unconventional Solar Air Heater with Triangular Flow-Passage: A CFD Based Comparative Performance Assessment of Different Cross-Sectional Rib-Roughnesses," *Renewable Energy*, vol. 172, pp. 1267-1278, July 2021. doi:10.1016/j.renene.2021.03.068

[26] Z. Zhao, L. Luo, D. Qui, Z. Wang and B. Sundén, "On the Solar Air Heater Thermal Enhancement and Flow Topology Using Differently Shaped Ribs Combined with Delta-Winglet Vortex Generators," *Energy*, vol. 224, pp. 119944, June 2021. doi:10.1016/j.energy.2021.119944

- [27] K. Saurabh and H. Thakur, "Heat Transfer and Fluid Flow Analysis of Artificially Roughened Solar Air Heater," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, part 2, pp. 910-920, 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.02.540
- [28] G. Kalaiarasi, R. Verlaj, M. Vanjeswaran and N. Pandian, "Experimental Analysis ana Comparison of Flat Plate Solar Air Heater with and without Integrated Sensible Heat Storage," *Renewable Energy*, vol. 150, no. 6, pp. 255-265, May 2020. doi:10.1016/j.renene.2019.12.116
- [29] Autodesk, "General Fluid Flow and Heat Transfer Equations," December, 09, 2019. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-83A92AE5-0E9E-4E2D-B61F-64B3696E5F66-htm.html>. [Accessed: February, 15, 2022].
- [30] Autodesk, "Turbulent Flow," Autodesk, December, 09, 2019. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-BBA4E008-8346-465B-9FD3-D193CF108AF0-htm.html>. [Accessed: February, 21, 2022].
- [31] Autodesk, "Two Equation Turbulence Models (TKE & TED)," Autodesk, May 27, 2021. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/SimCFD-Learning/files/Reference-Material/Theoretical-Background/Governing-Equations/Turbulent-Flow/GUID-61C4EB55-362C-48A0-8B22-20F9148D190D-html.html>. [Accessed: February, 20, 2022].
- [32] Autodesk, "Turbulence, CFD 2021," May 27, 2021. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/SimCFD-UsersGuide/files/The-CFD-Process/Solving-the-Simulation/Solve-Quick-Edit-dialog-Physics/GUID-E9E8ACA1-8D49-4A49-8A35-52DB1A2C3E5F-html.html>. [Accessed: February, 14, 2022].
- [33] Ö. Erol, "Numerical Investigation of the Fins and Turbulators on the Performance of a Solar Air Heater", in *23rd Congress on Thermal Science and Technology with International Participation, ULIBTK 2021*, September, 08-10, 2021, Gaziantep, Turkey, N. Yücel, R. Yumrutaş, M.S. Söylemez, M. Kanoğlu, A. Atmaca, H. Yağlı, Eds., pp. 502-509.
- [34] Ö. Erol, "Analysis of the Performance of a Solar Air Heater with Different Configurations: Effect of Fins and Turbulators," *Heat Transfer Research*, vol. 53, no. 6, pp. 45-39, March 2022. doi:10.1615/HeatTransRes.2022041666

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effects of Different Surface Treatments before Coating on Corrosion Behavior of Aluminum Alloy Coated with Graphene Oxide

Kubilay Karacif^a, Duygu Candemir^b

Submitted: 23.02.2022 Revised: 22.03.2022 Accepted: 29.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705017

ABSTRACT

Keywords: Surface treatment, graphene oxide, corrosion, aluminum

^aHitit University,
Engineering Faculty,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering
19030 - Çorum, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7180-7897
e mail: kubilaykaracif@hitit.edu.tr

^bHitit University,
Engineering Faculty,
Dept. of Metallurgical and Materials
Engineering
19030 - Çorum, Türkiye
Orcid: 0000-0002-6186-0122

*Corresponding author:
kubilaykaracif@hitit.edu.tr

In this study, the effects of four different surface treatments applied on the AA5754 aluminum alloy surface before graphene oxide coating on the corrosion behavior were investigated. Before the coating process, surface preparation was performed with SiC based grindingpapers with 180, 320, 800 and 1200 grit numbers on four different sample groups. Graphene oxide coating was made by electrophoretic deposition process by applying 5 V potential and 5 minutes to aluminum alloy samples. Electrochemical corrosion tests in salt water solution were applied to four different groups of samples that were coated. Polarization and Tafel polarization curves were obtained by using the potentiodynamic method in electrochemical corrosion tests. According to the results of the corrosion experiments, it was determined that the corrosion rate decreased and the corrosion resistance increased as the grindingpaper grain number increased, that is, as the grindingpaper grain size decreased, in the grinding process on the aluminum alloy surface before graphene oxide coating.

Kaplama Öncesi Farklı Yüzey İşlemlerinin Grafen Oksit Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Korozyon Davranışına Etkileri

ÖZ

Bu çalışmada, grafen oksit kaplama öncesi AA5754 alüminyum alaşımı yüzeyine uygulanan dört farklı yüzey işleminin korozyon davranışına etkileri araştırılmıştır. Kaplama işlemi öncesinde dört farklı numune grubuna 180, 320, 800 ve 1200 tane numaralı SiC esaslı zımparalar ile yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. Alüminyum alaşımı numunelere, 5 V potansiyel ve 5 dakika süre uygulanarak elektroforetik biriktirme prosesi ile grafen oksit kaplama yapılmıştır. Kaplama yapılan numunelere tuzlu su çözeltisinde elektrokimyasal korozyon testleri uygulanmıştır. Elektrokimyasal korozyon testlerinde potansiyodinamik yöntem kullanılarak polarizasyon ve Tafel polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Korozyon deneyleri sonuçlarına göre, grafen oksit kaplama öncesi alüminyum alaşımı yüzeyine yapılan zımparalama işleminde, zımpara tane numarası arttıkça yani zımpara tane boyutu azaldıkça, korozyon hızının azaldığı, korozyon direncinin arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey işlemi, grafen oksit, korozyon, alüminyum

1. Giriş (Introduction)

Alüminyum alaşımları hafiflik, yüksek özgül dayanım, süneklik, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik gibi avantajlı özelliklerinden dolayı havacılık, savunma sanayi, otomotiv ve inşaat gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Aynı zamanda alüminyum alaşımları, korozyona karşı daha az duyarlı bir metaldir. Çünkü alüminyum havaya maruz kaldığında, korozyon oluşumunu yavaşlatmak için yüzeyinde hızla bir pasif oksit filmi oluşturabilir. Fakat alüminyum ve alaşımlarının tuzlu su ortamında korozyon dirençleri düşüktür. Bu ortamdaki saldırgan klorür iyonları alüminyum yüzeyinde oluşan pasif filme zarar vererek bölgesel korozyona neden olmaktadır. Alüminyumun korozyon direncini geliştirmek için inhibitör, yüzey modifikasyonu, kaplamalar ve elektrokimyasal yöntemler kullanılır [4-8].

Grafen oksit kaplamalar ve nano kompozit kaplamalar korozyondan korunma için son zamanlarda ilgi görmektedir. Grafen esaslı kaplamalar, yüksek aşınma direnci, iyi elektriksel iletkenlik, termal kararlılık, mekanik dayanım, iyi fiziksel ve kimyasal özellikleri ile malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmektedir. Bu tip kaplamalar, tek atomik tabakadan mikron mertebesine kadar kalınlıklarda olabilmekte, farklı ortamlara karşı kararlı davranmakta ve korozyona karşı direnç gösterebilmektedir [9-13]. Metallerin grafen ve grafen oksit ile kaplanmasında elektroforetik kaplama yöntemine ilgi artmıştır. Elektroforetik kaplama yönteminin, sıvı süspansiyonlardaki grafen tabakalarının kontrollü olarak ince kaplamalar formunda elde edilmesinde etkili bir teknik olduğu görülmüştür. Bu yöntemde, süspansiyondaki yüklü parçacıklar, elektrik alan etkisiyle ters yüklü elektrota taşınmakta ve metal yüzeyinde bir film oluşturmaktadır. Grafen oksitte bulunan çok sayıda oksijen fonksiyonel grubu, grafen oksitin grafenden daha iyi dağılma ve reaksiyon aktivitesine sahip olmasını sağlar [14-16].

Alüminyum alaşımlarının grafen oksit kaplanması alanında çok az çalışma mevcuttur. Zhu ve arkadaşları, alüminyum alaşımının antikorozyon özelliğinin geliştirilmesi için poli(vinil butiral)/grafen oksit/poli(metilhidrosiloksan) nanokompozit kaplamalar konusunu çalışmışlar ve uygulanan kaplamanın metal yüzeyinde dikkate değer bir antikorozyon etkisiyle korozyon akımının azaldığını bildirmişlerdir [16]. Alrashed ve arkadaşları, 2024-T3 alüminyum alaşımında grafen oksit ve grafen oksit hibrit kaplamaların oksijene karşı bariyer özelliğini belirgin şekilde geliştirdiğini, suya karşı bariyer özelliğini ise daha az seviyede geliştirdiğini belirtmişlerdir [17]. Al-Sammarraie ve Raheema, paslanmaz çelik, bakır ve alüminyum malzemeleri elektroforetik yöntem ile grafen oksit kaplamışlar ve deniz suyu ortamında korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sürekliliği ve yüzeye iyi tutunan grafen oksit kaplama elde etmişler, grafen oksit kaplanmış numunelerin, kaplamasız numunelere göre daha iyi korozyon direnci gösterdiğini bildirmişlerdir [12]. Zhu ve arkadaşları, AA2024 alüminyum alaşımının korozyon direnci için grafen oksit/silan multi tabakalı film kaplamaların üretimi ve karakterizasyonunu incelemişlerdir. Tasarlanan kompozit filmler, bu alaşımın korozyon direncini geliştirmiş, özellikle orta tabakanın grafen oksit olduğu kompozit filmler, hem katodik hem de anodik reaksiyonların hızını azaltarak korozyon reaksiyonlarını etkili bir şekilde engellemişlerdir [18]. Jang ve arkadaşları, alüminyum için koruma tabakası olarak indirgenmiş grafen oksit filmin iyi bir bariyer oluşturarak korozyon direncini geliştirdiğini bildirmişlerdir [19]. Laleh ve arkadaşları tarafından grafen oksit kaplama ile alüminyum alaşımının korozyon direncinin geliştirilmesi çalışılmış, işlem görmemiş numuneye göre GO/Al numunesinin korozyon direncinde büyük bir gelişme olmuştur [20]. Li ve arkadaşları AA2024 alüminyum alaşımı için polivinilbutiral/polianilin-grafen oksit/poli (metilhidrosiloksan) kompozit kaplamanın korozyon koruma özelliklerini incelemişler, PVB/PANI-GO20/PMHS kaplamanın PVB kaplama ile karşılaştırıldığında çok daha iyi koruma performansı olduğunu görmüşlerdir [21]. Naghdi ve arkadaşları, grafen oksit kaplamanın, saf alüminyum yüzeyinin tuzlu su ortamında korunmasında etkili olduğunu, tavlama işleminin, malzemenin hidrofobikliğini arttırdığını ve sıcaklık artışının oksijen fonksiyonel gruplarının azalmasına, böylelikle su temas açısının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [9]. Monetta ve arkadaşları, metalik yüzeylerde epoksi/grafen kaplamaların fotooksidatif ve korozyon direncinin artırılması konusunu çalışmışlar, kaplamaya katılan grafen nano parçacıkların miktarının artışı ile antikorozyon özelliklerinin geliştiğini vurgulamışlardır [22]. Prabakar ve arkadaşları, lityum iyon pillerde akım toplayıcı (kollektör) alüminyum için korozyon önleyici olarak grafen oksit kaplamayı çalışmışlardır. Alüminyum folyo üzerinde grafen oksit kaplama, grafenin aksine lityum iyon pillerdeki bir LiPF₆ elektrolit ortamında alüminyum katot akım toplayıcı için etkili bir korozyon önleyici katman olmuş ve grafen oksit kaplama, çukurlaşma korozyonuna karşı koruma sağlamıştır [23]. Stankovic ve arkadaşlarının çalışmalarında, kimyasal buhar biriktirme kullanılarak büyütülen grafen ile kaplanmış bakır, NaCl çözeltisinde korozyon önleyici özellikler göstermiştir.

Alüminyum üzerindeki grafen kaplamaya kıyasla bakır üzerindeki grafen kaplamanın daha iyi koruyucu özellikleri, alüminyum oksit filminin kırılma ihtimaline atfedilmiştir [24]. Tian ve arkadaşları tarafından AA6061 alüminyum alaşımı için grafen oksit ile modifiye edilmiş su bazlı epoksi (WEP) kaplamaların korozyon önleyici özellikleri araştırılmış, modifiye grafen oksit, mükemmel bariyer etkisi ile alüminyum alaşımı alt tabaka üzerinde WEP kaplamalarının uzun vadeli korozyon önleyici koruma performansını iyileştirmiştir [25].

Bu çalışmada, elektroforetik yöntem ile grafen oksit kaplama öncesinde uygulanan dört farklı tane boyutunda zımparalama yüzey işleminin, grafen oksit ile kaplanmış AA5754 alüminyum alaşımının %3,5 NaCl ortamında korozyon davranışına etkileri incelenmiştir. Bu çalışma ile özellikle alüminyumun bu yöntem ile kaplanmasında yüzey işleminin etkisinin incelendiği çalışmanın bulunmadığı bu alana bilimsel anlamda katkı sağlanacaktır.

2. Malzeme ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Malzeme (material)

Grafen oksit kaplama çalışmalarında, Tablo 1'de kimyasal bileşimi verilen $2 \times 10 \times 100$ mm³ ebadında AA5754 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Tablo 1. AA5754 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (ağ. %) (Chemical composition of AA5754 aluminum alloy) (wt.%)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,2	0,3	0,15	0,2	Kalan

2.2. Yüzey işlemleri ve kaplama çalışmaları (surface treatments and coating studies)

Kimyasal bileşimi ve ebadı verilen AA5754 alüminyum alaşımı numunelere Tablo 2'de tane numaraları ve tane boyutları verilen SiC esaslı zımpara kağıtları ile yüzey zımparalama işlemi yapılmıştır. Bu işlemten sonra ultrasonik banyoda önce aseton, ardından etanol içerisinde temizlenen numuneler distile su ile yıkanarak kaplamaya hazır hale getirilmişlerdir. Dört farklı yüzey özelliğine sahip AA5754 alüminyum alaşımı numunelerin grafen oksit kaplama işlemleri 0,5 mg/ml konsantrasyona sahip grafen oksit çözeltisinde yapılmıştır. Anot olarak alüminyum alaşımı levha, katot olarak bakır levhanın yerleştirildiği iki elektrotlu sistemde 5 V potansiyel ve 5 dakika süre uygulanarak numune yüzeylerine kaplama yapılmıştır.

Tablo 2. Kullanılan SiC esaslı zımparaların tane numaraları ve tane boyutları (Grain number and grain size of SiC grinding paper)

Numune Grubu	Tane Numarası		KALIN ↓ İNCE
	Tane Boyutu (µm)		
Numune 1	180	88-74	KALIN ↓ İNCE
Numune 2	320	37-31	
Numune 3	800	15-11	
Numune 4	120	6,5-2,5	

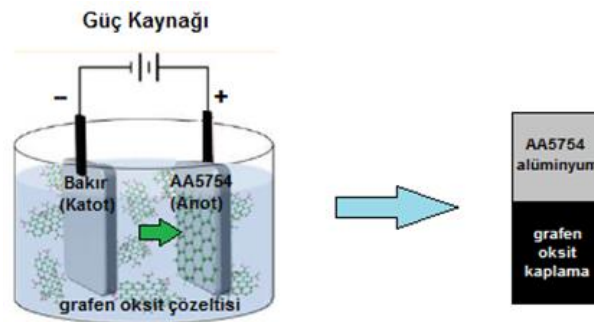
2.3. Korozyon çalışmaları (corrosion studies)

Elektrokimyasal korozyon deneyleri Ivium marka potansiyostat cihazı ile yapılmıştır. Korozif ortam olarak tuzlu su çözeltisi (%3,5 NaCl) kullanılmıştır. Hazırlanan üç elektrotlu korozyon hücresinde çalışma elektrotu grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı, karşı elektrot platin ve referans elektrot doygun kalomel elektrottur. Potansiyodinamik korozyon testlerinde sisteme belirlenen aralıklarda potansiyel uygulanarak polarizasyon ve Tafel polarizasyon eğrileri elde edilmiş, bu eğrilerden numunelerin korozyon davranışları yorumlanmıştır.

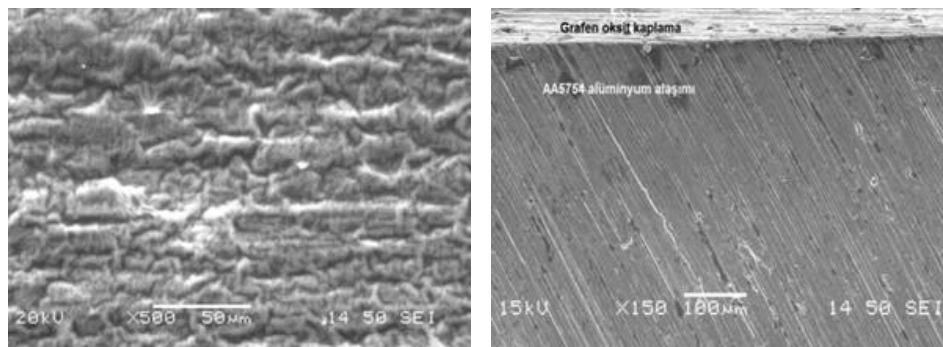
3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma (Experimental Results and Discussion)

3.1. Grafen oksit kaplama mekanizması ve mikroyapı (graphene oxide coating mechanism and microstructure)

Şekil 1’de gösterildiği gibi, elektroforetik yöntemle grafen oksit kaplama işleminde, güç kaynağı ile sisteme potansiyel uygulanması sonucunda elektrik alan kuvveti yardımıyla distile su içerisinde suspanse edilmiş negatif yüklü grafen oksit partikülleri, pozitif yüklenmiş olan alüminyum alaşımı altına doğru hareket etmekte, alüminyum alaşımı yüzeyinde film şeklinde kaplama gerçekleşmektedir [15]. Bu yöntem ile grafen oksit kaplama, süspansiyon çözeltisinde bir elektrik yükü elde edilmesi esasına dayanır. Alüminyum alaşımı yüzeyinde grafen oksitin kaplanmasında kararlı bir grafen oksit süspansiyonu ön koşuldur. Bu aşamada grafen oksit, çözücü içerisinde dağılmış şekilde olmalı ve birbirinden bağımsız olarak alüminyum yüzeyine hareket etmelidir. Elektroforetik kaplama tekniği ile alüminyum yüzeyinde sürekli film, fiber veya düzensiz, gözenekli tabakalar gibi farklı yapılarda grafen oksit biriktirmesi mümkün olabilmektedir. Bu oluşumlar kaplama koşullarına bağlı olup çoğunlukla tabaka-tabaka formunda oluşmuş bir yapı görülmektedir. Grafen oksit kaplama yapılan bir numunenin yüzey ve kesit kaplama görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Yüzey SEM görüntüsü, diğer grafen oksit kaplama çalışmalarında görülen tabakalı yapıya benzemektedir. Mikroyapı görüntülerindeki açık renkli bölgeler ışığın yansımaları sonucu parlayan bölgeler olup, kaplanmamış açık yüzey bölgeleri değildir. Elektroforetik kaplama yönteminde uygulanan 5 V potansiyel ve 5 dakikalık sürede alüminyum alaşımı yüzeyini tamamen kapatan bir grafen oksit kaplama elde edilmiştir. Enine kesitten alınan SEM görüntülerinde homojen sayılabilecek düzgünlükte, 35-40 µm kalınlıklarda grafen oksit filminin elde edildiği görülmektedir.



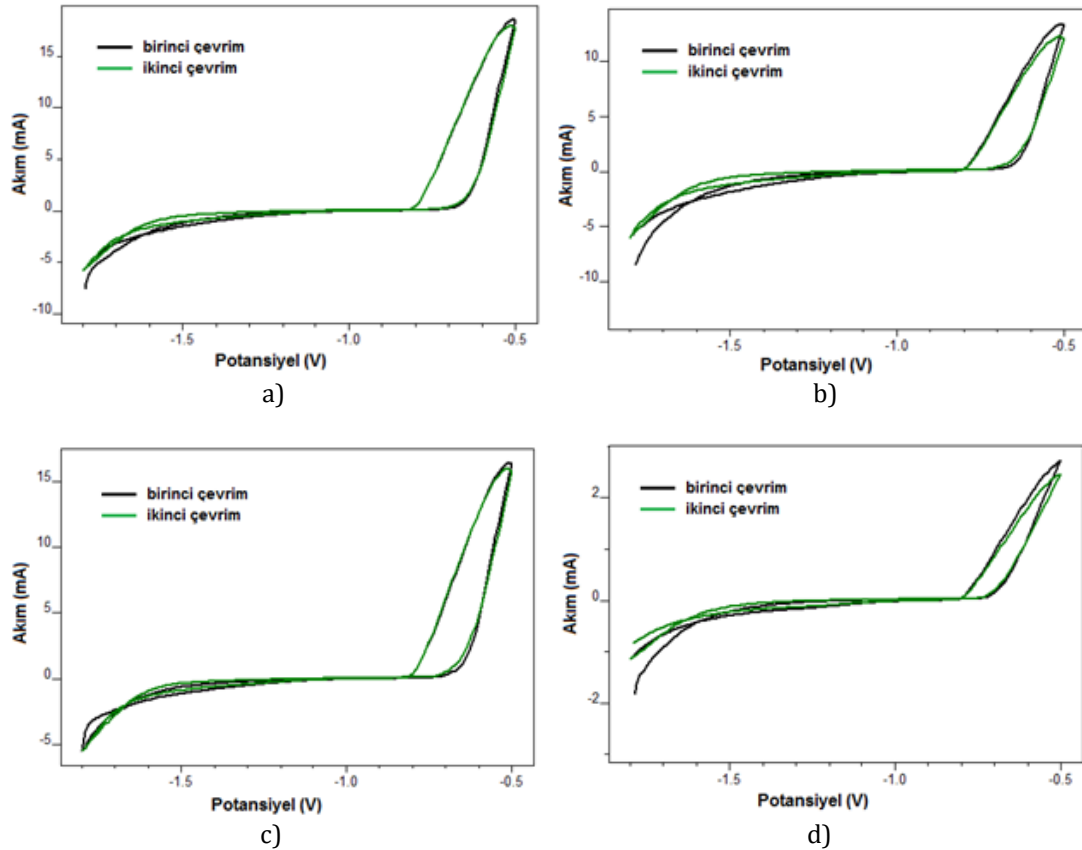
Şekil 1. Grafen oksit kaplama düzeneği (Graphene oxide coating system)



Şekil 2. Grafen oksit kaplanmış AA5754 alüminyum alaşımının yüzey ve kesit SEM görüntüsü (Surface and cross section SEM image of graphene oxide coated AA5754 aluminum alloy)

3.2. Elektrokimyasal polarizasyon sonuçları (electrochemical polarization results)

Elektroforetik yöntem ile grafen oksit kaplama öncesinde dört farklı tane boyutuna sahip zımparalama yüzey işlemi uygulanan grafen oksit kaplanmış AA5754 alüminyum alaşımı numunelerin genel korozyon eğilimlerini görmek için %3,5 NaCl çözeltisinde elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 3’de verilmektedir.

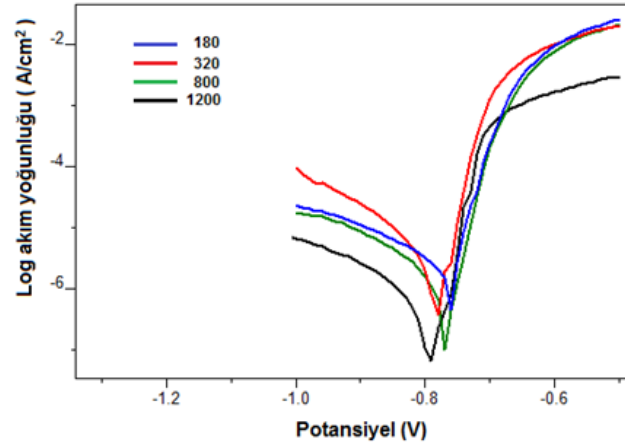


Şekil 3. Kaplama öncesi (a)180, (b)320, (c)800 ve (d)1200 tane numaralı zımparalar ile zımparalama yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunelerin polarizasyon eğrileri (Polarization curves of graphene oxide coated AA5754 aluminum alloy, a)180 b)320 c)800 d)1200 number grinding before coating)

Numunelerin elektrokimyasal polarizasyonu için -1,8 V gibi korozyonun olmayacağı katodik bir potansiyel değerinden, numuneleri korozyona zorlayan -0,5 V gibi anodik bir potansiyel değerine çıkılmıştır. Ardı ardına iki potansiyel taraması (çevrimi) uygulanmıştır. Polarizasyon eğrilerinde birinci potansiyel taraması siyah, ikinci potansiyel taraması yeşil renkli olarak görülmektedir. Şekilde verilen polarizasyon eğrilerinde, potansiyel yükseltilmesine rağmen numunelerde akım artışının olmadığı, eğrinin yatay şekilde gittiği bölge pasiflik bölgesidir. Tüm numunelerde pasiflik bölgesi yaklaşık olarak -0,7 V potansiyel değerine kadar devam etmektedir. Bu potansiyel değerine kadar grafen oksit kaplama iyi bir korozyon koruması sağlamakta, malzemede korozyon olmamakta veya çok düşük hızlarda olabilmektedir. Potansiyel seviyeleri -0,7 V değerini aşınca numunelerdeki akım değeri aniden yükselişe geçmektedir. Bu yüksek potansiyelde pasifleşme bitmekte, grafen oksit kaplamanın koruyucu özelliği azalmakta, korozyon başlamaktadır. Kaplama öncesinde 180 numaralı zımpara ile yüzey işlemi yapılan alüminyum alaşımı numunede maksimum akım değeri 19 mA, 320 numara ile zımpara ön işleme yapılan numunede 14 mA, 800 numara zımpara ile işlem yapılan numunede 16 mA ve 1200 numaralı zımpara ile işlem gören numunede 3 mA olarak belirlenmiştir. Özellikle en küçük tane boyutuna sahip olan yani en ince zımpara olan 1200 numaralı zımpara ile yapılan yüzey ön işlemlerinde en düşük akım elde edilmiştir. Faraday kanununa göre akım ile korozyon hızı arasında doğru orantı vardır. Akımın düşük seviyelerde olması, korozyon nedeniyle çözünen madde miktarının da düşük seviyelerde olduğunu gösterir. Potansiyel seviyesi -0,5 V değerinden tekrar -1,8 V seviyesine azaltıldığında numunelerden geçen akım da başlangıç seviyesine düşmektedir. Yeşil renkli olarak gösterilen ikinci potansiyel taramasında da aynı yol izlenmiş, akım değişimi aynı şekilde olmuştur. Normalde kaplama yapılan malzeme yüzeyleri birinci potansiyel çevriminde yüksek potansiyellerde iyice bozunup koruyucu özelliğini kaybeder ve yapılan ikinci potansiyel çevriminde daha yüksek akım değerleri elde edilir. Fakat bu çalışmada farklı zımparalama işlemleri sonrasında grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunelerinde ikinci potansiyel çevrimi de hemen hemen aynı olmuştur. Bu da tüm numunelerde grafen oksit filmin koruyucu özelliğinin birinci potansiyel taraması sonucunda kaybolmadığını göstermektedir. Grafen oksit kaplamanın korozyona karşı koruma özellikleri aşağıda Tafel polarizasyon sonuçları ile daha detaylı olarak açıklanacaktır.

3.3. Elektrokimyasal Tafel polarizasyon sonuçları (electrochemical Tafel polarization results)

Elektroforetik biriktirme yöntemi ile grafen oksit kaplama öncesi dört farklı tane numaralı zımpara ile zımparalama yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunelerin %3,5 NaCl ortamında elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 4’de, bu eğrilerden elde edilen korozyon potansiyeli, korozyon akımı ve korozyon hız verileri Tablo 3’de görülmektedir.



Şekil 4. Kaplama öncesi dört farklı tane numaralı zımpara ile zımparalama yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of graphene oxide coated AA5754 aluminum alloy different grinded before coating)

Tablo 3. Kaplama öncesi dört farklı tane numaralı zımpara ile zımparalama yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunelerin korozyon değerleri (Corrosion values of graphene oxide coated AA5754 aluminum alloy different grinded before coating)

Zımpara Tane Numarası	Korozyon Potansiyeli (V)	Korozyon Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	Korozyon Hızı (mm/y)
180	-0,768	2,20.10 ⁻⁶	0,024
320	-0,777	2,17.10 ⁻⁶	0,023
800	-0,762	1,13.10 ⁻⁶	0,012
1200	-0,788	8,86.10 ⁻⁷	0,009

Farklı ön yüzey işlemleriyle grafen oksit kaplanmış numunelerin Şekil 4’de verilen Tafel polarizasyon eğrileri ve Tablo 3’de verilen sayısal korozyon verileri incelendiğinde aslında tüm numunelerde iyi bir korozyon koruması olduğu görülmektedir. Grafen oksit, grafene göre zayıf iletkenliği, kaplama içindeki elektron transferini azaltarak kaplamanın korozyona karşı direncini artırmaktadır [16]. Grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı yüzeyinin, içinde bulunduğu ortama karşı bariyer özelliği gelişmektedir. Çünkü grafen oksit kaplama, gaz geçirmezlik, kimyasal (asit/baz/tuz ortamı) direnç, antibakteriyel potansiyel, termal kararlılık, çevre dostu olma ve en önemlisi yüksek spesifik yüzey alanı gibi birçok ayırt edici özelliğe sahiptir. Grafen oksit kaplamalar aynı anda reaktif gazlar, sıvılar, tuzlar ve asitler için olağanüstü bir bariyer özelliği sergileyebilmektedir [17-19]. Ayrıca hatasız grafen tek tabakası, hidroflorik asit gibi agresif asitlere ve klorür gibi agresif anyonlara karşı yüksek direnç gösterir. Grafen oksit reaktif oksijen fonksiyonel grupları ile NaCl ortamı gibi bir elektrolite maruz kaldığında negatif yüklü türler gibi davranabilir. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan tuzlu su çözeltisi gibi ortamlarda, grafen oksit ve elektrolit anyonlarında negatif yükler arasındaki elektrostatik itme, metal bir yüzeye korozyon oluşumundan sorumlu anyonların erişimini engelleyebilir. Bu engelleme de korozyon direnci sağlar [20, 23]. Grafen oksit kaplama, yüksek voltaj altında pasif Al₂O₃ tabakasının korunmasına da yardımcı olur [23]. Tüm numunelerde korozyon potansiyeli değerleri birbirine yakın, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerleri oldukça düşük seviyelerdedir. Numuneler kendi aralarında kıyaslandığında, 180 tane numaralı zımparalama ile ön yüzey işlemi yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunede korozyon akım yoğunluğu 2,20.10⁻⁶ A/cm², korozyon hızı 0,024 mm/y iken, biraz daha ince zımpara olan 320 tane numaralı zımpara ile ön yüzey işlemi yapılan grafen oksit kaplı numunenin akım yoğunluğu 2,17.10⁻⁶ A/cm² ve korozyon hızı 0,023 mm/y olarak belirlenmiştir. Bu iki numunenin korozyon sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Daha da ince zımparalama işlemi yapıldığında, 800 tane numaralı zımparalama ile ön yüzey işlemi yapılan grafen oksit kaplanmış alüminyum alaşımı numunede korozyon akım yoğunluğu 1,13.10⁻⁶ A/cm², korozyon hızı 0,012 mm/y iken, kullanılan en ince zımpara olan 1200 tane numaralı zımpara ile ön yüzey işlemi

yapılan grafen oksit kaplanmış numunenin akım yoğunluğu $8,86 \cdot 10^{-7}$ A/cm² ve korozyon hızı 0,009 mm/y olarak belirlenmiştir. Tüm sonuçlar birbirine yakın olmakla birlikte korozyon dayanımı açısından en iyi sonuçlar uygulanan en ince zımpara olan 1200 tane numaralı zımpara ile elde edilmiştir. Bu sonuçlarda, elektroforetik biriktirme yöntemi ile grafen oksit kaplama öncesinde uygulanan zımparalama işleminde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün etkili olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, kaplama öncesinde dört farklı yüzey ön işlemi uygulanmış ve sonrasında elektroforetik biriktirme ile grafen oksit kaplanmış AA5754 alüminyum alaşımının %3,5 NaCl ortamında elektrokimyasal korozyon özellikleri incelenmiştir. Polarizasyon eğrilerine göre, dört farklı yüzey ön işlemi görmüş grafen oksit kaplı AA5754 alüminyum alaşımı numunelerin tümünde de yaklaşık -0,7 V değerine kadar pasifleşme özelliği görülmüştür. Bu potansiyelden daha pozitif potansiyel bölgesinde, en ince tane boyutlu zımpara ile yüzey ön işlemi yapılan numunede akım geçişi en düşük seviyelerde olmuştur. Tafel polarizasyon eğrilerine göre de en düşük korozyon akımı yoğunluğu ve en düşük korozyon hızı, grafen kaplama öncesi 1200 tane numaralı zımpara ile ön yüzey işlemi yapılan AA5754 alüminyum alaşımı numunede elde edilmiştir. Kaplama öncesinde bu şekilde yapılan yüzey ön işleminin ince film şeklinde elde edilen grafen oksit kaplamanın pürüzlülüğün daha az olduğu yüzeye daha iyi bağlanarak korozyona karşı daha fazla direnç sağladığı düşünülmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] R. J. Mills, B. Y. Lattimer, S. W. Case and A. P. Mouritz, "The influence of sensitization and corrosion on creep of 5083-H116," *Corrosion Science*, vol. 143, pp. 1-9, 2018. doi:10.1016/j.corsci.2018.07.036
- [2] E. Canepa, R. Stifanese, L. Merotto and P. Traverso, "Corrosion behavior of aluminum alloys in deep-sea environment: A review and the KM3NeT test results," *Marine Structures*, vol. 59, pp. 271-284, 2018. doi:10.1016/j.marstruc.2018.02.006
- [3] K. Karacif and H. Karabulut, "Alümina takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin poliprol ile kaplanması ve korozyon davranışının incelenmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, no. 1, pp. 118-128, 2020. doi:10.35414/akufemubid.629740
- [4] K. Karacif, T. Kiyak and B. İnem, "Coating of aluminum with conducting polymer and investigation of the effect of corrosion on coating microstructure," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 235-241, 2010.
- [5] Z. Li, D. Yi, C. Tan and B. Wang, "Investigation of the stress corrosion cracking behavior in annealed 5083 aluminum alloy sheets with different texture types," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 817, pp. 152690, 2020. doi:10.1016/j.jallcom.2019.152690
- [6] H. Ezuber, A. El-Houd and F. El-Shawesh, "A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater," *Materials and Design*, vol. 29, no. 4, pp. 801-805, 2008. doi:10.1016/j.matdes.2007.01.021
- [7] S. J. Kim, S. K. Kim and J. C. Park, "The corrosion and mechanical properties of Al alloy 5083-H116 in metal inert gas welding based on slow strain rate test," *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 573-578, 2010. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.04.039
- [8] S. J. Lee, Y. S. Park and S. J. Kim, "Potentiostatic corrosion protection technology under cavitation condition for 5083-H116 Al alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, no. 11, pp. 3206-3214, 2013. doi:10.1016/S1003-6326(13)62854-X
- [9] S. Naghdi, B. Jaleh and A. Ehsani, "Electrophoretic deposition of graphene oxide on aluminum: Characterization, low thermal annealing, surface and anticorrosive properties," *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, vol. 88, no. 5, pp. 722-728, 2015. doi:10.1246/bcsj.20140402
- [10] X. Zhang, D.C. Zhang, Y. Chen, X. Z. Sun and Y. W. Ma, "Electrochemical reduction of graphene oxide films: Preparation, characterization and their electrochemical properties," *Chinese Science Bulletin*, vol. 57, no. 23, pp. 3045-3050, 2012. doi:10.1007/s11434-012-5256-2
- [11] L. Chen, Y. Tang, K. Wang, C. Liu and S. Luo, "Direct electrodeposition of reduced graphene oxide on glassy carbon electrode and its electrochemical application," *Electrochemistry Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 133-137, 2011. doi:10.1002/sml.201002340
- [12] A. M. A. Al-Sammaraie and M. H. Raheema, "Electrodeposited reduced graphene oxide films on stainless steel, copper, and aluminum for corrosion protection enhancement," *International Journal of Corrosion*, vol. 2017, pp. 1-9, 2017.

doi:10.1155/2017/6939354

- [13] N. H. Abu Bakar, G. A. M. Ali, J. Ismail, H. Algarni and K. F. Chong, "Size-dependent corrosion behavior of graphene oxide coating," *Progress in Organic Coatings*, vol. 134, pp. 272-280, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.05.011
- [14] Y. Ma, J. Han, M. Wang, X. Chen and S. Jia, "Electrophoretic deposition of graphene-based materials: A review of materials and their applications," *Journal of Materiomics*, vol. 4, no. 2, pp. 108-120, 2018. doi:10.1016/j.jmat.2018.02.004
- [15] A. Chavez-Valdez, M. S. P. Shaffer and A. R. Boccaccini, "Applications of graphene electrophoretic deposition. A review," *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 117, no. 6, pp. 1502-1515, 2013. doi:10.1021/jp3064917
- [16] G. Zhu, X. Cui, Y. Zhang, S. Chen, M. Dong, H. Liu, Q. Shao, T. Ding, S. Wu and Z. Guo, "Poly (vinyl butyral)/Graphene oxide/poly (methylhydrosiloxane) nanocomposite coating for improved aluminum alloy anticorrosion," *Polymer*, vol. 172, pp. 415-422, 2019. doi:10.1016/j.polymer.2019.03.056
- [17] M. M. Alrashed, M. D. Soucek and S. C. Jana, "Role of graphene oxide and functionalized graphene oxide in protective hybrid coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 134, pp. 197-208, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.04.057
- [18] H. Zhu, L. Yue, C. Zhuang, Y. Zhang, X. Liu, Y. Yin and S. Chen, "Fabrication and characterization of self-assembled graphene oxide/silane coatings for corrosion resistance," *Surface & Coatings Technology*, vol. 304, pp. 76-84, 2016. doi:10.1016/j.surfcoat.2016.07.002
- [19] H. Jang, J. H. Kim, H. Kang, D. Bae, H. Chang and H. Choi, "Reduced graphene oxide as a protection layer for Al," *Applied Surface Science*, vol. 407, pp. 1-7, 2017. doi:10.1016/j.apsusc.2017.02.041
- [20] R. R. Laleh, H. Savaloni, F. Abdi and Y. Abdi, "Corrosion inhibition enhancement of Al alloy by graphene oxide coating in NaCl solution," *Progress in Organic Coatings*, vol. 127, pp. 300-307, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2018.11.031
- [21] A. Li, S. Chen, Z. Ma, M. Sun, G. Zhu, Y. Zhang and W. Wang, "Corrosion protection properties of polyvinyl butyral/polyaniline-graphene oxide/poly (methylhydrosiloxane) composite coating for AA2024 aluminum alloy," *Diamond & Related Materials*, vol. 116, pp. 108397, 2021. doi:10.1016/j.diamond.2021.108397
- [22] T. Monetta, A. Acquesta, A. Carangelo, C. Naddeo and L. Guadagno, "Enhancement of photooxidative and corrosion resistance of epoxy/graphene water-based coatings on metallic substrate," *Progress in Organic Coatings*, vol. 135, pp. 7-18, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.05.031
- [23] S. J. R. Prabakar, Y. H. Hwang, E. G. Bae, D. K. Lee and M. Pyo, "Graphene oxide as a corrosion inhibitor for the aluminum current collector in lithium ion batteries," *Carbon*, vol. 52, pp. 128-136, 2013. doi:10.1016/j.carbon.2012.09.013
- [24] V. M. Stankovic, I. Jevremovic, I. Jung and K. Y. Rhee, "Electrochemical study of corrosion behavior of graphene coatings on copper and aluminum in a chloride solution," *Carbon*, vol. 75, pp. 335-344, 2014. doi:10.1016/j.carbon.2014.04.012
- [25] Y. Tian, W. Wang, L. Zhong, X. Xiang and X. Zhang, "Investigation of the anticorrosion properties of graphene oxide-modified waterborne epoxy coatings for AA6061," *Progress in Organic Coatings*, vol. 163, pp. 106655, 2022. doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106655

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Theoretical Fatigue Life in Milling of P20S Plastic Mold Steel

Barış Özlü^{a*}

Submitted: 10.06.2022 Revised: 06.08.2022 Accepted: 13.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705018

ABSTRACT

Keywords: Compression P20S Steel, Milling, Surface Roughness, Fatigue Life, Surface Response Method

^{a*} Aksaray University,
Technical Sciences Vocational School,
Dept. of Machine and Metal Technology
68100-Aksaray, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8594-1234

*Corresponding author:
barisozlu@aksaray.edu.tr

In this study, it was aimed to determine the effects of theoretical fatigue life depending on surface roughness and surface roughness of cutting parameters in milling P20S plastic mold steel with different cutting parameters. For the statistical analysis of the data, the experimental design was determined as 18 experiments with the Central Composite Experiment design. As a result of the experiments, output parameters such as Ra, Rz, Sm and hardness were measured to evaluate the surface roughness and theoretical fatigue life. Fatigue life was calculated by using Rz, Sm and hardness values in the \sqrt{area} model and changes in theoretical fatigue life depending on cutting parameters were evaluated. As a result, highest theoretical fatigue life with lowest surface roughness has been detected as 0.188 μm and 507.796 Mpa at 220 m/min cutting speed, 0.05 mm/tooth feed and 0.5 mm cutting depth, respectively. It has been observed that increasing cutting speed and Depth of cut decreases with feed rate have a positive effect on surface roughness and theoretical fatigue life. According to the results of analysis of variance, the most effective cutting parameter for surface roughness and theoretical fatigue life was feed rate with 68.6% and 59.34%, respectively.

P20S Plastik Kalıp Çeliğinin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Teorik Yorulma Ömrüne Etkisi

ÖZ

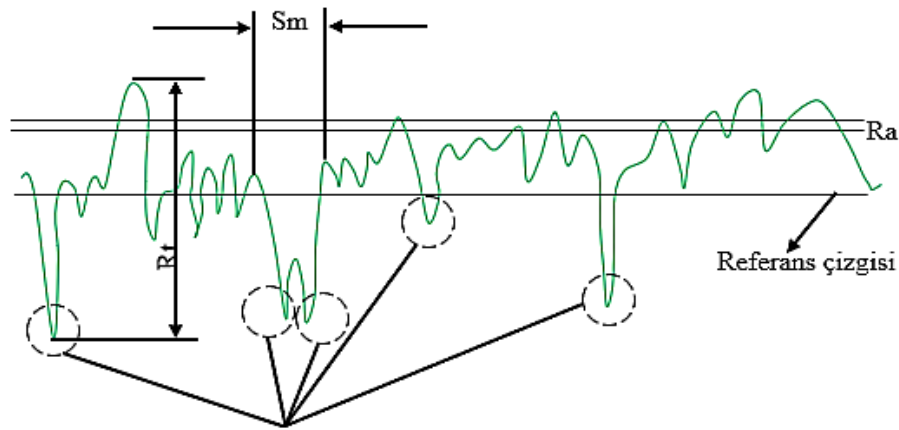
Bu çalışmada, P20S plastik kalıp çeliğinin farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı teorik yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Verilerin istatistiksel analizi için deney tasarımı Merkezi Kompozit Deney tasarımı ile 18 deney olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünü ve teorik yorulma ömrünü değerlendirmek için Ra, Rz, Sm ve sertlik gibi çıktı parametreleri ölçülmüştür. Rz, Sm ve sertlik değerleri \sqrt{area} modelinde kullanılarak yorulma ömrü hesaplanmış ve kesme parametrelerine bağlı teorik yorulma ömründeki değişimler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, en düşük yüzey pürüzlülüğü ile en yüksek teorik yorulma ömrü 220 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde sırası ile 0.188 μm ve 507.796 Mpa olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının artması ve ilerleme miktarı ile kesme derinliğinin azalması yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68.6 ve %59.34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyonlaşma, AISI H13 çeliği, Ölçü tamlığı, Taguchi, Anova

1. Giriş (Introduction)

Farklı teknikler ve koşullarda işlenmiş metal parçaların yüzey kalitesi ve pürüzlülük profili yüzeydeki gerilmeler, yorulma ömrü ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiye sahiptir [1-2]. İşlenmiş parçalardaki ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artması, yorulma ömrünü etkileyen en güçlü faktör olduğu rapor edilmiştir [3]. Özellikle işlenmiş parçalardaki yorulma çatlaklarının serbest yüzeylerde başladığı uzun zamandır bilinmektedir. Bunun nedeni, iş parçasının yüzey katmanlarının en yüksek yüklere ve çevresel etkilere maruz kalmasıdır. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi, çoğu durumda, işleme ile üretilen parçaların yüzey bütünlüğüne atfedilebilir [4-5]. İşlenen parçanın yüzeyinin tanımlanması ve kontrol edilmesi gereken iki önemli yön vardır. Birincisi, yüzeydeki geometrik düzensizlikler, ikincisi ise yüzey ve yüzey tabakasındaki metalürjik değişikliklerdir. Özellikle ikinci yön, yüzey bütünlüğü olarak adlandırılmıştır. Yüzey bütünlüğünü, yüzeyin geometrik değerleri ile yüzey katmanlarının artık gerilme, sertlik ve mikro yapısı gibi fiziksel özellikleri arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Yüzey bütünlüğü, yüksek statik ve dinamik gerilmelere dayanması gereken yapısal bileşenlerin imalatında son derece önemli hale gelen işlenmiş yüzey ve yüzey altının kalitesini etkiler [6-8]. Yüzey pürüzlülüğüne bağlı yorulma dayanımının ilk kılcal çatlakların olduğu dip vadi bölgeleri Şekil 1'de görülmektedir.

Özellikle imal edilen makine elemanlarının, imalat türüne bağlı oluşan yüzey pürüzlülüğünün yorulma dayanımını nasıl etkileyeceğini belirlemek için yapılan teorik hesaplamalar yorulma ömrünün kestirimi için oldukça önemlidir [9].



Yüzey pürüzlülüğü profilinde yorulma hasar mekanizmasının kılcal çatlak olarak başladığı pürüzlülük vadi dip bölgeleri

Şekil 1. Yorulma ömrü için yüzey pürüzlülüğü profilinde kılcal çatlakların başladığı bölgeler (Regions where capillary cracks start in the surface roughness profile for fatigue life)

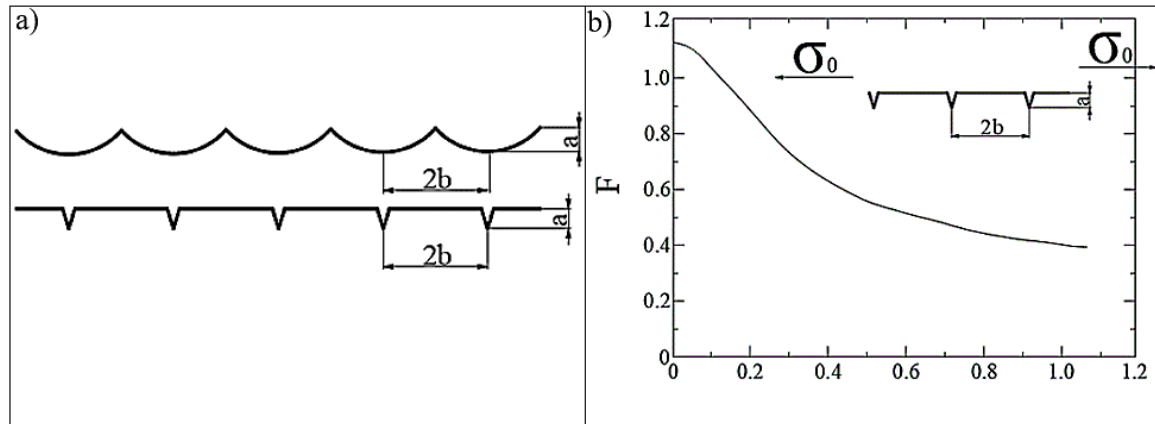
Yapılan literatür araştırmasında yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisini değerlendirmek için deneysel ve teorik olmak üzere farklı çalışmalar yapılmıştır. Novovic vd. [10] 0,1 µm'den fazla olan yüzey pürüzlülüğü Ra'nın, artık gerilme olmaksızın yorulma ömrü üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olacağını bildirmişlerdir. Yao vd. [11] yüksek kesme parametrelerinde Ti1023 malzemesinin frezelenmesinde iş parçalarının yüzey topografyası ve yorulma davranışı üzerindeki etkilerini sunmuşlardır. Yüzey gerilim konsantrasyon faktörüne dayalı olarak numunelerin yorulma ömrünün tahmin edilmesinin, yüzey pürüzlülüğüne dayalı olandan daha doğru olduğunu göstermiştir. Tekait [12] AISI 4050 çeliğinin farklı parametrelerde kesilmesi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünün ve teorik yorulma ömrüne etkilerini sunmuştur. Çalışmanın sonucunda ilerleme hızının artması yüzey pürüzlülük değerlerinde artışa neden olduğu ve durumunda malzemenin yorulma ömrünü kısalttığını rapor etmiştir. Özerkan [9] alüminyum 6061-T913 alaşımının değişik kesme parametreleri ile tornalanması sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı yorulma ömürlerinin teorik olarak hesaplanmasını gerçekleştirmiştir. Kesme hızının artırıldığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, ilerleme miktarının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını bunlara bağlı olarak teorik hesaplamalar ile yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla yorulmanın daha düşük gerilmelerde, azalması ile yorulma hasarının daha yüksek gerilme değerlerinde meydana gelebileceğini bildirmiştir. Javidi vd. [4] 34CrNiMo6 çeliğinin tornalanmasında kesici takım uç radyüsü ve ilerleme hızının yüzey bütünlüğüne ve yorulma ömrünü nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Artık gerilmenin

yorulma ömrü üzerindeki etkisinin, yüzey pürüzlülüğü etkisinden daha belirgin olduğunu göstermektedir. Field ve Kahles [13] yüzey bütünlüğünü, yüzeyin geometrik değerleri ile yüzey katmanlarının artık gerilme, sertlik ve mikro yapısı gibi fiziksel özellikleri arasındaki ilişki olarak tanımlamaktadır. Yüzey bütünlüğü, yüksek statik ve dinamik gerilmelere dayanması gereken yapısal bileşenlerin imalatında son derece önemli hale gelen işlenmiş yüzey ve yüzey altı kalitesini etkiler. Murakami [14] yaptığı çalışmada deneysel ve teorik olarak geliştirdiği “√area” modeliyle yüzey pürüzlülük değerlerini kullanarak teorik yorulmayı hesaplamada kullanmıştır. Deneysel verilerle teorik hesaplamalar sonucu elde ettiği sonuçların birbiri ile örtüştüğünü rapor etmiştir. Yapılan literatür araştırmasında P20S kalıp çeliğinin farklı kesme parametrelerinde frezelenmesi sonucu yüzey pürüzlülüğünün teorik veya deneysel yorulma ömrüne etkisi üzerine çalışmanın yapılmadığı ya da çok sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada farklı kesme parametrelerde P20S kalıp çeliğinin frezelenmesi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin teorik yorulma ömrü üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne ve teorik yorulma ömrüne etki eden kesme parametreleri istatistiksel olarak (Yüzey Yanıt Metodolojisi (YYM) yöntemi) analizi yapılmıştır.

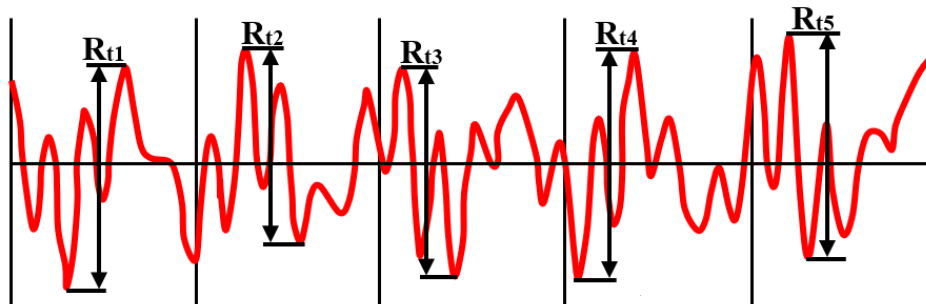
2. Teorik Yorulma Ömrü √area Modeli (Theoretical Fatigue Life √area Model)

Yapılan çalışmada, frezeleme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı √area modeli kullanılarak teorik yorulma ömrü hesaplanmıştır. Teorik yorulma ömrünün hesaplanmasında periyodik yüzey pürüzlülüğü çentiğinin yorulma hasarını başlatan çatlak hasarı eşdeğeri Şekil 2a’da ve periyodik yüzey pürüzlülüğü çatlaklarının gerilme yoğunluğu faktörü K_t Şekil 2b’de verilmiştir. Şekil 2b’deki F yüzey pürüzlülüğünün tepe ve vadi profilinin derinliğine ve genişliğine bağlı geometrik bir düzeltme faktörü olarak tanımlanır. K_t Eşitlik 1’de iş parçasının vickers sertlik değerinin (HV) bir fonksiyonudur. Eşitlik 1’de verilen √area işlenen yüzeydeki pürüzlülük dalga yapısı sıg aralıkla derin çetik olarak ifade edilmiştir [9,14].



Şekil 2. (a) Periyodik yüzey pürüzlülüğü çentikleri ve eşdeğer çatlakları, (b) Periyodik yüzey çatlakları için gerilme yoğunluk faktörü ((a) Periodic surface roughness notches and equivalent cracks, (b) Stress intensity factor for periodic surface cracks))

$$K_t = \Delta K t h = (3.3) * 10^{-3} (HV + 120) * (\sqrt{area})^{1/3} \quad (1)$$

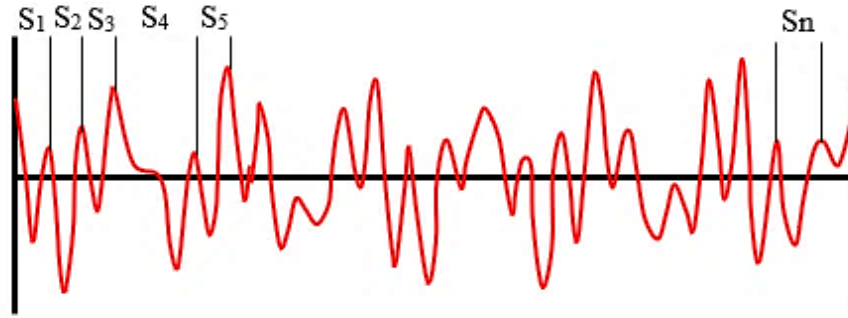


Şekil 3. Ölçüm skalasında referans çizgisine göre en yüksek tepe ve en düşük vadi değeri (The highest peak and lowest valley value relative to the reference line on the measurement scale)

İşlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü yorulmaya göre modellenirken Şekil 2’de pürüzlülük dalgasının genişliğini $2b$ ve derinliği ise a olarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmada teorik yorulma ömrünün hesaplamasında dalga genişliği ve derinliği R_z ve S_m olarak ifade edilmiştir. Şekil 3’de ve Eşitlik 2’de verilen, R_z ölçüm skalasında ölçülen en yüksek tepe ve en düşük çukur değerlerinin ortalaması R_t olarak alınmıştır [9,14].

$$R_z(DIN) = \frac{R_{t1}+R_{t2}+R_{t3}+\dots+R_m}{n} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n R_{ti} \quad (2)$$

Pürüzlülük ölçümünde kullanılan ölçüm uzunluğundaki tepe noktaları arası mesafeyi S_n olarak ifade edilmektedir (Şekil 4). Bu da yorulma ömründe kullanılan $2b$ terimine karşılık gelmektedir [9,14].



Şekil 4. Pürüzlülük ölçüm uzunluğundaki tepe noktaları arası mesafe (The distance between the peaks in the roughness measurement length)

Teorik yorulma ömrü hesabında gerilim oranı ($R=-1$) olarak tanımlanmıştır. Burada tam değişken dinamik yorulma ömrü göz önünde bulundurulmuştur. İşlenen yüzeydeki pürüzlülük profilindeki dalgalardaki hata boyutu " \sqrt{area} " olarak ifade edilmiştir. Yorulma ömrü formülünde yüzey pürüzlülüğündeki tepe ve çukur değerlerinin hangi aralıkta olduğu Eşitlik 3 ve Eşitlik 4’de gösterilmiştir.

$a/2b < 0.195$ için;

$$(area)^{1/2}/2b \cong 2.97(a/2b) - 3.51(a/2b)^2 - 9.74(a/2b)^3 \quad (3)$$

$a/2b > 0.195$ için;

$$(area)^{1/2}/2b \cong 0.38 \quad (4)$$

Yüzey pürüzlülüğündeki çukur ve aralıklara bağlı yorulma ömrü hesabı Eşitlik 5’de \sqrt{area} değerlerinde yerine koyarak yapılabilir. Eşitlik 6’da kabul edilen yarılama ömrü σ_w ile gerilme hassasiyet faktörü α ile gösterilmiştir.

$$\sigma_w = (1.43(H_V + 120))/(area)^{1/6} [(1 - R)/(2)]^\alpha \quad (5)$$

$$\alpha = 0.226 + H_V 10^{-4} \quad (6)$$

Eşitlik 7’de gerilme oranı R olarak ve σ_m ortalama gerilmeyi göstermektedir.

$$R = \frac{\sigma_m - \sigma_w}{\sigma_m + \sigma_w} \quad (7)$$

\sqrt{area} modelindeki bir diğer parametre ise pürüzlülükteki süreksizlikten meydana gelecek gerilme yığımlarını tanımlanan gerilme şiddet faktörüdür. Çentik bölgesindeki bütün gerilme ve genleşmelerin büyüklüğü bu faktörün bilinmesiyle belirlenebilir. Çatlağın ilerlemesi bu gerilme değerlerinin belli bir eşik değere ulaşması ile başlar.

3. MATERYAL VE METOT (Material and Method)

3.1. İş parçası, Takım Tezgâhı, Kesici Takım ve Ölçümler (Workpiece, Machine Tool, Cutting Tool and Measurements)

Yapılan çalışmada, iş parçası olarak ticari temin edilen P20S plastik kalıp çeliği seçilmiştir. Çalışmada kullanılan iş parçasının kimyasal bileşimi ağırlık yüzdesi olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. P20S plastik kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of P20S plastic mold steel (% weight))

Elementler	C	Cr	Mn	Si	Mo	Ni	S	P
	Wt.%	0.40	1.95	1.45	0.30	0.20	0.39	0.08

Frezeleme denemeleri maksimum 6000 rpm iş mili hızına, iş mili motoru 18.5 kw güce ve Fanuc kontrol ünitesine sahip Hanssa YH 1600-A CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Walter firması tarafından üretilen WKP35S kalite gurubunda ve SDMT09T308-F57 geometriye sahip CVD yöntemi ile TiCN/Al₂O₃/TiN kaplı karbür kesici takım kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce ticari olarak temin edilen P20S plastik kalıp çeliği üzerinde üretim sırasında meydana gelebilecek hataların yüzey pürüzlülüğünü etkilememesi için iş parçasının yüzeyinden 1 mm talaş kaldırıldı. İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin ölçümünde Mitutoyo (Surftest SJ-210) taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanıldı. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylere paralel dört farklı noktadan yapılmıştır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalamalarının hesaplanması ile ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri belirlendi.

3.2. Deney Tasarımı (Experimental Design)

Talaşlı imalat sektöründe ürün kalitesini artırmak ve maliyeti düşürmek için farklı optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır [15]. Bu teknikler arasında en fazla kullanılanlardan biride yanıt yüzeyi metodudur (YYM). YYM, kesme parametreleri arasındaki etkileşimi ve ikinci dereceden etkileri geliştirmek ve analiz etmek için en etkili istatistiksel yöntemlerden biridir. İmalat ve işleme uygulamalarında nicel modeller geliştirmek için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [16]. Bu bağlamda deneysel çalışmada kullanılan deney tasarımı Minitap 18 yazılımı ile yapılmıştır. Hazırlanan deney tasarımı Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 3’de görülmektedir.

Tablo 2. Deney tasarımının hazırlanması (Preparation of the experimental design)

Faktör	Ad	Min.	Mak.	Düşük Kod	Yüksek Kod	Ortalama	Standart Sapma
A	Kesme Hızı, Vc, (m/dak)	100	220	-1 ↔ 100	+1 ↔ 220	160	46.02
B	İlerleme Miktarı, f, (mm/diş)	0.05	0.1	-1 ↔ 0,05	+1 ↔ 0.1	0.075	0.0192
C	Kesme Derinliği, ap, (mm)	0.5	1.5	-1 ↔ 0,50	+1 ↔ 1.5	1	0.3835

Tablo 3. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri (Parameters and values used in the experimental study. Parameters)

Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)
1	100	0.05	0.5	10	220	0.075	1
2	220	0.05	0.5	11	160	0.05	1
3	100	0.1	0.5	12	160	0.1	1
4	220	0.1	0.5	13	160	0.075	0.5
5	100	0.05	1.5	14	160	0.075	1.5
6	220	0.05	1.5	15	160	0.075	1
7	100	0.1	1.5	16	160	0.075	1
8	220	0.1	1.5	17	160	0.075	1
9	100	0.075	1	18	160	0.075	1

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

P20S kalıp çeliğinin CNC freze tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerindeki değişime bağlı yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü değerlendirilmiştir. Ayrıca YYM ile kullanılarak kesme parametrelerindeki değişime bağlı yüzey pürüzlülüğünün ve teorik yorulma ömrünün analizi yapılmıştır. Tablo 4’de deneyler sonucu ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile teorik yorulma ömrü

için hesaplanan gerekli veriler verilmiştir.

Tablo 4. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile hesaplanmış yorulma ömür verileri (Fatigue life data calculated with measured surface roughness values)

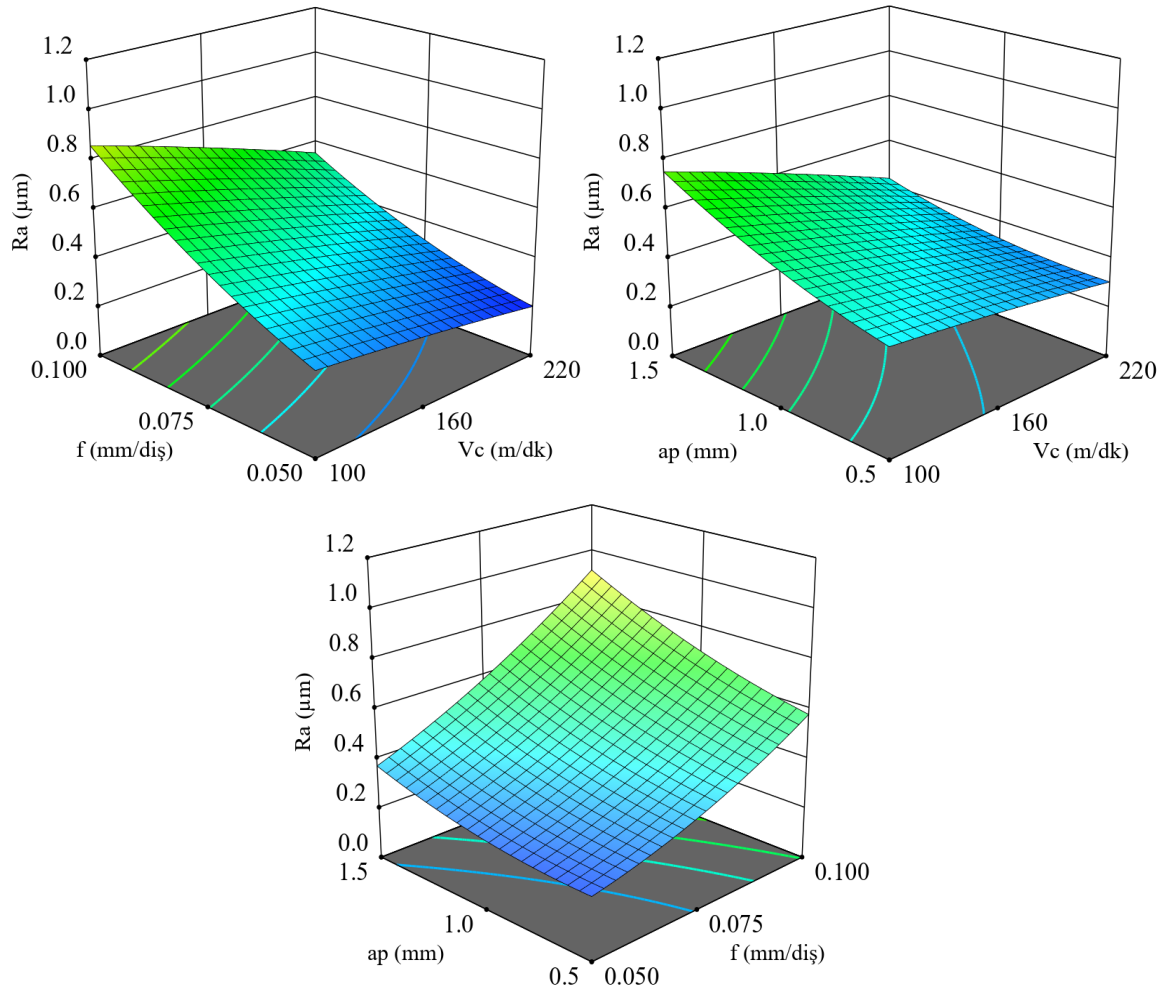
Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Rz (μm)	Sm (μm)	Ra (μm)	HV	$\sqrt{\text{area}}$ (mm)	σ_w (Mpa)	Kth
1	100	0.05	0.5	1.313	69.448	0.279	308	3.808	489.777	2.206
2	220	0.05	0.5	1.055	60.625	0.188	308	3.066	507.796	2.052
3	100	0.1	0.5	3.827	108.416	0.655	308	10.846	411.375	3.126
4	220	0.1	0.5	2.747	97.845	0.512	308	7.867	433.990	2.809
5	100	0.05	1.5	2.339	96.061	0.455	308	6.733	445.390	2.667
6	220	0.05	1.5	1.398	72.229	0.286	308	4.052	484.732	2.252
7	100	0.1	1.5	7.147	148.203	1.152	308	19.855	371.936	3.825
8	220	0.1	1.5	4.284	109.262	0.684	308	12.070	404.107	3.240
9	100	0.075	1	3.075	99.581	0.564	308	8.771	426.192	2.913
10	220	0.075	1	1.826	74.828	0.359	308	5.256	464.160	2.456
11	160	0.05	1	1.528	73.923	0.303	308	4.421	477.743	2.318
12	160	0.1	1	5.137	110.117	0.718	308	14.307	392.816	3.429
13	160	0.075	0.5	1.909	75.933	0.393	308	5.490	460.812	2.492
14	160	0.075	1.5	3.14	102.854	0.614	308	8.961	424.673	2.934
15	160	0.075	1	1.729	74.553	0.445	308	4.985	468.271	2.413
16	160	0.075	1	1.894	75.049	0.437	308	5.446	461.429	2.485
17	160	0.075	1	1.828	76.787	0.443	308	5.266	464.011	2.457
18	160	0.075	1	1.901	77.194	0.468	308	5.470	461.080	2.489

4.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Talaşlı imalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü en önemli çıktı parametrelerinden biridir. İşlenen parçanın yüzey kalitesi özellikle mekanik parçaların performansı ve üretim maliyetlerini doğrudan etkiler. Ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki değişim işlenen parçalar üzerindeki gerilmeler, yorulma ömrü ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi hayati önem taşımaktadır. [1,2,17,18]. Bu bağlamda farklı kesme parametrelerinde yapılan deneylerde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişim Şekil 5’de verilmiştir.

Şekil 5’de kesme hızı ilerleme miktarı, kesme hızı kesme derinliği ve ilerleme miktarı kesme derinliği değişimlerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi verilmiştir. Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.188 μm ile 1.152 μm arasında değişmiştir. Genel olarak kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olurken ilerleme miktarının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür. 100 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülüğü 0.279 μm ölçülmüştür. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %32.62 oranında azalırken ilerleme miktarının 0.1 mm/diş çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %134.78 oranında artışı görülmüştür. Kesme hızı ile kesme derinliği değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimine bakıldığında; 100 m/dk kesme hızında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 0.1 mm/diş ilerleme miktarında yüzey pürüzlülüğü 0.655 μm ölçülmüştür. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %21.83 oranında azalırken kesme derinliğinin 1.5 mm artırılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %75.88 oranında artışı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ilerleme miktarı ile kesme derinliği değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimine bakıldığında; 0.05 mm/diş ilerleme miktarında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 100 m/dk kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 0.279 μm ölçülmüştür. İlerleme miktarının 0.1 mm/diş kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değeri %134.77 oranında artarken kesme derinliğinin 1.5 mm çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değeri %63.1 oranında artışı görülmüştür.

Genel olarak yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü ağırlıklı olarak ilerleme miktarına, kesme derinliğine ve kesme hızına bağlı değişimler göstermiştir. Literatürde frezeleme çalışmalarında ortaya konduğu üzere kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileşeceği ancak ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin artışına bağlı yüzey pürüzlülüğünün artacağı bildirilmiştir [18-22]. Ayrıca yapılan deney sonuçlarına göre ilerleme miktarının artışına bağlı olarak Rz ve Sm değerlerinde de belirgin bir artışın olduğu görülmüştür.



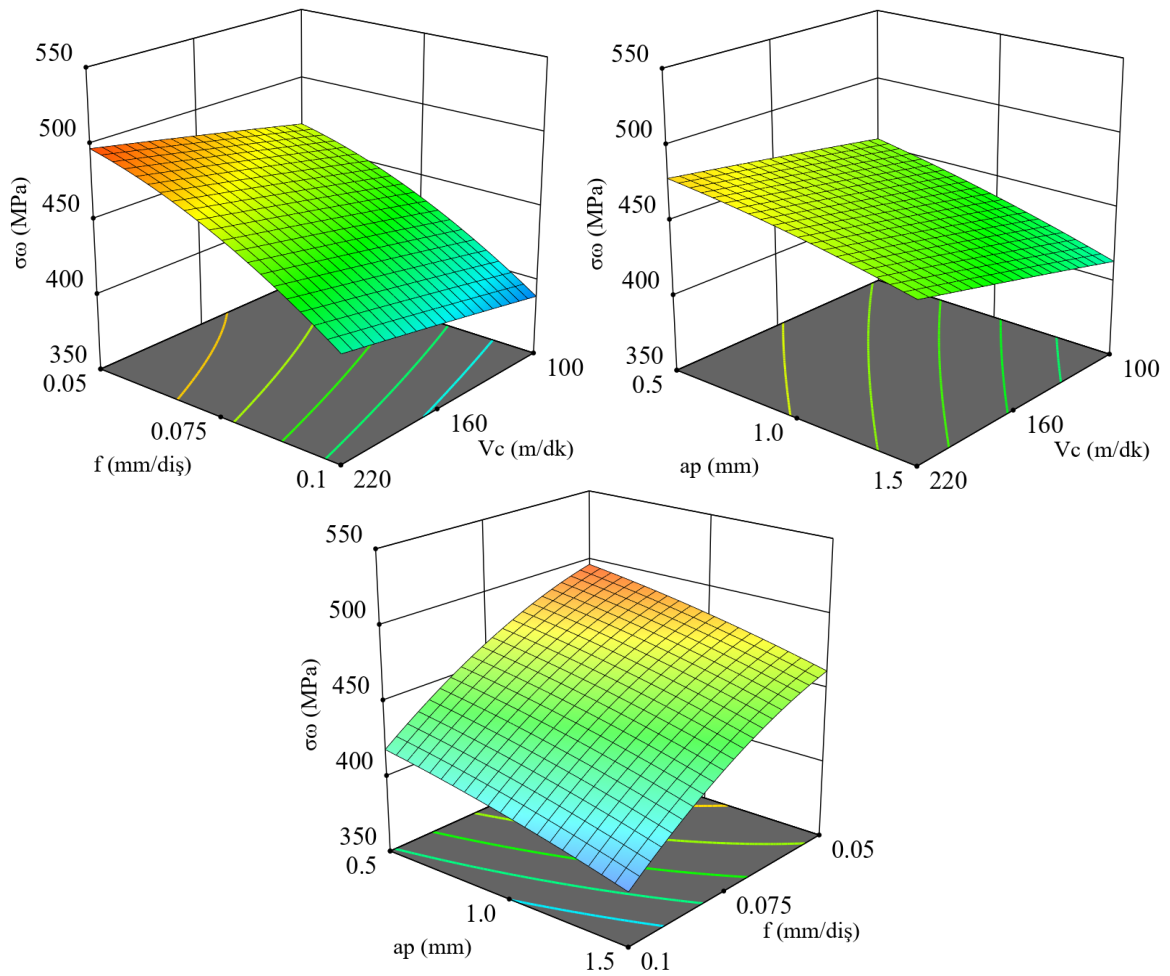
Şekil 5. Kesme parametrelerdeki değişime bağlı yüzey pürüzlülük değişimi (Surface roughness change depending on the change in cutting parameters)

4.2. Yüzey Pürüzlülüğüne Bağlı Olarak Teorik Yorulma Ömrünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Theoretical Fatigue Life Based on Surface Roughness)

P20S plastik kalıp çeliğinin farklı kesme parametrelerinde frezelenmesi sonucu yüzey pürüzlülük ölçüm değerlerinden R_z , S_m ve mikrosertlik değerleri \sqrt{area} modelinde yerine konarak işlenen parça için teorik yorulma ömrü için gerilme ve eşik gerilme şiddet faktör değerleri hesaplanarak sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük parametrelerine bağlı teorik yorulma ömründe, R_z yüzey profilindeki en yüksek tepe ve en düşük çukur arasındaki mesafe, S_m ise yüzey profilindeki dalga tepe noktaları arası mesafeyi ifade etmektedir. Yorulma hasarını harekete geçiren yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinden R_z ve S_m \sqrt{area} modelinde en uygun yüzey pürüzlülük değerleri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca deneyler sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile hesaplanan önemli başka bir faktörde eşik gerilme şiddetidir. Bu faktör pürüzlülükteki en yüksek tepe ile en düşük çukurda çatlakın tetiklenebileceği bölgedeki sınır kırılma tokluğunu (eşik gerilme şiddeti) ifade etmektedir. Başka bir deyişle kırılma tokluğu şiddeti aşıldığında çatlak meydana gelmeye başlayarak ilerleme yönünde hasar kendini gösterir [9, 23]. Tablo 4'te hesaplanan eşik gerilme şiddeti değerleri verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde en düşük eşik gerilme şiddeti 220 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde $2.052 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/3}$ iken en yüksek eşik gerilme şiddeti 100 m/dk kesme hızında, 0.1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1.5 mm kesme derinliğinde $3.825 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/3}$ hesaplanmıştır.

Yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı kesme parametrelerindeki değişim ile teorik yorulma ömrü arasındaki ilişki Şekil 5'de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu teorik yorulma ömrü değerleri 371.936 Mpa ile 507.796 Mpa arasında değişiklik göstermiştir. Şekil 5'e bakıldığında kesme hızının

artması ve ilerleme miktarının azalması ile teorik yorulma ömrünün arttığı görülmüştür. 100 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde teorik yorulma ömrü 489.777 Mpa hesaplanmıştır. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %3.68 oranında artarken ilerleme miktarının 0.1 mm/diş çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %16 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızı ile kesme derinliği değişimine bağlı teorik yorulma ömründeki değişim incelendiğinde; 100 m/dk kesme hızında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 0.1 mm/diş ilerleme miktarında teorik yorulma ömrü 411.375 Mpa hesaplanmıştır. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %5.5 oranında artarken kesme derinliğinin 1.5 mm artırılmasıyla teorik yorulma ömrü %9.6 oranında azaldığı izlenmiştir. Benzer şekilde ilerleme miktarı ile kesme derinliği değişimine bağlı teorik yorulma ömründeki değişim incelendiğinde; 0.05 mm/diş ilerleme miktarında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 100 m/dk kesme hızında teorik yorulma ömrü 489.777 Mpa hesaplanmıştır. İlerleme miktarının 0.1 mm/diş kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %16 oranında azalırken kesme derinliğinin 1.5 mm çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %9.06 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Kesme parametrelerdeki değişime bağlı yüzey pürüzlülük değişimi (Surface roughness change depending on the change in cutting parameters)

Tablo 4, Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ancak teorik yorulma ömrü artış olduğu görülmüştür. Teorik yorulma ömründeki artış kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğünün azalmanın neden olmuştur. Böylelikle yüzey pürüzlülüğü ne kadar düşük olursa yorulma hasar mekanizmasını tetikleme olasılığı o kadar düşük olur. Bu durum işlenen parçalarda yorulma ömrünün yüksek gerilmelerde ortaya çıkmasına neden olacaktır. Elde edilen sonuçlar ve grafiklerle incelendiğinde ilerleme miktarının artışına paralel olarak yorulma ömrümde de artışa neden olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeninin ilerleme miktarının artışı ile işlenmiş yüzeylerde pürüzlülük değerlerini artırıcı yönde bir etkiye sahip olmasıdır [9,23]. Kısaca, kesme hızının artması, ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin azalması yorulma ömrünü düşüreceği

yönde bir etki sağlayacağı söylenebilir.

4.3. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Varyans analizi (ANOVA), deney tasarımındaki tüm kesme parametrelerini bireysel ve arasındaki etkileşimleri belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [24,25]. $P>F$ değeri 0.05'ten küçük olduğunda model istatistiksel olarak anlam olduğu ve parametrenin yanıt üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [26,27]. Yapılan çalışmada kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve teorik yorulma ömrüne etkilerini belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için varyans analiz sonuçları Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5'deki varyans analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için Linear modelde kesme hızının ($V_c = 0.000 < 0.05$), ilerleme miktarının ($f = 0.000 < 0.05$), kesme derinliğinin ($a_p = 0.000 < 0.05$) etkileşimde kesme hızı*ilerleme miktarı ($V_c * f = 0.008 < 0.05$), kesme hızı*kesme derinliği ($V_c * a_p = 0.004 < 0.05$) ve ilerleme miktarı* kesme derinliği ($f * a_p = 0.004 < 0.05$) etkilerin anlamlı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Tablo 5'deki varyans analiz sonuçlarına göre teorik yorulma ömrü için Linear modelde kesme hızının ($V_c = 0.003 < 0.05$), ilerleme miktarının ($f = 0.000 < 0.05$) ve kesme derinliğinin ($a_p = 0.001 < 0.05$) etkilerin anlamlı olduğu görülmektedir. Varyans analizleri sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü üzerine katkı oranı (%) değeri Şekil 6'daki pasta grafiğinde verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68.6 ve %59.34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur. Varyans analizi sonucu elde edilen hata oranı %10'nun altındaysa deneysel hata kabul edilebilir [28]. Şekil 6 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata oranları sırası ile %4.44 ve %1.2 olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata oranları %10 altında olduğu için hesaplanan ikinci derece denklemin doğruluğu kabul edilebilir seviyededir.

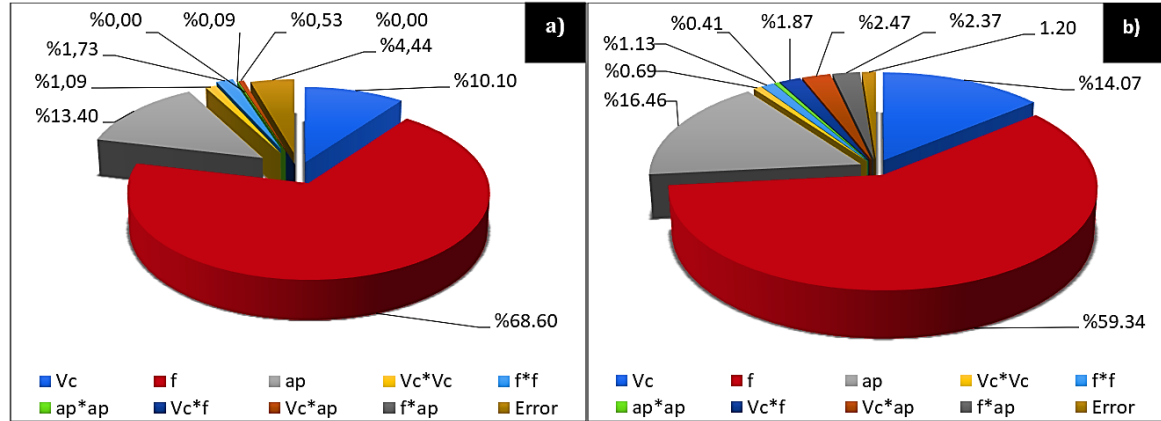
Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için elde edilen ikinci derece denklemler sırası ile Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için elde edilen ikinci derece denklemler için R^2 sırası ile %98.8 ve %95.56 olarak elde edilmiştir. Elde edilen ikinci derece denklemlerin R^2 büyük çıkması bu denklemin doğruluk oranını artırmaktadır [29].

$$Ra(\mu m) = -0.002 + 0.00268V_c - 0.56 * f - 0.076 * a_p - 0.000002 * V_c * V_c + 67.5 * f * f + 0.1408 * a_p * a_p - 0.02925 * V_c * f - 0.00116 * V_c * a_p + 3.950 * f * a_p \quad (8)$$

$$\sigma_w(MPa) = 478.3 + 0.164 * V_c + 935 * f - 31.9 * a_p - 0.00008 * V_c * V_c - 16312 * f * f - 10.9 * a_p * a_p - 0.21V_c * f + 0.129 * V_c * a_p - 19 * f * a_p \quad (9)$$

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için varyans analizleri. (Analysis of variance for surface roughness and theoretical fatigue life.)

Source	Ra (μm)					σ_w (MPa)				
	DF	Seq SS	Adj MS	F Value	P Value	DF	Seq SS	Adj MS	F Value	P Value
Model	9	0.813201	0.813201	73.43	0.000	9	21319.2	2368.8	19.12	0.000
Linear	3	0.739677	0.739677	200.38	0.000	3	20548.1	6849.4	55.30	0.000
Vc	1	0.115778	0.115778	94.09	0.000	1	2253.5	2253.5	18.19	0.003
f	1	0.488410	0.488410	396.94	0.000	1	15304.8	15304.8	123.56	0.000
a _p	1	0.135490	0.135490	110.11	0.000	1	2989.9	2989.9	24.14	0.001
Square	3	0.018319	0.018319	4.96	0.031	3	650.6	216.9	1.75	0.234
Vc*Vc	1	0.005688	0.000125	0.10	0.758	1	244.0	0.2	0.00	0.966
f*f	1	0.009273	0.004826	3.92	0.083	1	386.4	281.7	2.27	0.170
a _p *a _p	1	0.003358	0.003358	2.73	0.137	1	20.2	20.2	0.16	0.697
Way Interaction	3	0.055204	0.055204	14.96	0.001	3	120.5	40.2	0.32	0.808
Vc*f	1	0.015400	0.015400	12.52	0.008	1	0.8	0.8	0.01	0.937
Vc*a _p	1	0.020301	0.020301	16.50	0.004	1	119.2	119.2	0.96	0.355
f*a _p	1	0.019503	0.019503	15.85	0.004	1	0.4	0.4	0.00	0.954
Error	8	0.009844	0.009844			8	990.9	123.9		
Lack-of-Fit	5	0.009289	0.009289	10.05	0.043	5	957.9	191.6	17.41	0.020
Pure Error	3	0.000555	0.000555			3	33.0	11.0		
Total	17	0.823045				17	22310.1			



Şekil 6. Kesme parametrelerinin % katkı oranları (a) Yüzey pürüzlülüğü, (b) Teorik yorulma ömrü (The % contribution ratios of cutting parameters (a) Surface roughness, (b) Theoretical fatigue life)

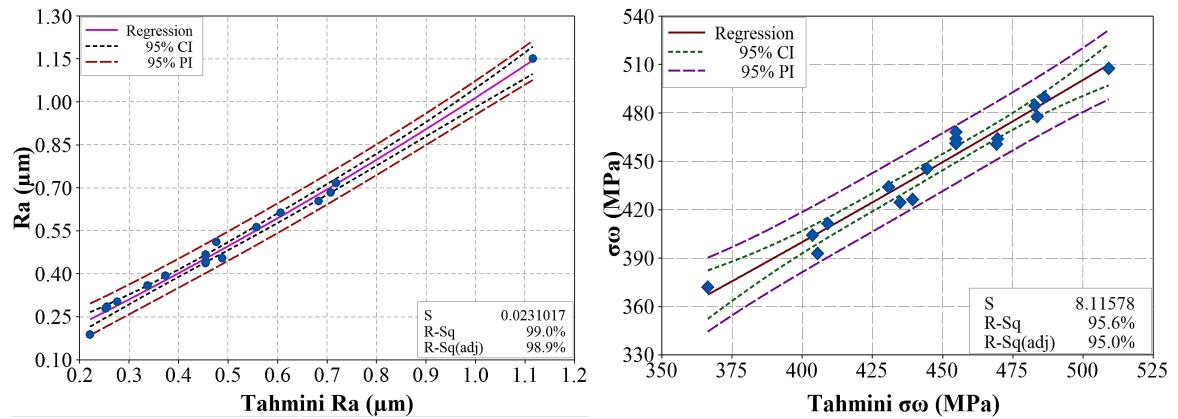
4.4. Yüzey pürüzlülüğünün ve Teorik Yorulma Ömrünün Optimum Tahmini (Optimum Estimation of Surface Roughness and Theoretical Fatigue Life)

DeneySEL sonuçlar ile tahmini değerler arası ilişkiyi belirlemek için YYM kullanılarak İkinci derece regresyon analizi yapılmıştır. İkinci derece regresyon analizini, yapılan deney sonuçları ile tahmini sonuçların güven aralığına dahil olup olmadığını belirlemek için uygulanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonucu ile hesaplanan teorik yorulma ömrü sonuçları ve bunlara karşılık gelen tahmini değerler Şekil 7 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Şekil 7'de verilen CI güven düzeyi aralığı ve PI tahmini güven aralığını ifade etmektedir [30,31]. Gerçek deney sonuçları ise mavi daire ve kare noktalarla gösterilmiştir. Bu noktaların merkezde bulunan çizgiye yakın bölgelerde toplanması elde edilen ikinci derece denklemlerin sonraki deneylerde ve çalışmalarda zaman kaybını minimuma düşürerek hızlı çözüm sağlayacağı kanısındayız.

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için gerçek ve tahmini değerler. (Actual and estimated values for surface roughness and theoretical fatigue life.)

Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Ra (µm)	Tahmini Ra (µm)	σ_w (Mpa)	Tahmini σ_w (Mpa)
1	100	0.05	0.5	0.279	0.253	489.777	486.120
2	220	0.05	0.5	0.188	0.221	507.796	509.208
3	100	0.1	0.5	0.655	0.683	411.375	409.005
4	220	0.1	0.5	0.512	0.476	433.990	430.833
5	100	0.05	1.5	0.455	0.488	445.390	444.370
6	220	0.05	1.5	0.286	0.255	484.732	482.938
7	100	0.1	1.5	1.152	1.116	371.936	366.305
8	220	0.1	1.5	0.684	0.708	404.107	403.613
9	100	0.075	1	0.564	0.557	426.192	439.370
10	220	0.075	1	0.359	0.338	464.160	469.568
11	160	0.05	1	0.303	0.276	477.743	483.672
12	160	0.1	1	0.718	0.718	392.816	405.452
13	160	0.075	0.5	0.393	0.373	460.812	469.2745
14	160	0.075	1.5	0.614	0.607	424.673	434.7895
15	160	0.075	1	0.445	0.455	468.271	454.757
16	160	0.075	1	0.437	0.455	461.429	454.757
17	160	0.075	1	0.443	0.455	464.011	454.757
18	160	0.075	1	0.468	0.455	461.080	454.757



Şekil 7. Gerçek ve tahmini yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü grafiği. (Graph of actual and estimated surface roughness and theoretical fatigue life.)

5. SONUÇLAR (Conclusions)

Bu çalışma, P20S plastik kalıp çeliğinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Ayrıca deneyler boyunca ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerine (Rz ve Sm) bağlı \sqrt{area} modeliyle teorik yorulma ömrü hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen deneysel ve teorik olarak elde edilen bazı önemli sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Frezeleme deneylerinde en düşük yüzey pürüzlülüğü 220 m/dk kesme hızında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde 0,188 μm ölçülmüştür.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değerinin 100 m/dk kesme hızında, 0,1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1,5 mm kesme derinliğinde 1,152 μm olduğu ölçülmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğünün Ra değerinin en yüksek ve en düşük çıktığı kesme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğünün diğer değerleri Rz ve Sm değerleri paralellik göstermiştir.
- Yüzey pürüzlülüğüne bağlı teorik yorulma ömrünün hesaplanmasında en yüksek yorulma ömrü yüzey pürüzlülüğünün en düşük çıktığı 220 m/dk kesme hızında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde 507,796 Mpa hesaplanmıştır.
- En düşük teorik yorulma ömrü yüzey pürüzlülüğünün en yüksek çıktığı 100 m/dk kesme hızında, 0,1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1,5 mm kesme derinliğinde 371,936 Mpa hesaplanmıştır.
- \sqrt{area} modelinde yüzey pürüzlülüğünün Rz ve Sm değerlerini kullanılarak yapılan teorik yorulma ömründe ilerleme miktarının artması ile yüzey profilindeki tepe ve çukurların artması yorulma ömrünü olumsuz etkilemiştir. İlerleme değerinin artışı yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilerken kesme hızının artması yorulma ömrünü olumlu yönde etkilemiştir.
- Yorulma ömründe çatlak oluşumunu tetikleyen başka bir parametre ise eşik gerilme şiddeti faktörüdür. Eşik gerilme şiddeti faktörünün kesme hızının artması ile azaldığı ancak ilerleme hızındaki artışa bağlı artmıştır.
- Varyans analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68,6 ve %59,34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata payı sırası ile %4,44 ve %1,2 olarak hesaplanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (References)

- [1] W. L. Xiao, H. B. Chen, Y. Yin, "Effects of surface roughness on the fatigue life of alloy steel," *Key Engineering Materials*, vol. 525-526, pp. 417-420, Nov. 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.417
- [2] Y. Xiong, W. Wang, Y. Shi, R. Jiang, K. Lin, X. Liu, "Fatigue behavior of in-situ TiB₂/7050Al metal matrix composites: Fracture mechanisms and fatigue life modeling after milling," *International Journal of Fatigue*, vol. 138, pp. 105698, Sep. 2020. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105698

- [3] E. Santecchia, A. M. S. Hamouda, F. Musharavati, E. Zalnezhad, M. Cabibbo, M. El Mehtedi, S. Spigarelli, "A review on fatigue life prediction methods for metals," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol.2016, pp. 1-26, Sep 2016. doi:10.1155/2016/9573524
- [4] A. Javidi, U. Rieger, W. Eichseder, "The effect of machining on the surface integrity and fatigue life," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 2050-2055, Oct-Nov 2008. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005
- [5] E. Zahavi and V. Torbilo, "Fatigue design: life expectancy of machine parts," CRC Press, 1996.
- [6] C. R. Liu, S. Mittal, "Optimal pre-stressing the surface of a component by superfinish hard turning for maximum fatigue life in rolling contact," *Wear*, vol. 219, pp. 128-140, Aug. 1998. doi:10.1016/S0043-1648(98)00240-3
- [7] M. Jacobson, "Surface integrity of hard-turned M50 steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 216, pp. 47-54, Jan. 2002. doi:10.1243/0954405021519681
- [8] M. Jacobson, D. Patrik, G. Fredrik, "Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel" *J. Mater. Proc. Technol.*, vol. 128, pp. 318-323, Oct. 2002. doi:10.1016/S0924-0136(02)00472-7
- [9] H. B. Özerkan, "Tornalamada oluşan yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisinin teorik değerlendirilmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 33, ss. 189-198, Haziran, 2018.
- [10] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen, "The effect of machined topography and integrity on fatigue life," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 125-134, Feb 2004. doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.10.018
- [11] C. Yao, D. Wu, Q. Jin, X. Huang, J. Ren, D. Zhang, "Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, pp. 650-660, Mar. 2013. doi:10.1016/S1003-6326(13)62512-1
- [12] İ. Tekait, "Theoretical evaluation of the effect of surfaces processed with abrasive water jet on fatigue life," *Transactions of Famena*, vol. 43, pp. 85-98, 2019. doi:10.21278/TOF.43207
- [13] M. Field, J. Kahles, "Review of surface integrity of machined components," *Ann CIRP*, vol. 20, pp. 153-163, 1971.
- [14] Y. Murakami, "Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions," *Elsevier Science, Oxford*, pp. 305-320, 2002.
- [15] E. Nas, S. Akıncioğlu, "Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu," *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, pp. 115-126, Ocak 2019. doi:10.21541/apjes.412042
- [16] R. Soundararajan, A. Ramesh, N. Mohanraj, N. Parthasarathi, "An investigation of material removal rate and surface roughness of squeeze casted A413 alloy on WEDM by multi response optimization using RSM," *J. Alloys Compd.*, vol. 685, pp. 533-545, Nov. 2016. doi:10.1016/j.jallcom.2016.05.292
- [17] A. Das, S. R. Das, S. K. Patel, B. B. Biswal, "Effect of MQL and nanofluid on the machinability aspects of hardened alloy steel," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 291-320, Sep. 2020. doi:10.1080/10910344.2019.1669167
- [18] F. Günan, T. Kivak, Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, "Performance evaluation of MQL with AL203 mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 10386-10400, Oct. 2020, doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.018
- [19] B. Özlu, "Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel," *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 36, pp. 1241-1251, 2021. doi:10.17341/gazimmfd.668169
- [20] B. Özlu, H. Demir, M. Türkmen, S. Gündüz, "Examining the machinability of 38MnVS6 microalloyed steel, cooled in different mediums after hot forging with the coated carbide and ceramic tool," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, pp. 6228-6239, Nov. 2021. doi:10.1177/0954406220984498
- [21] M. Akgün, H. Demir, "Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 Superalloy," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 28, pp. 2150011, 2021. doi:10.1142/S0218625X21500116
- [22] M. Akgün, "Optimization of process parameters affecting cutting force, power consumption and surface roughness using taguchi-based gray relational analysis in turning AISI 1040 steel," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 29, pp. 2250029, 2022. doi:10.1142/S0218625X22500299
- [23] R. Çakıroğlu, M. Günay, "Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmini," *Journal of Polytechnic*, vol. 24, pp. 495-502, 2021. doi:10.2339/politeknik.705903
- [24] B. Özlu, "Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 28, pp. 2150093, 2021. doi:10.1142/S0218625X21500931

- [25] A. Uğur, E. Nas, H. Gökkaya "Investigation of the machinability of SiC reinforced MMC materials produced by molten metal stirring and conventional casting technique in die-sinking electrical discharge machine," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 186, pp. 105875, Nov. 2020. doi:10.1016/j.ijmecs.2020.105875
- [26] R. Işık, B. Özlü, H. Demir, "St-37 malzemesinin lazer ile kesme işleminde seçilen parametrelerin etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi," *Firat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, vol. 33, no. 1, pp. 161-171, 2021. doi:10.35234/fumbd.769716
- [27] F. Çırakoğlu, B. Özlü, H. Demir, "Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu," *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 913-923, 2021. doi:10.35193/bseufbd.977412
- [28] R. G. Hills, T.G. "Trucano, Statistical validation of engineering and scientific models: Background," *Sandia National Laboratories SAND99-1256*. 36, 1999.
- [29] A. Çiçek, T. Kıvak, E. Ekici, "Optimization of drilling parameters using taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 26, pp. 295-305, May. 2015. doi:10.1007/s10845-013-0783-5
- [30] F. Kara, "Taguchi optimization of surface roughness and flank wear during the turning of DIN 1.2344 tool steel," *Mater. Test*, vol. 59, pp. 903-908, Oct. 2017. doi:10.3139/120.111085
- [31] E. Nas, B. Öztürk, "Optimization of surface roughness via the taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials," *Mater. Test*, vol. 60, pp. 519-525, Nov. 2018. doi:10.3139/120.111181

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

CLAHE based Enhancement to Transfer Learning in COVID-19 Detection

Gokhan Altan^a, Süleyman Serhan Narlı^b

Submitted: 02.12.2021 Revised: 11.04.2022 Accepted: 29.04.2022 doi:10.30855/gmbd.0705001

ABSTRACT

Early diagnosis of COVID-19 disease becomes possible with the enhancements on feature learning and advanced pre-processing stages for classification of chest X-ray images using deep learning. Besides, high-performance models have been developed by many researchers due to the popularity of Deep Learning. In this study, chest X-ray images were pre-processed using Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) before the classification with particular popular transfer learning approaches in deep learning architectures including AlexNet, MobileNet, VGG16, and DarkNet19. The originality of the paper is pre-processing the images using CLAHE to obtain more significant representations of airways and pathologies instead of training with raw chest X-ray images. The best CLAHE parameters were determined considering the results of various trials at a specified range. The other superior contribution of the proposal is using a large-scale dataset, which is comprised of 3500 healthy and 3615 chest x-rays with COVID-19. The CLAHE-based transfer learning proposal achieved an accuracy rate of 95.878% as the most successful binary classification result for COVID-19 and healthy using VGG16 model and CLAHE parameters including disk value of 56, clip-limit of 0.2.

Keywords: Deep Learning, Convolutional neural networks, Adaptive Histogram Equalization, medical image analysis, chest x-ray

^a Iskenderun Technical University, Faculty of Natural and Engineering Sciences, Dept. of Computer Engineering 31200 - Hatay, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7883-3131
e mail: gokhan.altan@iste.edu.tr

^b Iskenderun Technical University, Faculty of Natural and Engineering Sciences, Dept. of Computer Engineering 31200 - Hatay, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0162-9786
e mail: serhan.narli@gmail.com

*Corresponding author:
gokhan.altan@iste.edu.tr

COVID-19 Tespitinde Öğrenim Aktarımına CLAHE Tabanlı Geliştirme

ÖZ

Derin öğrenme kullanılarak göğüs röntgeni görüntülerinin sınıflandırılması için öznetelik öğrenme ve gelişmiş ön işleme aşamaları üzerindeki geliştirmelerle COVID-19 hastalığının erken teşhisi mümkün hale getirmiştir. Bunun yanında, Derin Öğrenme popüleritesi nedeniyle birçok araştırmacı tarafından denenerek yüksek performanslı modeller ortaya sürülmüştür. Bu çalışmada göğüs röntgen filmlerine, AlexNet, MobileNet, VGG16 ve DarkNet19 gibi popüler derin öğrenme mimarilerindeki transfer öğrenme yaklaşımıyla sınıflandırmadan önce Kontrast Sınırlı Adaptif Histogram Eşitleme (CLAHE) kullanılarak ön işlem uygulanmıştır. Makalenin orijinaliği, göğüs röntgeni görüntülerini doğrudan ham veri ile eğitmek yerine önce hava yollarının ve patolojilerin daha belirgin yansımalarını elde edilerek gerçekleştirilmesidir. En başarılı CLAHE parametreleri çeşitli aralıklardaki deneyler sonucunda belirlenmiştir. Önerilen yaklaşımın diğer üstün katkısı, modelin eğitiminde ve testinde 3615 COVID-19'lu ve 3500 sağlıklı göğüs röntgeninden oluşan büyük ölçekli bir veri seti kullanılmasıdır. CLAHE tabanlı öğrenim aktarımı önerisi, en başarılı COVID-19 ve sağlıklı ikili sınıflandırma başarımına %95,878 doğruluk oranıyla VGG16 modeli üzerinde 56 disk değeri ve 0.2 klip limiti CLAHE parametrelerini kullanarak ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin Öğrenme, Evrişimsel sinir ağları, Göğüs röntgeni, Adaptif Histogram Eşitleme, Tıbbi görüntü analizi

1. Introduction

Severe acute respiratory syndrome coronavirus (COVID-19), a new type of coronavirus of which the first known presence was reported in December 2019. It has affected the whole world and caused thousands of death across the globe. Early diagnosis is essential to reduce the effects of the COVID-19 virus. Many methods are used to detect the COVID-19 virus, and one of the fastest methods is detecting COVID-19 disease by chest X-ray (CXR), the diagnosis used. In terms of the cost of the methods, X-ray images are accepted as a high-speed and cheap method compared to other diagnostic procedures. Preventing the progression of the disease on the lungs in COVID-19 disease by early diagnosis is of vital importance, which increases the volume of computerized analysis on X-rays.

X-ray is an inexpensive radiology test that creates an image of the chest and internal organs with low-dose radiation without uncomfortable for the patient. The chest is quickly exposed to radiation by a specialized medical device to perform a chest X-ray. Consequently, an image is generated on a film by the permeability specifications of the tissues [1].

Diagnosing by CXR images is considered a difficult task for even radiologists in terms of small pathologies and early stages of common lung diseases. Therefore, computer-aided diagnosis (CAD) systems have been developed in recent years to assist physicians in evaluating a CXR image. However, the enhancing CAD systems have not yet achieved satisfactory results in the diagnosis and prognosis of diseases on CXR images [2].

Due to the necessity for rapid and accurate analysis of CXR images, a series of COVID-19 detection models based on state-of-the-art Convolutional neural network (CNN) models have been proposed in recent years, with promising results [3]. Apostolopoulos (2020) experimented with two different datasets using learning transfer for CXR image analysis. The first dataset contains 224 COVID-19 images, 700 Bacterial Pneumonia, and 504 Healthy images. In the first analysis, he experimented with five different CNN models. The highest binary classification results were obtained with VGG19 with 98.75% among the VGG19, MobileNet v2, Inception, Xception, and Inception ResNet v2 models. Consequently, the most successful model achieved a classification accuracy rate of 93.48%, a precision rate of 92.85%, and a sensitivity rate of 98.75% for multiclass classification (healthy, COVID-19, and pneumonia). The other dataset consists of 224 COVID-19, 714 pneumonias (400 bacterial and 314 viral pneumonia), and 504 healthy CXRs. The second experiment achieved a classification performance of 96% using transfer learning on MobileNet v2 for binary cases. Moreover, they reached the performance rates of 94.72%, 98.66%, and 96.46% for accuracy, precision, and sensitivity for multiclass cases, respectively. Apostolopoulos evaluated the capabilities of transfer learning for various classification performances of different CNN architectures on CXR images. They highlighted the most success of VGG19 and MobileNet v2 for the diagnosis of COVID-19 [4]. Chowdhury (2020) trained CXR images using MobileNetV2, ResNet18, ResNet101, VGG19, and DenseNet201 models. Before training the CNN architectures, they performed preprocessing and segmentation for the CXR dataset. In the preprocessing step, the data set is reduced to 224,224 for the models we mentioned above. The dataset has been resized to two dimensions with 227x227 pixels for SqueezeNet and 299x299 for the Inception v3 model. In the segmentation process, the images are rotated and flipped. The training of CNN architectures was conducted without applying segmentation processes to the images. They utilized 423 COVID-19, 423 viral pneumonias, and 423 healthy CXR images in the experiments (304 for training, 85 for testing). They segmented 2128, 2274, and 1579 regions of interest for pathologies and healthy tissues. In both experiments, 5-fold cross-validation was performed in the training of the CNN models. The ChexNet architecture reached the best classification performance without segmentation for 2-class training with an accuracy rate of 99.41%, the precision rate of 99.42%, the sensitivity rate of 99.41%, and the f1-score of 0.9941. After applying the segmentation process, the success rate was 99.69%, precision 99.69%, sensitivity 99.69%, and f1-score 99.69%. The ChexNet without segmentation achieved an accuracy rate of 97.74%, precision rate of 96.61%, sensitivity rate of 96.61%, and f1-score of 0.9661 for the multiclass case analysis. The best diagnosis achievements for segmented CXR images were reported an accuracy rate of 97.94%, precision rate of 97.95%, sensitivity rate of 97.94%, and f1-score of 0.9794 using DenseNet201 architecture. They examined the effect of the segmentation on the performance for 2-class and multiclass diagnoses. Moreover, they determined well enough classification performances on various CNN models [3].

Medical images are diagnostic tools for imaging, visualization, and identification of pathological nodules and tissues from healthy tissue. Many medical imaging modalities visualize the density of organs based on a given dose of x-ray or photon exposure. CXR, which is used to detect lung and heart diseases, is often preferred because it contains low-dose radiography that is not harmful to human health and is cheaper than computed tomography. It is still used as the first choice in the physical experiments of clinical validity for a supportive diagnosis, an indispensable tool for visceral ailments such as lungs, heart, bone, kidney, and intestines [5]. Severe lung diseases can be detected in lung tomography due to the intense appearance of pathological cells in the tissue. For this reason, chest radiographs still come to the fore as the primary approach for imaging respiratory tract diseases and early detection of most pathologies. Due to the noisy chest x-rays, detecting disease pathology requires an extensive workload for specialists and additional time loss for double-blind evaluation of each case. Such disadvantages can be overcome in a short time using CAD systems by detecting minor pathologies that may be overlooked even by multiple radiologists and speed up the patient-specific treatment process [6].

Dataset and feature extraction are very important in machine learning algorithms to develop successful CAD models with clinical validity. Arranging the distribution of training and test data in the dataset are operations to consider when modelling a robust and trusting CAD system [7].

Traditional CAD models in CXR analysis must be trained by including the characteristics of pathological regions. Moreover, it is essential to generate the small pathology, edema, and nodules in the airways to detect pathological regions depending on high classification performances with related activation maps. Especially in lung diseases, airways, obstructions, damages, and edema regions need to be improved with sensitive image processing approaches for diagnosis and visualization at early stages with a clinical usability [5]. Due to CXR being a noisy medical image, certain pre-processing has become necessary. However, filtering techniques and pre-processing of the overall CXRs cause a distortion of the pathologies representing the disease symptoms and losing the regional importance of pathologies. Significantly, clarification of disease-specific pathologies and enhancing airways before feeding the classifier will increase the clinical validity of the learning procedure for deep learning type classifiers. Therefore, the determination of CLAHE parameters that should be used for different popular pre-trained architectures for abnormalities in COVID-19 is a major deficiency in the literature.

This study aimed at making pathological regions more prominent in CXR using Adaptive Histogram Equalization (AHE). The CXR images were trained with lightweight popular deep learning models for various ranges of AHE parameters. In this way, the best AHE parameters were determined according to the highest achievements in test and training for each CNN architecture.

We proposed a simplistic CNN-based COVID-19 identification model for separating COVID-19 cases from healthy subjects. The main contribution is feeding the CNN architectures with apparent pathology with a clinical validity for simplistic transfer learning procedures on a large-scale dataset.

2. Material and Method

2.1. Convolutional Neural Networks

Convolutional Neural Network (CNN) is a multi-layered feed-forward neural network, which is located within the layers of deep learning. It is comprised of filtering stages using convolution and generating feature activation maps. The CNN produces prominent representations by feature learning. The dominant pixel values of the feature maps can be increased using various sizes and maps of filters. Therefore, it is not necessary to use any additional feature extraction or hand-crafting feature algorithms for the input data [8].

CNN architecture was first presented by LeCun et al. with the name of LeNet. They revealed this procedure on a gradient basis which is comprised of feature learning with convolution and classification stage for feeding the supervised learning-based approach [9].

CNN is a deep network model consisting of convolutional layers, transferring the dominant pixels using pooling layers. Each stage of architecture generates a various number of feature maps. Each pixel value in a feature map has a receptive field that connects to a layer of neurons in the previous layer via a trainable weight set in the flattening layer [10]. The inputs are combined with the learned weights to create a new feature map, and the results are sent via rectified linear units (ReLUs; [11]), a non-linear activation function.

The weights of all neurons in a feature map are equally constrained. However, different feature maps in the same convolution layer have different weights. Therefore, various features can be extracted at each location and transferred between convolution blocks. The convolution layer uses various sizes and numbers of filters to represent different characteristics of the input images. The depth of the CNN is defined by the number of filters in each convolution layer [12].

Deep learning models also include the pooling layer, which reduces the input data size separately from the convolution layer. It is generally used after the activation layer at the end of convolutional blocks. The jointing process creates data losses. However, it makes the network faster with the decrease in the dimensionality of represented images to be circulated in the neural networks. Thus, the amount of computation in the CNN and the memory size for the analysis are reduced [13]. After several convolution layers and pooling layers, the feature maps are stacked on top of each other, and they flattened to the fully-connected layers to interpret the representations and to perform a supervised classification [14].

The fully-connected layer produces the classification result according to the desired number of classes depending on a particular function. The softmax activation function is generally used at the output function of the classification layer to predict proportional similarity of the actual output [12].

2.2. COVIDx Dataset

Chest X-rays with COVID-19 were obtained from the COVIDx dataset [15], the largest open-access dataset in terms of the number of COVID-19 positive cases. It consists of 3616 chest X-rays that are positive for COVID-19 and continue to be updated due to ongoing cases worldwide. It has been analysed as part of the Italian Medical Association, Interventional Radiology (SIRM) COVID-19 database and the COVID-19 dataset.

The CXRs have a wide variation in specifications in terms of resolution and depth. Therefore, each CXR image needs to be resized in a standard form. However, pneumonia and healthy CXRs are rectangular (Ex: 1900x140), COVID-19 cases are square (299x299). In this way, the rectangular chest x-ray is resized to square form and stretched, causing loss of the anatomical shape of the lungs. For this reason, square resizing of chest X-rays and zero translation were applied to prevent distortion while preserving the anatomical shape of the lungs.

The CXRs were selected from the COVIDx database. A total number of 7115 CXRs (3615 COVID-19 and 3500 healthy) were analysed to evaluate the effect of the transfer learning on enhanced CXRs for classification of COVID-19 and healthy cases.

2.3. Transfer Learning

Successful training of deep neural networks usually requires a large-scale dataset and a long training time. Moreover, a fundamental assumption for many deep learning models is that training and testing data should be taken from a similar distribution. When the number of data is less than necessary to train the model, it is essential to reuse previous knowledge for different data, tasks, or feature sets. Transfer learning is a novel deep learning approach in which a previously trained model is reused as the starting point for a related model and task. It not only reduces the necessity to collect a large number of training data but also speeds up the training of deep learning architectures [16,17].

Traditionally, Deep neural networks require huge amounts of labelled datasets for image classification, such as ImageNet [18], one of the largest datasets (more than 14 million images from 1000 objects)

very powerful. However, transfer learning has recently been an effective solution in medical image recognition systems with a shortage of labelled datasets. Training of deep learning from scratch can be computationally expensive. In this context, two transfer learning techniques have been widely applied for image recognition tasks: (1) using pre-trained architectures as a feature extractor and (2) fine-tuning a pre-trained network with adaptive parameter updates [5].

This study utilized transfer learning on the popular lightweight CNN architectures, including AlexNet, VGG16, DarkNet19, and MobileNet.

AlexNet is one of the pioneer studies to popularize convolutional neural networks in deep learning. AlexNet [19] significantly outperformed other handcrafted models in the 2012 ImageNet ILSVRC competition. It is composed of five convolutional layers, three max-pooling, and three fully connected layers.

The VGGNet performed very successfully in the ILSVRC competition in 2014 [20]. 6 different convolution layer models are proposed for the various designed architecture (11, 13, 16, and 19 convolution layers accordingly). In this architecture, the convolution filter size was chosen as 3x3 [21].

MobileNet architecture has been introduced with a deeply separable convolution layer instead of the traditional convolution layer [22]. It has a two-dimensional spatial separable convolution by dividing the two-dimensional (height-width) filter into two small kernels. It requires far fewer learned parameters than a regular convolution layer with the same procedure.

The DarkNet19 architecture has been proposed as a novel classification model which is based on the YOLOv2 model [23]. Similar to the VGG model, a 3x3 convolution filter is used, and the number of filters is doubled after each maximum value association layer. In the classification layer, the feature representation is revealed by using a 1x1 dimensional convolution filter between the mean pooling and the 3x3 dimensional convolution layer [24]. DarkNet19 architecture is comprised of 19 convolution layers, five max-pooling layers.

2.4. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) is a technique used to enhance the density level of an image. CLAHE is frequently used in medical image processing for pixel density level rearrangement and noise removal [25]. CLAHE was developed as variations of histogram equalization by Hummel [26,27], Ketcham [28], and Pizer [29]. It has performed successful enhancing results on various types of images. Unlike general histogram equalization, CLAHE operates based on a defined intensity level on regional pixels of the image rather than handling the intensity level of the total image. To eliminate the noise in the image, the increase in intensity level is limited [30]. Unlike adaptive histogram equalization (AHE), CLAHE updates the density value according to a user-specified maximum (clip-limit) value. Thus, the density level does not affect the smooth regions and prevents the excessive increase as a noise. As a result, CLAHE determines the pixel radius to which the histogram equalization will be applied as in AHE, but also it has a user-defined density limit (clip-limit), unlike AHE. Thus, the details in the image become more prominent [29].

Figure 1 indicates the enhancement outputs and pixel contrast distributions on a random CXR for various histogram equalization techniques. The original CXR exhibits an unstable distribution with pixel contrast values stacked between 0.25 and 0.75. Although this pixel contrast value is distributed in the range of 0-1 after conventional Histogram equalization (HE), its consistency is not at a sufficient level. Although a more consistent distribution is obtained for values in the pixel contrast range by using Local histogram equalization (LHE), the contrast values of 0 and 1 have a high value in the distribution. Therefore, the rib cages bones and airway sections on the CXR become similar visibility in the enhanced image. When using the same disk size as LHE for CLAHE, 0 and 1-pixel contrast values are reduced to almost zero even for a low clip-limit of 0.02. Compared to LHE, CLAHE provided clearer visibility in contrast with a regional enhancement for bone tissue with poor permeability of the airways.

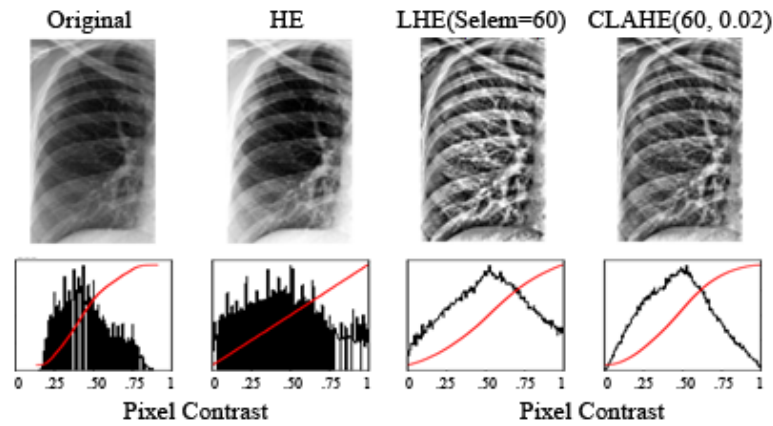


Figure 1. Different Histogram Equalization Methods

The pioneering studies that reported successful enhancements on chest X-ray films utilized disc sizes of $1/8$ - $1/16$ of the input and clip limit values of 0.2 and 0.3 [25], [31]. In this study, we additionally analysed the effect of the disk sizes of $[1/2, 1/4, 1/7, 1/8, 1/16, 1/28, \text{ and } 1/56]$ with input size of 224 and clip limit values at the range of $[0-1]$ increasing by 0.1 to increase the scope of experiments. By determining the variations, it was desired to determine the most responsible CLAHE parameters for learning the pathologies with COVID-19. We experimented a brute force on the parameters of CLAHE, including clip-limit and disc size. According to the best performances on separating COVID-19 from healthy subjects, the five highest-performing CLAHE parameters were presented for each deep learning architecture.



Figure 2. A random CXR with COVID-19 (left) and its output with the best CLAHE parameters for DarkNet19, AlexNet, VGG16, and MobileNet, respectively

3. Experimental Results and Discussion

Transfer learning focuses on the architectures which update the pre-trained weights on large-scale datasets. There are many object-oriented programming languages that support transfer learning on interfaces and procedures. Python is the most common language with easy integration, GPU-based computational capabilities. Hence, we utilized Python language with Tensorflow and Keras libraries for training the CNN models. In this process, Anaconda's Spyder interface was preferred. Each training was conducted using Intel Core i7-10750H CPU (2.60 GHz) and Nvidia RTX 2060 Graphics card in terms of hardware.

3500 Healthy CXR images and 3615 COVID-19 CXR images were trained for different CLAHE parameters with AlexNet, MobileNet, VGG16, and DarkNet19 models.

We experimented 71 combinations for various disk size and clip-limit values of CLAHE parameters. The most successful five disk size and clip-limit values were stored for each deep learning model among the entire achievements. Figure 3 indicates the determination procedure for CLAHE on transfer learning with different pre-trained architectures. COVID-19 and healthy CXR images were preprocessed using the best five CLAHE parameters, and the dataset was rearranged according to different contrast values. In the training of the diagnosis model, the dataset is divided into 80% training and 20% testing folds, the batch size value is 32, and the epoch number is 50. An early stopping algorithm was triggered to prevent overfitting during the learning of the deep learning architecture. The CLAHE parameters evaluated for each pre-trained architecture and the best five achievements are presented in Table 1. Figure 2 depicts the enhanced CXRs with the best CLAHE parameters for DarkNet19, AlexNet, VGG16, and MobileNet.

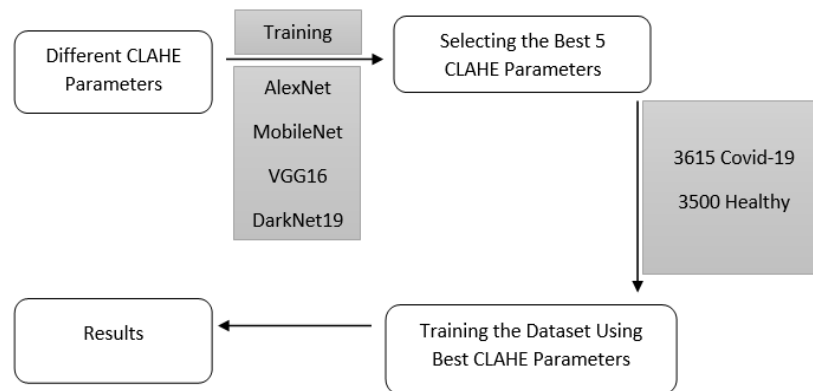


Figure 3. CLAHE Parameters selection procedure

Table 1. Comparison of classification performances for CLAHE parameters on each CNN model

	Disk Value	Clip Limit Value	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
<i>DarkNet19</i>	8	0.1	0.89227	0.90162	0.89227	0.89155
	4	0.4	0.90070	0.91511	0.90070	0.89993
	8	0.6	0.92319	0.92849	0.92319	0.92299
	16	0.7	0.94239	0.94283	0.94239	0.94238
	112	1	0.95176	0.95447	0.95176	0.95166
<i>AlexNet</i>	4	0.1	0.91216	0.91581	0.91216	0.91194
	8	0.1	0.84118	0.87389	0.84118	0.83777
	56	0.1	0.85151	0.87877	0.85152	0.84903
	28	0.5	0.93724	0.93770	0.93724	0.93723
	56	0.8	0.83794	0.87431	0.83794	0.83360
<i>MobileNet</i>	28	0.4	0.82763	0.82872	0.82763	0.82743
	28	0.6	0.80468	0.80570	0.80468	0.80444
	32	0.7	0.81827	0.82020	0.81827	0.81790
	28	0.5	0.81358	0.81701	0.81358	0.81320
	8	0.9	0.77986	0.78647	0.77986	0.77835
<i>VGG16</i>	4	0.1	0.95550	0.95619	0.95550	0.95550
	28	0.1	0.95410	0.95460	0.95410	0.95408
	8	0.2	0.89602	0.90940	0.89602	0.89506
	56	0.2	0.95878	0.95955	0.95878	0.95876
	8	0.3	0.88852	0.90031	0.88852	0.88780

Early diagnosis of diseases with CAD systems has gained significant importance by analyses in terms of COVID-19. Consequently, developing novel image processing techniques, definition of model-based enhancement parameters, and proposing robust systems have become researchers' main focuses.

The studies for assessments of COVID-19 and using automatized techniques for abnormality detection within various diagnostic tools became very important to early diagnosis. Whereas high classification performances for diagnosis of COVID-19 were reported using different deep learning models with complicated architectures, applying simple pre-processing stages to the evaluation process reached high enough achievements using pruned and simplistic architectures on transfer learning.

The main ideas are using the generated representations instead of many convolutional layers, transmitting feature learning within resembled instances with CLAHE, and adapting the capability of feature transferring between adjacent layers to separate healthy CXRs from COVID-19 pathology.

The state-of-the-art indicates that the pre-trained CNN architectures, pruned networks, and detailed feature learning stages have the ability to separate COVID-19 from healthy cases on CXRs. Using hybrid methods resembling the stage of deep architectures, pruning the complex pre-trained architectures with transfer learning, and proposing lightweight architectures with simplistic image processing approaches can advance the deep models. The experimented pruned pre-trained CNN architecture with CLAHE is a powerful trajectory to get high enough classification performances with easy-adaptable real-time applications over to the state-of-art. Using CLAHE for generating smoothed representation provided high classification performances using transfer learning on popular CNN architectures. Therefore, simplifying the deep architectures reduces the training time of the COVID-19

identification architectures and integrates the shallow architectures for even real-time applications in embedded systems.

Table 2. Comparison of relevant DL-based COVID-19 disease detection studies in terms of algorithms and performances

Related Works	Preprocessing	Model	Covid-19 Sample	Healthy Sample	Accuracy (%)
<i>Narin et al. [32]</i>	-	ResNet50	50	50	98.00
<i>Castiglioni et al. [33]</i>	-	ResNet10	250	250	80.00
<i>Haghanifar [34]</i>	HE, CLAHE, Segmentation (U-NET)	DenseNet121	400	3000	98.68
<i>Das et al. [35]</i>	-	InceptionNet v3	50	50	97.00
<i>Saha et al. [36]</i>	-	EMCNet (VGG16)	2300	2300	98.91
<i>This study</i>	CLAHE (Disk:112, Clip_limit:1)	DarkNet19	3615	3500	95.176
	CLAHE (Disk:28, Clip_limit:0.5)	AlexNet	3615	3500	93.724
	CLAHE (Disk:28, Clip_limit:0.4)	MobileNet	3615	3500	82.763
	CLAHE (Disk:56, Clip_limit:0.2)	VGG16	3615	3500	95.878

Table 2 presents the comparison of our study with the deep learning algorithms developed for COVID-19 binary classification diagnosis. Narin et al. used 50 healthy and 50 COVID-19 CXRs for training and testing of ResNet50 [9]. They applied cross validation method with in the training of pre-trained model and achieved an accuracy rate of 98% [32]. Castiglioni et al. presented a completely different approach on own dataset, including 250 COVID-19 cases and 250 healthy images. The ResNet10 model [9] was trained with an accuracy rate of 80% on their limited CXR dataset [33]. Haghanifar et al. analysed a total number of 10380 images from 780 COVID-19, 5000 healthy, and 4600 NIH CXR-14 dataset. The contrast of the images was adjusted using histogram equalization thereby making the mass and nodules more prominent using CLAHE algorithm. The semantic segmentation was applied with U-Net on enhanced CXRs, so that the lung lobes were detected from the image and segmented. They proposed own architecture, the COVID-CXNet model which is built from the CheXNet-based model and is composed of 431 layers about 7M parameters. The advantage of the architecture is reducing trains time by high speed. On the other hand, it was created from 5 convolution layers and fully connected layers on a limited number of CXRs with COVID-19 and reported an accuracy rate of 96.72%. The best achievements for healthy and 400 COVID-19 CXRs were 98.68% and 94.00% for accuracy and f1-score, respectively. Their proposal emphasized too complicated with segmentation procedure, CLAHE on segmented lung lobes, and hybrid deep learning architecture [34]. Das et al. proposed a modified version of the InceptionNet v3 model in their study. Due to the lack number of COVID-19 CXRs, InceptionNet v3 model on ImageNet weights was re-trained by aiming to prevent overfitting with its architectural complicated architecture. Consequently, they reached classification performances on limited testing CXRs (50 COVID-19 and 50 healthy) with rates of 97.00%, 94.00%, and 100% for accuracy, sensitivity, and specificity on InceptionNet v3, respectively [35]. Saha et al. utilized CNN as feature learning and conventional machine learning classifiers (random forest, support vector machine, decision tree, and AdaBoost) to classify COVID-19 cases. A total number of 2300 (from different sources) CXRs with COVID-19 and 2300 healthy CXRs were analysed in the training of CNN. Their proposal, EMCNet, was inspired by the VGG-16 architecture with the advantages of transfer learning. The highest classification performances for binary classification were an accuracy rate of 98.91%, precision rate of 100%, recall rate of 97.82% and f1-score 0.9889. In their analysis, the accuracy rate was maximized by using conventional machine learning classifiers by stated a different way in classification on the advanced joint use of features extraction by deep learning [36].

The common point and main disadvantage of all studies is that they used a low number of CXRs with COVID-19. Moreover, using raw CXRs has no ability to assess abnormality in common lung diseases. Therefore, it is not possible to define a standardized in the clinical validity. The proposal analysed a large number of CXRs with COVID-19, homogenous distribution of binary cases, and enhanced abnormalities related to the COVID-19. The proposal reached the highest classification accuracy with rate of 95.878 using VGG16 architecture.

3. Conclusions

Processing medical images with Deep Learning has become very popular in recent years. Its use is increasing daily due to its high performance and easy adaptability for classification in various fields, even medical image processing. Deep Learning includes many parameters originated from the inspired by an advanced neural network structure. Resultant to its high performance in the classification of medical images, it is used to classify many diseases. Although many measures force the worldwide effects of COVID-19 (SARS-CoV-2) disease as a pandemic, the variants of COVID-19 disease have not been prevented. Under these circumstances, the necessity and the success of early diagnosis of COVID-19 progression are in direct proportion for treatments. In this case, the importance of early detection systems emerges.

The main contribution of the paper is adapting simplistic CNN architectures with the enhanced medical images applying CLAHE for classification of healthy CXRs and CXRs with COVID-19. Moreover, utilizing updated large-scale COVID-19 CXRs (3615 cases) proves the clinical availability of the proposal on defined parameters with CNN.

Conflict of Interest Statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- [1] S. Jaeger *et al.*, "Automatic Tuberculosis Screening Using Chest Radiographs," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 33, no. 2, pp. 233–245, 2014. doi:10.1109/TMI.2013.2284099
- [2] A. A. El-solh, C. Hsiao, S. Goodnough, J. Serghani, and B. J. B. Grant, "Predicting active pulmonary Tuberculosis Using an Artificial Neural Network," *Chest*, vol. 116, no. 4, pp. 968–973, 1999. doi:10.1378/chest.116.4.968
- [3] M. E. H. Chowdhury *et al.*, "Can AI Help in Screening Viral and COVID-19 Pneumonia?," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132665–132676, 2020. doi:10.1109/ACCESS.2020.3010287
- [4] I. D. Apostolopoulos and T. A. Mpesiana, "Covid-19: automatic detection from X-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks," *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 43, no. 2, pp. 635–640, 2020. doi:10.1007/s13246-020-00865-4.
- [5] G. Litjens *et al.*, "A survey on deep learning in medical image analysis," *Medical Image Analysis*. vol.42, pp. 60–88, 2017, doi: 10.1016/j.media.2017.07.005
- [6] S. Rajaraman, S. Sornapudi, M. Kohli, and S. Antani, "Assessment of an ensemble of machine learning models toward abnormality detection in chest radiographs," in *Proc. of 41st Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2019, 23-27 July 2019, Berlin, Germany [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856715>. [Accessed: 8 May 2022].
- [7] R. Hooda, A. Mittal, and S. Sofat, "Lung segmentation in chest radiographs using fully convolutional networks," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.27, pp.710– 722, 2019. doi:10.3906/elk-1710-157
- [8] P. Y. Simard, D. Steinkraus, and J. C. Platt, "Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis," in *Proc. of 7th Int. Conference on Document Analysis and Recognition (Icdar) 2003. 6 Aug. 2003, Edinburgh, UK* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2003.1227801>. [Accessed: 8 May 2022].
- [9] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition," *IEEE*, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324, 1998. doi:10.1109/5.726791
- [10] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, pp. 436–444, May 2015. doi:10.1038/nature14539
- [11] V. Nair and G. E. Hinton, "Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines," in *Proc. of ICML'10: 27th International Conference on Machine Learning*, June 21-24, 2010, Haifa, Israel [Online]. Available: Toronto University, <http://www.cs.toronto.edu/~fritz/absps/reluICML.pdf>. [Accessed: 8 May 2022].
- [12] D. C. Cireşan, U. Meier, J. Masci, L. M. Gambardella, and J. Schmidhuber, "Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification," in *Proc. of IJCAI'11: the 22th international joint conference on Artificial Intelligence*, vol. 2, July 2011, Barcelona Catalonia, Spain, pp. 1237–1242, [Online]. Available: Acm Digital Library, <https://doi.org/10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-210>. [Accessed: 8 May 2022].

- [13] G. E. Hinton, N. Srivastava, A. Krizhevsky, I. Sutskever, and R. R. Salakhutdinov, "Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors", *arxiv.org*, Jul. 3, 2012. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1207.0580>. [Accessed: May 8, 2022].
- [14] M. D. Zeiler and R. Fergus, "Visualizing and Understanding Convolutional Networks," in *Proc. of 13th European Conference of Computer Vision – ECCV 2014*, 2014, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, T. Tuytelaars, Eds. Berlin: Springer, vol. 8689, pp. 818–833.
- [15] T. Rahman, M. Chowdhury, and A. Khandakar, "COVID19 Radiography Database", *kaggle.com*, Oct. 3, 2019. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/tawsifurrahman/covid19-radiography-database>. [Accessed: May 8, 2022].
- [16] R. Caruana, "Multitask Learning," *Machine Learning*, vol. 28, no. 1, pp. 41–75, 1997. doi:10.1023/A:1007379606734
- [17] S. Thrun, "Is Learning The n-th Thing Any Easier Than Learning The First?," in *Proc. of Advances in Neural Information Processing Systems 8, NIPS*, Denver, CO, USA, November 27-30, 1995, D. S. Touretzky, M. C. Mozer and M. E. Hasselmo, Eds. United States: MIT Press, pp. 640–646, 1996.
- [18] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L. Li, K. Li, and L. Fei-fei, "ImageNet : a Large-Scale Hierarchical Image Database," in *Proc. of 2009 IEEE Conference of Computer Vision Pattern Recognition.*, 20-25 June 2009, Miami, Florida, [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848>. [Accessed: 8 May 2022].
- [19] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84–90, May 2017. doi:10.1145/3065386
- [20] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition," *arxiv.org*, Sep. 4, 2014. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1409.1556>. [Accessed: May 8, 2022].
- [21] S. Han, H. Mao, and W. J. Dally, "Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding", *arxiv.org*, Oct. 1, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1510.00149>. [Accessed: May 8, 2022].
- [22] A. G. Howard *et al.*, "MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications", *arxiv.org*, Apr. 17, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1704.04861>. [Accessed: May 8, 2022].
- [23] J. Redmon and A. Farhadi, "YOLO9000: Better, Faster, Stronger.", *arxiv.org*, Dec. 25, 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1612.08242>. [Accessed: May 8, 2022].
- [24] M. Lin, Q. Chen, and S. Yan, "Network In Network", *arxiv.org*, Dec. 16, 2013. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1312.4400>. [Accessed: May 8, 2022].
- [25] Y. Li, W. Wang, and D. Yu, "Application of adaptive histogram equalization to x-ray chest images," in *Proc. of the Second International Conference on Optoelectronic Science and Engineering '94*, 15-18 August 1994, Beijing, China, [Online]. Available: SPIE Digital library, <https://doi.org/10.1117/12.182056>. [Accessed: 8 May 2022].
- [26] R. A. Hummel, "Image enhancement by histogram transformation," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 6, no. 2, pp. 184–195, Apr. 1977. doi:10.1016/S0146-664X(77)80011-7
- [27] R.A. Hummel, "Histogram modification techniques," *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 4, no. 3, pp. 209–224, Sept. 1975. doi:10.1016/0146-664X(75)90009-X
- [28] D.J. Ketcham, "Real-time image enhancement techniques," *Image Processing*, vol. 74, pp. 120–125, 1976. doi:10.1117/12.954708
- [29] S.M. Pizer, "Intensity mappings for the display of medical images.," *Functional mapping of organ systems and other computer topics.*, pp. 205–217, 1981. doi:10.1016/0146-664X(81)90006-X
- [30] K. Zuiderveld, *Graphics Gems IV: Contrast limited adaptive histogram equalization*, San Diego, CA, United States: Academic Press Professional, pp. 474–485, 1994.
- [31] S. M. Pizer, R. E. Johnston, J. P. Ericksen, B. C. Yankaskas, and K. E. Muller, "Contrast-limited adaptive histogram equalization: speed and effectiveness," in *Proc. of the First Conference on Visualization in Biomedical Computing*, 1990, 22-25 May 1990, Atlanta, GA, USA, [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/VBC.1990.109340>. [Accessed: 8 May 2022].
- [32] A. Narin, C. Kaya, and Z. Pamuk, "Automatic detection of coronavirus disease (COVID-19) using X-ray images and deep convolutional neural networks," *Pattern Analysis and Applications.*, vol. 24, no. 3, pp. 1207–1220, 2021. doi:10.1007/s10044-021-00984-y
- [33] F. S. Isabella Castiglioni *et al.*, "Artificial Intelligence Applied on Chest X-Ray Can Aid in the Diagnosis of Covid-19 Infection", *medrxiv.org*, Apr. 10, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1101/2020.04.08.20040907>. [Accessed: May 8, 2022].

[34] A. Haghanifar, M. M. Majdabadi, and S. Ko, "COVID-CXNet: Detecting covid-19 in frontal chest x-ray images using deep learning", *arxiv.org*, Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2006.13807>. [Accessed: May 8, 2022].

[35] D. Das, K. C. Santosh, and U. Pal, "Truncated inception net: COVID-19 outbreak screening using chest X-rays," *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, vol. 43, no. 3, pp. 915–925, Sep. 2020. doi:10.1007/s13246-020-00888-x

[36] P. Saha, M. S. Sadi, and M. M. Islam, "EMCNet: Automated COVID-19 diagnosis from X-ray images using convolutional neural network and ensemble of machine learning classifiers," *Informatics in Medicine Unlocked*, vol. 22, p. 100505, 2021. doi:10.1016/j.imu.2020.100505

* Bu makale 5th International Conference on Engineering Technologies in Konya/TURKEY (ICENTE 2021) isimli konferansta sunulmuş bildirinin genişletilmiş halidir.

This is an open access article under the CC-BY license



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Investigation of MOF-303 – Active Carbon Mixtures for Passive Thermal Management Applications

A. Alperen Günay^{a,b}

Submitted: 11.05.2022 Revised: 29.08.2022 Accepted: 29.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705020

ABSTRACT

Keywords: Heat sink, metal-organic framework, active carbon, desorption, thermal management

^{a,*} The University of Tokyo,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
113-8656 - Tokyo, Japan
Orcid: 0000-0002-2013-9101
e mail: gunaya@metu.edu.tr

^b Middle East Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
06800 - Ankara, Türkiye

*Corresponding author:
gunaya@metu.edu.tr

Small sized electronics and IoT devices can be thermally managed through sorbent heat sinks if economical and efficient solutions are developed. Here, we investigate a mixture of metal-organic frameworks and active carbon to lower the costs and increase the water uptake capacity. The mismatch on particle size and physical properties between the two sorbents lead to favorable desorption characteristics while also cutting down on costs. We spray coat the mixture onto copper substrates to obtain passive sorbent heat sinks. Results of this study display an $\approx 30\%$ enhancement in the water uptake capacity and an $\approx 10\%$ improvement in the thermal performance for the heat sinks coated with the mixture when compared to the only MOF case. The enhancement is attributed to fast desorption in the early phases of operation and to slow desorption in the steady state. Furthermore, we also study the coating microscopically through infrared imaging and observe that the carbon is colder than the MOF particles due to the lower thermal conductivity it possesses. This study not only demonstrates an economic way of enhancing the cooling performance of sorbent heat sinks but it also serves as a guideline for the design of desorption driven thermal management strategies.

MOF-303 - Aktif Karbon Karışımlarının Pasif Isı Yönetimi Uygulamaları için İncelenmesi

ÖZ

Küçük boyutlu elektronik ve nesnelerin interneti cihazlarının ısı yönetimleri ekonomik ve yüksek verimli çözümler geliştirilmesi halinde desorpsiyon temelli ısı emiciler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bu tarz sistemlerin maliyetlerini düşürmek ve su alım kapasitelerini artırmak amacıyla metal-organik çerçeve - aktif karbon karışımları incelenmektedir. İki emici arasındaki parçacık boyutu ve fiziksel özelliklerdeki farklılıklar uygun desorpsiyon özelliklerine yol açarken, aynı zamanda maliyetleri de düşürmektedir. Isıl yönetim uygulamaları için pasif desorpsiyon temelli ısı emiciler elde etmek amacıyla üretilen MOF-karbon karışımı bakır yüzeylere püskürtülmüştür. Elde edilen ısı emiciler test edilmiş olup; elde edilen sonuçlar yalnızca MOF temelli kaplama durumuna kıyasla MOF-karbon bazlı ısı emicilerin su alım kapasitesinde $\approx 30\%$ 'luk bir iyileşme ve termal performansta $\approx 10\%$ 'luk bir iyileşme elde edildiğini göstermektedir. Bu iyileşme, operasyonun erken aşamalarında hızlı desorpsiyona, ve sabit hal durumunda yavaş desorpsiyona atfedilmektedir. Ayrıca, kaplamalar kızılötesi görüntüleme yoluyla mikroskopik olarak da incelenmiş ve karbonun sahip olduğu daha düşük termal iletkenlik nedeniyle MOF parçacıklarından daha soğuk olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma sadece desorpsiyon temelli ısı emicilerin soğutma performanslarını arttırmanın ekonomik bir yolunu göstermekle kalmayarak, aynı zamanda desorpsiyon odaklı termal yönetim stratejilerinin tasarımı için bir kılavuz haline de gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı emici, metal-organik çerçeve, aktif karbon, desorpsiyon, ısı yönetim

1. Giriş (Introduction)

Teknolojide son birkaç yıldır nanoteknoloji temelli büyük gelişmeler meydana gelmektedir[1]. Bu gelişmeler elektronik cihazların performansını ciddi ölçüde artırırken, belirli mühendislik sorunlarını da beraberinde getirmiştir[2]. Cihazların küçülmesi özellikle ısı yönetim açısından ciddi zorluklar ortaya koymaktadır[3]. Bu bağlamda, literatürde birçok ısı yönetim tekniği geliştirilmiş ve denenmiştir. Bunlara örnek olarak ısı emiciler[4], faz değişimli sistemler[5, 6], hava akımına maruz bırakılma [7] ve radyasyon yoluyla soğutma [8] gösterilebilir. Bu tekniklerden bir veya birkaçının beraber kullanımı sonucunda ısı yönetim performansında çok büyük gelişmeler görülebilmektedir. Örneğin, ısı emiciler durgun hava koşulları altında çok verimli soğutucular değillerdir[9]. Ancak, bir akımla birleştirildiklerinde çok yüksek ısı transferi değerleri gösterebilirler[10]. Bu nedenle, sistemlerin ihtiyaçları doğrultusunda detaylı bir ısı yönetim metot araştırması gerçekleştirilmelidir.

Önceki paragrafta belirtilen yöntemlerin her biri belirli şartlar altında büyük avantaj gösterebilir de, ne yazık ki her biri her sistem için uygun değildir. Isı emiciler belirli modifikasyonlara tabi tutulmadıkları sürece durgun hava altında kullanılmaları yüksek verim göstermemektedir[11]. Faz değişimli sistemlerde soğutma için genellikle buharlaşma [12] ve kaynama [13] kullanılmaktadır. Bu sistemler de fazını değiştirebilecekleri bir sıvı rezervuarına ve pompalama sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle, küçük sistemler için kullanımları ideal değildir[13]. Ayrıca, sıvıyla temas belli bir süre sonra korozyon gibi sonuçları da beraberinde getirmektedir ve uzun süreli kullanım için ideal değildir[13]. Akım bazlı sistemlerde de ekstra bir pompaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu da, faz değişimli sistemlere benzer olarak, küçük sistemler için uygun değildir[14]. Son olarak, radyasyon bazlı soğuma sadece görece yüksek sıcaklıklar (>60 °C) için büyük getirileri sisteme sunmaktadır[15]. Bu nedenle, mesken elektronik cihazları için farklı çözümler bulunması gerekmektedir.

Bahsedilen ısı yönetim yöntemlerinden ısı emiciler ve radyasyon bazlı soğuma teknikleri pasif olarak adlandırılabilir, yani uygulama için ek bir enerjiye gereksinim duyulmamaktadır[16]. Isı yönetimini pasif yöntemlerle gerçekleştirme fikri bilim adamları için çok çekici ve araştırılmaya değer bir yöntem olarak gözlemlenmiştir[17]. Bu nedenle, son yıllarda küçük cihazların pasif yöntemlerle soğutulması üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır[5, 18]. Son yıllarda, emici malzemelerin atmosferden su çekmeleri ve çektikleri bu suyu bırakarak bir desorpsiyon bazlı soğuma elde edilmesi fikri de çalışılmıştır[19]. Silika jellerin soğutma için kullanımı uzun yıllar önce ortaya atılmış ve sistemin verimli çalışabilmesi için birkaç farklı prosesten oluşması gerektiği belirtilmiştir[20]. Sonraki çalışmalar da dikkate alındığında, silika jellerin hem düşük ısı iletkenlik kapasitesine hem de düşük su hasat kapasitesine sahip olmaları, randımanlı kullanımlarının önünde engel teşkil etmektedir[21]. Buna ek olarak, aktif karbon bazlı soğutucu sistemler de önerilmiş; ancak bunlar da genel olarak etil alkol ve benzeri akışkanlar için kullanılmışlardır[21]. Aktif karbonun düşük su hasat kapasitesi atmosferden su çekebilmesinin önündeki en büyük engeldir[22]. Belirli çalışmalarda zeolitler de bu bağlamda kullanılmış olsalar da gereken yüksek desorpsiyon sıcaklıkları nedeniyle çok verimli sistemler elde edilememiş, ve bu nedenle bilim insanları farklı malzeme ve yöntem arayışlarına girmişlerdir[19].

Son yıllarda, desorpsiyon bazlı soğuma için metal-organik çerçeve (MOF) malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler gözenek yapıları ve hidrofiliklikleri nedeniyle su hasadı için eşsiz avantajlar sunmaktadırlar[23]. Wang vd. bu fikri su çekme kapasitesi yüksek olan krom bazlı MIL-101 kullanarak elektronik cihazlar için denemiş ve soğutma performansında MOF kaplanmamış ısı emicilere göre %36'lık bir artış gözlemlemiştir[24]. Günay vd. benzer bir fikri aynı malzeme kullanılarak termoelektrik cihazlar için kullanmış ve termoelektrik güç üretiminde düşük sıcaklıkta (≈ 33 °C) normal bakır yüzeylere göre %300'lük bir artış gözlemlemiştir[25]. Her iki çalışmada da, MOF-101'in sunduğu yüksek radyasyon yayınlığının desorpsiyon davranışlarıyla birleşmesi böyle büyük artışlara neden olmuştur. Gelgelelim, birçok metal-organik çerçeve malzemenin üretimi meşakkatli ve pahalı bir süreci de beraberinde getirmektedir[26]. Bu nedenle, alternatif çözüm arayışları da bilimsel olarak önem teşkil etmektedir. Özellikle, su hasat kapasitelerinin ve desorpsiyon oranlarının artırılması bu tür uygulamalar için elzemdir ve araştırılmalıdır.

Metal-organik çerçevelerin su hasat kapasitelerinin artırılması amacıyla birçok farklı metot incelenmiştir. Üretim esnasında bağların oluşması engellenerek kusurlar yaratılmış ve bu kusurların su molekülleriyle doldurulabildiği tespit edilmiştir[27]. Bir çalışmada, Palash vd. tarif içinde metal

kaynağı olarak kullanılan solüsyonları belli metal iyonlarıyla katkılamak suretiyle düşük-orta nem aralıklarında (%10-70) su hasat kapasitesini arttırmayı başarmıştır [28]. Ayrıca, interfazlarda gözenek oluşturmak için MOF malzemeler başka malzemelerle kompozitlenerek de atmosferden su çekme kapasiteleri artırılmıştır[29]. Ancak, bu teknikler MOF üretimindeki ekonomik sorunlara çözüm bulamamaktadır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon sürecindeki su hasat dinamiklerini değiştirebilecek bir başka yöntem de değişik parçacık boyutlarının ve fiziksel özelliklerinin birlikte kullanımınıdır[30]. Farklı parçacık boyutlarındaki partiküllerin bir araya gelmesi adsorpsiyon açısından büyük avantajları beraberinde getirmekte, özellikle de adsorpsiyon hızının artırılmasına yardımcı olmaktadır[31]. Küçük boyutlu parçacık büyük boyutlunun etrafında yüzey alanını arttıracığından, büyük boyutlu parçacıklar tarafından emilemeyen su küçük boyutlu parçacıklar tarafından emilebilecektir. Bu da adsorpsiyon hızında ve hasat kapasitesinde artışa neden olabilmektedir[32]. Bu olguyu temel olan kaplamaların üretilmesi emici bazlı ısı yönetim yöntemlerinde performans artışına yol açabilecektir.

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında üretilen bir metal-organik çerçeve ile piyasadan temin edilen aktif karbonun karışımının soğutucu performansını nasıl etkilediği araştırılmaktadır. MOF olarak alüminyum bazlı MOF-303 seçilmiştir. MOF-303 metal olarak görece daha ucuz olan alüminyum kullanması, ve su bazlı yöntemlerle üretilmesinden ötürü diğer MOF'lara göre çok daha ucuzdur[33, 34]; ancak hala yüksek sayılabilecek bir su hasat performansı göstermektedir. Üretilen MOF ile temin edilen aktif karbonun malzeme özellikleri deneysel yöntemlerle belirlenmiş, ve MOF'un hem su hasat kapasitesi hem de parçacık boyutu olarak aktif karbona göre çok daha yüksek değerler gösterdiği belirlenmiştir. Her iki malzemedeki kütlece eşit olarak solüsyonlar hazırlanmış ve spreyleme yöntemiyle endüstriyel bakır malzemelerin üzerine kaplanmıştır. Üretilen ısı emiciler bir iklimlendirme kabininin içinde adsorpsiyon, desorpsiyon ve ısı akışı nezdinde değerlendirilmiş ve karışımın her iki malzemeye göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Kaplama herhangi bir kaplama olmayan bakıra göre ısı akışında %33'lük bir artış gösterirken, MOF-303 bazlı kaplamaya göre yaklaşık %10'luk bir artışı beraberinde getirmiştir. Son olarak, aktif karbonun ve MOF parçacıklarının mikro düzeyde nasıl davrandıklarının görülmesi amacıyla mikro lens entegre edilmiş termografi testleri gerçekleştirilmiş ve ısı transferinde artışa yol açan mekanizmalar belirlenmiştir. Bu mekanizmalar uygulamanın erken kısımları için hızlı desorpsiyon, daha sonraki kısımlar içinse yavaş desorpsiyon olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada sunulan sonuçlar atmosferden su hasat edebilen pasif ısı emicilerin ekonomik bir şekilde verimlerinin artırılmasının ötesine geçerek malzemelerin hangi özelliklerinin sistemde ne rol oynadıklarını da gösteren bir tasarım kılavuzu ortaya koymuştur.

2. Yöntem (Method)

2.1. Parçacık üretimi (Particle Synthesis)

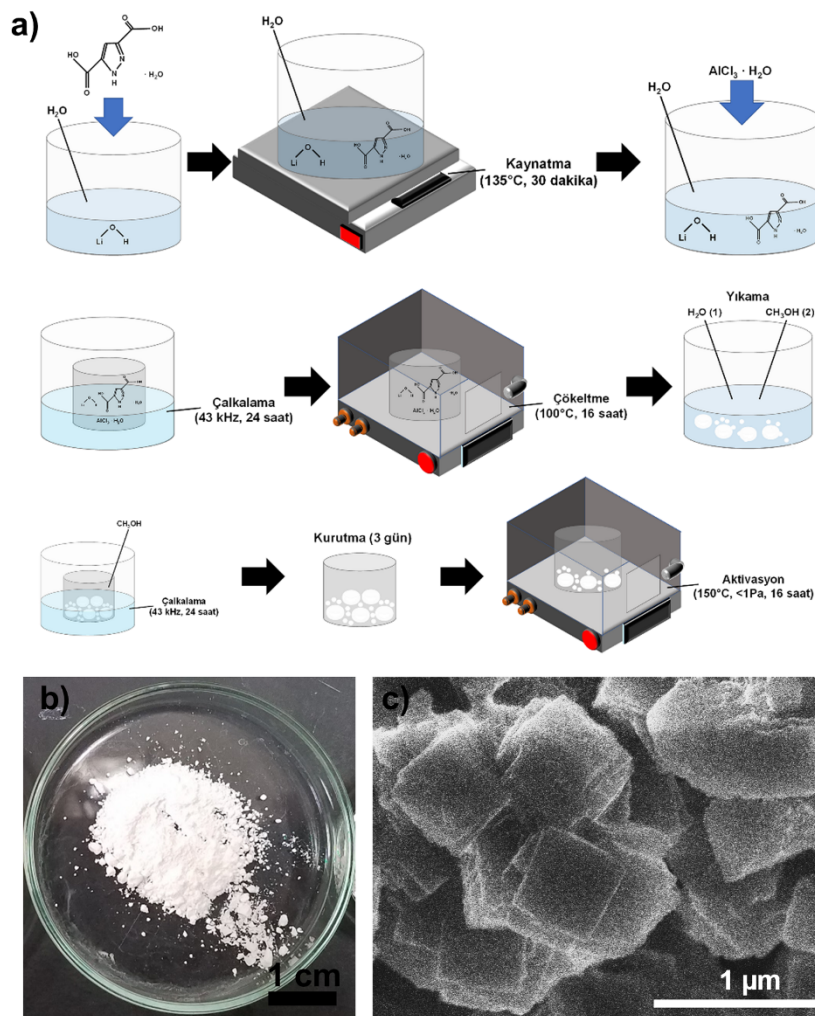
Diğer metal organik çerçeve yapılarına göre hem daha ucuz hem de belli konularda daha avantajlı olduğu literatürde belirtilmiş olan MOF-303 üretimi için literatürde belirtilmiş olan üretim teknikleri kullanılmıştır ([34], Şekil 1a). 15 gram 3,5 pirazol dikarboksilik asit monohidratı (Sigma Aldrich #303180-11-2) 1.5 kilogram saf su (Sigma-Aldrich #7732-18-5) ve 75 g Lityum Hidroksit (Sigma-Aldrich #1310-65-2) karışımından oluşan bir çözeltinin içinde çözündürülmüştür. Elde edilen çözelti öncelikle 135°C'de 30 dakika boyunca ısıtılmış, daha sonra içine 22.5 gram Alüminyum Klorit Heksahidrat (Sigma-Aldrich #7784-13-6) eklenmiştir. Elde edilen çözelti 43 kHz'de 24 saat boyunca çalkalanmıştır. Çalkalanan çözelti homojen ısı dağılımı özelliğine sahip bir fırının içinde 100°C'de 16 saat boyunca tutulmuştur. Elde edilen çökelti sırasıyla saf su ve metil alkol (Sigma-Aldrich #67-56-1) ile yıkanmış ve metil alkol içerisinde 43 kHz'de 24 saat boyunca tekrar çalkalanmıştır. Elde edilen çözelti normal ortamda 3 gün boyunca kurumaya bırakılmış ve son olarak yüksek vakumlu bir fırında (<1 Pa) 150°C'de 16 saat tutularak aktive edilmiştir. Üretim sonucu 10 gram civarı toz elde edilmiştir (Şekil 1b). Elde edilen tozların elektron mikroskopu analizleri kübik yapıda olduklarını ortaya koymuştur (Şekil 1c). Aktif karbon üretimi gerçekleştirilmemiş olup karbon kimyasal tedarikçilerden temin edilmiş ve karakterize edilmiştir (Sigma-Aldrich #7440-44-0).

2.2. Kaplama yapımı (Application of the coating)

Kaplamalar için spreyleme yöntemi kullanılmıştır. Literatürde kullanılan kaplama tarifleri hem MOF-303 hem de aktif karbon için denenerek en iyi kaplamayı veren optimum bir tarif belirlenmiştir[25]. Eşit gramajda aktif karbon ve MOF-303 bir santrifüj içerisinde karıştırılmış ve daha sonra saf su ve etil alkolden oluşan bir çözeltinin içerisine eklenmiştir. Bu çözelti 43 kHz'de 45 dakika boyunca

çalkalanmış ve sonrasında içerisine bağlayıcı olarak sodyum silikat eklenmiştir. Bağlayıcıyı da içeren çözelti 43 kHz'de 60 dakika daha çalkalanmıştır. Elde edilen çözelti kütle olarak 1:4.80:4.80:19.32:60.70 (Sodyum Silikat:Aktif Karbon:MOF-303:Saf Su:Etil Alkol) oranındadır. Bu çözelti bir püskürtücünün içerisine taşınarak kaplama spreyi hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan sprey istenilen kaplama kalınlığı elde edilene kadar tedarikçilerden temin edilen endüstriyel (Nilaco #CU-113551) bakır yüzeylerin üzerine püskürtülerek ısı emiciler hazırlanmıştır. Bakır numunelerin kalınlığı 2 mm olarak seçilmiştir.

Karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, aktif karbon içermeyen bir çözelti de hazırlanmış ve sprey olarak hazırlanmıştır. Orijinal çözeltideki aktif karbon kadar MOF-303 daha eklenerek çözeltideki emici miktarı sabit tutulmuştur. Referans çözeltinin kütle oranı 1:9.60:19.32:60.70 (Sodyum Silikat:MOF-303:Saf Su:Etil Alkol) olarak belirlenmiştir. Aktif karbon için de bu oran aynıdır. Her iki tarz kaplamanın da çok yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğu görülmüştür.

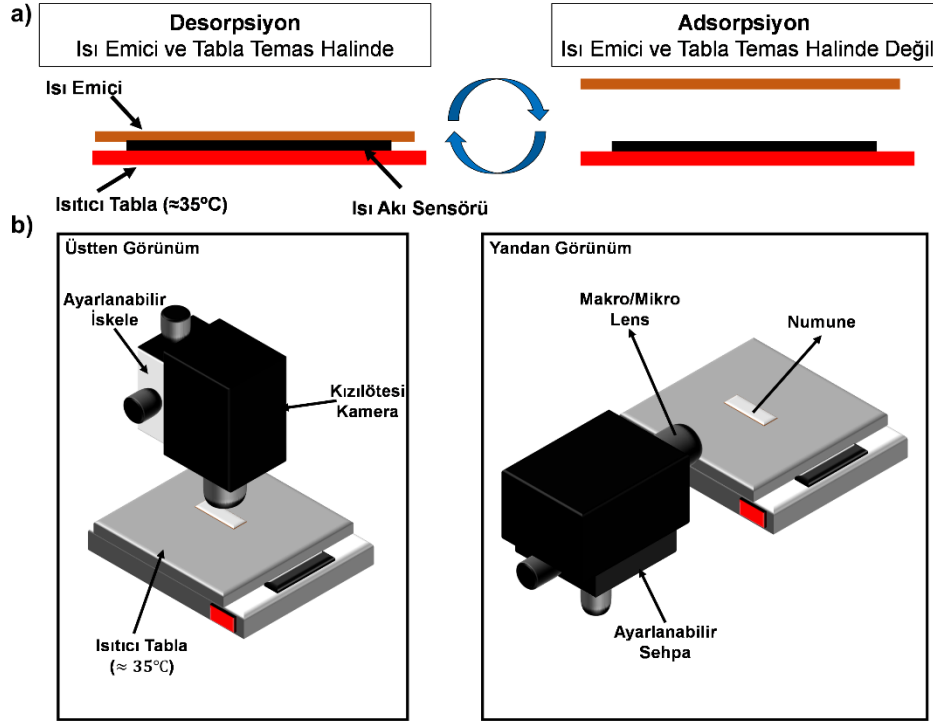


Şekil 1. a) MOF-303 sentez prosedürü, b) sentezlenmiş MOF-303 tozlarının görüntüsü, c) sentezlenmiş tozların elektron mikroskop görüntüsü ((a) MOF-303 synthesis procedure, (b) synthesized MOF-303 powders, (c) SEM image of the synthesized powders))

2.3. Deney düzeneği ve prosedürü (Experimental setup and procedure)

Deneylerde kullanılan kaplamaların su emme özelliklerine sahip olmalarından ötürü ortamın nem ve sıcaklık kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple, kaplamalar arasında adil bir karşılaştırma yapabilmek adına testler bir iklimlendirme kabini içinde gerçekleştirilmiştir. Isı transferi ve su hasadı testleri için kullanılan deney düzeneği önceki çalışmalarımızda detaylıca verilmiştir [25]. Deneyleri yapabilmek için, 0.1 mg ölçüm hassasiyetine sahip bir tartı iklimlendirme kabininin içine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Ayrıca, desorpsiyon testleri için de bir ısıtıcı tabla kabinin içine yerleştirilmiştir (Şekil

2a). İklimlendirme kabinindeki sıcaklık ve nem sabit değerlere ulaştıktan sonra içindeki su tamamen buharlaştırılmış olan (yüksek sıcaklıkta tutulmuş olan) ısı emiciler tartının içine yerleştirilmiş ve veri toplama işlemi başlatılmıştır. Önceden belirlenen süreye gelindiğinde su hasadını gerçekleştirilmiş olan ısı emici 35°C'de tutulan ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilmiş ve belirli aralıklarla veri toplanmıştır. Bu süreçte, ısı emici ile ısıtıcı yüzey arasında bir ısı akı sensörü de yerleştirilmiş ve ısı emici ile sıcak yüzey arasındaki ısı transferi karakteristikleri de deneysel olarak belirlenmiştir. Veriler aralıksız olarak toplanarak ısı transferinde artış meydana gelen bölgeler belirlenmiştir.



Şekil 2. a) Uygulama detayları, b) kızılötesi deneyler için kurulan deney düzeneği ((a) Details of the application, b) Experimental procedure for the IR experiments))

Isı transferi artışı ve sorpsiyon mekanizmalarının çalışabilmesi için yüksek hassasiyete sahip bir kızılötesi kamera da sisteme entegre edilmiştir. Sabit halde görüntüleme yapılarak belirli bölgelerdeki sıcaklık farklarını çalışmak suretiyle kaplamadaki aktif karbon ve MOF-303'ün rollerinin ayrı ayrı çalışılması hedeflenmiştir. Bu düzenek de Şekil 2b'de verilmiştir. Kızılötesi kamerayla hem tepeden hem de yandan görüntüleme yapılarak sistemdeki sıcaklık farkları çalışılmıştır. Son olarak, dinamik ışık saçınımı gibi deneysel karakterizasyon yöntemleri kullanılarak çalışmanın tabanını oluşturan varsayımlar temellendirilmeye çalışılmıştır.

3. Bulgular (Findings)

3.1. Malzeme karakterizasyonu (Material characterization)

Üretilen MOF-303 ve temin edilen aktif karbonun belli özellikleri uygulama öncesi deneysel olarak karakterize edilmiştir. MOF-303'ün elektron mikroskopunda incelenmesi sonucu kristal yapısının kübik olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hem MOF-303 hem de aktif karbon için dinamik ışık saçınımı (DLS) yöntemiyle parçacık boyut analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre aktif karbonun ortalama parçacık çapının (d_{AC}) ≈ 210 nm, MOF-303 ortalama parçacık çapının ise (d_{303}) ≈ 700 nm olduğu belirlenmiştir (Tablo 1). İki yapı arasındaki bu fark, değişik parçacık boyutlarına ve dağılımına sahip emici yapıların su hasat performanslarının farklılık göstereceğine dair hipotezimizi bu iki yapıyı kullanarak test edebileceğimizi temin etmektedir.

İki yapının tozları ayrıca yoğunluklarının belirlenmesi amacıyla helyum piknometresinde de test edilmiştir. Deneylerimiz sonucunda aktif karbon için literatürdeki değerlere paralel olarak (ρ_{AC}) 2080 kg/m³ değerine ulaşılmışken, MOF-303 için ise (ρ_{303}) bu değer 1670 kg/m³ olarak belirlenmiştir[25]. Ayrıca, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yöntemi kullanılarak tozların özgül ısı kapasiteleri de

hesaplanmıştır. Bu değerler aktif karbon için ($c_{p,AC}$) ≈ 850 J/kg·K ve MOF-303 için ($c_{p,303}$) ≈ 1150 J/kg·K olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu bulgular daha sonra ısı transferi mekanizmalarını ve iki malzemenin de bireysel rollerinin değerlendirilmesini anlamada büyük önem teşkil edecektir.

Tozların ısı iletim katsayılarının ölçülmesi elimizdeki deneysel düzeneklerle mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, yöntem kısmında belirtilen tarifler kullanılarak hem MOF-303 hem de aktif karbon için kaplamalar hazırlanmıştır. Bu kaplamaların lazer parlama tekniği (LFA) kullanılarak ısı difüzyon katsayıları belirlenmiş, daha sonra hali hazırda bilinen yoğunluk ve özgül ısı kapasiteleri bilgileri kullanılarak ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır ($k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p$). Analizler sonucunda aktif karbon için (k_{AC}) 0.63 W/m·K, MOF-303 için (k_{303}) 0.75 W/m·K değerlerine ulaşılmıştır. Son olarak, yüzeylerin radyasyona tepkilerini gözlemleyebilmek amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre (FTIR) kullanılarak kaplamaların geniş aralıklı kızılötesi yayınlıkları (ϵ) ölçülmüştür. Her iki kaplama için de bu değer 0.99 olarak belirlenmiştir. Bu değer yüksek olması ısı emicilerin radyasyon yoluyla soğumalarına olanak sağlayacak olup, her iki malzeme için de aynı olması da kızılötesi kamera yoluyla adil bir değerlendirme yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bağlayıcı sodyum silikatın kütesinin emici malzemeye göre yeterince küçük olmasından ötürü özellikleri yok sayılmıştır.

Tablo 1. Deneysel karakterizasyon sonucu elde edilen parametreler (Material properties obtained by experimental characterization)

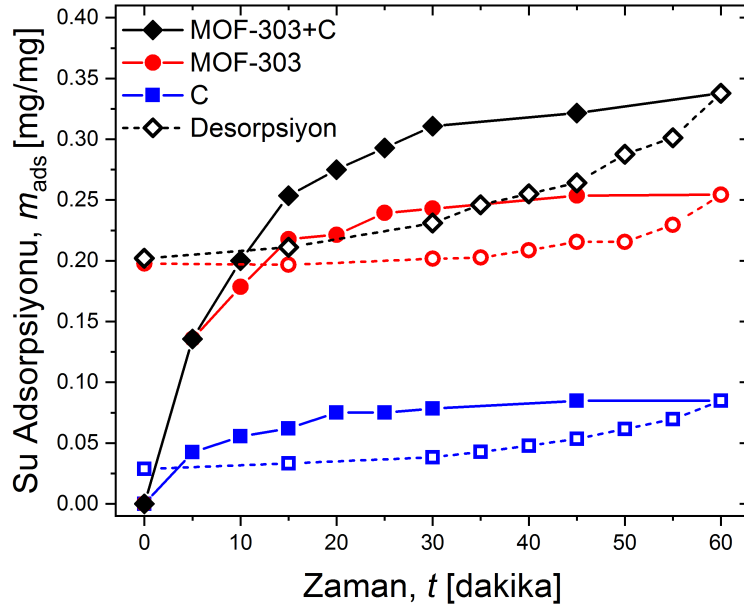
Parametre	Aktif Karbon	MOF-303	Yöntem
ρ (kg/m ³)	2080±45	1670±100	Helyum piknometresi
c_p (J/g·K)	850	1150	DSC
k (W/m·K)	0.63±0.02	0.75±0.25	LFA
δ (nm)	210±40	700±50	DLS
ϵ (-)	0.99	0.99	FTIR

3.2. Su hasadı (Water uptake)

Malzeme etkisini tarafsız ve adil olarak gözlemleyebilmek adına aynı parçadan kesilmiş olan endüstriyel bakırın üzerine eşit kütlede kaplamalar yapılmıştır. Kaplama yapılmadan önce kesilmiş olan bakır yüzeyler kütle ve yüzey kalitesi için incelenmiş ve farklar en aza indirilmiştir. Yöntem kısmında belirtilen tarifler kullanılarak hem MOF-303, hem aktif karbon, hem de ikisinin karışımı için aynı şartlar altında kaplamalar üretilmiştir. Kaplama kütleleri dikkatlice ölçülmüş ve eşit olmalarına dikkat edilmiştir (25 gram kaplama). Elde edilen kaplanmış ısı emici yüzeyler 22.5 °C ve %60 neme sahip bir ortamda test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Sonuçlar dikkatlice incelendiğinde MOF-303 ve aktif karbonun karıştırılması sonucu elde edilen kaplamanın hem aktif karbona hem de MOF-303'e göre çok daha yüksek adsorpsiyon gösterdiği görülmektedir. Karışım temelli kaplama 60 dakika sonunda ağırlığının yaklaşık %34'ü kadar atmosferik su hasadı gerçekleştirmiştir. Bu değerler MOF-303 temelli kaplama için yaklaşık %26 ve aktif karbon için yaklaşık %8.5 olarak ölçülmüştür. Bu artışa sebep olarak iki parçacık arasındaki hem boyut hem de değişik ısı iletim katsayısı ve difüzyon yeteneğinden kaynaklanan etkileşim gösterilebilir[30]. Doğunluğa ulaşmış MOF-303 tarafından emilemeyen su molekülleri MOF-303 arasında yerleşmiş olan aktif karbon molekülleri tarafından emilebilmekte ve bu bağlamda aktif karbon MOF-303'e atmosferden su adsorpsiyonu konusunda ek destek sağlayabilmektedir. Bu destek sayesinde MOF-303'ün 60 dakika sonunda hasat ettiği su miktarı artış göstermiştir. Bir diğer önemli nokta ise bu değer 60 dakika sonunda hala doyun değere ulaşmamış olmasıdır. Deneylere devam edilmiş ve 24 saat sonunda doyunluk değeri olarak %37.5'lük bir değer belirlenmiştir. Bu değer literatürde belirtilen %36'lık MOF-303 değerinden fazladır[25], ancak çok büyük bir artış değildir. Bunun sebebi olarak moleküller arasındaki boyut farklılıklarının temel olarak adsorpsiyon hızına etki etmesi ve kapasiteyi çok fazla arttıramaması gösterilebilir[35]. Su tutma kapasitesinin artırılması için karbon ve MOF değişik yöntemlerle yüksek sıcaklık altında tepkimeye sokulmalıdır[36]. Bu tarz uygulamalar bu çalışmanın amacı dâhilinde değerlendirilmemiştir.

Adsorpsiyon davranışlarındaki değişimlere ek olarak, kaplamaların desorpsiyon davranışları da incelenmiştir. Isı emicilerin soğutma kapasiteleri atmosferden hasat edilmiş suyun desorpsiyonu yoluyla artırılacaktır. Bu bağlamda, desorpsiyonun zamana bağlı değişimi büyük önem teşkil etmektedir[37]. Isı emicilerin çalışması öngörülen şartlar altında desorpsiyonun nasıl gerçekleşeceğini anlaşılabilmesi amacıyla, kaplanmış bakır yüzeyler 35°C'lik bir yüzeye yerleştirilmiş ve kütlelerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Ortam nemi ve sıcaklığı adsorpsiyon deneyleriyle aynı tutulmuştur. Şekil 3 dikkatlice incelendiğinde her üç kaplamanın da üstel fonksiyon normlarını takip ederek desorpsiyon yaptıkları gözlemlenmektedir. Buradaki önemli nokta desorpsiyonun ters olarak

çizildiği ve 60. dakikada başlatılarak zamanın geri doğru sarıldığı anlaşılmıştır. Grafik ters çevrildiğinde aslında adsorpsiyonla aynı şekilde bir davranış göstermektedir. Ancak, su hasadı 60. dakika sonunda elde edilen değerden başlayarak üstel bir şekilde düşüş gösterecektir. Ayrıca, desorpsiyon ne yazık ki adsorpsiyondan daha yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun sebebi olarak su buharının yüzeye bağ oluşturmalarının büyük parçacıklarda ve mezogözenekli malzemelerde oluşmuş bağların koparılmasına nazaran daha az enerjiye ihtiyaç duyması gösterilebilir[38]. Bu nedenle, desorpsiyon adsorpsiyondan bağımsız bir şekilde irdelenmeli ve veriler bu kavram göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir.



Şekil 3. Kaplamalar için elde edilen adsorpsiyon ve desorpsiyon dinamikleri (Adsorption/desorption dynamics of the coatings)

Daha önce de belirtildiği gibi, desorpsiyon da adsorpsiyon gibi üstel fonksiyon bazlı bir eğilim göstermektedir. Bu da desorpsiyonun özellikle erken zamanlarda ısı transferi için önemli olduğu anlamına gelmektedir. Erken zamanlarda su kütleindeki değişim oranı yüksek olacağı için soğutma kapasitesine olan katkı yüksek olacakken, denge haline yaklaşıldıkça bu eğim azalacağından soğutma kapasitesine yapılan etki oldukça azalacaktır. Bu olgu bir sonraki kısımda kapsamlıca değerlendirilecektir. Şekil 3'ten elde edilebilecek bir başka bulgu da MOF-303'ün denge değerlerine çok erken ulaşmasıdır. MOF-303'ün su hasat kapasitesi çalışılan aralıktaki nem ve sıcaklık değişimleriyle çok büyük değişiklik göstermediğinden, denge bir an önce kurulabilmektedir[34]. Aktif karbon içinse bu durum farklıdır. Aktif karbonda desorpsiyon düşüş göstermeye devam etmektedir. Ancak, karbonun su hasat kapasitesi düşük olduğu için bu desorpsiyonun soğutma kapasitesine katkısı düşük olacaktır. Gelgelelim, karbon ve metal organik çerçevenin karışımından oluşan kaplamaların yüksek su hasat kapasitesi ile yüksek desorpsiyonu birleştirdiği gözlemlenmiştir. Adsorpsiyonda olduğu gibi, malzemelerin farklılıklarından doğan getiriler desorpsiyonda da bu kaplamayı ön plana çıkarmıştır. Bu kaplama 60 dakika sonunda tuttuğu suyun neredeyse yarısını tekrar atmosfere göndererek yüksek bir desorpsiyon göstermiştir. Bu nedenle, ısı emici olarak diğer yüzeylere nazaran hem operasyon süresi hem de soğutma kapasitesi bakımından daha iyi bir kaplama olacağı öngörülmektedir.

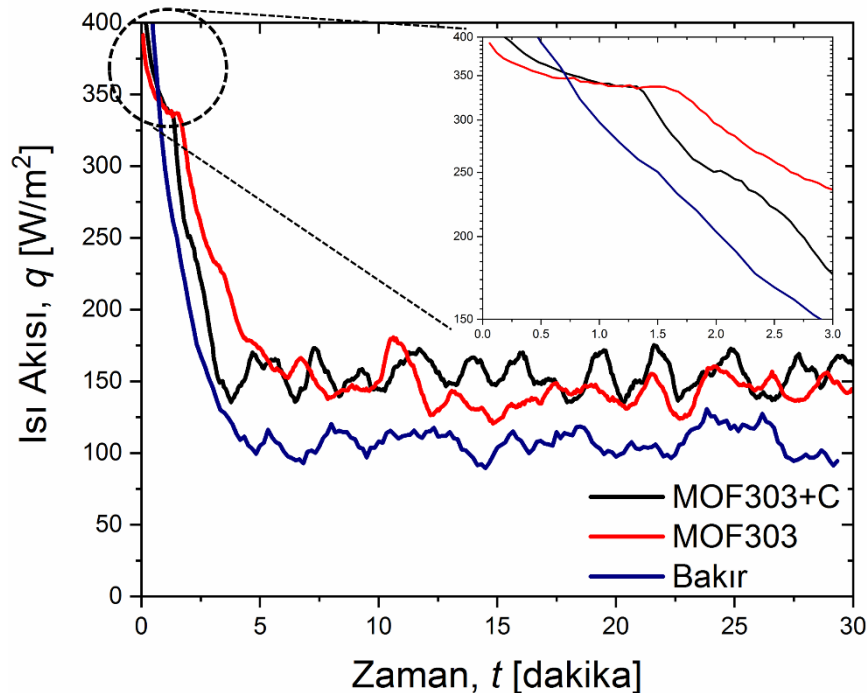
3.3. Isı transferi (Heat transfer)

Su hasadı testlerinin tamamlanmasının ardından su emme kapasitesine ulaşmış olan ısı emiciler ısı akı sensörü entegre edilmiş ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilerek aralarındaki ısı transferi gözlemlenmiştir. Nesnelerin interneti cihazlarının çalışma sıcaklıkları göz önüne alınarak ısıtıcı tabla 35 °C'de sabitlenmiştir. Isıtıcı tabla burada soğutulacak olan yüzeyi temsil etmektedir. Endüstriyel bakır, MOF-303 ve MOF-303 – aktif karbon karışımılı ısı emiciler için elde edilmiş ısı akı değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi ısı transferi kaplanmış numuneler için birkaç farklı aralıktan oluşmaktadır. Bunlar: 1) hızlı desorpsiyonun domine ettiği erken bölüm (0-90 sn), 2) geçiş

değerlerinin domine ettiği bölüm (90-400 sn), 3) sabit hal durumu (7 dk - ..). Mekanizmaların anlaşılabilmesi için üç bölgenin de doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 4'teki yakınlaştırılmış bölge dikkate alındığında hızlı desorpsiyon bölgesinde aktif karbon – MOF-303 karışımının daha yüksek performans gösterdiği açıkça görülebilmektedir. Bunun sebebi aktif karbon – MOF-303 karışımının daha yüksek desorpsiyon sebepli buharlaşma yoluyla soğutma kapasitesi göstermesidir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, bu karışım MOF-303'e göre daha yüksek adsorpsiyon göstermiştir. Bu da zamana göre eğiminin (kütle değişim oranının) daha yüksek olmasına yol açmaktadır[39]. Bu oran buharlaşma için yüzeyden çekilen ısının daha yüksek olmasına yol açmakta ve daha yüksek bir soğuma kapasitesine neden olmaktadır. Bu yüksek eğim 90 saniye kadar bu sistemi domine etmektedir. Daha sonra, hızlı desorpsiyon yerini daha düşük eğimli, yavaş bir desorpsiyon haline bırakmaktadır[24]. Bu da ortamdan çekilen ısının hızlı bir şekilde azalmasına yol açmaktadır. Burada sistemin sıcaklık dengesini kurabilmesi için gereken geçiş bölgesine girilmiştir. Burada domine eden değerlerin bulunabilmesi için ısı transferi denkleminin ölçekleme yöntemiyle çözülmesi gereklidir. Genel hatlarıyla ısı transferi denklemi Eşitlik (1)'de verilmiştir:

$$\sum_i m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = A_s (q - h_n (T_s - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)) - \dot{m} h_{des}, \quad (1)$$

Burada m kütleyi, A_s yüzey alanını, q ısı akısını, h_n konveksiyon için ısı transfer katsayısını, σ Stefan-Boltzmann sabitini, \dot{m} su hasadının kütleli değişim oranını, h_{des} desorpsiyon için buharlaşma ısısını temsil etmektedir. Ayrıca, i alt indisi ilgili yüzeyi (bakır, kaplama vb.), s alt indisi atmosferle temas halindeki yüzeyi, ∞ alt indisi ise içinde bulunulan ortamı temsil etmektedir. Eşitlik (1)'i ölçekleyebilmek için tüm terimlere tek tek bakmak gerekmektedir. Öncelikle, iki yüzey için de kütle, yayınlılık, ve konveksiyon katsayıları eşittir. Bu nedenle bu terimler direkt olarak yok sayılabilir. Ayrıca, yavaş desorpsiyon geçiş bölgesinde sıcaklık değişiminden kaynaklanan ısıya göre çok daha düşük bir ısı transferi değeri göstermektedir. Bu nedenle, desorpsiyon değerleri de yok sayılabilir. Bu da Eşitlik (1)'in ölçekleme sonucunda $c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \sim q$ formuna geldiği gözlemlenmiştir. Deneylerimizdeki ölçümlerimize göre iki sistem için de yüzey sıcaklıkları arasında elde edilen farklar çok küçüktür. Ayrıca, bu sıcaklıkların zamana göre değişimleri her iki yüzey için de neredeyse aynıdır. Bu nedenle, ısı transferinde bu kadar büyük bir farka yol açmaları imkansızdır. Bu bağlamda, geçiş bölgesindeki ısı transferinin direkt olarak özgül ısı kapasitesine bağlı olduğu, ve bu kapasitesi yüksek olan kaplama için daha yüksek bir değere ulaşacağı görülmektedir. Şekil 4 elde edilmiş ve Tablo 1'de sunulmuş olan özgül ısı değerleri ışığında değerlendirildiğinde, özgül ısı kapasitesi yüksek olan MOF-303 için bu bölgede ısı transferinin daha yüksek olmasının teoriyle birebir örtüştüğü görülmektedir.



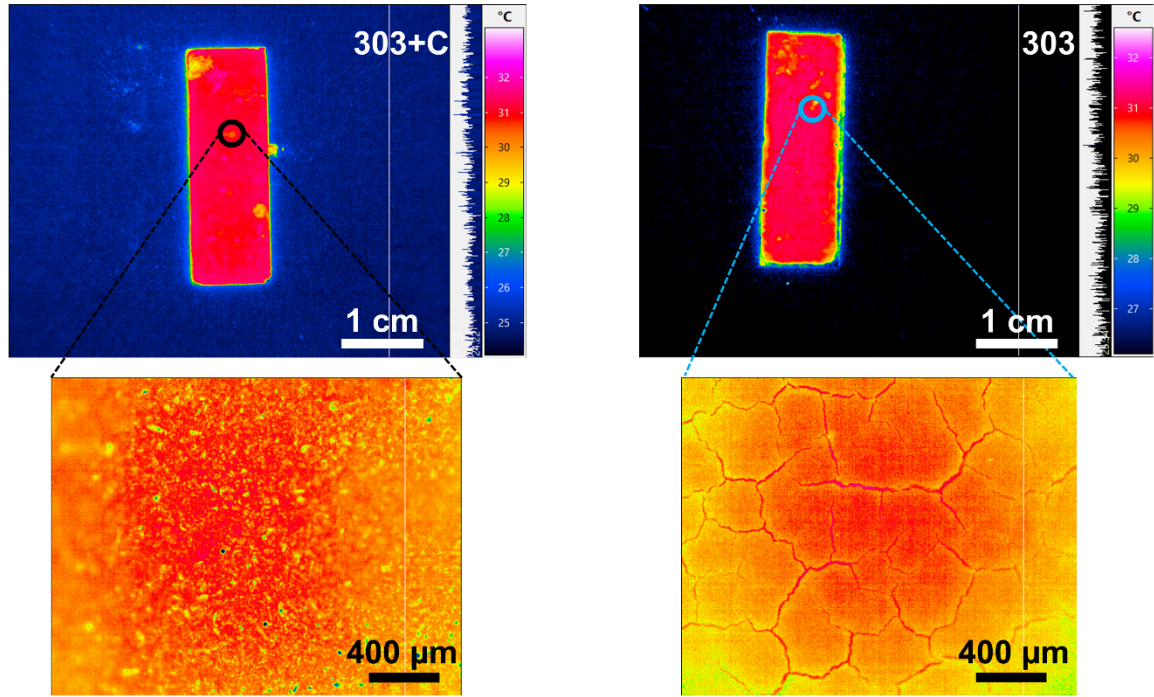
Şekil 4. Isı emici numuneler için toplanan ısı akısı verileri (Experimental heat flux values for the heat sinks)

Son bölge olan ve analiz edilen sürenin büyük bölümünü oluşturan (7 dk - ..) sabit hal bölgesinde ise durum farklıdır. Bu bölgede sıcaklık değerleri neredeyse sabitlenmiş olduğundan, $(\Delta T/\Delta t)$ direkt olarak yok sayılabilir. Eşitlik (1) tekrar değerlendirildiğinde ve ölçeklendiğinde, $\dot{m}h_{des} + h\Delta T + \epsilon\sigma\Delta T^4 \sim q$ olarak yazılabilmektedir. Bu bağlamda yayınlıkların aynı olması ve yüzey parametrelerinin benzerlik göstermesi nedeniyle, ayrıca aradaki sıcaklık farkının çok küçük olması nedeniyle konveksiyon ve radyasyon terimleri yok sayılabilir. Bu da aradaki farkın yavaş desorpsiyon kaynaklı olduğunu göstermektedir ($\dot{m}h_{des} \sim q$). Karbonla karıştırılmış MOF-303, temel MOF-303'e göre daha uzun süreli desorpsiyon özellikleri göstermektedir (Şekil 3). Bu nedenle, efektif ısı iletkenlik katsayısı düşmüş de olsa, karışım içeren kaplama sabit halde daha iyi performans göstermektedir.

Isı transferi genel olarak değerlendirildiğinde, 30 dakikalık kullanım süresince MOF-303 bazlı kaplama 151.69 W/m^2 'lik ortalama ısı akısı (\bar{q}) göstermiştir. Bu değer MOF-303 ve aktif karbon karışımından oluşan kaplama için 164.90 W/m^2 olarak belirlenmiştir. Kaplamaya aktif karbon eklenmesi ekonomik getirilerinin yanı sıra toplam kullanımda yaklaşık %10'luk bir artışa da önyak olmuştur. Ayrıca, herhangi bir kaplama uygulanmamış olan bakır yüzey için bu değer 124.12 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda MOF-303 temelli kaplamanın %22.5, MOF - karbon karışımli kaplamanın da %33'lük bir performans artışına yol açtığı görülmüştür. Endüstriyel bakırın yayınlık değerinin kaplamaya göre çok daha düşük olması bu denli büyük bir farka neden olmuştur. Bu farklar desorpsiyonun kuvvetli olduğu erken fazlar için daha da büyük olarak belirlenmiştir. Operasyon süresince ölçülen ısı transferi değerlerindeki dalgalanmalar ısıtıcı tablanın sıcaklığı sabit tutmak amaçlı güç dalgalanmaları oluşturmasının yanı sıra, iklimlendirme kabininin de ortam sıcaklığını ve nemini belirli aralıklarla kontrol etmesinin yol açtığı değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Bu sebeple, ortalama değerler alınmış ve bu değerler karşılaştırılmaya tabi tutulmuştur. Bu deneyler 30 dakika sonunda kesilmemiş olup 180 dakika boyunca devam ettirilmişlerdir. 180 dakikalık kullanım sonunda sabit hal durumundaki ısı akı değerlerinde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ayrıca, önceki çalışmalarda bu tarz kaplamaların döngüsel olarak yüzlerce kez aynı performansta çalışabileceği de gösterilmiştir[25]. Bu tarz kaplamaların kalınlıkları artırılarak günlük uygulamalarda, azaltılarak da kısa süreli dalga uygulamalarında kullanılabilirler mümkündür.

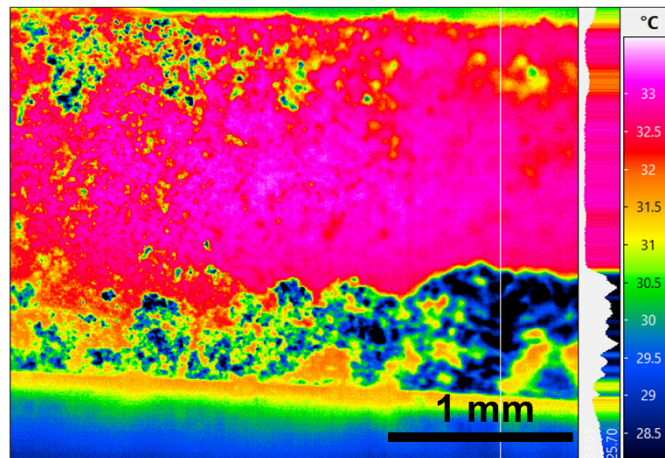
3.4. Kaplamadaki malzemelerin mikro ölçekte bireysel durumlarının analizi (Microscale analysis of the individual states of each material inside the coating)

Bir önceki kısımda belirtilen analizlerde MOF-303 - aktif karbon karışımının endüstriyel bakırların soğutma kapasitesini artırdığı belirtilmiş ve bu artışa neden olan etmenler makro ölçekte ele alınmıştır. Ancak, konvansiyonel ısı transferi deneyleri ve cihazlarıyla kaplamanın içindeki karbon ve metal organik çerçevenin durumlarının anlaşılabilirliği mümkün değildir. MOF-303 ve aktif karbon kimyasal olarak tepkimeye girmedikleri için ve her iki malzeme de kullanılan sıvıların içinde tam olarak çözülmediği için elde edilen kaplamada ayrı parçacıklar halinde bulunmaktadır. Bu sebeple, malzemelerin mikro ölçekte davranışlarının da incelenbilmesi amacıyla deney düzeneğine bir adet kızılötesi kamera da entegre edilmiştir (Şekil 2b). Bu şekilde, kızılötesi kamera yardımıyla aynı dış ortam koşullarında (22.5°C , %60 nem) ve tabla sıcaklığında (35°C) hem makro ölçekli hem de mikro ölçekli gözlemler yapılmıştır. Sabit hal için yukardan görünümü içeren gözlem sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Makro ölçekli lens ile ölçümler yapıldığında her iki kaplama için de belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak, mikro ölçekli lens yardımıyla belirli noktalara odaklanıldığında farklar ortaya çıkmaya başlamıştır. MOF-303 bazlı kaplama için kaplamadaki kusurlar hariç sıcaklıkta belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Kusurların yoğun olduğu, yani kaplamanın incelendiği ve kılcal şekilde alttaki bakırın ortaya çıktığı bölümlerde dahi sıcaklık neredeyse aynı olarak ölçülmüştür. Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluğu gibi özelliklerin homojenlik göstermesinden ötürü bu sonuçlar sürpriz değildir. Ancak, MOF-303 - aktif karbon karışımı için farklı bir durum ortaya çıkmaktadır. MOF-303 ve aktif karbon arasındaki yoğunluk farkından ötürü spreyde belirli noktalar daha çok MOF-303 ile, belirli noktalar ise daha çok aktif karbon ile kaplanmıştır. Bu durum yaklaşılmış olan termografi görüntüsünden de açıkça görülebilmektedir. MOF-303'ün daha yoğun kaplandığı ve daha büyük parçacık boyutlarıyla gözlemlenen bölümler, aktif karbonun daha yoğun olarak kaplandığı ve daha küçük parçacık boyutlarıyla tane tane gözlemlenen kısımlara göre daha sıcaktır. Bu MOF-303'ün aktif karbona göre daha yüksek olan ısı iletkenlik katsayısıyla açıklanabilir. Bakır numunenin ısıtıcı tabladan aldığı ısıyı daha iyi bir iletken olması nedeniyle MOF-303 yoluyla ortama yayması aktif karbona göre daha kolay olmaktadır. Bu da MOF-303'ün sıcaklığını aktif karbona göre daha yüksek değerlere çıkarmaktadır.



Şekil 5. Kaplanmış numunelerin makro ve mikro ölçekli termografi görüntüleri (IR images of the coated substrates in the macro/microscale)

Bu durumun gerçekliğini daha da iyi anlayabilmek amacıyla ısı emicinin yan tarafından da termografik görüntüler alınmıştır (Şekil 6). Karbonun yoğunluğunun metal organik çerçeveye göre daha yüksek olması, onun yan yüzeyde daha çok aşağı kısımlara kaplanmasına neden olmuştur. MOF-303 ise daha çok üst yüzeylere kaplanmıştır. Şekil 6 incelendiğinde çok ilginç bir olguyla karşı karşıya kalınmıştır. Aktif karbon sıcak yüzeye daha yakın da olsa, daha üst kısımlara kaplanmış olan MOF-303'e göre daha düşük sıcaklık göstermektedir. Her iki malzemenin de yansınırlıklarının aynı olmasından ötürü, bu kavram iki malzeme arasındaki ısı iletkenlik katsayısı ve desorpsiyon davranışlarında ortaya çıkan farklarla ilişkilendirilebilir. Aktif karbonun ısı iletkenlik katsayısı MOF-303'e göre daha düşük olduğundan ötürü enerjinin yayılımında daha az tercih edilmesi, ve sıcaklığının MOF'a göre daha az artması normaldir. Ayrıca, aktif karbonla karıştırılmış MOF-303, temel MOF-303'e göre daha uzun süre desorpsiyon yapabilmektedir (Şekil 3). Bu kavram da aktif karbon parçacıklarının sıcaklıklarını belirli bir oranda düşürmektedir.



Şekil 6. MOF-303 – Aktif Karbon karışımıyla kaplanmış numunenin yandan termografi görüntüsü (Side-view IR image of the substrate coated with MOF-303 – active carbon mixture)

Kızılötesi kamerayla, özellikle mikro ölçekli lens kullanılarak yapılan gözlemler, nanomalzeme temelli kaplamalarda makro ölçekli analizlerin yanı sıra ancak mikro ölçekli gözlemlerin de yapılarak mekanizmaların temeline inilebileceğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Tartışma (Conclusions and Discussion)

Bu çalışmada, nesnelerin interneti cihazları ya da küçük elektronik cihazlar gibi düşük sıcaklıklarda çalışan cihazların verimlerini arttırmak amacıyla kullanılabilir emici kaplamalar geliştirilmiş ve test edilmiştir. Laboratuvarda üretilen alüminyum bazlı bir metal-organik çerçeve (MOF-303) kaplamada temel malzeme olarak kullanılmış ve bu malzemenin su emme döngüsü kullanılarak desorpsiyon temelli bir soğutma etkisi yaratılmıştır. Ayrıca, üretimi ve temini MOF'lara göre çok daha kolay olan aktif karbon malzemesi de MOF ile birleştirilerek parçacık boyunda bir gradyan oluşturulmak suretiyle su emme dinamikleri modifiye edilmiştir. Hem MOF malzeme hem de aktif karbon için SEM, DLS gibi deneysel karakterizasyon yöntemleri kullanılmış ve gerekli malzeme özellikleri elde edilmiştir. MOF-303 ve aktif karbon bir spreyn içinde birleştirilerek endüstriyel bakır yüzeylere kaplanmıştır. Kaplanan yüzeyler 22.5 °C sıcaklık ve %60 nem oranında sabitlenmiş olan bir iklimlendirme kabininde denemelere tabi tutulmuş ve performans değerleri not edilmiştir. MOF-303 – aktif karbon karışımı parçacık boyutu ve ısı iletkenlik katsayısında oluşturulan gradyanlar sayesinde her iki bileşenine göre daha yüksek adsorpsiyon ve desorpsiyon göstermiştir. Karışım bazlı kaplama 60 dakikada atmosferden ağırlığının %34'ü kadar su çekme başarısı göstermiştir. Bu değerler MOF-303 için %26 iken, aktif karbon için %8.5 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, ısı transferi özelliklerinin de ölçülebilmesi amacıyla numuneler 35°C'ye sabitlenmiş bir ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilmek suretiyle soğutma testlerine tabi tutulmuştur. Tabla ile numune arasında yerleştirilen ısı akı sensörleri yoluyla ısı transferi dinamikleri ölçülmüştür. MOF-303 – aktif karbon karışımından elde edilen kaplama endüstriyel bakıra göre %35, MOF-303'e göre ise %10'luk bir performans artışı göstererek 164 W/m²'lik bir ortalama soğutma akısı göstermiştir. Bu artışın operasyonun erken fazlarında hızlı desorpsiyon temelli geç fazlarında yavaş desorpsiyon temelli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hem MOF temelli hem de karışım temelli iki kaplama için de yayınlık değerleri 0.99 olarak ölçüldüğünden endüstriyel bakıra göre radyasyon temelli büyük bir artış gözlemlenmiştir. Son olarak, aktif karbon ve MOF'un kaplama içerisinde nasıl davranış gösterdiklerinin anlaşılabilmesi amacıyla sisteme bir kızılötesi kamera entegre edilmiştir. Bir mikro lens yardımıyla kaplama hem yüzeyden hem de yandan gözlemlenmiş, ve karbonun MOF'a göre daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması nedeniyle daha düşük sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, iki malzeme arasındaki yoğunluk farklarından ötürü mikro düzeyde homojen bir kaplama elde edilemediği de belirlenmiştir. Makro ölçüde ise belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu çalışmada sorpsiyon, morfoloji, ve fiziksel özelliklerinde farklar bulunan değişik malzemelerin karıştırılmasının ısı transferini pozitif yönde etkileyebileceği gösterilmiştir. Desorpsiyon temelli soğutucular üretilirken yeni sorbent malzemelerin araştırılmasına paralel olarak, hali hazırda elde bulunan malzemelerin kombinasyonlarının da denenmesi yüksek fayda sağlayabilecektir. Bu bağlamda, bu çalışma hem desorpsiyon bazlı kaplamaların soğutma kapasitelerinin ekonomik yöntemlerle nasıl arttırılabileceğini araştırmış, hem de makro ve mikro ölçekli desorpsiyon, radyasyon ve ısı transferi karakterizasyonları için bir kılavuz ortaya koymuştur.

Teşekkür (Acknowledgment)

Yazar Dr. Sivasankaran Harish ve Prof. Dr. Junichiro Shiomi'ye bu çalışmadaki destekleri için şükranlarını sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar (References)

- [1] B. Barat and Baumann, *Springer handbook of nanotechnology*. Vol. 2, Berlin:Springer, 2007.
- [2] A. L. Moore and L. Shi, "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics," *Materials Today*, vol. 17, no. 4, pp. 163-174, 2014. doi:10.1016/j.mattod.2014.04.003
- [3] R. J. McGlen, R. Jachuck, and S. Lin, "Integrated thermal management techniques for high power electronic devices," *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1143-1156, 2004. doi:10.1016/j.applthermaleng.2003.12.029
- [4] Z. He, Y. Yan, and Z. Zhang, "Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: A review," *Energy*, vol. 216, p. 119223, 2021. doi:10.1016/j.energy.2020.119223
- [5] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Application of phase change materials in thermal management of

- electronics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 17, pp. 2822-2832, 2007. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.013>
- [6] T. J. Lu, "Thermal management of high power electronics with phase change cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 13, pp. 2245-2256, 2000. doi:[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00318-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00318-X)
- [7] W. Nakayama, "Thermal management of electronic equipment: a review of technology and research topics," 1986.
- [8] A. Krishna and J. Lee, "Morphology-Driven Emissivity of Microscale Tree-like Structures for Radiative Thermal Management," *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 124-136, 2018. doi:[10.1080/15567265.2018.1446065](https://doi.org/10.1080/15567265.2018.1446065)
- [9] D. Christen, M. Stojadinovic, and J. Biela, "Energy Efficient Heat Sink Design: Natural Versus Forced Convection Cooling," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8693-8704, 2017. doi:[10.1109/TPEL.2016.2640454](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2640454)
- [10] P. Teertstra, M. M. Yovanovich, and J. R. Culham, "Analytical Forced Convection Modeling of Plate Fin Heat Sinks," *Journal of Electronics Manufacturing*, vol. 10, no. 04, pp. 253-261, 2000. doi:[10.1142/s0960313100000320](https://doi.org/10.1142/s0960313100000320)
- [11] S. S. Haghghi, H. R. Goshayeshi, and M. R. Safaei, "Natural convection heat transfer enhancement in new designs of plate-fin based heat sinks," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 125, pp. 640-647, 2018. doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.122)
- [12] L. H. Saw, H. M. Poon, H. S. Thiam, Z. Cai, W. T. Chong, N. A. Pambudi, and Y. J. King, "Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs," *Applied Energy*, vol. 223, pp. 146-158, 2018. doi:[10.1016/j.apenergy.2018.04.042](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.042)
- [13] S. Lin, K. Sefiane, and J. R. E. Christy, "Prospects of confined flow boiling in thermal management of microsystems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 825-837, 2002. doi:[10.1016/S1359-4311\(01\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00124-7)
- [14] D. Shin, S. W. Chung, E. Y. Chung, and N. Chang, "Energy-Optimal Dynamic Thermal Management: Computation and Cooling Power Co-Optimization," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 340-351, 2010. doi:[10.1109/TII.2010.2052059](https://doi.org/10.1109/TII.2010.2052059)
- [15] H. Zu, W. Dai, Y. Li, K. Li, and J. Li, "Analysis of enhanced heat transfer on a passive heat sink with high-emissivity coating," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 166, p. 106971, 2021. doi:[10.1016/j.ijthermalsci.2021.106971](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106971)
- [16] A. M. Omer, "Renewable building energy systems and passive human comfort solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 6, pp. 1562-1587, 2008. doi:[10.1016/j.rser.2006.07.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.010)
- [17] H. Ye and G. Zhang, "A review of passive thermal management of LED module," *Journal of Semiconductors*, vol. 32, no. 1, p. 014008, 2011. doi:[10.1088/1674-4926/32/1/014008](https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/1/014008)
- [18] R. Hu, Y. Liu, S. Shin, S. Huang, X. Ren, W. Shu, J. Cheng, G. Tao, W. Xu, R. Chen, and X. Luo, "Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management," *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 17, p. 1903921, 2020. doi:[10.1002/aenm.201903921](https://doi.org/10.1002/aenm.201903921)
- [19] J. Xu, J. Chao, T. Li, T. Yan, S. Wu, M. Wu, B. Zhao, and R. Wang, "Near-Zero-Energy Smart Battery Thermal Management Enabled by Sorption Energy Harvesting from Air," *ACS Central Science*, vol. 6, no. 9, pp. 1542-1554, 2020. doi:[10.1021/acscentsci.0c00570](https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00570)
- [20] B. B. Saha, E. C. Boelman, and T. Kashiwagi, "Computational analysis of an advanced adsorption-refrigeration cycle," *Energy*, vol. 20, no. 10, pp. 983-994, 1995. doi:[10.1016/0360-5442\(95\)00047-K](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00047-K)
- [21] R. P. Sah, B. Choudhury, and R. K. Das, "A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 123-134, 2015. doi:[10.1016/j.rser.2015.01.039](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.039)
- [22] F. Stoeckli, T. Jakobov, and A. Lavanchy, "Water adsorption in active carbons described by the Dubinin-Astakhov equation," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, vol. 90, no. 5, pp. 783-786, 1994. doi:[10.1039/FT9949000783](https://doi.org/10.1039/FT9949000783)
- [23] M. Ejeian and R. Z. Wang, "Adsorption-based atmospheric water harvesting," *Joule*, vol. 5, no. 7, pp. 1678-1703, 2021. doi:[10.1016/j.joule.2021.04.005](https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.005)
- [24] C. Wang, L. Hua, H. Yan, B. Li, Y. Tu, and R. Wang, "A Thermal Management Strategy for Electronic Devices Based on Moisture Sorption-Desorption Processes," *Joule*, vol. 4, no. 2, pp. 435-447, 2020. doi:[10.1016/j.joule.2019.12.005](https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.12.005)
- [25] A. A. Günay, S. Harish, M. Fuchi, I. Kinefuchi, Y. Lee, and J. Shiomi, "Metal-organic framework coated porous structures for enhanced thermoelectric performance," *Energy Conversion and Management*, vol. 255, p. 115289, 2022. doi:[10.1016/j.enconman.2022.115289](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115289)
- [26] L. Aftab, N. Iqbal, A. Asghar, and T. Noor, "Synthesis, characterization and gas adsorption analysis of solvent dependent Zn-BTC metal organic frameworks," *Separation Science and Technology*, vol. 56, no. 13, pp. 2159-2169, 2021. doi:[10.1080/01496395.2020.1813176](https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1813176)
- [27] J. Choi, L.-C. Lin, and J. C. Grossman, "Role of Structural Defects in the Water Adsorption Properties of MOF-801," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 122, no. 10, pp. 5545-5552, 2018. doi:[10.1021/acs.jpcc.8b00014](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00014)
- [28] M. L. Palash, I. Jahan, T. H. Rupam, S. Harish, and B. B. Saha, "Novel technique for improving the water adsorption isotherms

- of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers," *Inorganica Chimica Acta*, vol. 501, p. 119313, 2020. doi:10.1016/j.ica.2019.119313
- [29] L. Garzón-Tovar, J. Pérez-Carvajal, A. Yazdi, J. Hernández-Muñoz, P. Tarazona, I. Imaz, F. Zamora, and D. Maspoch, "A MOF@COF Composite with Enhanced Uptake through Interfacial Pore Generation," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 58, no. 28, pp. 9512-9516, 2019. doi:10.1002/anie.201904766
- [30] X. Zheng, L. W. Wang, R. Z. Wang, T. S. Ge, and T. F. Ishugah, "Thermal conductivity, pore structure and adsorption performance of compact composite silica gel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 68, pp. 435-443, 2014. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.075
- [31] M. Yeşilbaş and J.-F. Boily, "Particle Size Controls on Water Adsorption and Condensation Regimes at Mineral Surfaces," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 32136, 2016. doi:10.1038/srep32136
- [32] M. Manyangadze, N. H. M. Chikuruwo, C. S. Chakra, T. B. Narsaiah, M. Radhakumari, and G. Danha, "Enhancing adsorption capacity of nano-adsorbents via surface modification : a review," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 25-32, 2020. doi:10.1016/j.sajce.2019.11.003
- [33] F. Fathieh, M. J. Kalmutzki, E. A. Kapustin, P. J. Waller, J. Yang, and O. M. Yaghi, "Practical water production from desert air," *Science Advances*, vol. 4, no. 6, p. eaat3198, 2018. doi:10.1126/sciadv.aat3198
- [34] N. Hanikel, M. S. Prévot, F. Fathieh, E. A. Kapustin, H. Lyu, H. Wang, N. J. Diercks, T. G. Glover, and O. M. Yaghi, "Rapid Cycling and Exceptional Yield in a Metal-Organic Framework Water Harvester," *ACS Central Science*, vol. 5, no. 10, pp. 1699-1706, 2019/10/23 2019. doi:10.1021/acscentsci.9b00745
- [35] J. D. Howe, C. R. Morelock, Y. Jiao, K. W. Chapman, K. S. Walton, and D. S. Sholl, "Understanding Structure, Metal Distribution, and Water Adsorption in Mixed-Metal MOF-74," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 121, no. 1, pp. 627-635, 2017/01/12 2017. doi:10.1021/acs.jpcc.6b11719
- [36] I. A. Khan, A. Badshah, N. Haider, S. Ullah, D. H. Anjum, and M. A. Nadeem, "Porous carbon as electrode material in direct ethanol fuel cells (DEFCs) synthesized by the direct carbonization of MOF-5," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 1545-1555, 2014. doi:10.1007/s10008-013-2377-8
- [37] S. Ito, H. Huang, F. Watanabe, H. Yuan, M. Hasatani, and N. Kobayashi, "Heat Transfer during Microwave-Assisted Desorption of Water Vapor from Zeolite Packed Bed," *Drying Technology*, vol. 30, no. 15, pp. 1707-1713, 2012. doi:10.1080/07373937.2012.714825
- [38] J. Chorover and M. L. Brusseau, "Kinetics of sorption—desorption," in *Kinetics of water-rock interaction*: Springer, 2008, pp. 109-149.
- [39] A. A. Günay, "Analysis and Optimization of Activated Carbon Coated Heat Sinks," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, vol. 42, no. 1, pp. 65-74, 2022. doi:10.47480/isibted.1107445

This is an open access article under the CC-BY license

