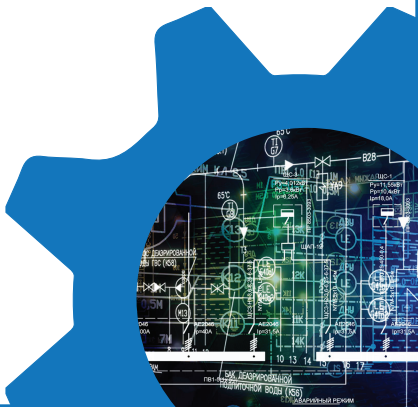


**GAZI**  
*JOURNAL OF*  
**ENGINEERING**  
**SCIENCES**



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### EDİTÖR / EDITOR - IN - CHIEF

**İsmail ŞAHİN**

Gazi University, Ankara, Turkey  
e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)

### YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

**Harun GÖKÇE**

Gazi University  
e-mail: [harungokce@gazi.edu.tr](mailto:harungokce@gazi.edu.tr)

**Murat DÖRTERLER**

Gazi University  
e-mail: [dorterler@gazi.edu.tr](mailto:dorterler@gazi.edu.tr)

### ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

**Abdullah AKDOĞAN**

Pamukkale University

**Adem TEKEREK**

Gazi University

**Alper BÜYÜKKARAGÖZ**

Gazi University

**Amin MIRZAPOUR**

Zanjan Islami 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

**Majid MEGHDADI**

University of Zanjan, Iran

**Mustafa KURT**

Gazi University, Turkey

**Nowruz ALLAHVERDİ**

Karatay University, Turkey

**GAZİ****JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES****Farzollah MIRZAPOUR**

University of Zanjan, Iran

**Herbert M. REYNOLDS**

Michigan State University, USA

**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

**Reza Negarastani**

RIETEX, England

**Salman NISAR**National University of Sci. and Tech.,  
Pakistan**Shahin JALILI**

Tebriz University, Iran

**Şakir TAŞDEMİR**

Selçuk University, Turkey

**Tahsin Tecelli ÖPÖZ**

John Moores University, England

**Yasir JOYA**

GIK Institute, Pakistan

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

Gazi University

**Nurullah YÜKSEL**

Gazi University

e-mail: [editorgjes@gmail.com](mailto:editorgjes@gmail.com)**BU SAYININ HAKEMLERİ / REVIEWER OF THIS ISSUE**

A. Hanifi ERTAŞ

A. Serdar GÜLDİBİ

Abdullah ORMAN

Anıl UTKU

Barış ÖZLÜ

Bülent DAĞ

Cemalettin AYGÜN

Ç. Vakkas YILDIRIM

Elvan DUMAN

Engin NAS

Erhan GÜNEŞ

Esra SÖĞÜT

Eyüp Emre ÜLKÜ

Gül TOKDEMİR

Hayati OLGUN

Haydar KÜÇÜK

Hüseyin GÖKÇE

Mehmet GÖK

Mustafa ENGİN

Nalan KAYA

Osman Nuri UÇAN

Ömer MERCİMEK

Ömer MERCİMEK

Özgür ÖZDİLLİ

Ramazan ÇAKIROĞLU

Rukiye KARAKIŞ

Saadin OYUCU

Sakine KIRATLI

Salih ERMIŞ

Saruhan KARTAL

Seda HEZER

Selçuk ÖZCAN

Selim BUYRUKOĞLU

Serdar KIRIŞOĞLU

# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

---

İskender ÖZKUL

Levent SABAH

M. Feyzi AKŞAHİN

M. Fikret GELİBOLU

M. Kemal KÜLEKÇİ

Sinan TOKLU

Taha EREM

U. Görkem ÇAKICI

Volkan KILIÇLI

Zafer AYZ

Zeki OMAÇ

**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](mailto:editorgjes@gmail.com)

# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### İÇİNDEKİLER / CONTENTS

E-Ticaret Firmalarının Web Site Performanslarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Değerlendirilmesi <i>Evaluation of E-Commerce Firms' Website Performances Using Multi-Criteria Decision Making Techniques</i> <b>Rabia KAR, Başak GÖK, Hadi GÖKÇEN</b> .....	388-410
İşletme Yükleri Değişen Betonarme Kaset Döşemelerin CFRP ile Düşey Yük Kapasitelerinin Arttırılması <i>Increasing the Vertical Load Capacity of Reinforced Concrete Waffle Slabs With Varying Operating Loads Using CFRP</i> <b>Ahmet BAL</b> .....	411-421
Pestisit Damlacıklarının Elektrostatik Yüklenmesi ve Laboratuvar Kullanımları İçin Düşük Maliyetli Yüksek Voltaj Jeneratörü <i>Low-Cost High-Voltage Generator For Electrostatic Charging Of Pesticide Droplets And Laboratory Uses</i> <b>Kemal AMAYA</b> .....	422-434
Ulusal ve Uluslararası Standartlarda Üretilen Kompozit Binaların Karşılaştırmalı Analizi <i>Internal Or External Thermal Superinsulation Towards Low/Zero Carbon Buildings? A Critical Report</i> <b>Pinar Mert CUCE, Erdem CUCE, Emre ALVUR</b> .....	435-442
Akışkan Yatak Kurutucuda İki Kademeli Isı Geri Kazanım Sistemi Tasarımı: Çevresel ve Ekonomik Analiz <i>Design of Two Stage Heat Recovery System in Fluidized Bed Dryer: Environmental and Economic Analysis</i> <b>Deniz GÖKBENA, Veyssel DURAK, Merve ULULAR, Ufuk BAHÇEÇİOĞLU, Mustafa AKTAŞE, Yaren GÜVEN</b> .....	443-452
e-ksper: Çekirdeksiz Kuru Üzüm Kalite Değerlendirmesi için Evrimsel Sinir Ağları Temelli Sistem <i>e-ksper: A Convolutional Neural Network Based System for Seedless Raisin Quality Grading</i> <b>Emre GÜLSOYLU, Zeynep CİPİLOGLU YİLDİZ</b> .....	453-466
Kalın Cidarlı Fonksiyonel Dereceli Dönen Küresel Basınçlı Kapların Elastik Analizi <i>Elastic Analysis of Functionally Graded Rotating Spherical Pressure Vessels</i> <b>Durmuş YARIMPABUÇ, Mehmet EKER, Aybegüm ÇALIŞKAN</b> .....	467-476
Web Uygulamaları için Blokzinciri Tabanlı Güvenli bir Kimlik Doğrulama Çözümü <i>Blockchain-Based Secure Authentication Solution for Web Applications</i> <b>Mustafa TANRIVERDİ</b> .....	477-489
Belirsiz Taleplerle Hemşire Çizelgeleme Problemi için Stokastik Hedef Programlama <i>Stochastic Goal Programming for the Nurse Scheduling Problem with Uncertain Demand</i> <b>Seyit Hamza CAVGA, Nezir AYDİN</b> .....	490-507
Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemleri ile Hidroponik Tarım <i>Hydroponic Agriculture with Machine Learning and Deep Learning Methods</i> <b>Nurten BULUT, Mehmet HACİBEYOĞLU</b> .....	508-519

**GAZİ**

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Östempelenmiş Sfero Dökme Demir (GGG70) Malzemenin Frezelenmesinde Proses Parametrelerinin Arı Algoritması ile Optimizasyonu

*Optimization of the Process Parameters by the Bees Algorithm in Milling of Austempered Ductile Cast Iron (GGG70) Material*

**Gürkan ATAŞ, Mete KALYONCU, Mevlüt AYDIN, Muhammet Hüseyin ÇETİN**.....520-534

Al 7075-T6 Frezeleme Operasyonunda Kesme Parametrelerinin Ve Takım Tutucunun Yüzey Pürüzlülüğüne Ve İşleme Hassasiyetine Etkisinin İncelenmesi

*Investigation of the Effect of Cutting Parameters and Tool Holder on Surface Roughness and Machining Precision in Al 7075-T6 Milling Operation*

**Mustafa BOZDEMİR, Eymen AKDENİZ, Muhammet YILMAZ, M. Kutay GEZER**.....535-543

EMG Tabanlı Zaman Sabiti Sinir Ağları Kullanarak Kas Yorgunluğu Bozukluklarının Tespiti için Yeni Bir Yaklaşım

*A novel Approach for Muscle Fatigue Disorders Detection Using EMG Based Time-Constant Neural Networks*

**Michael BIDOLLAHKHANI, Ferhat ATASOY**.....544-556

Bagging-MLP Yöntemiyle Troposferik Ozon Konsantrasyonunun Tahmini

*Prediction of Tropospheric Ozone Concentration with Bagging-MLP Method*

**Pınar CİHAN, Husayin Kurtulus OZCAN, Atakan ONGEN**.....557-573

ARIMA ve LSTM Modelleri ile Sıcaklık Zaman Serileri Tahmini

*Time Series Prediction of Temperature Using Seasonal ARIMA and LSTM Models*

**Hakan KOÇAK**.....574-584

Uçak Motorlarında Süperalaşım Yerine Kullanılabilecek Olan Kompozit Malzemelerin İncelenmesi

*The Examination of Composite Materials as Alternatives to Superalloys in Aircraft Engines*

**Serhat YUDAR**.....585-595

SDN Tabanlı SCADA Sistemlerinde Makine Öğrenmesi Tabanlı DDoS Saldırı Tespiti

*Machine Learning-Based DDoS Attack Detection on SDN-Based SCADA Systems*

**Esra SÖĞÜT, Adem TEKEREK, O. Ayhan ERDEM**.....596-611

Ekran Filigranı: Dijital Suçluların Tespitinde Yeni Bir Yaklaşım

*Screen Watermark: A Novel Approach in Detecting Digital Criminals*

**Ömer Faruk KERMAN, Aybike ŞİMŞEK**.....612-621

Diz Eklemi Simülör Prototipinin ISO 14243/3 Standardına Uygun Sistem Modelleme Çalışmasının Yapılması ve Matlab Simulink Ortamında Yürüyüş Profilinin Simüle Edilmesi

*Performing System Modeling Study of Knee Joint Simulator Prototype in accordance with ISO 14243/3 Standard and Simulating Gait Profile in Matlab Simulink Environment*

**Ozkan HİZAROĞLU, Adnan AKKURT**.....622-633

**GAZİ****JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES**

Kahramanmaraş Depremlerinin Yığma Yapılar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması *Performing System Investigation of the Effects of Kahramanmaraş Earthquakes on Masonry Structures*

**Abdulkadir GÜLEÇ**.....634-646

Aktif Elemanlara Dayalı Yüzen ve Topraklanmış Endüktans Simülatörünün Yeni FinFET Transistör Uygulaması

*New FinFet Transistor Implementation of Floating and Grounded Inductance Simulator Based on Active Elements*

Hüseyin Demirel, Arsen Ahmed Mohammed.....647-653

AISI 304 Paslanmaz Çelikte Geliştirilmiş Yüzey Kalitesi için Lazer Kesim Parametrelerinin optimizasyonu *Optimization of laser cutting parameters for improved surface quality in AISI 304 stainless steel*

Engin Nas, Sabri Uzuner.....654-662

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



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Evaluation of E-Commerce Firms' Website Performances Using Multi-Criteria Decision Making Techniques

Rabia Kar<sup>a</sup>, Başak Gök<sup>b</sup>, Hadi Gökçen<sup>c</sup>

Submitted: 03.05.2023 Revised: 19.07.2023 Accepted: 23.08.2023 doi:10.30855/gmbd.07050774

#### ABSTRACT

**Keywords:** E-commerce, web site performance, MCDM, AHP, TOPSIS

<sup>a,c</sup> ETB Communication Services Inc.,  
34844 Maltepe/Istanbul, Türkiye  
Orcid: 0009-0004-4284-9317  
e mail: rabiakar6@gmail.com

<sup>b</sup> Gazi University,  
Faculty of Applied Sciences,  
Dept. of Management  
Information Systems  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-8687-5961

<sup>c</sup> Gazi University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Industrial Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-5163-0008

<sup>\*</sup>Corresponding author:  
basakgok@gazi.edu.tr

Technological developments show their effects in all areas of life such as education, health, entertainment, shopping, culture and art activities. With the penetration of the Internet into all areas of life, the trading and shopping methods of societies, businesses and individuals have changed. With e-commerce environments instead of physical merchandising, the shopping models and behaviors of consumers have changed. The competition of e-commerce sites in the global market is increasing day by day. In this study, it is aimed to evaluate the website performance of these companies by determining the most visited e-commerce companies in Turkey. Multi-criteria decision making (MCDM) techniques were used in the website performance evaluation of e-commerce companies. In the study, website performances were determined by 8 performance criteria. The weight values of the criteria used in the evaluation were calculated with the AHP (Analytic Hierarchy Process) technique. TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) technique was used to rank the websites according to the determined criteria. Evaluation of continuously developed and improved e-commerce platforms is important for companies to improve their services in terms of both due diligence and competitive advantage.

### E-Ticaret Firmalarının Web Site Performanslarının Çok Kriterli Karar Verme Teknikleriyle Değerlendirilmesi

#### ÖZ

Teknolojik gelişmeler eğitim, sağlık, eğlence, alışveriş, kültür sanat etkinlikleri gibi hayatın her alanında etkilerini göstermektedir. İnternetin hayatın her alanına girmesiyle toplumların, işletmelerin ve bireylerin ticaret ve alışveriş yöntemleri farklılaşmıştır. Fiziksel mağazacılık yerine e-ticaret ortamları ile tüketicilerin alışveriş modelleri ve davranışları değişmiştir. Küresel pazarda e-ticaret sitelerinin rekabeti her geçen gün daha da artmaktadır. Bu çalışmada Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret firmaları belirlenerek, bu firmaların web sitesi performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. E-ticaret firmalarının web sitesi performans değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniklerinden yararlanılmıştır. Çalışmada web site performansları 8 adet performans kriteri ile belirlenmiştir. Değerlendirmede kullanılan kriterlerin ağırlık değerleri, AHP (Analytic Hierarchy Process) tekniğiyle hesaplanmıştır. Web sitelerin saptanmış olan kriterlere göre sıralanması ise TOPSİS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) tekniğinden yararlanılmıştır. Sürekli geliştirilen ve iyileştirilen e-ticaret platformlarının değerlendirilmesi, hem durum tespiti hem de rekabet avantajı sağlama açısından firmaların hizmetlerini iyileştirmesinde önem arz etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** E-ticaret, Web site performansı, ÇKKV, AHP, TOPSIS



## 1. Giriş (Introduction)

Çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri son yıllarda yönelem araştırması kapsamında sıklıkla kullanılan tekniklerden biridir. ÇKKV çalışmaları karar vericinin karşılaştığı problemleri yapılandırabilmesini ve çözüme ulaştırabilmesini kolaylaştırmıştır. Günümüzde bir karara varabilmek özellikle kararı etkileyen çok sayıda kriter varsa, oldukça zorlaşmaktadır. Bir karar probleminde birden çok alternatifin bulunduğu durumlarda bunları birbirleriyle çelişen kriterlere göre sıralanması için birçok ÇKKV tekniği mevcuttur. ÇKKV teknikleri, işletmelerin karşılaştıkları karar problemlerinde tanımlanmış olan kriterlerin ağırlıklarını hesaplamada ve alternatiflerin sıralanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ürün, konum, strateji, dağıtım kanalı, tedarikçi, lojistik firması, proje, ve personel seçimi gibi birçok işletme problemlerinin çözümünde ÇKKV tekniklerinden yararlanılabilir.

Teknolojik gelişmelerle birlikte eğitimden ticarete kadar birçok alanda işlemler dijital ortamlarda gerçekleşmektedir. E-ticaret ya da elektronik ticaret, kısaca çevrimiçi gerçekleşen ekonomik faaliyetler olarak tanımlanmaktadır [1]. Mobil uygulamalar ya da web siteleri aracılığıyla yürütülen e-ticaret, hem bireyler hem de kurumlar tarafından işlem kolaylığı, zaman tasarrufu, düşük maliyet gibi nedenlerle tercih edilmektedir.

Elektronik ticaret platformlarının kullanımı özellikle COVID-19 pandemi döneminde artmıştır. Pandemi ile sosyal ve ticari hayat etkilenmiş, eğlence, eğitim, sağlık, bankacılık gibi tüm hizmetler internet ortamına taşınmıştır. Müşteriler fiziksel temastan kaçınmak amacıyla alışverişlerini elektronik ortamdan yapmaya yönelmiştir. Bu dönemde müşteriler alışverişlerini fiziksel mağazadan yapmak yerine e-ticaret sitelerini tercih ettiklerini belirtmiş, e-ticaret web sitelerinde ziyaretçi ve satış sayısında artışlar görülmüştür. Pandemi döneminde e-ticaret hacminde Türkiye, en büyük artışların görüldüğü ülkeler arasında yer almıştır. E-Ticaret web sitelerinin kullanılmasında artış görülmesi sebebiyle bu web sitelerinin sayfa açılma süresi, sayfa hızı ve boyutu gibi web site performans özellikleri önemli hale gelmiştir. Müşteriler tarafından tercih edilmek isteyen işletmeler web sitesinin teknik özelliklerine önem vermek zorundadır. Müşterinin web sitesinde geçirdiği ortalama süre, hemen ayrılma oranı, ziyaret başına görüntülediği sayfa sayısı, web sitesin toplam ziyaretçi sayısı gibi özellikler web sitesinin performans ve kullanım istatistiklerini etkilenmektedir. Web sitesinin performansı, işletmelerin daha çok müşteriye ulaşabilme ve satışlarını artırabilmesi için önem arz etmektedir [2].

Literatürde web sitesi performans değerlendirmesine ilişkin çalışmalar bulunmakta olup, bu çalışmaların sıklıkla yenilenmesi önem arz etmektedir. Değişen toplumsal ve teknolojik gelişmeler e-ticaret hizmeti sunan işletmeleri de etkilemekte ve işletmeler rekabet avantajı ile sürekli iyileştirmeye yönelik yeni çalışmalar yapmaktadır. Bu nedenle web sitesi performans değerlendirmesi çalışmalarının işletmelerin güçlü ve zayıf yönlerini tespit edebilmesi, rakiplerine göre durum tespiti yapabilmesi, yapılan iyileştirmelerin değerlendirilmesi gibi nedenlerle literatüre kazandırılması önemlidir.

Bu çalışmada Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin, web site performansını belirleyen kriterler, bu kriterlerin ağırlığı ve e-ticaret web sitelerinin performans sıralamasının belirlenmesi amaçlanmaktadır. E-ticaret web sitelerinin performans kriterleri uzman görüşüyle belirlenmiş olup, web sitelerinin karşılaştırılmasında ÇKKV tekniklerinden AHP ve TOPSİS tekniklerinden yararlanılmıştır. AHP tekniğiyle belirlenen kriterlerin ağırlık değerleri tespit edilmiş, TOPSİS tekniği ile de e-ticaret web siteleri belirlenen kriterlere göre sıralanması sağlanmıştır. Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret siteleri www.similarweb.com sitesinden Ekim 2022’de alınan verilere göre belirlenmiştir.

Bu çalışmada kapsamındaki araştırma soruları şunlardır:

- Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web site performansını belirleyen kriterler nelerdir?
- Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web site performansını etkileyen kriterlerin önem/ağırlık değeri nedir?
- Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web sitesi performans sıralaması nasıldır?

## 2. Kavramsal Çerçeve (Conceptual Framework)

Bu bölümde ÇKKV, AHP ve TOPSİS teknikleriyle ilgili kavramsal bilgiler ve literatürde yer alan çalışmalar sunulmaktadır.

### 2.1. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniği (Multi-criteria decision making technique)

Çok kriterli karar verme (ÇKKV); birçok kriterin birlikte değerlendirilmesi ile alternatiflere değerler atayan bir süreç olarak tanımlanmaktadır. ÇKKV, aynı anda birden çok uygulanan kriterler arasından en iyi seçimin yapılmasını mümkün kılan bir tekniktir. Rasyonel bir karara varılmasında sıklıkla seçilen bu teknik, tekniğin amaçları ve kısıtlar çerçevesinde sınırlanmaktadır. ÇKKV teknikleri, karar vericilerin alternatiflerini birçok kritere göre tanımlar, sıralar, değerlendirir, derecelendirir, seçer veya reddeder [3]. Bu sebeple bir problemin ÇKKV problemi sayılabilmesi için en az 2'şer tane çelişen kriter ve alternatif çözüme ihtiyacı vardır [4].

ÇKKV, teorik gelişimiyle beraber uygulama açısından da karar analizlerinde oldukça hızlı bir gelişim göstermiştir. Kuvvetli bir mantık yapısına sahip olup, karar tespitlerinde göstermiş olduğu başarılı çözümler ile karmaşık problem çözümünde birçok uygulama alanında kullanılmaktadır [5].

ÇKKV karar vericilerin önceliklerini de dikkate alarak aynı ölçülere sahip olmayan ve birbirleriyle çelişen kriterleri karakterize eden karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde de kullanılmaktadır. Yöneylem araştırması altında hızla gelişen ÇKKV, problemin çözümlenmesinde kriter seçimi, çok disiplinli olma ve bilimsel yaklaşım gibi özellikleriyle yenileyen bir alanı da betimlemektedir [6]. ÇKKV problemlerinin ana amacı tanımlanan bütün kriterleri dikkate alarak en yüksek düzeyde memnuniyeti sağlayan en iyi alternatifleri/çözümleri belirlemektir [7].

### 2.2. AHP tekniği (AHP technique)

1968'de Myers ve Alpert tarafında ortaya atılan analitik hiyerarşi tekniği (AHP), 1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliştirilmiş, çok kriterli karmaşık problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. AHP, özel bir hiyerarşik toplamsal ağırlıklandırma sürecidir ve çok nitelikli karar problemleri için bir ölçüm, yapılandırma ve sentezleme tekniğidir [8].

AHP ile bazı kişisel değerlendirme problemlerinde sayısal bir değerlendirme gerçekleştirmek mümkündür [9]. Bu tekniğe başvuran birey sezgileriyle ve/veya deneyimleriyle alternatifleri değerlendirebilmekte ve her bir alternatif için rakamsal bir sonuç elde edebilmektedir. AHP karar vericilerin kriter önceliklendirmesine olanak tanıyan ve olası alternatifler üreterek, karmaşık problemlerin çözülmesini mümkün hale getiren bir modeldir. Ayrıca bilgilerde değişiklik yapıldığında, çözüm veya sonuç duyarlılığı karar verici tarafından test edilebilmektedir. AHP, çok girdili ve karmaşık durumlarda, insan beyninin problem çözme ve düşünme biçimini zorlamak yerine, bu karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan güçlü bir tekniktir. AHP, kişilerin kendi karar verme mekanizmalarını tanımlamalarını mümkün hale getirir ve daha iyi bir kararların üretilmesini sağlar. İnsanın tamamen içgüdüsel olarak gerçekleştirdiği, gerçek hayatta bilinçli öğrenilmemiş karar mekanizmasına dayanmaktadır. Bu modelde, tecrübe ve eğitim önem arz etmemektedir [10].

AHP, karar alternatiflerini sıralarken ikili karşılaştırma matrisleriyle göreceli ağırlıklandırma yapmaktadır [11]. Nitel ve nicel faktörlerin bir arada değerlendirilmesini mümkün kılan AHP tekniği, bireylere karar verirken, ikili karşılaştırmalarla, büyük ölçüde destek sağlamaktadır [12]. Birçok uygulamaya esas oluşturan AHP'nin uygulama aşamaları aşağıda verilmiştir [11,13-16]:

Aşama 1 - Problemin tanımlanması ve amacın belirlenmesi: İlk olarak karar verme problemi tanımlanarak amacın belirlenmesi gerekmektedir.

Aşama 2 - Karar alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi: Problemden kullanılacak olası karar alternatiflerin belirlenmesi gerekmektedir. Hangi alternatifin seçileceğine ilişkin kararı etkileyen, karar kriterlerinin de belirlenmesi gerekmektedir.

Aşama 3 - Hiyerarşik yapının oluşturulması: AHP tekniğinde problemin hiyerarşik yapısının görselleştirilmesi oldukça önemlidir. Burada karar problemi hiyerarşik olarak düzenlenerek daha anlaşılır ve değerlendirilebilir hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Hiyerarşik yapıya ilişkin örnek bir görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Aşama 6 - Öncelik vektörünün oluşturulması: Bu aşamada vektörlerin ağırlık değerlerinin hesaplanabilmesi için ilk olarak ikili karşılaştırma matrisi normalleştirilmelidir. Burada öncelikle n adet ve n bileşenli B sütun vektörü oluşturulmaktadır. B sütun vektör aşağıda verilmiştir:

$$B = [b_{11} \ b_{21} \ \dots \ b_{n1}]$$

B sütun vektörü (1) formülü ile belirlenir:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Yukarıda bahsedilen adımlar her değerlendirme kriteri için tekrarlandığında belirlenen kriter sayısı kadar B sütun vektörü oluşturulacaktır. Kriter sayısı kadar oluşan B sütun vektörü bir matris şeklinde birleştirilerek normalize olmuş ikili karşılaştırma matrisi (C Matrisi) elde edilmiş olunur. C matrisine ilişkin matematiksel ifade şöyledir:  $C = [c_{11} \ c_{12} \ \dots \ c_{1n} \ c_{21} \ c_{22} \ \dots \ c_{2n} \ \dots \ c_{n1} \ c_{n2} \ \dots \ c_{nm}]$ .

Normalize edilmiş matris ile kriterlerin birbirlerine göre önem değerleri, yani ağırlık değerleri elde edilir. Önem değerlerin elde edilmesi için normalize matrisinin satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınır. Buna ilişkin formül (2) de verilmiştir:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (2)$$

Hesaplamalar sonucunda aşağıda yer alan öncelik vektörü (W sütun vektörü) elde edilmektedir.  $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]$

Aşama 7 - Tutarlılık oranının hesaplanması: AHP tutarlılık oranı (consistency ratio -CR), öncelik vektörü ve kriterler arasında gerçekleştirilen karşılaştırmaların tutarlılığının test edilmesini sağlamaktadır. Tutarlılık oranı, kriter sayısının Temel Değer ( $\lambda$ ) katsayısı ile karşılaştırılması ifade etmektedir. Temel değer hesaplanabilmesi için bir önceki adımda oluşturulan A karşılaştırma matrisi ile W öncelik vektörü ile çarpılarak D sütun vektörü elde edilmektedir.  $D = [a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{1n} \ a_{21} \ a_{22} \ \dots \ a_{2n} \ \dots \ a_{n1} \ a_{n2} \ \dots \ a_{nm}] \times [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]$

Değerlendirme kriterlerinin her biri için elde edilen D sütun vektörüyle W sütun vektörünün karşılıklı elemanlarının bölünmesiyle, E değeri elde edilir. Buradaki D değerinin aritmetik ortalaması alınarak, karşılaştırmaya bağlı temel değer ( $\lambda$ ) elde edilmektedir (Formül 3). Temel değer elde edilmesinden sonraki işlem ise tutarlılık göstergesinin (CI) elde edilmesidir. CI değerini elde etmek için formül (4)'ten yararlanılmaktadır. Son olarak ise tutarlılık oranı (CR) hesaplanır. Bu adımda elde ettiğimiz tutarlılık göstergesi (CI), rassallık göstergesine (RI) bölünerek CR değeri elde edilir (Formül 5).

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

Tutarlılık oranını elde edebilmek için RI değerine ihtiyaç vardır ve bu değer, rastgele indeks tablosundaki kriter sayısına (n) göre belirlenmektedir. Tablo 3'te rastgele indeksler yer almakta olup, bu tabloda 1 ile 15 arasında bulunan kare matrisler için rastgele değerler bulunmaktadır.

Tablo 3. Rastgele indeks (Rİ) tablosu (Random index (RI) table)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rassallık Göstergesi	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51	1,48	1,48	1,56	1,57	1,59

Karar verici değerlendirme aşamasında tutarlılık oranını her kriterine dayalı olarak kullanabilmektedir. Tutarlılık oranı son kararı verirken kalite ve geçerlilik açısından oldukça önemlidir. AHP tekniği tutarlılığın test edilmesini sağladığı için diğer ÇKKV tekniklerinden daha çok güven oluşturmaktadır. Hesaplamalar sonucunda karar matrisinin tutarlılığının sağlanabilmesi için tutarlılık oranı 0,10'dan küçük olması istenir

(CR < 0,10). Tutarlılık oranı sifira ne kadar yakın ise daha tutarlı bir karşılaştırma sonucu elde edilecektir.

Sonucun belirlenmesinden sonra, karşılaştırma işleminin tutarlılık oranını sağlayıp sağlanmadığının kontrolü yapılmalıdır. Eğer tutarlılık oranı sağlanmazsa, karar vericinin kararı gözden geçirmesi ve düzeltilmesi beklenir. Daha sonra ikili karşılaştırma matrislerinden ağırlıkların hesaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece her kriterin çözümdeki ağırlığı belirlenmiş olur.

### 2.3. TOPSİS tekniği (TOPSIS technique)

Hwang ve Yoon'un 1980 yılında geliştirdikleri tekniği günümüzde organizasyonlarda performans değerlendirme kriteri olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Bu nedenle TOPSİS tekniği ile birçok alanda uygulamalar yapılmakta ve gün geçtikçe de öneminin arttığı görülmektedir [17].

TOPSİS tekniğindeki temel mantık, seçilmiş olan alternatife pozitif ideal çözüme (PIS) mümkün mertebe yakın ve negatif ideal çözüm (NIS) için ise oldukça uzak olması istenir. Dolayısıyla teknik, ideal çözüme en fazla benzerlikte olan bir alternatif seçmektedir [18].

Her bir kriterin aynı şekilde değişen (artan/azalan) bir fayda eğilimine sahip olduğu varsayılmaktadır [19] ve bu nedenle pozitif ve negatif ideal çözümlerin tanımlanması oldukça kolaydır. TOPSİS tekniğinde elde edilen değerlerin en iyileri pozitif ideal çözümü, en kötülerini ise negatif ideal çözümü ifade etmektedir. Alternatife değerlendirilmesinde pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olan seçenek, en iyi alternatif kabul edilmektedir [20]. TOPSİS tekniklerinde uygulanan aşamalar aşağıda verilmiştir [21-22];

Aşama 1 - Problemin tanımlanması ve amacın belirlenmesi: İlk olarak karar verme problemi tanımlanarak amacın belirlenmesi gerekmektedir.

Aşama 2 - Karar alternatiflerinin ve kriterlerin belirlenmesi: Problemden kullanılacak muhtemel karar alternatiflerinin belirlenmesi gerekmektedir. Hangi alternatifin seçileceğine ilişkin kararı etkileyen karar kriterlerinin de belirlenmesi gerekmektedir.

Aşama 3 - Karar matrisinin oluşturulması: Karar matrisi satırlarında üstünlüklerine göre sıralanan karar alternatifleri, sütunlarında ise karar vermede kararı etkileyen kriterler yer almaktadır. Karar matrisi, karar verici tarafından oluşturulan (mxn) boyutundadır ve A matrisi ile ifade edilmektedir [23].  $A_{ij} = [a_{11} \ a_{12} \ \dots \ a_{1n} \ a_{21} \ a_{22} \ \dots \ a_{2n} \ \dots \ a_{m1} \ a_{m2} \ \dots \ a_{mn}]$ .

A matrisi başlangıç matrisi olarak da ifade edilmektedir ve burada m problemin çözümünde kullanılacak alternatiflerin sayısını ve n değeri değerlendirmeye alınacak kriterlerin sayısını ifade etmektedir.

Aşama 4 - Karar matrisinin normalleştirilmesi: Bu süreç, çeşitli nitelik boyutlarını benzer şekilde boyutsuz niteliklere dönüştürmeye çalışır. Karar matrisinin oluşturulmasından sonra matristeki her bir  $A_{ij}$  değeri aşağıdaki formülden (6) yararlanılarak normalize edilmektedir [24].

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (6)$$

Bu formül ile her bir değer, bulunduğu sütundaki değerlerin kareler toplamının kareköküne bölünerek normalize edilmesi sağlanmaktadır [23]. R ile gösterilen normalleştirilmiş karar matrisi ifade etmektedir.

$$R_{ij} = [r_{11} \ r_{12} \ \dots \ r_{1n} \ r_{21} \ r_{22} \ \dots \ r_{2n} \ \dots \ r_{m1} \ r_{m2} \ \dots \ r_{mn}]$$

Aşama 5 - Ağırlıklandırılmış normalize matrisin elde edilmesi: Değerlendirmeye alınacak kriterlerin ağırlık değerleri ( $w_i$ ) belirlenmesi bu aşamanın ilk adıdır. Karar verici tarafından belirlenen kriter atanmış ağırlık değerlerinin toplamını 1 olması gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde formüle edilir;

$$\sum_{i=1}^m W_{ij} = 1 \quad (7)$$

Bu ağırlık değerleri ( $w_i$ ) bir önceki adımda elde edilen normalize matrisin (R Matrisi) her bir sütunda yer alan elemanları ile çarpılmaktadır ve böylece Ağırlıklı Standart Karar Matrisi ( $V_{ij}$ ) elde edilmektedir [23];  $V_{ij} =$

$$[w_1r_{11} \ w_2r_{12} \ \dots \ w_n r_{1n} \ w_1r_{21} \ w_2r_{22} \ \dots \ w_n r_{2n} \ \dots \dots \dots \ w_1r_{m1} \ w_2r_{m2} \ \dots \ w_n r_{mn}] \cdot$$

Aşama 6 - Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi: Karar vericinin amacı büyükleme ise; her sütunda en büyük değer bulunur ve ideal çözüm olarak tanımlanır. Her sütundaki en küçük değer belirlenerek, negatif ideal çözüm tanımlanır. Karar vericinin amacı küçükleme ise; her bir sütunda en küçük değer bulunur ve ideal çözüm olarak tanımlanır. Sonrasında her sütundaki büyük değer bulunarak negatif ideal çözüm tanımlanır [24].

$$\text{Pozitif ideal çözüm } (A^+) = \{ \max_i v_{ij} | j \in J \}, (\min_i v_{ij} | j \in J') \quad (8)$$

Formül 8'den hesaplanacak set  $A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$  şeklinde gösterilmiştir. Burada her bir sütuna ait en büyük değer ifade edilmektedir.

$$\text{Negatif ideal çözüm } (A^-) = \{ \min_i v_{ij} | j \in J \}, (\max_i v_{ij} | j \in J') \quad (9)$$

Formül 9'dan hesaplanacak set  $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$  şeklinde gösterilmiştir. Burada her bir sütuna ait en küçük değer ifade edilmektedir. Yani, karar verici fayda kriterini değerlendirdiğinde en büyük değeri seçerken, maliyet açısından baktığında ise en küçük değeri seçecektir. Amacı en büyükleme olan bir problemin pozitif ideal ve negatif ideal çözümün elde edilmesi Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Pozitif ideal ve negatif ideal çözümlerin elde edilmesi [Obtaining positive ideal and negative ideal solutions]

Alternatifler	Kriterler			
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$V_{11} = w_1 \cdot r_{11}$	$V_{12} = w_1 \cdot r_{12}$	...	$V_{1n} = w_1 \cdot r_{1n}$
$A_2$	$V_{21} = w_1 \cdot r_{21}$	$V_{22} = w_1 \cdot r_{22}$	...	...
...	...	...	...	...
$A_m$	$V_{m1} = w_1 \cdot r_{m1}$	$V_{m2} = w_2 \cdot r_{m2}$	...	$V_{mn} = w_n \cdot r_{mn}$
$A^+$ (Pozitif ideal)	$V_1 = \text{Maks } v_{i1}$	$V_2 = \text{Maks } v_{i2}$	...	$V_n = \text{Maks } v_{in}$
$A^-$ (Negatif ideal)	$V_1 = \text{Min } v_{i1}$	$V_2 = \text{Min } v_{i2}$	...	$V_n = \text{Min } v_{in}$

Aşama 7 - Ayırma ölçümünün hesaplanması: Değerlendirmeye alınacak kriter değerlerinin pozitif ideal ve negatif ideal çözüm setinden sapmaları bu aşamada elde edilmektedir. Bunun için Öklid Uzaklık yaklaşımından yararlanılabilir [25]. Bu yaklaşım ile elde edilen sapma değerleri pozitif ideal ayırım ( $S_i^+$ ) ve negatif ideal ayırım ( $S_i^-$ ) olarak ifade edilmektedir. Sapma değerlerinin belirlenmesinde, formül (10) ve (11)'den yararlanılmaktadır;

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

Bu formüller ile hesaplanacak ( $S_i^+$ ) ve ( $S_i^-$ ) sayıları, doğal olarak problemde belirlenmiş alternatif sayısı kadar olması gerekmektedir.

Burada ( $S_i^+$ ) her bir alternatifin pozitif ideal çözümünden Öklid mesafesine olan uzaklığıdır. ( $S_i^-$ ) ise her bir alternatifin negatif ideal çözümünden Öklid mesafesine olan uzaklığıdır [19].

Aşama 8 - İdeal çözüme göre görelî çözümün hesaplanması: Bu adımda her bir alternatifinin ideal çözüme görelî yakınlığı ( $C_i^+$ ) hesaplanmaktadır. Bunun için adım 8'de elde edilen pozitif ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinden yararlanılmaktadır. Burada ( $C_i^+$ ) değeri negatif ideal ayırım ölçüsünün toplam ayırım ölçüsüne bölünmesi ile edilmektedir ve formül (12) ile hesaplanmaktadır [26];

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

Burada ( $C_i^+$ ) değeri,  $0 \leq (C_i^+) \leq 1$  aralığında bir değer alır.

$(C_i^+)$  = 1 ilgili alternatifin pozitif ideal çözüme mutlak yakınlığını göstermektedir.  
 $(C_i^-)$  = 0 ilgili alternatifin negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını göstermektedir.

Son olarak her bir alternatif için elde edilen  $(C_i^+)$  değerleri büyükten küçüğe sıralanır ve burada en büyük  $(C_i^+)$  değerine sahip olan alternatif en iyi veya optimal alternatiftir.

#### 2.4. Literatürde AHP, TOPSIS ve web sitesi performansı (AHP, TOPSIS and website performance in the literature)

Literatürde ÇKKV tekniklerinden olan AHP ve TOPSIS teknikleriyle gerçekleştirilmiş çalışmaların bazıları Ek-3'te sunulmuştur [12, 13, 15, 16, 27-36]. ÇKKV tekniği çok girdili karar süreçlerinde sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Literatürde yer alan e-ticaret web sitelerin performans değerlendirmelerini içeren çalışmaların bazıları ise şöyle özetlenebilir:

Sulova, web sitesi temel performans göstergelerini ziyaret başına görüntülenen sayfa sayısı, web sitesinin ziyaretçi sayısı, kullanıcının web sitesinden hemen ayrılma oranları ve web sitesinde geçirilen ortalama süre olduğunu vurgulamıştır [37]. Elisa ise web sitesinde sayfanın açılma süresinin performans değerlendirmesinde temel kriter olduğunu ifade etmiştir [38].

Maruf, ÇKKV tekniklerinden olan SWARA ve WASPAS kriterlerini kullanarak Türkiye'de en çok ziyaretçi sayısına ulaşan 10 e-ticaret web sayfasını performanslarına göre değerlendirmiştir. Çalışma Gtmatrix ve Similarweb'den 2021 yılı Ocak ayı verilerine göre değerlendirmiştir. SWARA kriteri ile web sitesi performansını performans katsayısı (%), açılma süresi, hemen ayrılma oranı, toplam ziyaretçi sayısı, dünya sıralaması, Türkiye sıralaması, sayfada geçirilen ortalama süre ve görüntülenen ortalama sayfa sayısı kriterleri ile belirleyip, bu kriterlerin ağırlıklarını tespit etmiştir. En yüksek ağırlıklı performans kriterini web sitesinin açılma süresi olarak belirlemiştir. En düşük ağırlıklı performans kriterleri ise web sitesinin Türkiye'de ve dünyada yer aldığı sıradır. WASPAS kriteri ile web sitelerin performans kriterlerine göre sıralanmasında ilk sırayı Trendyol almaktadır. En iyi performanstan düşük performansa Trendyol'u, Çiçeksepeti, Sahibinden, Hepsiburada, Amazon, Gittigidiyor, N11, Morhipo, İdefix ve ePttavm işletmeleri izlemektedir [39].

Maruf ve Özdemir, ÇKKV tekniklerinden olan SWARA ve ARAS kriterlerini kullanarak Türkiye'de kullanılan 15 ticari banka web sitesi performanslarına göre değerlendirmiştir. Veriler 2021 yılı Ocak ayına ait olup, veri kaynağı olarak Gtmatrix ve Similarweb'den yararlanılmıştır. Web sitesi performansı performans (%), hız indeksi (s), açılma süresi (s), boyut (mb), hemen ayrılma oranı (%), toplam ziyaretçi sayısı, dünya sıralaması, Türkiye sıralaması, geçirilen ortalama süre (s) ve görüntülenen ortalama sayfa sayısı kriterleri ile belirlenmiştir. SWARA kriteri ile elde edilen kriter ağırlık değeri azalan sırayla performans, açılma süresi, hız indeksi, boyut, görüntülenen ortalama sayfa sayısı, toplam ziyaretçi sayısı, hemen ayrılma oranı, geçirilen ortalama süre, dünya sıralaması ve Türkiye sıralaması kriterleridir. Seçilen banka web sitelerinin ARAS kriteri ile performans sıralamaları ise azalan sırada HSBC, Fiba Bank, Şeker Bank, Yapı ve Kredi Bankası, İş Bankası, OdeaBank, Vakıfbank, Garanti BBVA, Ziraat Bankası, Halkbank, QNB Finans Bank, Deniz Bank, Türkiye Ekonomi Bankası, ING Bank ve Akbank'tır. Çalışma kapsamında HSBC en iyi web site performansına sahiptir [40].

Nacar ve Özdemir (2021), e-ticaret web sitelerine ilişkin değişkenlerin arasında bulunan ilişkileri ve pandemi döneminin (COVID-19) bu ilişkilere olan etkisi farklı dönemlerde araştırmıştır. Bu çalışmada 2020 yılı şubat, mayıs ve ekim aylarına ait verilerle (veriler aylık olarak sunulmaktadır), Türkiye'de en çok ziyaret edilen 16 e-ticaret web sitesini açık erişimle veri paylaşan Similarweb ve Gtmatrix veri kaynağından elde etmiştir. Web sitesinin teknik özellikleri, web sitesine giriş kaynakları ve web sitesi için yapılan aramalar ile web sitesi kullanım istatistikleri incelenmiştir. Bu değişken setleri arasında güçlü bir ilişkinin olduğu ve incelemeye dahil edilen aylarda farklı web site özelliklerinin öne çıktığını, değişkenler arasında bulunan ilişki yapısının pandemi döneminde değiştiği gözlemlenmiştir. Ek olarak web sitesi açılma süresi, düşük sayfa boyutunun dünya ve Türkiye sıralamasını etkilediğini vurgulamışlardır [2].

Naheem (2016), ticari web trafiği verileri sağlayan Amazon.com'un bir yan kuruluşu olan Alexa Internet'i kullanan Malayalam gazete web sitelerini webometrik kriterler kullanılarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada Kerala'daki önde gelen 13 Malayalam gazetesi web sitesi değerlendirmeye alınmıştır. Çalışmaya dahil edilen gazete web siteleri şunlardır; Chandrika, Deepika, Deshabhimani, Janayugom, Janmabhumi, Kerala Kaumudi, Madhyamam, Malayala Manorama, Mangalam, Mathrubhumi, Siraj, Thejas ve Veekshanam.

Burada her bir web sitesi Alexa veri bankasında aratılarak trafik sıralaması, görüntülenen sayfalar, hız, bağlantılar, hemen çıkma yüzdesi, sitede geçirilen süre, arama yüzdesi ve Hintli/yabancı kullanıcılar (Kitle coğrafyası) gibi veriler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek trafik sıralamasına sahip bazı gazeteler bazı özelliklerde zayıf performans gösterirken, düşük trafik sıralamasına sahip bazı gazeteler iyi performans göstermiştir. Diğer gazetelerle karşılaştırıldığında Malayala Manorama hem küresel hem de Hindistan'da en yüksek trafik sıralamasına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte Malayala Manorama en yüksek sayıda bağlantıya sahiptir. Siraj gazetesinin web sitesi, en yüksek günlük görüntülenen ortalama sayfa sayısı ve ziyaretçiler tarafından sitede geçirilen tahmini günlük süreye sahip olduğu belirlenmiştir. Madhyamam en yüksek indirme hızına sahiptir. En düşük hemen çıkma yüzdesi ise Veekshanam gazetesinin web sitesinde ölçülmüştür. Arama motorlarından gelen ziyaretlerin en yüksek yüzdesine Janayugom; en yüksek yabancı kullanıcı sayısına Chandrika'nın sahiptir. Burada Malayalam gazetelerinin yabancı kullanıcılarının çoğu Katar, BAE, Suudi Arabistan ve Kuveyt gibi Körfez ülkelerinden geldiği gözlemlenmiştir [41]. Bu sonuçlar Malayalam'da çevrimiçi gazetelerin performans değerlendirmesi ile rekabet avantajı sağlaması için geliştirmesi gereken yönleri hakkında bilgi vermektedir.

Gymera ve Jah (2020), Kipfashion adında bir Afrika moda giyim firmasının e-ticaret mağazasını analiz ederek, optimize etmişlerdir. Çalışma arama e-ticaret mağazasını arama motoru görünürlüğüne göre optimize etme ve mağazayı e-dönüşüm için optimize etme hedeflenmiştir. Google analytics aracılığıyla, SEO ve diğer optimizasyon süreçleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda işletmenin başarısını etkileyen (dönüşüm oranını en üst düzeye çıkaran) kriterler belirlenerek, başarıyı artırmak amacıyla yeni stratejiler belirlenmiştir. Web sitesi performansı, kullanıcı deneyimi, arama motorlarındaki görünürlük ve sosyal medya platformlarındaki varlık, işletmenin başarısını etkileyen kriterlerdir. Gymera ve Jah web sitesi hızının, müşterinin mağaza hakkındaki ilk izlenimi verdiğini vurgulamışlardır. Web sitelerin yüksek bir performansa sahip olması durumunda, yüksek geri dönüş ziyaretleri, düşük hemen çıkma oranları, daha yüksek dönüşümler, katılım, organik aramada (arama motoruna girilen anahtar kelimeler) daha yüksek sıralarda yer alma ve daha iyi kullanıcı deneyimi sağladığını belirtmişlerdir. Web sitesi hızının yavaş olması, maddi olarak mağazayı olumsuz yönde etkilediği ve mağazanın itibarına zarar verdiği belirtilmiştir. Pazarlama ve satış süreçlerini olumlu yönde değiştirmek ve müşteri sayısını artırmak için, e-ticaret olarak hizmete sunulan çevrimiçi mağazanın web sayfası yükleme süresinin azaltılması önerilmişlerdir [42].

### 3. Yöntem (Method)

Bu bölümde araştırma yöntemi, örneklem, web sitesi performans kriterlerinin seçimi ve bu kriterlerinin ağırlıklandırmasına ilişkin ayrıntı bilgi sunulmaktadır.

#### 3.1. Araştırma yöntemi (Research method)

Bu çalışmada Türkiye'de satış yapan işletmelerin e-ticaret web sitesi performansı değerlendirilmiştir. Tarama türünde gerçekleştirilen bu çalışmada, ücretsiz ve açık olarak erişim sağlanan veriler analiz edilmiştir. E-ticaret web sitelerinin performanslarına göre sıralanmasında ÇKKV tekniklerinden olan AHP ile TOPSİS'ten yararlanılmıştır. Değerlendirme kriterlerinin ağırlık değerlerinin elde edilebilmesinde AHP tekniği, web sitelerinin bu kriterlere göre sıralanması ise TOPSİS tekniğinden yararlanılmıştır. Her iki teknik için hesaplamalar Microsoft Excel uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada karşılaştırılan e-ticaret siteleri verileri ise açık ve ücretsiz olarak veri paylaşımı yapan Similarweb.com ve <https://gtmetrix.com> adresinde elde edilmiştir.

#### 3.2. Örneklem (Sample)

Türkiye'de en çok ziyaret edilen e-ticaret siteleri, 2022 yılı Ekim ayı Similarweb.com tarafından yayınlanan listedeki ilk 15 web sitesi olarak seçilmiştir. Bu listeye göre en çok ziyaret edilen e-ticaret firması web siteleri sıralaması azalan sırayla Trendyol.com, A101.com.tr, FLO.com.tr, Hepsiburada.com, DeFacto.com.tr, Çiçeksepeti.com, Turkcell.com.tr, Dolap.com, Karaca-home.com, Sahibinden.com, Amazon.com.tr, Letgo.com, n11.com, Migros.com.tr ve Mavi.com'dur [43].

#### 3.3. Web sitesi performans kriterlerinin seçimi ve ağırlıklarının belirlenmesi (Selection and weighting of website performance criteria)

Web site performansı belirlenirken dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına



sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi, hemen ayrılma oranı, performans katsayısı ve hız endeksi kriterleri sıklıkla kullanılmakta olup, bu çalışmada bu kriterler ile analiz yapılmıştır. Bu kriterlerin belirlenmesinde uzman görüşünden yararlanılmıştır. Performans kriterlerinin yer aldığı anket, e-ticaret ve web teknolojileri hakkında bilgi sahibi olan 10 uzmana iletilmiş ve yanıtları değerlendirilmiştir.

Araştırmada karşılaştırılan e-ticaret sitelerine ilişkin performans verileri ise açık ve ücretsiz olarak veri paylaşımı yapan Similarweb.com ve <https://gtmetrix.com> adresinden elde edilmiştir. Similarweb.com sayfasından dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi ve hemen ayrılma oranı; Gtmetrix.com adresinden ise web sitesi performans katsayısı ve hız indeksine ilişkin veriler elde edilmiştir. Bu performans kriterlerine ilişkin açıklamalar şöyledir.

**Dünya Sıralaması:** Araştırılan web sitesinin, dünyadaki e-ticaret web siteleri arasında hangi sırada olduğunu gösterir.

**Ülke Sıralaması:** Web sitesinin Türkiye'deki e-ticaret web siteleri arasında kaçınıcı sırada olduğunu gösterir.

**Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon):** Web sitesini ziyaret eden aylık tahmini toplam müşteri sayısını ifade etmektedir.

**Ziyaret Başına Sayfa Sayısı:** Web sitesinde ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısını ifade etmektedir. Aylık olarak ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısı toplam ziyaretçi sayısına bölünerek, ortalama değer olarak ifade edilmektedir.

**Ortalama Ziyaret Süresi (Dk.):** Müşterilerin web sitesinde geçirdiği ortalama süreyi dakika cinsinden ifade etmektedir.

**Hemen Ayrılma Oranı (%):** Hemen çıkma oranı (Bounce Rate) olarak da ifade edilir. Web sitesi ziyaretçisinin, açılış sayfası haricinde başka bir sayfayı ziyaret etmeden siteden ayrılma yüzdesini gösteren bir metriktir.

**Performans (%):** Performans puanı/katsayısı, kullanıcı web sayfasını performans değerlerini ifade eder ve % olarak tanımlanır. Performans puanını, %45 'lik etki ile yükleme performansı, %40 ile etkileşim ve %15 ile görsel stabilite oluşturmaktadır. Bu performans metrikler ile GTmetrix testleri tarafından elde edilen Lighthouse Performans Puanıdır. Lighthouse, Google tarafından yayınlanan bir performans analiz aracıdır.

**Yükleme performansı;** ziyaretçilerin web sayfasındaki gerçek içeriği (metin, resim, video vb.) görüntüleme hızı, web sayfasının ekranda görsel olarak tamamlanma hızı ve web sayfasındaki en büyük "içerik ögesinin" (ana resim, video, başlık metni vb.) ziyaretçinin ekranında tamamen görünür hale gelmesi için geçen süreyi kapsamaktadır. Etkileşim ise sayfanın kullanıcı etkileşimi için güvenilir bir şekilde en kısa hazırlanma süresi ve kullanıcının sayfaya etkileşim kurmasını engelleyen etkenlerle ilgili bir metriktir. Görsel stabilite sayfa yüklenirken web öğelerinin beklenmedik şekilde kayması durumunu içermektedir.

**Hız İndeksi (s):** Bir web sayfasının öğelerinin görünür hale gelme süresini saniye (s) biriminde tanımlayan "web sayfası yükleme performansı" metriğidir [44].

Yukarıda açıklaması verilen web sitesi performans kriterlerinin ağırlıkları uzman görüşü ile belirlenmiştir. Ağırlıkların belirlenmesinde literatürde sıklıkla kullanılan Saaty (1987) tarafından geliştirilmiş ve 1 ile 9 arasında puanlandırılan Saaty ölçeğinden yararlanılmıştır. Ankette uzmanlardan e-ticaret web sitelerin performansını etkileyen kriterleri karşılaştırmalı puanlandırması istenilmiştir. Performans kriterlerinin ağırlığı, uzmanların anket sorularına karşılaştırmalı olarak verdiği yanıtların toplamının katılımcı sayısına bölünmesiyle, yani aritmetik ortalamasının alınmasıyla elde edilmiştir. Anket formunda web site performansını etkileyen kriterlerin açıklamalarına da yer verilmiştir. Performans kriterleri dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi, hemen ayrılma oranı, performans katsayısı ve hız endeksi olmak üzere 8 adettir. Ankette açıklama metni, ikili karşılaştırma puanlama örneği ve belirlenen kriterler için puanlama tablosu yer almaktadır. Puanlama değerlerine ilişkin açıklama Tablo 1'de sunulmuştur. İkili karşılaştırma tablosunda, performans kriterinin önem derecesi yani ağırlığını belirlerken; 1 eşit önem durumu olan en düşük önemi, 9 ise aşırı önem durumunu temsil etmektedir. Anketin tamamı Ek-1 olarak sunulmuştur (Puanlanmış örnek bir anket Ek-2'de verilmiştir). Uzmanların verdikleri yanıtlar doğrultusunda kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Kriter ağırlıkları bulgular bölümünde Tablo

5 olarak sunulmuştur.

#### 4. Bulgular (Findings)

##### 4.1. Web sitesi performans kriterlerine ilişkin bulgular (Findings regarding website performance criteria)

Çalışmada değerlendirilen e-ticaret web sitelerinin performans kriter değerlerinin veri seti Kasım 2022'de oluşturulmuş olup web sitelerinin Ekim 2022'ye ait performans değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Alternatifler (E-Ticaret Alışveriş Web siteleri)	Kriterler								
	Dünya Sıralaması	Ülke Sıralaması (Türkiye)	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)	Hemen Ayrılma Oranı %	Performans (%)	Hız İndeksi (s)	
Trendyol.com	159	7	179,1	6,97	6,55	36,11	56	2,9	
A101.com.tr	4476	96	14,11	3,48	2,25	52,36	32	4,4	
FLO.com.tr	4304	95	8,69	9,82	4,48	38,65	53	2,9	
n11.com	1354	31	35,2	4,62	3,59	46,59	37	6,4	
Hepsiburada.com	369	15	94,77	5,75	5,23	41,63	33	5	
DeFacto.com.tr	7854	180	6,58	5,48	3,42	37,09	67	2,5	
Çiçeksepeti.com	2505	54	22,96	3,62	4,13	56,85	43	2,9	
Turkcell.com.tr	4729	104	12,55	3,88	3,11	51,8	39	10,5	
Dolap.com	12751	256	3,19	9,35	5,48	36,73	65	1,3	
Karaca-home.com	64579	1219	0,74	4,64	3,03	51,04	34	7	
Sahibinden.com	160	6	122,7	16,07	9,37	27,33	52	9,4	
Amazon.com.tr	916	22	42,97	6,34	4,16	42,9	73	4,7	
Letgo.com	4616	207	5,57	6,33	4,33	36,2	35	2,9	
Migros.com.tr	3864	87	11,65	6,79	3,4	51,65	13	12,2	
Mavi.com	10957	244	4,06	7,37	4,2	43,61	17	5	

Şekil 2. Alternatifler, kriterler ve performans değerleri (Alternatives, criteria and performance values)

##### 4.2. AHP tekniği bulguları (AHP technique findings)

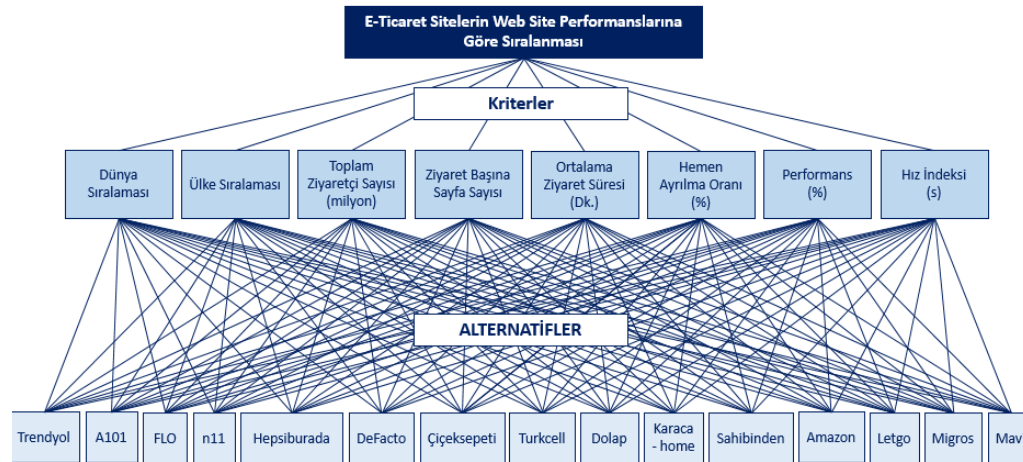
AHP tekniği aşamalarına ilişkin bulgular sırasıyla şöyledir.

Aşama 1 - Problemin Tanımlanması ve Amacın Belirlenmesi: Günümüzde gelişen teknoloji ve rekabet ortamı e-ticaret firmalarının sundukları hizmetleri sürekli iyileştirmesine ve geliştirmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'deki e-ticaret firmalarının web site performanslarını etkileyen değişkenler, bu değişkenlerin ağırlık değerleri ve işletme performansının belirlenmesi amaçlanmaktadır. AHP tekniği ise e-ticaret firmalarının web sitelerinin performans kriterlerinin ağırlıklarını (öncelik vektörü) belirleme amacıyla kullanılmıştır.

Aşama 2 - Karar Alternatiflerin ve Kriterlerin Belirlenmesi: Türkiye'de en çok ziyaret edilen e-ticaret siteleri, 2022 yılı Ekim ayı Similarweb.com tarafından yayınlanan listedeki ilk 15 web sitesi olarak seçilmiştir. Bu listeye göre en çok ziyaret edilen e-ticaret web siteleri sıralaması azalan sırayla Trendyol.com, A101.com.tr, FLO.com.tr, Hepsiburada.com, DeFacto.com.tr, Çiçeksepeti.com, Turkcell.com.tr, Dolap.com, Karaca-home.com, Sahibinden.com, Amazon.com.tr, Letgo.com, n11.com, Migros.com.tr ve Mavi.com'dur [43].

Web sitesi performans kriterleri dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi, hemen ayrılma oranı, performans katsayısı ve hız endeksi olmak üzere 8 adettir. Uzman görüşünden yararlanılarak kriterler belirlenmiş olup, kriterlere ilişkin açıklamalar Bölüm 2.3'te sunulmuştur.

Aşama 3 - Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: Belirlenen e-ticaret sitelerinin web sitesi performanslarının sıralanabilmesi için problemin hiyerarşik yapısı oluşturulmuş ve Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Problemin hiyerarşik yapısı (Hierarchical structure of the problem)

Aşama 4 - Önceliklerin Belirlemesi: Web sitesi performans kriterlerinin ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşünden yararlanılmıştır. Performans kriterlerinin önem düzeyi Saaty (1987)'nin geliştirdiği ikili karşılaştırma ile belirlenmiştir. Uzman görüşü doğrultusunda belirlenen ikili karşılaştırma sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. İkili karşılaştırma uzman görüşü sonuçları (Pairwise comparison expert opinion results)

Kriterler	İkili Karşılaştırma Değerleri	Kriterler	İkili Karşılaştırma Değerleri
Dünya Sıralaması - Ülke Sıralaması	1,91	Hemen Ayrılma Oranı - Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	3,55
Toplam Ziyaretçi Sayısı - Dünya Sıralaması	3,60	Performans - Dünya Sıralaması	5,90
Toplam Ziyaretçi Sayısı - Ülke Sıralaması	4,40	Performans - Ülke Sıralaması	5,20
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı - Dünya Sıralaması	4,00	Performans - Toplam Ziyaretçi Sayısı	4,30
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı - Ülke Sıralaması	4,00	Performans - Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	5,00
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı - Toplam Ziyaretçi Sayısı	2,25	Performans - Ortalama Ziyaret Süresi	3,50
Ortalama Ziyaret Süresi - Dünya Sıralaması	4,80	Performans - Hemen Ayrılma Oranı	2,90
Ortalama Ziyaret Süresi - Ülke Sıralaması	4,40	Performans - Hız İndeksi	1,38
Ortalama Ziyaret Süresi - Toplam Ziyaretçi Sayısı	3,50	Hız İndeksi - Dünya Sıralaması	6,00
Ortalama Ziyaret Süresi - Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	2,12	Hız İndeksi - Ülke Sıralaması	5,60
Ortalama Ziyaret Süresi - Hemen Ayrılma Oranı	1,61	Hız İndeksi - Toplam Ziyaretçi Sayısı	4,70
Hemen Ayrılma Oranı - Dünya Sıralaması	4,00	Hız İndeksi - Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	4,30
Hemen Ayrılma Oranı - Ülke Sıralaması	4,40	Hız İndeksi - Ortalama Ziyaret Süresi	3,55
Hemen Ayrılma Oranı - Toplam Ziyaretçi Sayısı	2,85	Hız İndeksi - Hemen Ayrılma Oranı	3,20

Tablo 5'e göre performans kriterlerinden "Hız İndeksi - Dünya Sıralaması" ikili karşılaştırması (6,00) en yüksek değeri, "Performans - Hız İndeksi" ikili karşılaştırması (1,38) değer almıştır. "Performans - Hız İndeksi" kriterlerinin birbirlerine göre önemi yaklaşık olarak "eşit" seviyedeysen, "Hız İndeksi - Dünya Sıralaması" ikili karşılaştırması "güçlü dereceden daha fazla önemli" seviyesine yakındır (Tablo 1).

Aşama 5 - İkili Karşılaştırma Matrisinin ve Öncelik Vektörünün Oluşturulması: Kriter ikili karşılaştırma değerlerinden (Tablo 5) yararlanarak, kriterlerin kendi aralarındaki ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur (Tablo 6).

Tablo 6. İkili karşılaştırma matrisi (Pairwise comparison matrix)

Performans Kriteri	Dünya Sıralaması	Ülke Sıralaması (Türkiye)	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)	Hemen Ayrılma Oranı (%)	Performans (%)	Hız İndeksi (s)
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1,00	1,91	0,28	0,25	0,21	0,25	0,17	0,17
C2	0,52	1,00	0,23	0,25	0,23	0,23	0,19	0,18
C3	3,60	4,40	1,00	0,44	0,29	0,35	0,23	0,21
C4	4,00	4,00	2,25	1,00	0,47	0,28	0,20	0,23
C5	4,80	4,40	3,50	2,12	1,00	1,61	0,29	0,28
C6	4,00	4,40	2,85	3,55	0,62	1,00	0,34	0,31
C7	5,90	5,20	4,30	5,00	3,50	2,90	1,00	1,38
C8	6,00	5,60	4,70	4,30	3,55	3,20	0,72	1,00
<b>Toplam</b>	29,82	30,91	19,11	16,91	9,86	9,82	3,15	3,76

Tablo 6'ya göre ziyaret başına sayfa sayısı (C4), dünya sıralaması (C1) kriterinden 4 kat daha önemlidir, yani orta dereceden fazla önemlidir (Tablo 1). Dünya sıralaması (C1) kriteri ise ziyaret başına sayfa sayısı (C4), kriterinden 1/4 oranında tercih edilir ve matriste 0,25 değerini almıştır. Tablo 6'da yer aldığı üzere en önemli kriter ülke sıralaması (C2) 30.91 ile en yüksek öneme sahiptir. Dünya sıralaması (C1) 29.82; toplam ziyaretçi sayısı (C3) 19.11, ziyaret başına sayfa sayısı (C4) 16.91; ortalama ziyaret süresi (C5) 9.86; hemen ayrılma oranı (C6) 9.82; performans (C7) 3.15 ve hız endeksi (C8) 3.76 olarak azalan sırayla izlemektedir.

Aşama 6 - Öncelik Vektörünün Oluşturulması: Bu kısımda TOPSIS tekniğinde kullanılacak ağırlık değerleri elde edilmiştir. Kriter ağırlık değeri ikili karşılaştırma matrisindeki (Tablo 6) her bir değer bulduğu sütunda her bir hücre değeri sütun toplamı ile bölünerek hesaplanmıştır. Örneğin C3-C1 hücresinde bulunan değer;  $3,60/29,82=0,1207$  şeklinde elde edilmiştir. Matriste yer alan değerler sütun toplamına bölünerek öncelik vektörü oluşturulmuştur. Her kritere ait değerler, satır kapsamında toplanarak kriter sayısına (n) bölünerek ağırlık değerleri elde edilmiştir ve Tablo 7'de sunulmuştur. Performans kriterleri Tablo 6 'da ve ilerleyen tüm tablolarda yer alan kısaltmalar (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8) ile ifade edilmiştir.

Tablo 7. Öncelik vektörünün oluşturulması (Creating the priority vector)

Kriterler	Kriterler								Ağırlık Değeri
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
C1	0,0335	0,0618	0,0145	0,0148	0,0211	0,0255	0,0538	0,0443	0,0337
C2	0,0176	0,0324	0,0119	0,0148	0,0230	0,0231	0,0611	0,0474	0,0289
C3	0,1207	0,1423	0,0523	0,0263	0,0290	0,0357	0,0738	0,0565	0,0671
C4	0,1341	0,1294	0,1178	0,0591	0,0478	0,0287	0,0635	0,0618	0,0803
C5	0,1609	0,1423	0,1832	0,1253	0,1014	0,1640	0,0907	0,0748	0,1303
C6	0,1341	0,1423	0,1492	0,2099	0,0630	0,1018	0,1095	0,0830	0,1241
C7	0,1978	0,1682	0,2251	0,2956	0,3548	0,2953	0,3175	0,3666	0,2776
C8	0,2012	0,1812	0,2460	0,2542	0,3599	0,3259	0,2301	0,2656	0,2580

Tablo 7'de her bir kritere ait ağırlık değeri elde edilmiştir, ancak bunların TOPSIS tekniğinde kullanılmasının mümkün olup olmadığını tespit edebilmesi için tutarlılık oranının hesaplanması gerekmektedir.

Aşama 7 - Tutarlılık Oranının Hesaplanması: Her bir sütun öncelik vektörüyle çarpıldıktan sonra, her bir satırda bulunan değerler toplanarak "Toplam" sütunu oluşturulmuştur (Tablo 8).

Tablo 8. Temel değer in elde edilmesi (Getting the core value)

Kriterler	Kriterler								Toplam	Ağırlık	Toplam/ Ağırlık Değeri	Ortalama (Landa max)
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8				
C1	0,0337	0,0552	0,0186	0,0201	0,0272	0,0310	0,0471	0,0430	0,2758	0,0337	0,1934	
C2	0,0176	0,0289	0,0152	0,0201	0,0296	0,0282	0,0534	0,0461	0,2391	0,0289	0,2725	
C3	0,1212	0,1272	0,0671	0,0357	0,0372	0,0435	0,0646	0,0549	0,5514	0,0671	0,2186	
C4	0,1347	0,1156	0,1510	0,0803	0,0615	0,0350	0,0555	0,0600	0,6935	0,0803	0,6387	
C5	0,1616	0,1272	0,2348	0,1702	0,1303	0,1998	0,0793	0,0727	0,1759	0,1303	0,0221	0,6765
C6	0,1347	0,1272	0,1912	0,2850	0,0810	0,1241	0,0957	0,0806	0,1194	0,1241	0,0203	
C7	0,1986	0,1503	0,2885	0,4014	0,4562	0,3599	0,2776	0,3560	0,4885	0,2776	0,9639	
C8	0,2020	0,1619	0,3153	0,3452	0,4627	0,3971	0,2012	0,2580	0,3434	0,2580	0,0827	

Elde edilen toplam sütun tablosundaki değerler 6. adımda elde edilen ağırlık değerlerine bölünerek "Toplam/Ağırlık Değeri" sütunu oluşturulur. Sonrasında ise bu sütundaki değerler toplanarak n (kriter) sayısına bölünür ve böylece temel değer ( $\lambda - \text{Landa max}$ ) elde edilir. Temel değer in elde edilmesinden sonraki işlem ise tutarlılık göstergesinin (CI) elde edilmesidir. Bunun için  $(\lambda - n)/(n - 1)$  formülü uygulanarak  $CI = 0,096643$  değerine ulaşılmıştır. Son olarak ise tutarlılık göstergesinin (CI) rassallık göstergesine (RI) bölünmesiyle tutarlılık oranı (CR) elde edilmiştir. Burada RI değeri problemde tanımlanan kriter sayısına göre Rastgele İndeks tablosundan alınmıştır (Tablo 3).

Çalışmada kriter sayısı 8 olduğu için, tutarlılık oranı CI değeri olan 1,41 değerine bölünerek elde edilmiştir. CR değeri  $0,068543$  ( $CI/RI = 0,096643/1,41$ ) olarak elde edilmiş olup,  $0,10'$ dan küçük olduğu için tutarlılığın sağlandığı sonucuna varılmıştır. Tutarlılık oranı sıfıra ne kadar yakın ise daha tutarlı bir karşılaştırma sonucu elde edilecektir. Bu doğrultuda AHP tekniği ile elde edilen ağırlık değerleri TOPSIS uyulmasında kullanılması uygun görülmüştür. AHP ile performans kriter ağırlıkları azalan sıra ile performans katsayısı (C7: 0,27), hız indeksi (C8: 0,25), ortalama ziyaret süresi (C5: 0,13), hemen ayrılma oranı (C6: 0,12), ziyaret başına sayfa sayısı (C4: 0,08), toplam ziyaretçi sayısı (C3: 0, 06), dünya sıralaması (C1: 0,03), ülke sıralaması (C2: 0,02) olarak belirlenmiştir.

### 4.3. TOPSİS tekniği bulguları (TOPSIS technique findings)

Bu bölümde AHP tekniği ile elde edilen ağırlık değerleri dikkate alınarak TOPSİS tekniği ile e-ticaret firmalarının web site performanslarına göre sıralanmıştır. Uygulamada gerçekleştirilen aşamalar şöyledir.

**Aşama 1 - Problemin Tanımlanması ve Amacın Belirlenmesi:** Bu çalışmada Türkiye'de hizmet veren e-ticaret sitelerinin performansları araştırılmaktadır. Araştırılan e-ticaret web sitelerinin performansının belirlenmesinde AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıkları dikkate alınarak, alternatif performansların sıralanması amaçlanmaktadır.

**Aşama 2 - Karar Alternatiflerin ve Kriterlerin Belirlenmesi:** Belirlenen 15 e-ticaret işletmesine ait web sitesi performansını belirlemek için AHP tekniğinde belirlenmiş olan kriterler, TOPSİS tekniğinde de kullanılmıştır. Bu kriterler dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi, hemen ayrılma oranı, web sitesi performans (%) ve hız indeksi kriterleridir.

**Aşama 3 - Karar Matrisinin Oluşturulması:** TOPSİS karar matrisinde kullanılan performans kriterlerinden dünya sıralaması, ülke sıralaması, hemen ayrılma oranı ve hız indeksi kriterleri minimizasyon yönlü kriterlerdir. Minimizasyon yönlü olmaları, bu değerlerin mümkün merteye küçük olmasını ifade etmektedir. Örneğin dünya sıralaması değerinin küçük olması onun diğer alternatiflerden daha ön sırada olmasını ifade eder veya hız indeksinin saniye cinsinden küçük olması web sitesinin hızlı bir şekilde görünür hale geldiğini belirtir. Toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi ve performans kriterleri ise maksimizasyon yönlüdür. Bu değerlerin yüksek olması tercih edilir. Örneğin web sitesini ziyaret eden müşterilerin sayısının fazla olması istenilen bir durumdur. Bu nedenle kriter sütununun altında ilgili kriterlerin maksimizasyon ve minimasyon durumu max ve min olarak tabloda belirtilmiştir (Tablo 9). Tablo 9'da AHP tekniğinden elde edilen ağırlık değerleri de eklenerek karar matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 9. Karar matrisi (Decision matrix)

Alternatifler	Kriterler							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	min	min	max	max	max	min	max	min
	Kriter Ağırlığı							
	0,0337	0,0289	0,0671	0,0803	0,1303	0,1241	0,2776	0,2580
Kriter Değeri								
Trendyol.com	159	7	179,1	6,97	6,55	36,11	56	2,9
A101.com.tr	4476	96	14,11	3,48	2,25	52,36	32	4,4
FLO.com.tr	4304	95	8,69	9,82	4,48	38,65	53	2,9
N11.com	1354	31	35,2	4,62	3,59	46,59	37	6,4
HepsiBurada.com	369	15	94,77	5,75	5,23	41,63	33	5
DeFacto.com.tr	7854	180	6,58	5,48	3,42	37,09	67	2,5
Çiçeksepeti.com	2505	54	22,96	3,62	4,13	56,85	43	2,9
Turkcell.com.tr	4729	104	12,55	3,88	3,11	51,8	39	10,5
Dolap.com	12751	256	3,19	9,35	5,48	36,73	65	1,3
Karaca-Home.com	64579	1219	0,74	4,64	3,03	51,04	34	7
Sahibinden.com	160	6	122,7	16,07	9,37	27,33	52	9,4
Amazon.com.tr	916	22	42,97	6,34	4,16	42,9	73	4,7
Letgo.com	4616	207	5,57	6,33	4,33	36,2	35	2,9
Migros.com.tr	3864	87	11,65	6,79	3,4	51,65	13	12,2
Mavi.com	10957	244	4,06	7,37	4,2	43,61	17	5

Tablo 10. Normalleştirilmiş karar matrisi (Normalized decision matrix)

Alternatifler	Kriterler							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Trendyol.com	0,002339	0,005326	0,728775	0,243760	0,355766	0,211480	0,311193	0,121421
A101.com.tr	0,065844	0,073039	0,057415	0,121705	0,122210	0,306648	0,177824	0,184225
FLO.com.tr	0,063314	0,072278	0,035360	0,343432	0,243333	0,226355	0,294522	0,121421
N11.com	0,019918	0,023585	0,143232	0,161574	0,194992	0,272856	0,205610	0,267963
HepsiBurada.com	0,005428	0,011412	0,385628	0,201093	0,284069	0,243808	0,183381	0,209346
DeFacto.com.tr	0,115537	0,136947	0,026775	0,191650	0,185759	0,217219	0,372320	0,104673
Çiçeksepeti.com	0,036850	0,041084	0,093426	0,126601	0,224323	0,332944	0,238952	0,121421
Turkcell.com.tr	0,069566	0,079125	0,051067	0,135694	0,168921	0,303369	0,216724	0,439627
Dolap.com	0,187574	0,194770	0,012980	0,326995	0,297648	0,215111	0,361206	0,054430
Karaca-Home.com	0,949992	0,927438	0,003011	0,162273	0,164576	0,298918	0,188938	0,293085
Sahibinden.com	0,002354	0,004565	0,499278	0,562011	0,508935	0,160059	0,288965	0,393571
Amazon.com.tr	0,013475	0,016738	0,174849	0,221727	0,225952	0,251245	0,405662	0,196785
Letgo.com	0,067904	0,157489	0,022665	0,221377	0,235186	0,212007	0,194495	0,121421
Migros.com.tr	0,056842	0,066191	0,047405	0,237465	0,184672	0,302490	0,072241	0,510805
Mavi.com	0,161183	0,185640	0,016521	0,257749	0,228125	0,255404	0,094469	0,209346

Aşama 4 - Karar Matrisinin Normalleştirilmesi: Karar matrisin normalleştirilmesi için, 3. aşamada oluşturulan karar matrisindeki değerler, bulunduğu sütundaki değerlerin karelerinin toplamının kareköküne bölünmüştür. Böylece normalleştirilmiş karar matrisi elde edilmiş ve Tablo 10'da sunulmuştur.

Aşama 5 - Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi: Bu aşamada normalleştirilmiş karar

matrisindeki her bir değer ilgili sütundaki kriterlere ait ağırlıklar ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matris oluşturulmuştur (Tablo 11).

Tablo 11. Ağırlıklandırılmış normalize matris (Weighted normalized matrix)

Alternatifler	Kriter Ağırlığı							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	0,0337	0,0289	0,0671	0,0803	0,1303	0,1241	0,2776	0,2580
	Kriter Değeri							
Trendyol.com	0,0000788	0,0001539	0,0489008	0,0195739	0,0463563	0,0262446	0,0863871	0,0313266
A101.com.tr	0,0022190	0,0021108	0,0038525	0,0097729	0,0159239	0,0380551	0,0493641	0,0475300
FLO.com.tr	0,0021337	0,0020888	0,0023727	0,0275776	0,0317063	0,0280907	0,0817592	0,0313266
N11.com	0,0006712	0,0006816	0,0096109	0,0129744	0,0254075	0,0338614	0,0570772	0,0691345
HepsiBurada.com	0,0001829	0,0003298	0,0258757	0,0161478	0,0370143	0,0302565	0,0509067	0,0540113
DeFacto.com.tr	0,0038936	0,0039578	0,0017966	0,0153895	0,0242043	0,0269569	0,1033560	0,0270057
Çiçeksepeti.com	0,0012418	0,0011873	0,0062689	0,0101661	0,0292292	0,0413184	0,0663330	0,0313266
Turkcell.com.tr	0,0023444	0,0022867	0,0034266	0,0108962	0,0220104	0,0376480	0,0601625	0,1134238
Dolap.com	0,0063212	0,0056288	0,0008710	0,0262577	0,0387836	0,0266952	0,1002708	0,0140429
Karaca-Home.com	0,0320147	0,0268029	0,0002020	0,0130305	0,0214442	0,0370957	0,0524493	0,0756158
Sahibinden.com	0,0000793	0,0001319	0,0335016	0,0451295	0,0663143	0,0198633	0,0802166	0,1015413
Amazon.com.tr	0,0004541	0,0004837	0,0117324	0,0178047	0,0294415	0,0311796	0,1126118	0,0507706
Letgo.com	0,0022884	0,0045514	0,0015208	0,0177766	0,0306447	0,0263100	0,0539919	0,0313266
Migros.com.tr	0,0019156	0,0019129	0,0031809	0,0190684	0,0240628	0,0375390	0,0200542	0,1317876
Mavi.com	0,0054319	0,0053650	0,0011085	0,0206972	0,0297246	0,0316956	0,0262247	0,0540113

Aşama 6 - Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlerin Belirlenmesi: Bu aşamada ise ağırlıklandırılmış normalize matrisindeki her bir sütundaki en yüksek ve en düşük değerler belirlenmiştir. Değerlendirilen kriter minimizasyon yönlü ise (dünya sıralaması, hız indeksi gibi) sütundan pozitif ideal çözüm (V+) için en düşük olan değer, negatif ideal çözüm (V-) için en yüksek olan değer seçilmiştir. Eğer ilgili kriter maksimizasyon yönlü ise tam tersi uygulanmıştır, yani pozitif ideal çözüm (V+) için en yüksek olan değer, negatif ideal çözüm (V-) için en düşük olan değer seçilmiştir. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerleri aşağıda Tablo 12'de yer almaktadır.

Tablo 12. Pozitif ideal ve negatif ideal çözümler (Positive ideal and negative ideal solutions)

Çözümler	Kriterler							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
V+	min	min	max	max	max	min	max	min
V+	0,0000788	0,0001319	0,0489008	0,0451295	0,0663143	0,0198633	0,1126118	0,0140429
V-	0,0320147	0,0268029	0,0002020	0,0097729	0,0159239	0,0413184	0,0200542	0,1317876

Aşama 7 - Ayırma Ölçümünün Hesaplanması: Burada pozitif ve negatif ideal çözümlerin elde edilmesinde sonra ayırım uzaklığı ölçümü yapılmıştır ve Tablo 13'te sunulmuştur.

Aşama 8 - İdeal Çözüme Göre Görelî Çözümün Hesaplanması: TOPSİS tekniğinin son aşamasında ideal çözüme göre görelî çözümlerin (Ci+) değerleri elde edilir. Ci+, bir önceki aşamada yer alan pozitif ideal ve negatif ideal ayırım ölçülerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Ci+ değerleri, her bir alternatif için ideal negatif ayırım ölçümü, negatif ve pozitif ideal ayırım ölçülerin toplamına bölünerek hesaplanmış ve Tablo 14'te sunulmuştur.

Tablo 13. Ayırma ölçümleri (Separation measurements)

Alternatifler	Ayırma Değeri		Alternatifler	Ayırma Değeri	
	Si+	Si-		Si+	Si-
Trendyol.com	0,0455915	0,1408671	Dolap.com	0,0607380	0,1497184
A101.com.tr	0,1062060	0,0973647	Karaca-Home.com	0,1218777	0,0652965
FLO.com.tr	0,0706894	0,1270802	Sahibinden.com	0,0945650	0,1078148
N11.com	0,1027948	0,0848833	Amazon.com.tr	0,0704626	0,1315386
HepsiBurada.com	0,0879866	0,0999103	Letgo.com	0,0898128	0,1145894
DeFacto.com.tr	0,0721784	0,1397858	Migros.com.tr	0,1652403	0,0412466
Çiçeksepeti.com	0,0855480	0,1185381	Mavi.com	0,1160865	0,0875025
Turkcell.com.tr	0,1347449	0,0590716			

Tablo 14. İdeal çözüme göre görelî çözümler (Separation measurements)

Alternatifler	Ci+	Sıra	Alternatifler	Ci+	Sıra
Trendyol.com	0,7554872	1	Dolap.com	0,7113986	2
A101.com.tr	0,4782846	10	Karaca-Home.com	0,3488541	13
FLO.com.tr	0,6425669	5	Sahibinden.com	0,5327349	8
N11.com	0,4522813	11	Amazon.com.tr	0,6511774	4
HepsiBurada.com	0,5317292	9	Letgo.com	0,5606074	7
DeFacto.com.tr	0,6594782	3	Migros.com.tr	0,1997539	15
Çiçeksepeti.com	0,5808240	6	Mavi.com	0,4297996	12
Turkcell.com.tr	0,3047811	14			

Tablo 14'teki ideal çözüme göre görelî çözüme göre en iyi web sitesi performansına sahip e-ticaret sitesi Trendyol.com'dur. Azalan sırayla Dolap.com, defacto.com.tr, Amazon.com.tr, FLO.com.tr, ciceksepeti.com, letgo.com, sahibinden.com, hepsiburada.com, A101.com, n11.com, mavi.com, karaca-home.com, turkcell.com ve migros.com.tr web sitesi performansına sahiptir.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Teknolojik gelişmelerle birlikte e-ticaret kullanımında her geçen gün artış görülmektedir. İşletmeler daha iyi hizmet üretebilmek için ve rekabetin üstesinden gelebilmek için değişime uyum sağlamları zorunlu hale gelmiştir. İşletmelerin e-ticarete olan ihtiyaçları artmış ve çevrimiçi satış platformları önemli kazanmıştır. Özellikle COVID-19 döneminde birçok faaliyet internet ortamına taşınmıştır. Bu dönemde müşteriler mümkün olduğunca fiziksel temastan kaçınma ve satın alma davranışlarını e-ticaret üzerinden gerçekleştirmeye yönelmişlerdir. COVID-19 pandemisi döneminde e-ticaret web sitelerinin ziyaretçi sayıları ve satışlarında artışlar görülmüştür. E-ticaret kullanımının artması nedeniyle işletmeler web sitelerinin performanslarını arttırmaya önem vermişlerdir.

Bu çalışmada Türkiye'de en çok ziyaret edilen 15 alışveriş e-ticaret web sitesinin performansları analiz edilmiş ve sıralanmıştır. E-ticaret web sitelerinin performans kriterlerine göre sıralanabilmesi için ÇKKV tekniklerinden olan AHP ve TOPSIS'ten yararlanılmıştır. Araştırma soruları yönelik sonuçlar şöyledir:

Araştırma sorusu 1. Türkiye'de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web site performansını belirleyen kriterler nelerdir?

E-ticaret firmalarının web sitelerinin sıralanmasında kullanılan kriterler belirlenirken, web siteleri hakkında daha önce gerçekleştirilmiş literatürlerden yararlanılmıştır. Kriterlerin belirlenmesinden uzman görüşünden yararlanılmıştır. Web sitesi performans kriterleri dünya sıralaması, ülke sıralaması, toplam ziyaretçi sayısı, ziyaret başına sayfa sayısı, ortalama ziyaret süresi, hemen ayrılma oranı, performans katsayısı ve hız endeksi olmak üzere 8 addettir.

Alan uzmanları tarafından 1-9 skalalı Saaty ölçeğine göre değerlendirilen ikili karşılaştırma ile kriter önem



derecelerinde “Hız İndeksi - Dünya Sıralaması” ikili karşılaştırması (6,00) en yüksek değeri, “Performans – Hız İndeksi” ikili karşılaştırması (1,38) değer almıştır (Tablo 5). “Hız İndeksi - Dünya Sıralaması” ikili karşılaştırması “güçlü dereceden daha fazla önemli” seviyesine yakınken; “Performans – Hız İndeksi” kriterlerinin birbirlerine göre önemi yaklaşık olarak “eşit” seviyededir (Tablo 1).

Araştırma sorusu 2. Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web site performansını etkileyen kriterlerin önem/ağırlık değeri nedir?

AHP tekniği ile performans katsayısı (0,2776) ve hız indeksinin (0,2580) en yüksek kriter ağırlıklarına sahip olduğu görülmüştür. Sonrasında ise azalan sırayla hemen ayrılma oranı (0,1303), ortalama ziyaret süresi (0,1241), ziyaret başına sayfa sayısı (0,0803), toplam ziyaretçi sayısı (0,0671), dünya sıralaması (0,0337) ve ülke sıralaması (0,0289) yer almaktadır. Analiz sonucu olarak en önemli 2 gösterge, performans katsayısı ve hız indeksidir. Değer olarak birbirine çok yakın olan bu kriterler uzmanlar tarafından da “eşit” düzeyine yakın derecede önemli bulunmuştur.

Çalışmamızda elde ettiğimiz bulgulara göre web sitesi performans katsayısı ve hız indeksi yüksek olan e-ticaret sitelerinin üst sıralarda yer aldığı gözlenmiştir. Benzer sonuçlar, Maruf (2020)’un gerçekleştirmiş olduğu çalışmada üst sırada olmayı etkileyen kriterler, performans katsayısı ve web sitelerin açılma süresi olarak ifade edilmiştir. Hız indeksi ve web sitesinin açılma süresi aynı özelliği ölçmektedir. Maruf (2020)’un Türkiye’deki 10 e-ticaret sitesini web site performanslarına göre sıraladığı çalışmasında en yüksek ağırlık değerine sahip web sitelerinin performans katsayısı (0,343) ve web sitelerinin açılma süresi (0,215)’dir. Nacar ve Özdemir (2021) de web sitesi açılma hızının belirleyici olduğunu belirtmiştir [2]. Bu çalışma, Maruf (2020) ile Nacar ve Özdemir (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda performans katsayısı en belirleyici kriterken, Elisa (2017)’nin yaptığı çalışmada web sayfasının açılma süresinin performans değerlendirmesinde temel kriter olduğunu ifade edilmiştir [38].

Araştırma sorusu 3. Türkiye’de en çok ziyaret edilen e-ticaret işletmelerinin web sitesi performans sıralaması nasıldır?

Belirlenen ve ağırlıklandırılan web sitesi performans kriterleri doğrultusunda 15 e-ticaret web sitesi performansı TOPSİS tekniği ile sıralanmıştır. TOPSİS sıralamasında göre en iyi performansı gösteren web sitesi Trendyol.com ’dur. Trendyol.com’u azalan sıralamada Dolap.com, DeFacto.com.tr, Amazon.com.tr, FLO.com.tr, Çiçeksepeti.com, Letgo.com, Sahibinden.com, Hepsiburada.com, A101.com.tr, n11.com, Migros.com.tr, Karaca-home.com Turkcell.com.tr ve Migros.com.tr takip etmektedir. Maruf (2020)’un Türkiye’deki 10 e-ticaret sitesini web site performanslarını karşılaştırdığı çalışmasında Trendyol.com en yüksek performansa sahiptir. Maruf (2020) ve bizim yaptığımız çalışmalarda e-ticaret web sayfası performansına göre Trendyol.com’un ilk sırada yer alması, teknik olarak Trendyol.com’un doğru stratejiler doğrultusunda rekabet avantajı sağladığını göstermektedir. Buna rağmen Trendyol.com Türkiye genel sıralamasında 2. Sırada, dünya sıralamasında birinci sıradadır. Bu durum sadece teknik performans kriterlerinin dışında, müşteri ihtiyaçları, rekabet ortamı, değişen ihtiyaçlar gibi farklı faktörlerin de önemli olduğunu, sıralama belirlenen çerçevenin iyi tanımlanması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca Türkiye veya dünyada sıralamasında yüksek sırada olma her işletme için önemli olsa da bu kriterlerin dışında web sayfası performansını etkileyen diğer kriterlere de dikkat edilmelidir. Maruf (2020) ikinci sırada Sahibinden.com sitesinin performansının olduğunu belirtirken, bizim çalışmamızda bu işletme 8. sıradadır. Bu durum firmaların web siteleri performanslarını iyileştirmeleri, satın alma trendleri gibi etkenlerden etkilenebilmektedir.

E-ticaret sitelerinin performansını etkileyen performans kriterlerini, bu kriterlerinin ağırlıklarını belirleyerek, e-ticaret web sitelerinin sıralamasını yapan bu çalışma ve literatürdeki çalışmalar e-ticaret süreçlerinin iyileştirilmesi, trendlere yönelik çözümler üretme gibi süreçlerde işletmelere katkı sağlaması beklenmektedir. Toplumsal ve küresel olaylar, tüm yaşamı etkilediği için e-ticareti de etkileyecektir. Bu nedenle bu tür çalışmalar işletmelerin güçlü ve zayıf performans kriterlerini belirleyerek, hem yeni karar, strateji ve yatırımlarıyla rekabet avantajı yakalamasına hem de piyasada arz-talep dengesini sağlamasına katkı sağlayacaktır.

Hem bireyler hem de işletmeler sürekli değişen ve gelişen dünyamıza uyum sağlayarak var olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada 2022 yılının Ekim ayına ait veriler Similarweb ve GTmetrix sitelerinden elde edilmiş olup, bu veriler doğrultusunda değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı dönemlerde yapılacak olan çalışmalar trendleri belirleme ve iyileştirmeleri izleme için literatüre katkı sağlaması beklenmektedir. Farklı zaman

dilimlerinde gerçekleştirilecek çalışmalar ile performans kriterleri ve sıralamalar ile yeni yaklaşımlar geliştirilebilir.

Bu çalışma sonucunda problemde tanımlanmış olan kriterlerin web siteleri için ne derecede önemli oldukları ortaya konulmuştur. Ancak burada dikkat edilmesi gereken temel husus, web sitesi performanslarının belirlenen kriterler doğrultusunda sıralanmasıdır. Farklı kriterler ile farklı sıralamalar gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada e-ticaret web sitelerinin sıralanmasında hizmet veya ürün kalitesi gibi kriterler dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla sıralanan işletmeler veya markalar değil, yalnızca e-ticaret web siteleridir. Performans değerlendirmede daha fazla kriter kullanarak daha kapsayıcı araştırmalar yapılması literatüre katkı sağlayabilir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] M. Sönmezay, "Yeni hizmet performansı üzerinde yeni hizmet geliştirme öncüllerinin etkileri: E-ticaret işletmeleri üzerinde bir araştırma", Doktora tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, Türkiye, 2021.
- [2] R. Nacar ve K. Özdemir, "E-ticaret pazaryeri web sitelerinin dinamikleri: Covid-19 pandemi sürecindeki değişim," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, cilt 16, sayı 1, ss. 205-226, Nisan 2021. doi:10.17153/oguiibf.867263
- [3] N. Çitli, "Bulanık çok kriterli karar verme," Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [4] Y. B. Yücel, "Çok kriterli karar verme teknikleri ile tekstil sektöründe en uygun tedarikçi seçimi ve bir yazılım uygulaması," Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bartın, Türkiye, 2018.
- [5] M. Güneş ve N. Umarusman, "Bir karar destek aracı bulanık hedef programlama ve yerel yönetimlerde vergi optimizasyonu uygulaması," *Review of Social, Economic & Business Studies*, sayı: 2, ss. 242-255, Ocak 2003.
- [6] Y. Çınar, "Çok nitelikli karar verme ve bankaların mali performanslarının değerlendirilmesi örneği," Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2004.
- [7] M. Karaatlı, N. Ömürbek, İ. Budak ve D. Okan, "Çok kriterli karar verme kriterleri ile yaşanabilir illerin sıralanması," *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı: 33, ss. 215-228, Şubat 2015.
- [8] E. H. Forman and Saul I. Gass, "The analytic hierarchy process-An exposition," *Operations Research-Infirms*, vol 49, no.4 , pp. 476-485, August 200.
- [9] H. Sezer, "Düzenli hat taşımacılığında nakliye müteahhidinin gemi operatörü seçimine çok kriterli karar destek sistemi yaklaşımı," Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2008.
- [10] L. Erikan, "Hava Kuvvetleri Komutanlığında aday seçiminde analitik hiyerarşi prosesi ile etkin karar verme," Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [11] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process - What it is and how it is used", *Mathematical modelling*, vol. 9, No. 3-5, pp. 161-176, 1987. doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8
- [12] T. Eren ve S. Gür, "Online alışveriş siteleri için AHP ve TOPSIS kriterleri ile 3PL firma seçimi," *Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, cilt 10, sayı 2, s. 819-834, Aralık 2017. doi:10.17218/hititsosbil.285102
- [13] M. E. Bulak, O. Kozanoğlu, Ş. N. Aydoğduoğlu, F. Göçer ve R. Göçer, "E-ticaret sitelerinin kullanılabilirliğinin AHP ve TOPSİS kriterleriyle karşılaştırılması," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, sayı 26, ss. 493-509, Aralık 2021. doi:10.31590/ejosat.963658
- [14] A. Doğan ve E. Önder, "İnsan kaynakları temin ve seçiminde çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanılması ve bir uygulama", *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, sayı 9, cilt 34, ss. 5796-5819, Haziran 2014. doi:10.19168/jyu.90784
- [15] N. Ömürbek, Y. Makas ve V. Ömürbek, "AHP ve TOPSIS kriterleri ile kurumsal proje yönetim yazılımı seçimi," *Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı 21, ss. 59-83, Haziran 2015
- [16] R. Göral, "E-WOM'a dayalı çok kriterli karar verme teknikleri ile en uygun otelin belirlenmesi ve bir uygulama," *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı 33, ss. 1-17, Şubat 2015.
- [17] M. Soba ve K. Eren, "TOPSIS kriterini kullanarak finansal ve finansal olmayan oranlara göre performans değerlendirilmesi, şehirlerarası otobüs sektöründe bir uygulama," *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, sayı 11, cilt 21, ss. 23-40, Haziran 2011.

- [18] Y. Şahin ve A. Supçiller, "Tedarikçi seçimi için bir karar destek sistemi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, sayı 3, cilt 2, s. 91-104, Haziran 2015.
- [19] Ö. Özkan, "Personel seçiminde karar verme kriterlerinin incelenmesi: AHP, ELECTRE ve TOPSIS örneği," Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2007.
- [20] M. Alpay "Kredi değerliliğinin ölçülmesinde TOPSIS kriteri ve bir uygulama," Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2010.
- [21] K. Paul Yoon and C.L. Hwang, *Multiple attribute decision making an introduction*, Springer Berlin, Heidelberg, 1995.
- [22] S. Albayrak ve M. Turanlı, "Çok kriterli karar verme kriterleri ile Türkiye'de HES (hidroelektrik santral) seçimi," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, sayı 21, cilt 41, ss. 68-79, Haziran 2022. doi:10.55071/ticaretfd.1113158
- [23] S. Dumanoglu ve N. Ergül, "İMKB'de işlem gören teknoloji şirketlerinin mali performans ölçümü," *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, sayı 48, ss. 101-111, Ekim 2010.
- [24] H. Bircan, G. Demir ve F. Güvendi, "TOPSIS ve VİKOR kriterleri ile ikinci dil seçimi," *Ulakbilge*, sayı 46, ss. 313-324, Mart 2020. doi:10.7816/ulakbilge-08-46-0
- [25] S. Perçin, "ERP yazılımı seçiminde iki aşamalı AAS-TOPSIS yaklaşımı," *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, sayı 8, cilt 2, ss. 93-114, Haziran 2013.
- [26] S. Ballı and S. Korukoğlu, "Operating system selection using Fuzzy AHP and TOPSIS Methods," *Mathematical and Computational Applications*, vol 14, no 2, ss.119-130, August 2009.
- [27] T. Eren, Y. A. Abalı ve B. S. Kutlu, "Çok ölçütlü karar verme kriterleri ile bursiyer seçimi: Bir eğitim kurumunda uygulama," *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, sayı 26, cilt 3-4, ss. 259-272, Nisan 2012.
- [28] Z. Günay ve Ö. F. Ünal, "AHP-TOPSIS kriteri ile tedarikçi seçimi (bir telekomünikasyon şirketi örneği)," *PESA Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, sayı 2, cilt 1, ss. 37-53, Nisan 2016.
- [29] M. Yılmaz, A. Eroğlu ve M. L. Erdaş, "AHP VE TOPSIS kriterleri ile işletme kredibilitésinin değerlendirilmesi: Borsa istanbul endeksinde kayıtlı işletmeler üzerinde bir çalışma," *International Journal of Academic Value Studies*, vol 3, no 9; pp. 411-432, 2017. Doi:10.23929/javs.166
- [30] C. Taş, N. Bedir, T. Eren, H. M. Alağaç ve S. Çetin, "AHP-TOPSIS kriterleri entegrasyonu ile poliklinik değerlendirilmesi: Ankara'da bir uygulama," *Sağlık Yönetimi Dergisi*, sayı 2, cilt 1, s. 1-17, Temmuz 2018.
- [31] A. Ilgaz, "Lojistik sektöründe personel seçim kriterlerinin AHP ve TOPSIS kriterleri ile değerlendirilmesi," *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı 32, s. 586-605, Aralık 2018.
- [32] N. İ. Süt, M. Hamurcu ve T. Eren, "Kampüste yeşil ulaşım uygulaması: Ring araçlarının seçimi için bir karar verme süreci," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, sayı 5, cilt 1, s. 9-21, Nisan 2019. doi:10.30855/gmbd.2019.01.02.
- [33] C. Oral ve S. Geçdoğan, "Kurumsal sürdürülebilirlik ölçümü için AHP ve TOPSIS kriterlerinin kullanılması: Bankacılık sektörü üzerine bir uygulama," *İşletme Araştırmaları Dergisi*, sayı 12, cilt 4, ss. 4166-4183, 2020. doi:10.20491/isarder.2020.1097.
- [34] D. Öztürk ve M. Tekin, "Hammedde tedarikçi seçiminde AHP-TOPSIS kriterlerinin kullanılması ve gıda sektöründe bir uygulama," *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı 25, cilt 2, ss. 411-432, Mayıs 2021.
- [35] Y. Ersoy, "AHP Ve TOPSIS kriterleri kullanılarak tekstil sektöründe personel seçimi," *Kafdağı*, sayı 6, cilt 1, ss. 60-78, Haziran 2021. Doi:10.51469/kafdağı.948358.
- [36] M. Yorulmaz ve B. Tonguç, "Gemi brokerlerinin mesleki etik ilkelerinin AHP ve TOPSIS kriterleri ile değerlendirilmesi," *Academic Knowledge*, sayı 5, cilt 1, ss. 118-140, Haziran 2022. doi:10.5281/zenoda.6780480
- [37] S. Sulova, "A system for e-commerce website evaluation," *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, vol. 19, no 2.1, pp. 25-32, June 2019. doi:10.5593/sgem2019/2.1/S07.004
- [38] N. Elisa, "Usability, accessibility and web security assessment of e-government websites in Tanzania," *International Journal of Computer Applications*, vol. 164, no 5, April 2017. doi:10.5120/ijca2017913632
- [39] M. Maruf, "Türkiye'de e-ticaret sitelerinin SWARA ve WASPAS kriterleri ile web sitesi performansına göre sıralanması," *TroyAcademy*, sayı 6, cilt 2, ss. 411-421, Haziran 2021. doi:10.31454/troyacademy.897589
- [40] M. Maruf ve K. Özdemir, "Türkiye'deki ticari bankalara ait web sitelerin performanslarının SWARA ve ARAS kriteri ile sıralanması," *OPUS International Journal of Society Researches*, cilt 18, ss. 1514-1537, Temmuz 2021. doi:10.26466/opus.888184
- [41] K. T. Naheem, "Malayalam news paper websites: A webometric study using 'Alexa Internet,'" *International Journal of Digital Library Services*, vol. 6, no. 3, pp. 67-75, 2016
- [42] J. Gyamera and S. I. K. Jah, "Analyzing & optimizing a small-scale e-commerce website, case company: Kipfashion," Bachelor's thesis,

Lab University Of Applied Sciences LTD, Business Information Technology, Lathi, Finland, 2020.

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



## Ekler (Appendices)

### Ek-1 İkili karşılaştırma için anket formu (Appendix1 Survey form for pairwise comparison)

	Aşırı Derecede Önemli	Çok Çok Güçlü Derecede Önemli	Çok Kuvvetli Derecede Önemli	Güçlü Dereceden Daha Fazla Önemli	Güçlü Derecede Önemli	Orta Dereceden Fazla Önemli	Orta Derecede Daha Önemli	Zayıf veya Biraz Daha Önemli	Eşit Önemli	Zayıf veya Biraz Daha Önemli	Orta Derecede Daha Önemli	Orta Dereceden Fazla Önemli	Güçlü Derecede Önemli	Güçlü Dereceden Daha Fazla Önemli	Çok Kuvvetli Derecede Önemli	Çok Çok Güçlü Derecede Önemli	Aşırı Derecede Önemli	
Dünya Sıralaması (E-Ticaret websitelerinin dünyadaki E-Ticaret web sitelerine kıyasla kaçınıcılığında olduğu göstermektedir.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ülke Sıralaması (E-Ticaret websitelerinin Türkiye'deki E-Ticaret web sitelerine kıyasla kaçınıcılığında olduğu göstermektedir.)
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon) (Web sitesini ziyaret eden aylık tahmini toplam müşteri sayısını ifade etmektedir.)
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı (Web sitesinde ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısını ifade etmektedir. Burada aylık olarak ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısı toplam ziyaretçi
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.) (Müşterilerin web sitesinde geçirdiği ortalama süreyi ifade etmektedir.)
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı % (Hemen Çıkma Oranı (Bounce Rate), sitenize gelen bir ziyaretçinin, açılış sayfası haricinde başka bir sayfayı ziyaret etmeden siteden ayrılma yüzdesini gösteren bir metriktir.)
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%) (Yükleme performansı; ziyaretçilerin web sayfasındaki gerçek içeriği (metin, resim, video vb.) görüntüleme hızı, web sayfasının ekranda görsel olarak tamamlanma hızı ve web sayfasındaki en büyük "içerik ögesinin" (örneğin, ana resim, başlık metni vb.) ziyaretçinin ekranında tamamen görünür hale gelmesi için geçen süreleri kapsamaktadır. Etkileşim ise sayfanın kullanıcı etkileşimi için güvenilir bir şekilde en kısa hazırlanma süresi ve kullanıcının sayfaya etkileşim kurmasını engelleyen etkenlerle ilgili bir metriktir. Görsel stabilite sayfa yüklenirken web öğelerinin beklenmedik şekilde kayması durumunu içermektedir.)
Dünya Sıralaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s) (Bir web sayfasının öğelerinin ne kadar hızlı görünür hale geldiğini gösteren "web sayfası yüklemesi performansı" metriğidir.)
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Ülke Sıralaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Ort. Ziyaret Süresi (Dk.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Hemen Ayrılma Oranı %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Hemen Ayrılma Oranı %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Performans (%)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)

Ek-2 Puanlanmış anket formu örneği (Appendix2 Scored survey form example)

	Açık Derecede Çınamlı	Çok Güçlü Derecede Çınamlı	Çok Kuvvetli Derecede Çınamlı	Güçlü Dereceden Daha Fazla Çınamlı	Güçlü Derecede Çınamlı	Orta Dereceden Fazla Çınamlı	Orta Derecede Daha Çınamlı	Zayıf veya İlmaz Daha Çınamlı	Ejil Çınamlı	Zayıf veya İlmaz Daha Çınamlı	Orta Derecede Daha Çınamlı	Orta Dereceden Fazla Çınamlı	Güçlü Derecede Çınamlı	Güçlü Dereceden Daha Fazla Çınamlı	Çok Kuvvetli Derecede Çınamlı	Çok Güçlü Derecede Çınamlı	Açık Derecede Çınamlı	
Dünya Sınılaması (E-Ticaret websitenin dünyadaki E-Ticaret web sitelerine kıyasla kaçınıca sında olduğuna göstemesidir.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ülke Sınılaması (E-Ticaret websitenin Türkiye'deki E-Ticaret web sitelerine kıyasla kaçınıca sında olduğuna göstemesidir.)
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon) (Web sitesini ziyaret eden aylık tahmini toplam müşteri sayısına ifade etmektedir.)
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı (Web sitesinde ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısına ifade etmektedir. Burada aylık olarak ziyaret başına görüntülenen toplam sayfa sayısı toplam ziyaretçi sayısına bölünerek ortalaması alınmaktadır.)
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Ort.) (Müşterilerin web sitesinde geçirdiği ortalama süreyi ifade etmektedir.)
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı % (Hemen Çıkma Oranı (Bounce Rate), sitesine gelen bir ziyaretçinin, açılış sayfası haricinde başka bir sayfaya ziyaret olmadan siteden ayrılma yüzdesini gösteren bir metriktir.)
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%) (Tüketime geçirmesi, ziyaretçilerin web sayfasındaki geçici içerikler (metin, resim, video vb.) görüntüleme hızı, web sayfasının etkisinde görsel olarak tamamlanma hızı ve web sayfasındaki en büyük "içerik öğesinin" (örneğin, ana resim, büyük metin vb.) ziyaretçinin etkisinde tamamen görünür hale gelmesi için geçen süreyi kapsamaktadır. Etkileşim ise sayfanın kullanıcı etkileşimi için görünür bir şekilde en kısa hazırlanma süresi ve kullanıcının sayfaya etkileşim kurmasına engelleyen etkilerle ilgili bir metriktir. Görsel stabilite sayfa yüklenirken web
Dünya Sınılaması	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	öğesinin ne kadar hızlı görünür hale geldiğini gösteren "web sayfası yükleme performansı" metriğidir.)
Ülke Sınılaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)
Ülke Sınılaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı
Ülke Sınılaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)
Ülke Sınılaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ülke Sınılaması (Türkiye)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ziyaret Başına Sayfa Sayısı
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Toplam Ziyaretçi Sayısı (Milyon)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ziyaret Başına Sayfa Sayısı	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hemen Ayrılma Oranı %
Ort. Ziyaret Süresi (Ort.)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Performans (%)
Hemen Ayrılma Oranı %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Hemen Ayrılma Oranı %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)
Performans (%)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Speed Index (s)

## Ek-3 AHP ve TOPSIS teknikleri ile yapılmış çalışmalar (Appendix3 Studies with AHP and TOPSIS techniques )

Yazarlar	Amaç	Kriterler	Bulgular
T. Eren, Y. A. Abalı & B. S. Kütlü, 2012	Bursiyer seçimi	Ailenin bakmakla yükümlü olduğu çocuk sayısı, Ailenin toplam aylık geliri, Anne-baba durumu, Ailenin sahip olduğu toplam mülk sayısı, Öğrencinin çalışma durumu	Burs verilecek 5 öğrenci arasından listedeki 1. öğrenciyeye verilmesi yönünde sonuca ulaşılmıştır. Seçimi etkileyen en önemli kriterlerin ailenin toplam aylık geliri ve anne-baba durumu (Sağ beraber, sağ ayrı, Baba vefat, Anne vefat veya Anne baba vefat durumu) olarak görülmüştür.
R. Göral, 2015	E-WOM'a dayalı en uygun otelin belirlenmesi	Uyku Kalitesi, Konum, Odalar, Hizmet, Fiyat/ Fayda, Temizlik	Konya ilinde bulunan ve TripAdvisor internet sitesinde en fazla yorum almış ilk 9 otel değerlendirilmeye dahil edilmiş olup, önemli kriterlerin fiyat ve fayda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında C oteli en uygun otel olarak belirlenmiştir.
N. Ömürbek, Y. Makas & V. Ömürbek, 2015	Kurumsal proje yönetimi için 3PL firması seçimi	Tedarikçi Firma ve Satın Alma Kriterleri, Kullanım Kolaylığı Kriterleri, Uyarılma ve Teknik Altyapı Kriterleri, Destek	İşletmeler için haksız rekabete yol açılmaması sebebiyle program isimleri A, B, C ve D olarak tanımlanmış olup, en uygun EPM yazılımı A programı olarak belirlenmiştir. Burada A programının ilk sırada olma sebebi; maliyetin düşük olması, kullanımı kolay olması ve aigle-scrum desteğinin daha görsel olmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.
Z. Günay & Ö. F. Ünal, 2016	Tedarikçi seçimi	Fiyat, Kalite, Yönetim, Teknoloji, Esneklik, Teslimat, Yenilik	Tedarikçi seçiminde kalitenin en önemli faktör olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kaliteden sonra ise sırasıyla yenilik, teknoloji, yönetim, teslimat, esneklik ve fiyat yer almıştır. Tedarikçilerin sıralanmasında ise 4 firma arasından en iyi tedarikçinin Firma 1 olduğu görülmüştür.
T. Eren & S. Gür, 2017	Online alışveriş siteleri için 3PL firma seçimi	Esneklik, Güvenirlilik, Teknolojik Kullanım, Maliyet, Kapasite Yeterliliği, Teslimat Hızı, Yerleşim, Yönetim, Tecrübe	Uzmanların görüşlerine dayanarak işletmeler bir 3PL firma seçimi yaparken en çok dikkate aldıkları kriter maliyet olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda A, B, C ve D firmasından A firması aranan kriterlere en çok uyum gösteren firma olarak belirlenmiştir.
M. Yılmaz, A. Eroğlu, M. L. Erdaş, 2017	İşletme kredibilitesinin değerlendirilmesi	Likidite Oranları, Mali Yapı Oranları, Faaliyet Oranları, Karlılık Oranları, Büyüme Oranları	Kredi skoru sıralanmasında en yüksek ağırlık değerine kâr marjı sahip olmuştur. Kredi skoru sıralanmasında dahil edilen işletmeler arasında ise Konfrut Gıda işletmesi ilk sırada yerini almıştır.
C. Taş, N. Bedir, T. Eren, H. M. Alağaç & S. Çetin, 2018	Poliklinik değerlendirilmesi	Hastane hekim bilgisi, Temizlik ve fiziki koşullar, Genel hastane bilgisi, Hastane imajı	Hastaların hastane seçiminde dikkate aldıkları kriterler literatür incelemeleri ve uzman görüşleri sonucunda belirlenerek değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda öncelikli hastanenin Ankara Türkiye Yüksek İhtisas Eğitim ve Araştırma Hastanesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kriterlerin değerlendirilmesi aşamasında hastane hekim bilgisinin en önemli kriter olarak belirlenmiştir.
İlğaz, 2018	Lojistik sektöründe personel seçim	Teknik Yeterlilik, Mesleki Yeterlilik, Fiziksel Yeterlilik, Sosyal Yeterlilik	Personel seçimini etkileyen kriterler arasında en yüksek ağırlık değerine mesleki yeterlilik kriteri sahip olmuştur. Mesleki yeterlilik kriterleri arasında önem düzeyi en yüksek kriteri ise mesleki eğitim olarak görülmüştür. Bu doğrultuda 5 aday arasında A5 alternatifi ilk sırada yer almıştır.
N. İ. Süt, M. Hamurcu & T. Eren, 2019	Ring Araçlarının Seçimi (Kampüste Yeşil Ulaşım)	Motor Özellikleri, Donanım, Estetik Görünüm, Maliyet, Enerji Verimliliği, Hareket Kabiliyeti, Engellsiz Erişim, Çevre	Uygulama sonucunda kampüs için ilk sırada Teknoloji-1 yer alarak en uygun araç olarak önerilmiştir. Bu alternatif engellsiz erişim, çevre ve enerji verimliliği kriterlerinin büyük ölçüde karşılanması nedeniyle ilk sırada olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
C. Oral & S. Geçdoğan, 2020	Kurumsal Sürdürülebilirlik Ölçümü	Sürdürülebilirliğin Boyutları: Ekonomik Boyut, Sosyal Boyut, Çevresel Boyut	Çalışma sonucunda ana kriterler arasında en yüksek ağırlık değerine sahip olan kriter ekonomik boyut olarak tespit edilmiştir. Ekonomik boyut kriteri dışında sosyal ve çevresel boyut da bankaların devamlılığını sürdürebilmeleri için önemli olduğu görülmüştür. Tüm yılların performans puanları incelendiğinde; ekonomik boyut 2013 verilerine göre birinci sırada AKBNK yer almıştır. 2014-2018 yıllardaki değerlendirmelere göre de AKBNK ilk sırada yer almıştır.
D. Öztürk & M. Tekin, 2021	Hammaddede Tedarikçi Seçimi	Kalite, Maliyet, Teslimat, Tedarikçi Profili, Görevi öncelik	5 tedarikçi arasından ilk sırada D1 tedarikçisi yer almıştır. Tedarikçi seçimini etkileyen kriterlerin değerlendirilmesinde kalite kriteri en yüksek öne sahip olmuştur. Kalite kriterinden sonra ise sırasıyla maliyet, teslimat ve tedarikçi profili yer almıştır.
M. E. Bulak, O. Kozanoğlu, Ş. N. Aydoğduoğlu, F. Göçer & R. Göçer, 2021	E-Ticaret Sitelerinin Kullanılabilirliği	Güvenilirlik, Bilgi Kalitesi, Ulaşılabilirlik, Site Tasarımı, Site Navigasyonu, Hizmet Kalitesi, Müşteri Memnuniyeti	Kullanılabilirlik performansını etkileyen en önemli faktör site navigasyonu olarak belirlenmiştir. Kullanılabilirlik açısından AHP yöntemi sonucuna göre en iyi performans değerine sahip olan e-ticaret platformları N11 ve Hepsiburada olarak elde edilirken, TOPSIS yöntemine göre ise Sahibinden ve Amazon web siteleri yer almaktadır.
Y. Ersoy, 2021	Tekstil sektöründe personel seçimi	İş deneyimi, Bilgisayar becerisi, Analitik düşünme, İletişim becerisi, Takım çalışmasına yatkınlık, Öğrenme ve gelişme isteği, Yabancı dil bilgisi	Çalışma sonucuna göre değerlendirmeye dahil edilen kriterler arasında iş deneyimi en yüksek ağırlık değerine sahiptir. Sıralama analitik düşünme ve bilgisayar becerisi olarak devam etmiştir. İşletme için en uygun alternatif M3 adayı olarak belirlenmiştir.
M. Yorulmaz & B. Tonguç, 2022	Gemi brokerlerinin mesleki etik ilkelerinin değerlendirilmesi	Dürüstlük, Hukuka Uygunluk, Sır Saklama, Tarafsızlık, Şeffaflık, Haksız Rekabet Yapma, Bilgi Paylaşma, Sorumluluk, Bağımsızlık	Çalışma sonucunda kriterleri arasında dürüstlük, hukuka uygunluk ve tarafsızlık ilk 3 sırada yer almıştır. Bu doğrultuda mesleki etik ilkeler açısından en uygun gemi brokeri türü "bağımsız" çalışan B kişisi olarak tespit edilmiştir.

# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Increasing the Vertical Load Capacity of Reinforced Concrete Waffle Slabs With Varying Operating Loads Using CFRP

Ahmet Bal\*

Submitted: 30.01.2023 Revised: 28.10.2023 Accepted: 17.11.2023 doi:10.30855/gmbd.07050775

#### ABSTRACT

**Keywords:** CFRP, reinforced concrete structures, retrofitting, waffle slabs, earthquake

Tekirdağ Namık Kemal University,  
Technical Sciences Vocational School,  
Technology of Civil Engineering,  
Tekirdağ, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3305-928X  
e mail: abal@nku.edu.tr

\*Corresponding author: abal@nku.edu.tr

The subject of the study is to determine the earthquake performance according to TBEC2018 principles of the existing medicine production facility with a frame system, which was built with conventional RC method in Çorlu-Tekirdağ and to evaluating the use of CFRPs (Carbon Fiber Reinforced Polymers) for increasing the vertical load capacity of waffle slabs. In a highly hygienic environment, retrofitting alternatives have been investigated and structural safety comparison has been made. In the earthquake retrofitting application of the building, the advantages of retrofit with composite materials were utilized and advantages and disadvantages were determined compared to traditional methods. The live load value of 750 kg/m<sup>2</sup> was increased to 1000 kg/m<sup>2</sup> with the change of use. After this change, CFRP strips and fabrics were used to increase the load bearing capacity of the slabs. In addition, the change in the mode shapes and storey drifts of the structure was checked after the live load increase. The effect of CFRP reinforcement technique applied to waffle slabs, beams and columns on the stiffness, ductility and displacements of the structure was evaluated. The safety of the structure has been established according to the TBEC2018 and the effect of CFRP on the axial compression, bending and shear resistance of the structural elements was determined according to 1000 kg/m<sup>2</sup>, which is the live load capacity required by Covid19 vaccine production.

### İşletme Yükleri Değişen Betonarme Kaset Döşemelerin CFRP ile Düşey Yük Kapasitelerinin Arttırılması

#### ÖZ

Çalışmanın konusu, DBYBHY2007'ye göre tasarım ve analizleri tamamlanan, Çorlu-Tekirdağ'da konvansiyonel betonarme yöntemi ile inşaa edilmiş, çift yönlü dişli döşemelerin (kaset döşeme) kullandığı çerçeve sistemli mevcut ilaç üretim tesisinin, değişen işletme yükleri altında TBDY2018 yönetmeliği esaslarına göre deprem performansının belirlenmesi ve çift yönlü dişli döşemelerin düşey yük kapasitelerinin artışı için CFRP (karbon esaslı lifli polimerler)'lerin kullanımının uygunluğunun değerlendirilmesidir. İlaç tesisi gibi oldukça hijyenik bir ortamda güçlendirme alternatifleri araştırılmış ve yapısal güvenlik karşılaştırması yapılmıştır. Yapının deprem güçlendirme uygulamasında kompozit malzemelerle güçlendirmenin avantajlarından yararlanılmış ve geleneksel yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. 750 kg/m<sup>2</sup> olan hareketli yük değeri kullanım değişimi ile 1000 kg/m<sup>2</sup>'ye yükseltilmiştir. Bu değişimin ardından CFRP lamine ve kumaşlar ile döşeme yük taşıma kapasitesi arttırılmıştır. Ayrıca yapının mod şekilleri ve görelî ötelemelerinin değişimi hareketli yük artışından sonra kontrol edilmiştir. Çift yönlü dişli döşeme, kiriş ve kolonlara uygulanan CFRP güçlendirme tekniğinin yapı rijitliği sünekliliği ve deplasmanlarına etkisi değerlendirilmiştir. Yapının TBDY2018 yönetmeliği esaslarına göre güvenliği tesis edilmiş ve Covid19 aşî üretiminin ihtiyaç duyduğu hareketli yük kapasitesi olan 1000 kg/m<sup>2</sup>'ye göre CFRP'nin yapı elemanlarının ekstenel basınç, eğilme ve kesme dirençlerine etkisi belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** CFRP, betonarme yapılar, güçlendirme, kaset döşeme, deprem

## 1. Introduction

Slab systems are the horizontal planes that must support both live load and dead loads. Waffle slab is two-way concrete slab reinforced by ribs in two direction and able to carry heavier loads and span longer distances than flat slabs [1-3]. In other words, the waffle slab consists of frequent beams in two directions and the plate on them. Waffle slabs are generally used in projects where the column axis spanning is 7~8m and above (such as conference halls, shopping centres, industrial buildings) and in situations with high live loads (such as machine layout, truck loading area, forklift working area, storey car gallery). Larger spans can also be possible by using post-tensioning in this slab system.

The main beam and rib heights, plate thicknesses depend on the span, seismicity, material quality and load conditions. The bending moment and shear force of the ribs are calculated considering all parameters [1-3]. According to TBEC 2018 [4] the plate thickness shall not be less than 70 mm in reinforced concrete waffle slab systems under the effect of earthquake.

Fiber reinforced polymers materials are lightweight, noncorrosive, and exhibit high tensile strength. Composite materials with very different mechanical properties can be obtained by using different fiber and matrix materials. The advantages of carbon fiber can be listed as high modulus of elasticity and strength, low self-weight, resistance to chemical effects and high temperatures. It is known that the most application as a polymer matrix is with epoxy. The advantages of epoxy over other polymer matrices are high strength, high adhesion, and resistance to high temperatures [5-8].

Experimental and analytical studies on the retrofitting of reinforced concrete slab systems with CFRP are reviewed. Anıl et al. (2013) [9] They investigated the flexural behavior of a one-way reinforced concrete slab by opening it and reinforcing it with CFRP strips. It was seen that the method of strengthening one way reinforced concrete slabs with opening by using CFRP strips increased the load carrying capacity and stiffness of specimens considerably. Enochsson et al. (2007) [10] The work presented in this paper shows that CFRP sheets can be used to maintain and even increase the original load-capacity of two-way concrete slabs with openings. The aim of the study by Ghoroubi et al. (2020) [11] is to develop the retrofitting details, which will increase axial ultimate load capacity, stiffness, displacement ductility ratios, and energy dissipation capacities of short reinforced concrete (RC) low-slenderness columns to avoid adverse effects on earthquake performance. In the study by Emara et al. (2023) [12] the flexural behaviors of one- and two-way reinforced concrete (RC) slabs strengthened with carbonfiber- reinforced polymer (CFRP) strips under impact loads were investigated. In the study by Türer and Mercimek et al. (2023) [13-14] the effectiveness of a strengthening technique developed by using CFRP strips was investigated to prevent the punching strength loss caused by two square openings adjacent to the column in two-way reinforced concrete flat slabs and three different strengthening methods have been proposed to increase the punching strength of reinforced concrete (RC) flat slabs. Markou and Jung (2013) [15] Within this paper, the effects of CFRP plates on the strength of existing RC waffle slabs was investigated.

Earthquake is the heaviest loading situation that a structure encounters during its lifetime. It is known that due to insufficient ductility, insufficient strength and insufficient rigidity in reinforced concrete structures, damages occur under earthquake effect and even the structures reach the collapse point [16,17]. The parameters in the damage of existing structures or in reaching their carrying capacities can be listed as environmental impacts, increases in operating loads (dead, live, earthquake), changes in design regulations, etc. It is necessary for structural earthquake safety that all structures designed and constructed before the effective date of TBEC2018 [4] are checked according to the new conditions, the existing systems are evaluated and retrofitting works are carried out when required.

The subject of the study is to evaluate the increase of the vertical load capacities of the existing pharmaceutical production facility in Çorlu with a frame system using reinforced concrete two-way waffle slabs with CFRPs according to TBEC2018 [4] principles under varying operating loads. In the building where the application will take place, the live load bearing capacity has been increased from 750 kg/m<sup>2</sup> to 1000 kg/m<sup>2</sup> in order to realize the new functions created for Covid19 vaccine productions. The effect of CFRP reinforcement technique applied to waffle slabs, beams and columns on the stiffness, ductility and displacements of the structure was evaluated.



## 2. Analysis Of Existing Reinforced Concrete Structure And Earthquake Behaviour

The building was constructed in 2009 as a conventional frame reinforced concrete building according to TEC2007 [18] requirements in Çorlu, Tekirdag and is used as a pharmaceutical and vaccine production facility. Figure 1 shows the exterior view of the existing facility.



Figure 1. Exterior View of the Existing Pharmaceutical and Vaccine Production Facility

### 2.1. Architectural System

The building is 145m and 55m in size. It consists of 7 axis spans and 8 axes in X direction and 19 axis spans and 20 axes in Y direction. The axis span of the building is 7.86 metres in both directions. The building has 3 structural dilatations in Y direction and consists of 4 parts. There is a basement floor in the building. It is designed as ground + 2 floors. The total height of the building is 19.00m and the total height above ground is 12.00m. Figure 2 shows the ground floor layout and section view of the existing facility.

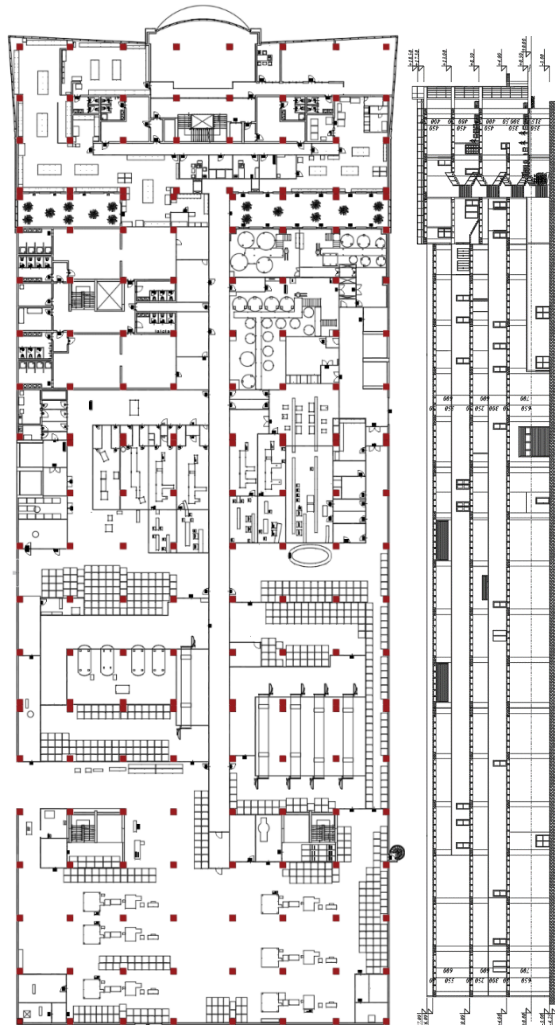


Figure 2. Ground Floor Layout and Section of the Existing Facility

Pharmaceutical and vaccination facilities are highly hygienic areas compared to other operations and are very

sensitive to external factors. Architectural solutions and functions are very important in these facilities consisting of many different organisations. With the Covid19 pandemic, which started in 2019 and affected the whole world, vaccine production has started rapidly in this facility. With the urgent change of production, it is planned to change the operating loads in the building. For this reason, determination of the flexural strength capacity of the structure elements and earthquake performance analysis were requested.

## 2.2. Structural System

The structure is a reinforced concrete building with conventional frame system. All columns are 85x85cm square section and main bearing beams are 50cm x 100-115-125cm variable rectangular section. Two-way waffle slab is used on all floors. In the first design of the building, the live load was calculated as 750 kg/m<sup>2</sup> for the first two floors and analysed as 500 kg/m<sup>2</sup> for the attic floor. Figure 3 shows the mathematical model of the structure.

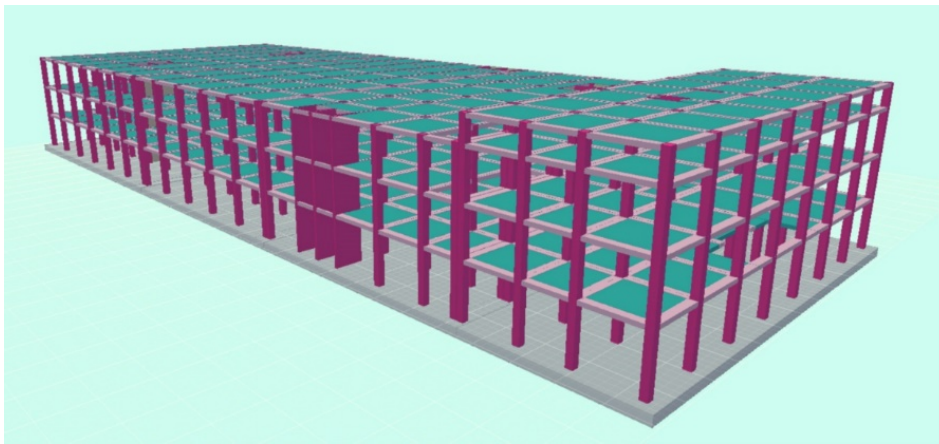


Figure 3. Mathematical Model of Structure

The existing static and architectural projects in the years when the building was built were reached. During the investigation, material information, foundation systems and soil parameters were analysed based on the existing project values and no studies were carried out on site.

According to TEC 2007 [18], the structure is accepted as a third-degree earthquake zone and the effective ground acceleration coefficient  $A_0=0.20g$ . For the specified soil type (ZD-Tight layers of sand, gravel, or very solid clay) and building coordinates, the maximum ground acceleration (PGA) was determined for DD-2 10% probability of exceeding in 50 years, corresponding to a return period of 475 years.as 0.293g from AFAD Turkey Earthquake Hazard Map Interactive Web Application [19] and analyses were performed with this acceleration value. The maximum ground speed (PGV) is 18.056 cm/sec. The coordinates of the existing structure are shown in the earthquake risk map and horizontal spectra are given in Figure 4.

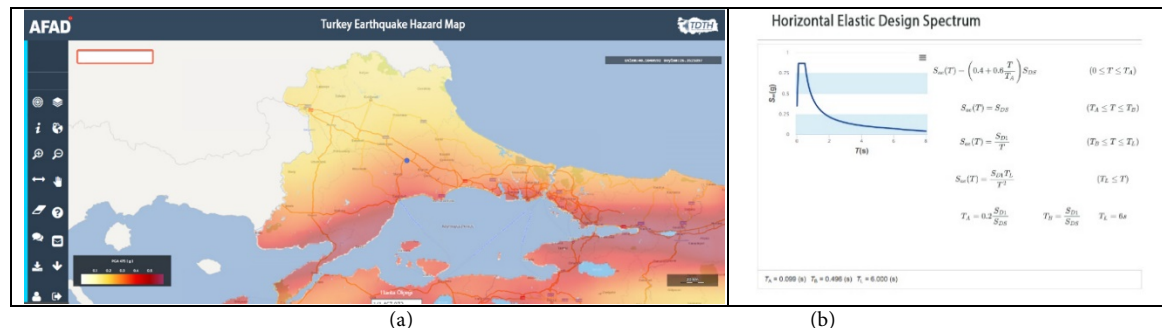


Figure 4. (a) Turkey Earthquake Hazard Map (b) Horizontal Spectra for Coordinates Where the Building Is Located

The building importance coefficient is  $I=1.0$  for industrial buildings according to TBEC 2018 [4]. The building use categories coefficient is  $BKS=3$ . The building use categories is determined according to the building importance coefficient. While according to TEC2007 [18] the structural system behaviour coefficient of the building is  $R=7$  in the current project, according to TBEC 2018 [4], the structural system behaviour coefficient is calculated as  $R=4$  and the strength excess coefficient is calculated as  $D=2,5$  [5].

### 3. Earthquake Performance Analysis and Retrofitting Project

Earthquake performance analyses were carried out according to the principles of the new building code for changing operating loads and new machine layouts planned to be added for Covid19 vaccine production. With the new machines and tanks to be added, the live load in the application areas has been determined as  $1000 \text{ kg/m}^2$  and it is aimed to increase the vertical load capacity according to this load.

Determination of the earthquake performance of the structure Pushover analysis from linear inelastic methods was carried out. Thus, it is aimed to determine the performance level of the reinforced concrete building by performing the analyses required for the reinforcement decision if necessary. Earthquake calculation was made for both two directions in accordance with the building code TBEC 2018. The analysis and mathematical models of the structure were made in SAP2000 analysis program [20]. Figure 5 shows the three-dimensional models of the structure in SAP2000 [20].

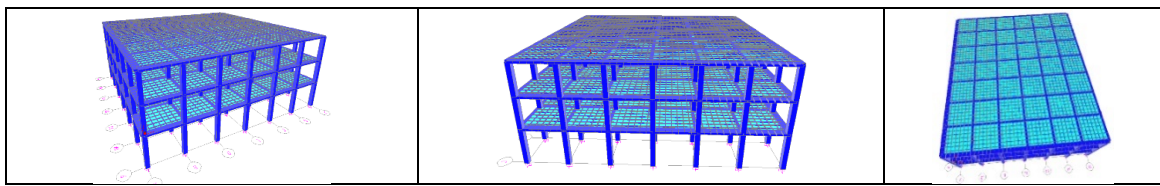


Figure 5. The Three-Dimensional Models Of The Structure in SAP2000

The 1<sup>st</sup> period is 1.037 sec. in X direction, the 2<sup>nd</sup> period is 1.028 sec. in Y direction and the 3<sup>rd</sup> period is 0.969 sec. in torsion mode at  $750 \text{ kg/m}^2$  live load level. The 1<sup>st</sup> period is 1.126 sec. in X direction, the 2<sup>nd</sup> period is 1.112 sec. in Y direction and the 3<sup>rd</sup> period is 1.046 sec. in torsion mode at  $1000 \text{ kg/m}^2$  live load level. The first three modes of the structure at  $750 \text{ kg/m}^2$  and  $1000 \text{ kg/m}^2$  live load level are given in Figure 6.

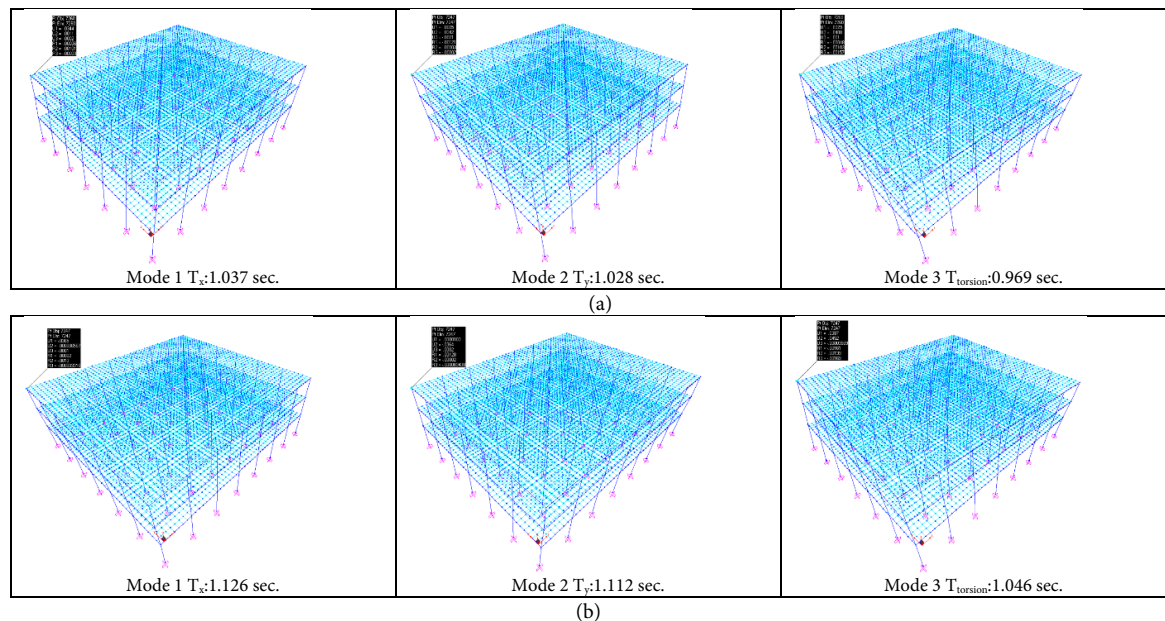


Figure 6. The first three modes of the structure (a)  $750 \text{ kg/m}^2$  (b)  $1000 \text{ kg/m}^2$

The maximum roof displacement of the structure in the X direction is  $0.0365 \text{ m}$  for  $750 \text{ kg/m}^2$  and  $0.0409 \text{ m}$  for  $1000 \text{ kg/m}^2$ . The maximum roof displacement of the structure in the Y direction is  $0.0364 \text{ m}$  for  $750 \text{ kg/m}^2$  and  $0.0384 \text{ m}$  for  $1000 \text{ kg/m}^2$ . Relative storey drift ratio in both directions (X-Y) increased from 1.20% to 1.40%. The relative storey drifts of the structure with both live loads are shown in Figure 7.

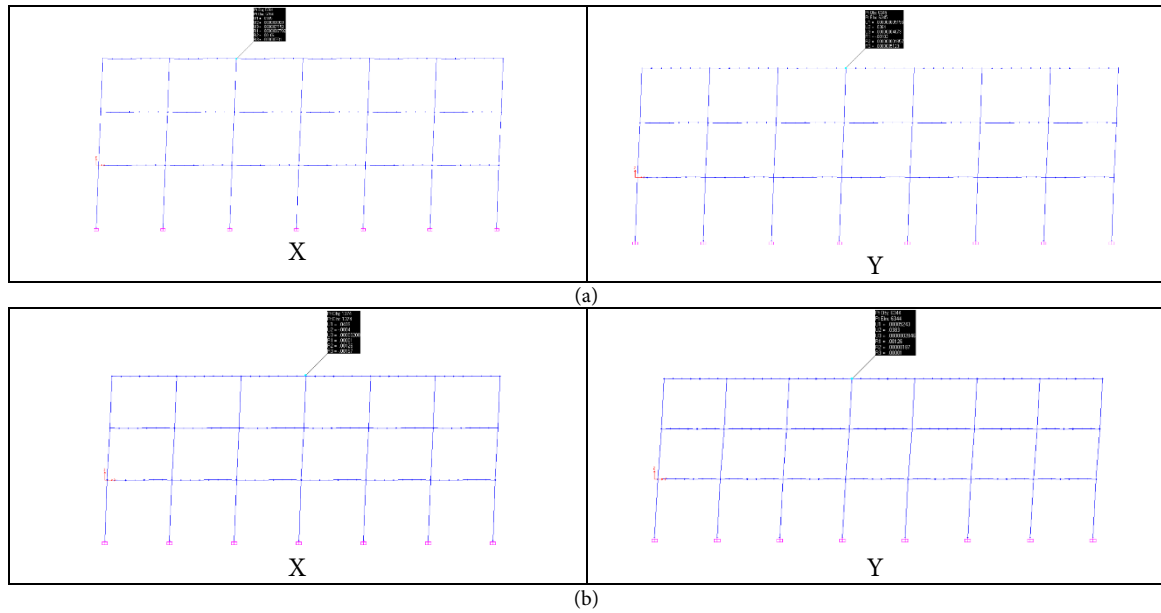


Figure 7. The relative storey drifts of the structure (a) 750 kg/m<sup>2</sup> (b) 1000 kg/m<sup>2</sup>

The natural vibration periods for 750 kg/m<sup>2</sup> live load, storey displacements, base shear forces and relative storey drifts for both earthquake directions were determined. The values obtained are within the limits of the TEC2007 [18]. Then the same values were determined for 1000 kg/m<sup>2</sup> live load value of the structure. There was a small increase in the natural vibration periods of the existing structure, but there was no change in the mode shapes in terms of direction. The base shear forces increased from 1307 tons to 1524 tons for both directions. Relative drift ratios increased from 1.2% to 1.4% for both directions. However, the relative storey drifts ratios are within the limits of both the TEC2007 [18] and TBEC2018. The earthquake performance of the building according to TEC2007 [18] ensures the life safety performance target. Figure 8 shows the earthquake performance level of the structure.

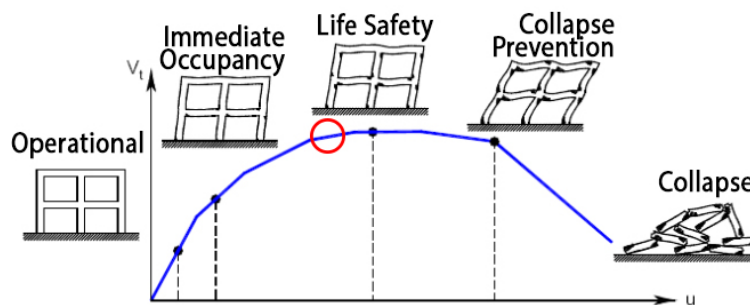


Figure 8. The Earthquake Performance Level of the Structure

The vertical load capacity of the waffle slabs, beams and columns should be increased on an element basis in the retrofitting of the structure. Providing the relative drift limits in the current regulation shows that the structure needs an increase in vertical load capacity rather than an additional increase in horizontal stiffness. CFRP applications generally contribute to the increase in strength and ductility of structural elements. CFRP applications do not cause a significant increase in the horizontal stiffness of the structural elements. Traditional reinforced concrete shear wall additions and jacketing significantly increase the stiffness of the structure. Since there is no need for stiffness increase in the investigated structure, a method using CFRPs is proposed to increase the vertical load capacity and ductility of the structure. Within the method, bending and shear strengths of waffle slabs and beams will be increased on element basis. In addition, it is aimed to increase the axial load carrying capacity and shear capacity of the columns with CFRP wrapping.

In order to increase the flexural strength capacity, a sample main reinforced concrete beam was selected, and its numerical values were given within the scope of the study. The width of the selected beam is 125cm, the total height is 50cm, the plate thickness is 10cm and the width of ribs are 20cm.

After linear and nonlinear static analyses, the maximum moments at the span of the main bearing beams were calculated and compared with the beam flexural strength capacities. The moment values in the beams are

given in Table 1. The  $M_{DL}$  (kNm) moment is the moment consisting of the dead load,  $M_s$  (kNm) is the service moment at section and  $M_u$  (kNm) moment is the factored moment at a section.

Table 1. Moment Values of Main Beam

Live Load	$M_{DL}$ kNm	$M_s$ kNm	$M_u$ kNm
750 kg/m <sup>2</sup>	147	373	511
1000 kg/m <sup>2</sup>	147	427	584

As a result of the analyses and calculations, it was determined that the flexural strength capacity of the beam was insufficient by increasing the live load. In the factory where vaccine and pharmaceuticals are produced, the alternative of retrofitting with CFRP was preferred due to its fast and clean construction technique. CFRP strips and fabrics were used to increase the shear force and flexural strength capacities in reinforced concrete main bearing beams, rib and plate slabs, columns.

Table 2. Technical Properties of Reinforced Concrete Beams

$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	30
$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	420
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	3012
Modulus Of Elasticity of Concrete (N/mm <sup>2</sup> )	32000
Modulus Of Elasticity of Steel (mm <sup>2</sup> )	200000
$k$ (ratio of depth of neutral axis to reinforcement depth measured from extreme compression fiber)	0,334
	(ACI 318-05) [21,22]

The technical properties of the CFRP fabric used are given in table 3 and the technical properties of the CFRP strips are given in table 4. These values were used in the application and retrofitting calculations.

Table 3. Technical Properties of CFRP Fabric

Modulus Of Elasticity (N/mm <sup>2</sup> )	230000
Type of Fiber	High Strength Carbon
Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	4900
Elongation at Break (%)	2,10
Thickness $S$ (mm)	500
Mass Of the Fabric Per Unit Area (g/m <sup>2</sup> )	300
Reaction to Fire	Classe F

Table 4. Technical Properties of CFRP Strips

Modulus Of Elasticity (N/mm <sup>2</sup> )	165000
Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	3000
Elongation at Break (%)	1,5
Thickness $S$ (mm)	1,2
Width (mm)	50
Cross Section Area (mm <sup>2</sup> )	60

As a result of the retrofitting calculations, static and reinforced concrete analyses were repeated in order to increase the vertical load capacities under increased operating loads and the retrofitted section was checked for shear force and flexural strength capacities. The retrofitted section is capable of sustaining the new flexural strength  $\Phi M_n = 615,8$  kNm. This value is sufficient in terms of operational and earthquake safety.

The maximum shear force of the beam was calculated as  $V_u = 887$  kN. Reinforced concrete beams are planned to be wrapped in U-shape with CFRP fabrics and will be anchored to the beam with CFRP anchors. The retrofitted section is capable of sustaining the new shear strength  $V_s = 1067,9$  kN. This value is sufficient in terms of operational and earthquake safety. After the increase in live loads and retrofitting with CFRP, it was observed that the performance level of the structure ensured the life safety performance level according to the TBEC2018 [4].

### 3.1. Retrofitting application

Cross-sectional bearing capacity checks of all reinforced concrete structural elements were carried out and reinforcement projects were prepared for changing fast operating loads. CFRP reinforcement was preferred due to the urgency of Covid19 vaccine production. The details of the second-floor reinforcement project are given within the scope of the study according to the tank and machine layouts planned to be added.

Firstly, the area to be retrofitted was cleaned and separated from the other parts of the facility. The retrofitting

application was completed with minimal intervention in the ultra-hygienic facility, which is the subject of the study. Before the application, plaster, paint etc. were removed from the reinforced concrete elements and the application started.

CFRP strips were used in both directions to increase the flexural strength capacities of the second-floor reinforced concrete ribs and beams. 4 strips were used in both directions in the beams and 1 strip in all ribs. Figure 9 shows the CFRP strips reinforcement application on beams and ribs.

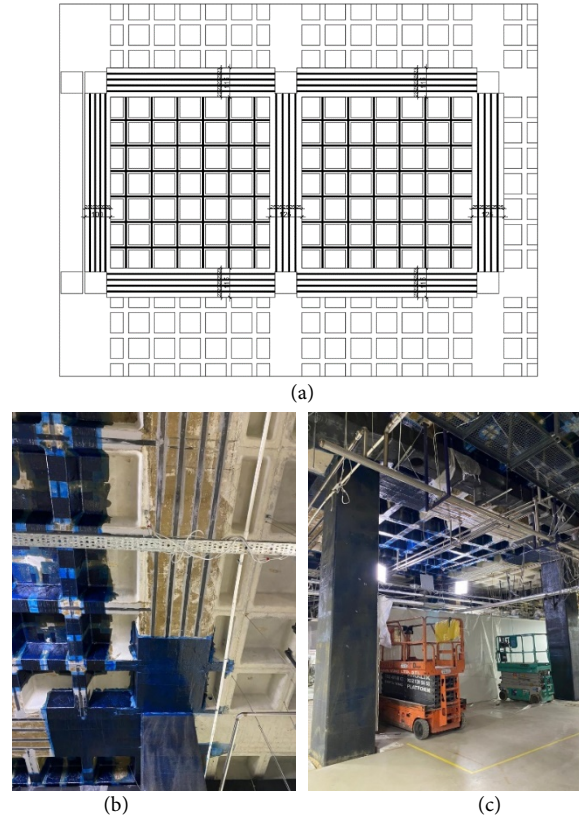


Figure 9. Second Floor CFRP Strips Reinforcement (a) Project Layout (b, c) Application Area

The beams were wrapped with a single layer of CFRP fabric along the entire beam to increase both shear force and flexural strength capacities. 2 layers of wrapping were made in the first 150cm in the column-beam joints, which are the plastic hinges that may occur. CFRP fabrics were wrapped u-shaped on the beams and ribs and anchored to the existing reinforced concrete elements. U-shaped fabrics were applied from the bottom of the ribs towards the plate. CFRP fabrics was wrapped and anchored at the ribs as 60cm in both directions. Thus the shear force capacity of the beam and all ribs is increased for varying operating loads. Figure 10 shows the CFRP fabric application for the shear force capacities of beams and ribs.

In order to increase the load bearing capacities of all columns in the frame where the operating loads will increase, wrapping with CFRP fabric was applied. The columns were wrapped in 3 layers in the first and last 75cm by removing the ground concrete by 15cm. In the parts where the probability of plastic hinge occurred is high and where the largest moments are calculated, the columns were wrapped in 3 layers. The columns were wrapped in 2 layers in the remaining area. Figure 12 shows the CFRP fabric application for the load bearing capacities of columns.

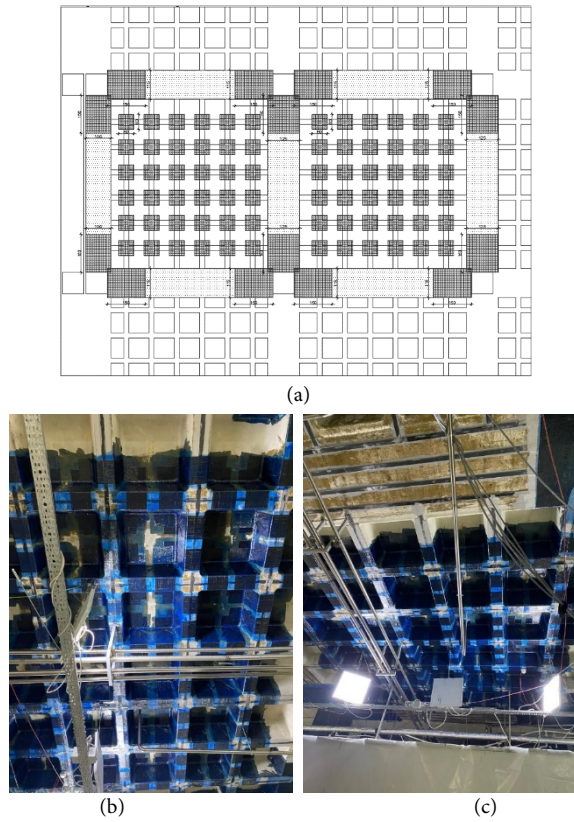


Figure 10. Second Floor CFRP Fabric Reinforcement (a) Project Layout (b, c) Application Area

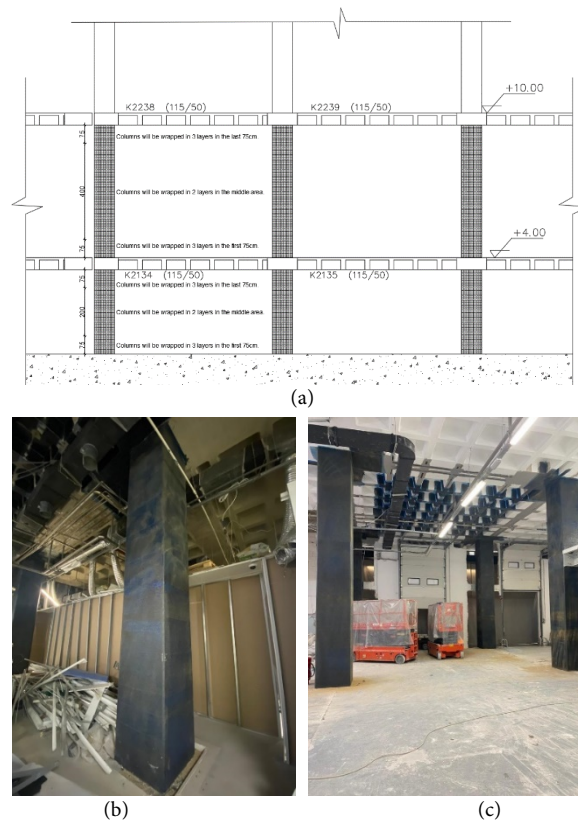


Figure 12. Second Floor CFRP Fabric Reinforcement (a) Project Section (b, c) Application Area

#### 4. Conclusion

Waffle slab is two-way concrete slab reinforced by ribs in two direction and able to carry heavier loads ans

span longer distances than flat slabs. The use of two-way waffle slabs is quite common in reinforced concrete framed factory buildings where the spans to be passed and the live loads are high.

The selected sample building is a reinforced concrete framed industrial building with two-way cassette flooring. In the building where the application will take place, the live load bearing capacity has been increased from 750 kg/m<sup>2</sup> to 1000 kg/m<sup>2</sup> in order to realize the new functions created for covid19 vaccine productions. Firstly, in the structural model, the building characteristics such as natural vibration periods, relative storey drifts, lateral stiffnesses, base shear forces and mode shapes were determined. After the increase in live load, these values were determined again and examined within the scope of both TEC2007 [18] and TBEC2018 [4]. The 1<sup>st</sup> period is 1.037 sec. in X direction, the 2<sup>nd</sup> period is 1.028 sec. in Y direction and the 3<sup>rd</sup> period is 0.969 sec. in torsion mode at 750 kg/m<sup>2</sup> live load level. The 1<sup>st</sup> period is 1.126 sec. in X direction, the 2<sup>nd</sup> period is 1.112 sec. in Y direction and the 3<sup>rd</sup> period is 1.046 sec. in torsion mode at 1000 kg/m<sup>2</sup> live load level. When the horizontal earthquake spectra in both TEC2007 [18] and TBEC2018 [4] were analyzed, it was observed that the earthquake loads on the structure tended to decrease since the period of the structure remained in the decreasing section in these spectra. Relative storey drift ratio in both directions (X-Y) increased from 1.20% to 1.40%. The base shear forces increased from 1307 tons to 1524 tons for both directions.

In its current condition (750 kg/m<sup>2</sup>), the earthquake performance of the building was found to ensure life safety according to TEC2007 [18]. When the loads of the structure reached 1000 kg/m<sup>2</sup>, the necessary parameters were checked and it was determined that after the strengthening with CFRP, it reached the target life safety performance level according to TBEC2018.

In reinforced concrete buildings with special architectural functions such as pharmaceutical facilities, fiber polymer reinforcement was preferred over traditional methods on the sample building due to its fast construction technique, clean application and no change in cross-section. Due to the increasing operating loads, the existing load-bearing elements were reinforced with CFRP (fabric and strip). CFRP strip was used to increase the shear force and flexural strength capacities of beams and ribs in frames where live loads will increase.

While CFRP do not make a significant contribution to the lateral stiffness of structural elements, they provide a significant increase in axial strength, shear strength and flexural strength with the wrapping effect. The maximum moment increase for the sample beam was calculated as 13% with the change in live load. The retrofitted section the new flexural value is sufficient in terms of operational and earthquake safety. The maximum shear force of the beam for increasing live loads was calculated and it was determined that the reinforced section remained within the limits of the new shear strength capacity. CFRPs also contributed significantly to the increase in element ductility in the sample project. And it allowed the structure performance to remain within the appropriate conditions.

## Acknowledgment

I would like to thank BASF Construction Chemicals and Polifarma İlaç A.Ş. employees for their contributions to the study. This publication was presented by the author at ICENTE 2022- 6th International Conference on Engineering Technologies on 20.11.2022.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] İ. Aka, F. Keskinel, F. Çılı and O. C. Celik, *Betonarme*. İstanbul, Birsen Press, 2001.
- [2] Z. Celep, *Betonarme Yapılar*. İstanbul, Beta Press, 2005.
- [3] K. Darılmaz, *Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş*. İstanbul, Yapı Yazılım Press, 2012.
- [4] TBEC-2018, "Turkish building earthquake code 2018," *Official Newspaper of Turkey: Ministry of Public Works and Settlement*, 2018.
- [5] P. İnci, C. Goksu, E. Tore, E. Binbir, A. O. Ates, and A. İlki, "Assessment Of seismic demand and damping of a reinforced concrete building after CFRP jacketing of columns," *Structural Engineering and Mechanics*, vol .82, no. 5, pp.651-665, 2022.



doi:10.12989/sem.2022.82.5.651

- [6] A. Ilki, E. Tore, C. Demir and M. Comert, "Seismic performance of a full-scale FRP retrofitted sub-standard RC building," *16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece*, vol.46, pp.519-544, 2018. doi:10.1007/978-3-319-75741-4\_22
- [7] A. Ilki, O. Peker, E. Karamuk, C. Demir and N. Kumbasar, "FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular reinforced concrete columns," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 2 pp. 169-188, 2008. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:2(169)
- [8] A. Ilki, N. Kumbasar and V. Koc, "Low strength concrete members externally confined with FRP sheets," *Structural engineering and mechanics: An international journal*, vol. 18, no. 2, pp. 167-194, 2004. doi:10.12989/sem.2004.18.2.167
- [9] O. Anil, N. Kaya and O. Arslan, "Strengthening of one way RC slab with opening using CFRP strips," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 883-893, 2013. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.093
- [10] O. Enochsson, J. Lundqvist, B. Taljsten, P. Rusinowski and T. Olofsson, "CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs an experimental and numerical study," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 4, pp. 810-826, 2007. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.009
- [11] R. Ghoroubi, O. Mercimek, A. Ozdemir and O. Anil, "Experimental investigation of damaged square short RC columns with low slenderness retrofitted by CFRP strips under axial load," *Structures*. Elsevier, vol. 28, pp. 170-180, 2020. doi:10.1016/j.istruc.2020.08.068
- [12] M. Emara, A. Hamoda and J. W. Hu, "Numerical assessment of rectangular one and two-way RC slabs strengthened with CFRP under impact loads," *Computers and Concrete*, vol. 31, no. 3, pp.173-184, 2023. doi:10.12989/cac.2023.31.3.173
- [13] A. Türer, O. Mercimek and Y. Erbaş, "Experimental and numerical investigation of punching behavior of two-way RC slab with different opening locations and sizes strengthened with CFRP strip," *Structures*, vol. 49, pp. 918-942, 2023. doi:10.1016/j.istruc.2023.01.157
- [14] O. Mercimek, R. Ghoroubi, Y. Erbaş and Ö. Anil, "Comparison of strengthening methods to improve punching behavior of two-way RC flat slabs," *Structures*, vol. 46, pp. 1495-1516, 2022. doi:10.1016/j.istruc.2022.11.018
- [15] M. Jung and G. Markou, "Numerical investigation of retrofitting waffle slabs with carbon fibre reinforced polymer plates," *9th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2023, Athens, Greece, June 12-14, 2023*.
- [16] A. Bal and A. M. Kılıç, "Investigation of strengthening an existing five-storey RC residential structure with fiber reinforced polymers," *2nd International Architecture and Design Congress, Çanakkale, Turkey, October*. Güven Plus Press, 2018. pp. 1161-1169.
- [17] A. Bal and A. M. Kılıç, "Comparison of CFRP and steel jacketing methods applications for retrofitting an existing concrete industrial structure in earthquake effect," *VI. International Earthquake Symposium Kocaeli, IESKO 2019, Kocaeli, Turkey*, KUV Press, 2019. pp. 207-212.
- [18] TEC-2007, "Turkish earthquake code 2007," *Official Newspaper of Turkey: Ministry of Public Works and Settlement*, 2007.
- [19] Earthquake Hazard Map AFAD, 2018. [Online]. Available: <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>. [Accessed: Sept., 2022].
- [20] SAP2000, C. S. I. "Analysis reference manual, structural analysis program," *Computers and Structures, Inc., California, Berkeley*, 2016.
- [21] ACI 440.2R-08, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures," *American Concrete Institute*, 2008.
- [22] ACI 318-08, "Building code requirements for structural concrete and commentary." *American Concrete Institute*, 2008.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Low-Cost High-Voltage Generator For Electrostatic Charging Of Pesticide Droplets And Laboratory Uses

Kemal Amaya\*

Submitted: 26.05.2023 Revised: 29.10.2023 Accepted: 17.11.2023 doi:10.30855/gmbd.07050776

### ABSTRACT

**Keywords:** Cockcroft-Walton voltage multiplier, high-voltage generators, agricultural pesticide electrostatic spraying

\*Çukurova University,  
Faculty of Agriculture,  
Department of Agricultural  
Machinery and Technologies  
Engineering,  
01330 - Adana, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-5096-1585  
e mail: kamal.amaya86@gmail.com

\*Corresponding author:  
kamal.amaya86@gmail.com

The study aimed to develop a low-cost high voltage circuit for laboratory uses and compare its performance with a commercial one in the electrostatic charging of spray droplets. Because the Cockcroft-Walton voltage multiplier is considered the simplest and cheapest, it was used to design this circuit. Two dc-ac inverters (50 Hz and 20 kHz) and capacitors with two capacities (10 and 470 nF) were used to develop three different circuits. The circuits were loaded with several electric currents to study the effect of the capacitor capacity and frequency value on the output voltage, output voltage ripple, and response time of the circuit. According to the results, loading the first circuit developed with a low-frequency inverter (50 Hz) and high-capacity capacitors (470 nF) by an electric current, even including the microampere, seriously affected the output voltage and the voltage ripple. Also, the second circuit developed using a high-frequency inverter (20 kHz) and low-capacity capacitors (10 nF) was subject to voltage drop at the lowest load currents. However, the third circuit developed using high-capacity capacitors (470 nF) with the high-frequency inverter (20 kHz) significantly improved the output and ripple voltage at different high load currents. In addition, they reduced the response time from 15 s (in circuit 1 and 2) to 40 ms. The developed high-voltage circuit (3) can provide the same efficiency in water droplet charging as a commercial circuit. Moreover, it was enhanced to provide high voltages values until 15 kV.

## Pestisit Damlacıklarının Elektrostatik Yüklenmesi ve Laboratuvar Kullanımları İçin Düşük Maliyetli Yüksek Voltaj Jeneratörü

### ÖZ

Çalışma, laboratuvar kullanımları için düşük maliyetli bir yüksek voltaj devresi geliştirmeyi ve sprey damlacıklarının elektrostatik yüklenmesinde performansını ticari bir devre ile karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Cockcroft-Walton voltaj çarpanı en basit ve ucuz olarak kabul edildiğinden, bu devreyi tasarlamak için kullanılmıştır. İki dc-ac çevirici (50 Hz and 20 kHz) ve iki kapasiteli kapasitörler (10 and 470 nF) kullanılarak üç farklı devre geliştirilmiştir. Kondansatör kapasitesinin ve voltaj frekansı değerinin üç devrenin çıkış voltajı, çıkış voltajı dalgalanması ve tepki süresi üzerindeki etkisini incelemek için devreye farklı elektrik akımı değerleri yüklenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düşük frekanslı invertör (50 Hz) ve yüksek kapasiteli kondansatörler (470 nF) ile geliştirilen birinci devrenin mikroamper içinde bile elektrik akımıyla yüklenmesi çıkış gerilimini ve gerilim dalgalanmasını ciddi şekilde etkilemiştir. Ayrıca yüksek frekanslı invertör (20 kHz) ve düşük kapasiteli kapasitörler (10 nF) kullanılarak geliştirilen ikinci devre, en düşük yük akımlarında voltaj düşüşüne maruz kalmıştır. Ancak, (20 kHz) yüksek frekanslı invertör ve (470 nF) kapasitörler kullanarak geliştirilen üçüncü devre, farklı yük akımlarında çıkış ve dalgalanma voltajını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca tepki süresini 15 saniye (1. ve 2. devrelerde) 40 milisaniyeye düşürmüştür. Geliştirilen yüksek gerilim devresi (3), su damlacıkları yüklenmesinde ticari devre ile aynı verimi sağlayabilmektedir. Üstelik, geliştirilen devre, 15 kV'a kadar yüksek voltaj değeri sağlayacak şekilde iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cockcroft-Walton voltaj çarpanı, Yüksek voltaj jeneratörleri, Tarımsal pestisit elektrostatik püskürtme

## 1. Introduction

Generally, commercial high-voltage devices are employed to test different equipment such as high-voltage cables, transformers, etc. In addition, dc high-voltage generators can be used in applied physics, industrial applications, electromedical equipment, and communications electronics [1]. The high-voltage multiplier circuit developed by Cockcroft-Walton (C-W) is considered to be the simplest and cheapest circuit for high-voltage generation. This circuit was improved in 1932 by Cockcroft-Walton [2] over the circuit developed by Greinacher [3] for the generation of a high dc voltage to power their particle accelerator [4], [5]. The working principle of this voltage multiplier circuit depends on stepping up the low input ac voltage by several stages (each stage includes two diodes and capacitors) to acquire a final high output dc voltage. Figure 1 shows the working method of the Cockcroft and Walton voltage multiplier for only two stages. In these types of circuits, the first side of the ac power supply is at zero potential (grounded), while the other side varies between plus and minus voltage  $\pm V_p$ . Let's assume that the input voltage  $V_p$  is equal to  $\pm 220$  V (The dashed line indicates the direction of current flow). (1) At the negative peak  $-220$  V, the capacitor  $C_1$  is charged through diode  $D_1$  with  $V_p=220$  V. (2) In the next positive cycle, the upper side of the power supply becomes  $+220$  V, and this voltage adds to the voltage in  $C_1$ . Therefore, capacitor  $C_2$  is charged through  $D_2$  to  $2V_p=440$ . (3) When the power supply source is at a  $-220$  negative peak again, the Capacitor  $C_1$  is charged as in step 1. Also, capacitor  $C_3$  is charged through  $D_3$  to  $440$ V. (4) The power supply is at a  $+220$  positive peak, and the capacitor  $C_4$  is charged to  $440$  V.

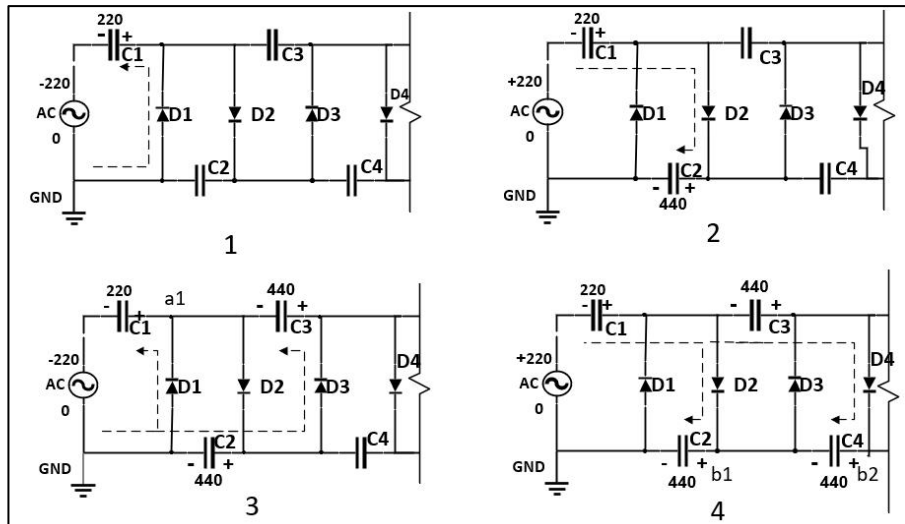


Figure 1. 2 stages Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit

The previous explanation was for two stages of the Cockcroft-Walton circuit. Still, when this circuit has  $n$  stages as shown in Figure 2, after a certain period, the capacitors ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ) are charged in the first half cycle by upward diodes ( $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ , respectively) and in the next half-cycle, the smoothing column capacitors ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ) are charged by downward diodes ( $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ ). Theoretically, the maximum value of the high output dc voltage of the  $n$  stage C-W voltage multiplier equals  $2n$  times the quantity of the ac input voltage under the no-load condition [6].

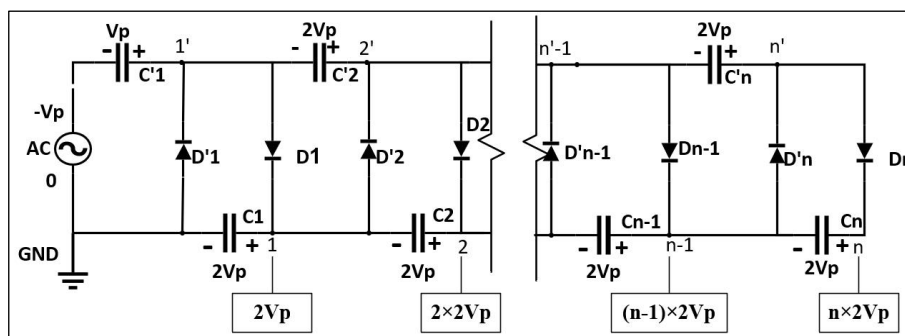


Figure 2.  $n$  stage C-W voltage multiplier circuit

Many studies have been conducted on developing and testing different voltage multipliers depending on the Cockcroft-Walton circuit. Al-Mamoori et al. (2019) simulated a voltage multiplier circuit using the PSpice software to simulate the electric field generated near the earth before starting the lightning strike [7]. An input ac voltage source that has 50 Hz and 240Vp-p was used for the simulation process. In addition, they used capacitors with 0.1  $\mu\text{F}$  to construct the voltage multiplier circuit. The different values of the high voltages were obtained by connecting the loading wire after each stage sequentially. Abidin et al. (2018) used the Cockcroft-Walton voltage multiplier as a converter circuit to optimize the output voltage value of the energy harvesting technique from the raindrops [8]. The circular piezoelectric (KSPG-10) that has a resonant frequency (1200 kHz) in the boundary of the frequency of raindrops and a maximum input voltage of 30 V peak to peak was used as input ac source for the voltage multiplier circuit. The study investigated the effect of a wide range of input ac voltage frequency on the circuit's performance since the frequency of rain ranges from less than 500 Hz to 30 kHz. Proteus software was used to simulate and investigate the optimum output voltage and current. Study results showed that the output voltage and current increased by increasing the input frequency. Dwivedi and Daigvane (2010) designed a C-W voltage multiplier circuit using 0.22  $\mu\text{F}$  capacitors to test high-voltage cables [5]. They used a high-voltage transformer with a 50 Hz frequency and single-phase sinusoidal waveform to feed the circuit by the ac input voltage of 5 kV and current of 50 mA. The circuit could provide a 60 kV output voltage. Spencer et al. (2001) developed a small high-voltage board that depends on the Cockcroft-Walton circuit with nine stages [9]. This board was used to power two photomultipliers<sup>1</sup>. The board was fed with 5–6 V DC converted to a 120 V ac sine-wave and 780kHz frequency to feed the voltage multiplier circuit. Malviya and Bhardwaj (2016) conducted a simulation study on the effect of high and low frequencies of the ac input voltage on the H.V multiplier circuit behavior, especially on the multiplier response time, using PSpice simulations [10]. The study investigated the response time for several voltage multiplier circuits that have two, three, four, or five stages. The simulation results showed that the output voltage becomes stable and reaches its final value more quickly by using a high-frequency input voltage. In addition, increasing the number of the circuit stages increase the response time for both used low and high frequencies. Unfortunately, the loading current of the C-W voltage multiplier circuit seriously affects the output voltage and voltage ripple. The ripple voltage is determined as the unwanted residual magnitude of the fluctuation in the dc output voltage at a specific output current [6]. Voltage ripples can have various negative effects on electric devices, such as heating and damaging electronic components and noise in audio circuits and television displays [8].

In all previous works, it was noted that no studies have practically investigated the effect of the load current on the output voltage of high-voltage multiplier circuits. Therefore, the study aimed to: (1) able the researchers' non-specialists in electronic engineering to develop a simple low-cost high-voltage circuit by using only some electronic elements, (2) investigate several parameters to reduce the voltage drop and ripple under the effect of different loading currents, and (3) compare the developed circuit with commercial one to determine its performance in electrostatic charging of water droplets. The article will be helpful for many postgraduate students to develop low-cost high voltage devices for different simple laboratory uses.

## 2. Material and Methods

### 2.1 Selection of C.W. circuit elements

The Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit consists of several diodes and capacitors. These electronic elements must be chosen carefully to avoid damage since they are stressed with twice the input voltage (except for the first capacitor).

#### 2.1.1 DC Power supply

It supplies the required dc voltage to the dc-ac inverter. The dc power supply used in the experiments can provide 0~30 V dc and 0~5 amp.

#### 2.1.2 DC-AC inverter selection

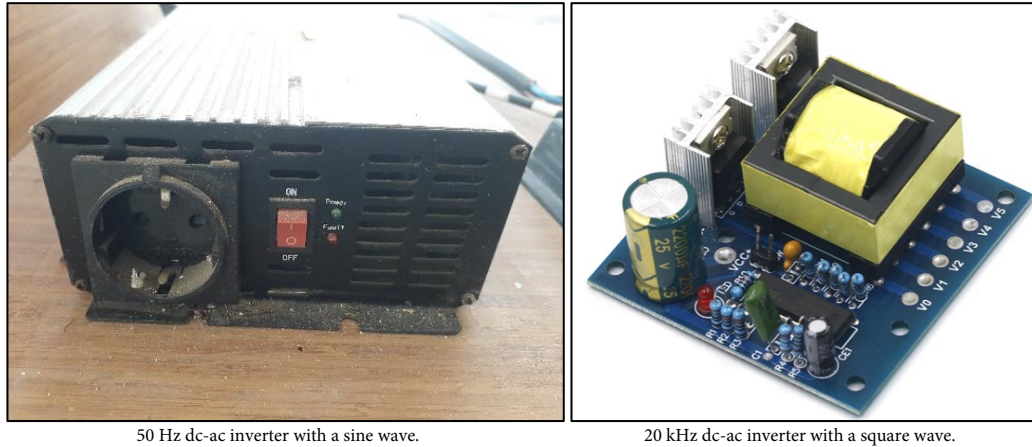
It plays two main roles: converting the direct current drawn from the previous dc power supply to the

---

<sup>1</sup> photomultiplier tubes (PMTs) are used extensively in the nuclear industry as a method of radiation detection.

alternating current required to operate the Cockcroft-Walton circuit. Raising the ac input voltage (feed ac voltage of the multiplier circuit) to a higher value to reduce stages' numbers of the voltage-multiplier circuit. In this study, two inverters, as shown in Figure 3, were used to feed the circuit separately to investigate the effect of the input ac voltage frequency on circuit efficiency.

- 12 V dc input and 220 V ac output voltage inverter with 50 Hz low-frequency and sine wave.
- 12 V dc input and 250 V ac output voltage inverter with 20 kHz high-frequency and square wave.



50 Hz dc-ac inverter with a sine wave.

20 kHz dc-ac inverter with a square wave.

Figure 3: The DC-AC inverters used in the study

### 2.1.3 Capacitor and diode selection

The voltage applied to each capacitor (except C'1) and the diode in this circuit was approximately 615 V. Therefore, high-voltage polyester capacitors with specifications of 630 V, and 470 nF, and diodes with specifications of 1N4007 and 1000 V were chosen to build the high voltage multiplier.

## 2.2 The effect of load currents on the output voltage and voltage ripple

The effect of the load current on the output voltage value and peak-to-peak ripple  $2\delta V$  were discussed in many studies [1], [4], [11], [12]. The output voltage without applying any load current to the circuit is given by Equation (1).

$$V_T = 2nV_p \quad (1)$$

n: number of stages.

$V_p$ : the peak value of input voltage.

The value of the voltage ripple  $2\delta V$  in the C.W voltage multiplier circuit is given by Equation 2:

$$2\delta V = \frac{I}{fC} \frac{n(n+1)}{2} \quad (2)$$

f: frequency of ac input voltage.

I: load current.

C: capacitor capacity.

The voltage drop  $\Delta V_o$  determines the difference between the theoretical no-loaded output voltage and the loaded output voltage  $V_o$ . The mathematical value of the voltage drop was symbolized by  $\Delta V_{mo}$  and can be calculated using Equations 3. Thus, the mathematical loaded output voltage symbolized by  $V_{mo}$  can be calculated using Equation 4.

$$\Delta V_{mo} = \frac{I}{f.C} \left( \frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (3)$$

$$V_{mo} = 2nV_p - \frac{I}{f.C} \left( \frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (4)$$

Three circuits were developed to study the impact of the capacitor capacity and frequency level of the DC – AC inverters on circuit performance.

*Circuit 1:* 50 Hz dc-ac inverter and 470 nF capacitors.

*Circuit 2:* 20 kHz dc-ac inverter and 10 nF capacitors.

*Circuit 3:* 20 kHz dc-ac inverter and 470 nF capacitors.

As shown in Figure 4, many resistors connected in series were used to load the circuit with five different load currents and investigate the effect of these currents on the output voltage of the circuit. The load current value gradually was increased by decreasing the number of resistors connected to the circuit voltage output.

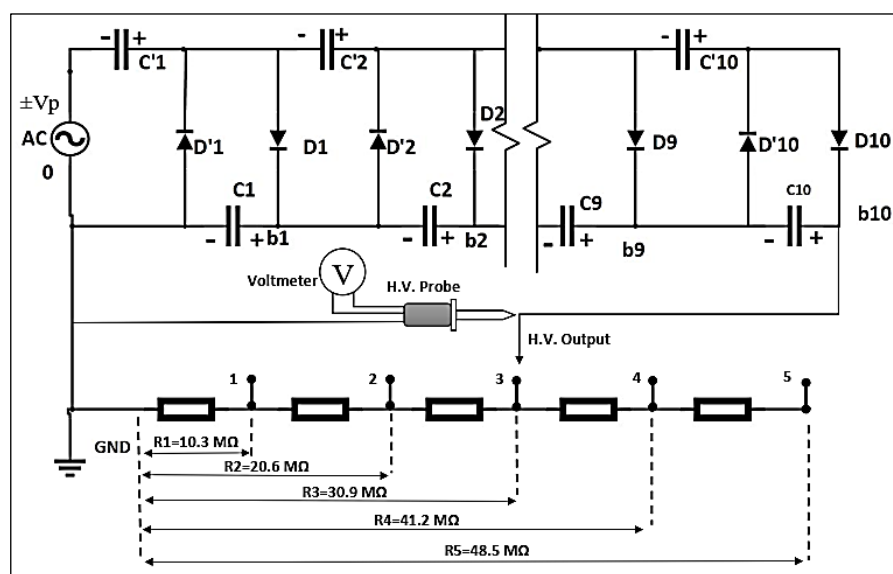


Figure 4. Diagram showing how to load the circuit with different load currents.

### 2.2.1 Mathematical output voltage $V_{mo}$

It was calculated mathematically using Equation (4). It is the maximum output voltage (without load current) minus the voltage drop.

### 2.2.2 Simulation output voltage $V_{so}$

Multisim 14.2 software was used to draw and simulate the circuit shown in Figure 4. All laboratory experiments were simulated using this software before any practical experiments to predict any damage that may occur in the used parts (Figure 5). In addition, the simulated output voltage was determined for comparison with the mathematical and actual values.

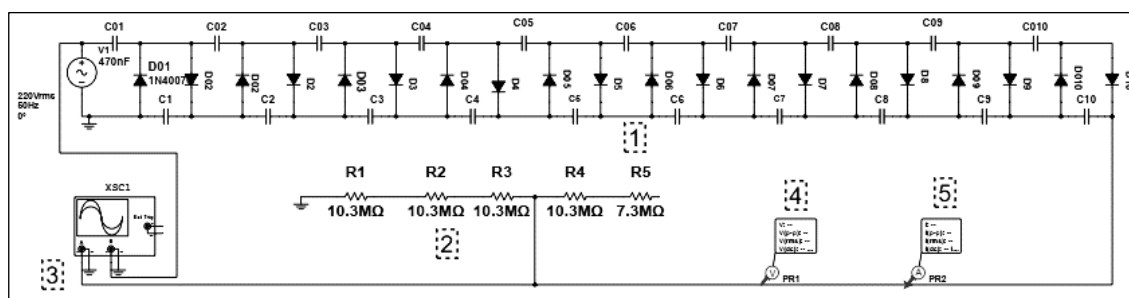


Figure 5. Scheme of the investigation of the circuit using the Multisim 14.2 software. 1-C-W circuit; 2- resistors; 3- oscilloscope; 4, 5- voltage and ampere probe.

### 2.2.3 Actual output voltage $V_o$

It was obtained from laboratory experiments according to the diagram in Figure 4 using the devices and tools shown in Figure 6. The Figure shows a voltage-multiplier circuit and several resistors connected in series. As mentioned previously, the circuit load current was gradually increased by decreasing the number of resistors connected to the circuit voltage output. At each value of load current, the actual output voltage is taken from the high-voltage probe.

### 2.3 The effect of capacitor value on the circuit efficiency

Capacitor selection depends on the frequency value of the ac input voltage. For 50-60 Hz applications, 1.0 to 250  $\mu\text{F}$  capacitors are usually used. However, for higher-frequency applications, capacitors of 20 to 60 nF are used [5]–[7]. In this study, two capacitor capacities were used to study the effect of the capacitor values on the circuit efficiency. The first value was 470 nF and the second was approximately 10 nF.

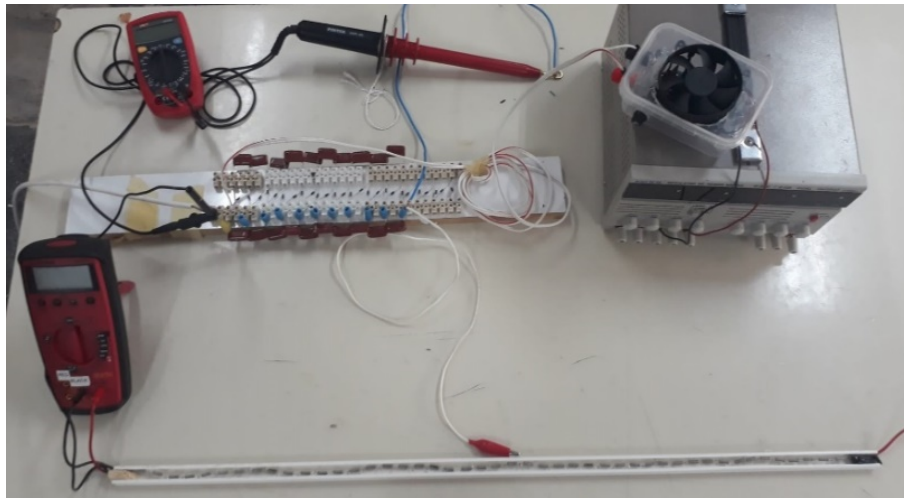


Figure 6. C-W voltage-multiplier circuit with a 20 kHz inverter and the tools used in testing its performance.

### 2.4 The effect of the input ac voltage frequency on the circuit performance

As shown in Figure (3), dc-ac inverter with 20 kHz and square wave was used to study the effect of the frequency on the output voltage drop and on response time (the time required for the output voltage to reach the final high value).

### 2.5 The ability of the developed high-voltage circuit to charge spray droplets electrostatically.

The high-voltage circuit developed in this study using 50 Hz ac input voltage and 470 nF capacitors was used to electrostatically charge spray droplets for comparing its performance with a commercial device (VSM2016, Udescon Company, Turkey). All tools and equipment used to charge spray droplets and evaluate the charging efficiency (charge-to-mass ratio) were presented in a previous study conducted by Amaya and Bayat 2023 [13].

## 3. Results and Discussion

### 3.1 The effect of loading currents on the output voltage and voltage ripple

#### 3.1.1. Circuit 1: 50 Hz input ac voltage and 470 nF capacitors

The actual  $V_o$ , simulated  $V_{so}$ , and mathematical  $V_{mo}$  values of the output voltage were compared with the theoretical output voltage. Figure 7 shows that using a low-frequency dc-ac inverter to operate the circuit can cause a critical drop in the output voltage. The values of the voltage drop in  $V_o$ ,  $V_{so}$ , and  $V_{mo}$  were similar at all load currents. Increasing the loading current from 0  $\mu\text{A}$  to only 0.150 mA was sufficient to decrease the output voltage  $V_o$  from its theoretical value of 6.15 kV to 1.61 kV. In addition, the mathematical value of the voltage ripple  $2\delta v$  calculated by Equation (2) increased with increasing load current of the voltage multiplier circuit. It reached 366 V at a load current of 0.156 mA. This enormous voltage ripple can be observed in the

simulation results in Figure 10-a.

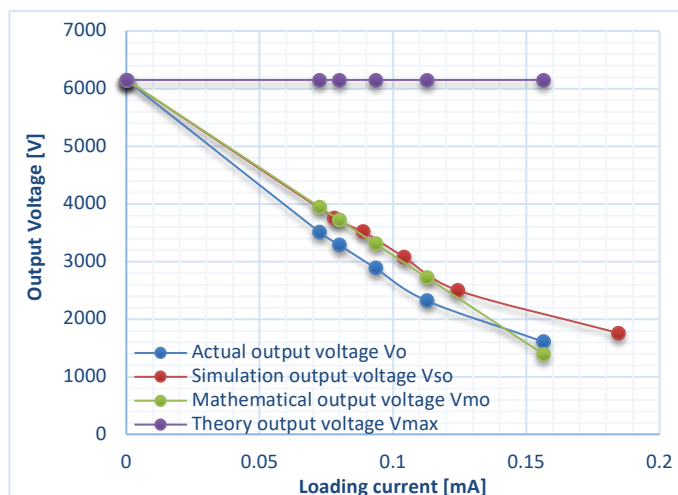


Figure 7. The effect of the loading current on the output voltage in circuit 1.

### 3.1.2. Circuit 2: 20 kHz input ac voltage and 10 nF capacitors

Here, the capacitors and low-frequency dc-ac inverter used in circuit 1 (470 nF and 50 Hz) were replaced by capacitors with capacities of 10 nF and a high-frequency inverter of 20 kHz to reduce output voltage dropping and residual electric-charge amount in capacitors after turning the circuit off. Figure 8 shows that when the circuit is loaded with increasing electric currents, the output voltage drop occurs only for the actual and simulation values. The voltage drop in the actual value  $V_o$  was larger than that in the simulation value  $V_{so}$ . It starts from  $V_o = 5.26$  kV at zero load current until 2.67 kV at 0.27 mA load current. It is worth noting that this circuit has a voltage drop of  $\Delta V_o = 0.9$  kV, even without any load current. However, the actual voltage drop and ripple in this circuit were less than those in the previous circuit. Although the loading current of 0.15 mA caused a drop in the output voltage to approximately reach  $V_o = 1.7$  kV in the circuit (1), it reduced the output voltage to only  $V_o = 3.45$  kV in this circuit. The mathematical value of the voltage ripple  $2\delta v$  calculated by Equation (2) reached 121 V at a load current of 0.442 mA. It can be observed in the simulation results in Figure 10-b. Although the high-frequency dc-ac inverter improved the output voltage value and reduce the ripple, the results indicate that using so low values of the capacitor capacities with this inverter causes primary voltage drop without any loading current. Thus they are inappropriate for developing the Cockcroft Walton voltage multiplier [5]–[7]. So, circuit (3) was developed and tested.

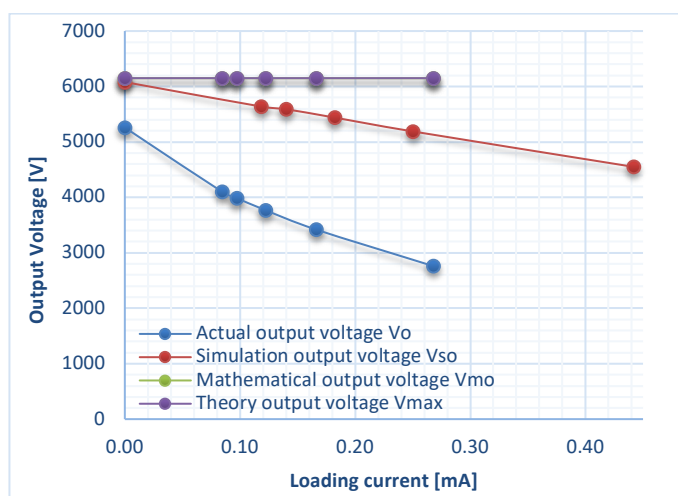


Figure 8. The effect of the loading current on the output voltage in circuit 2.



### 3.1.3. Circuit 3: 20 kHz input ac voltage and 470 nF capacitors

The capacitors with a capacity of 10 nF in the second circuit were replaced by 470 nF ones to improve the output voltage and voltage ripple at different load currents. It was noted in Figure 9 that all the output voltage values improved and are equal to the theoretical value  $V_{max}$  except the actual value obtained in the laboratory experiments. It decreased from  $V_o=6.15$  to 5.32 kV at a load current of 0.594 mA. Also, it is noted that at the first value of load current (0.126 mA), the output voltage  $V_o$  suddenly reduces by 10.9 %. Then, increasing the load current from 0.126 to 0.594 mA, decreases the output voltage  $V_o$  only by 2.9 %. Loading this circuit with an electric current of 0.150 mA could reduce the output voltage to only  $V_o=5.46$  kV, while this loading current value reduced the output voltage to 1.7 and 3.45 kV in both the previous first and second circuits, respectively. It was noted that the mathematical value of the ripple  $2\delta v$  calculated by the formula (2) was completely reduced by using 0.47  $\mu\text{F}$  capacitors with the high-frequency dc-ac inverter to build the circuit. This low value of the voltage ripple can be seen in the simulation results in Figure 10-b-c.

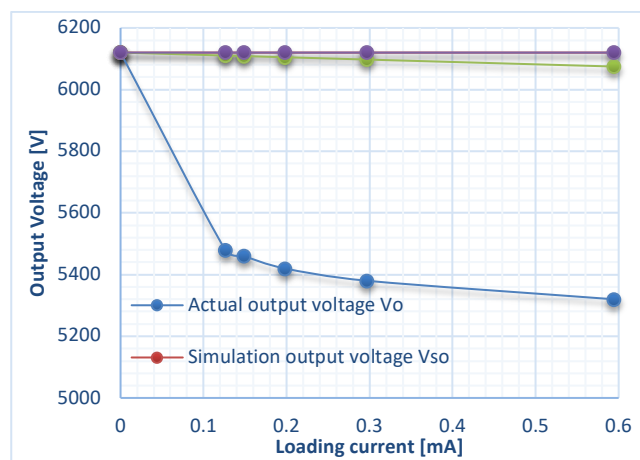


Figure 9. The effect of the loading current on the output voltage in circuit 3.

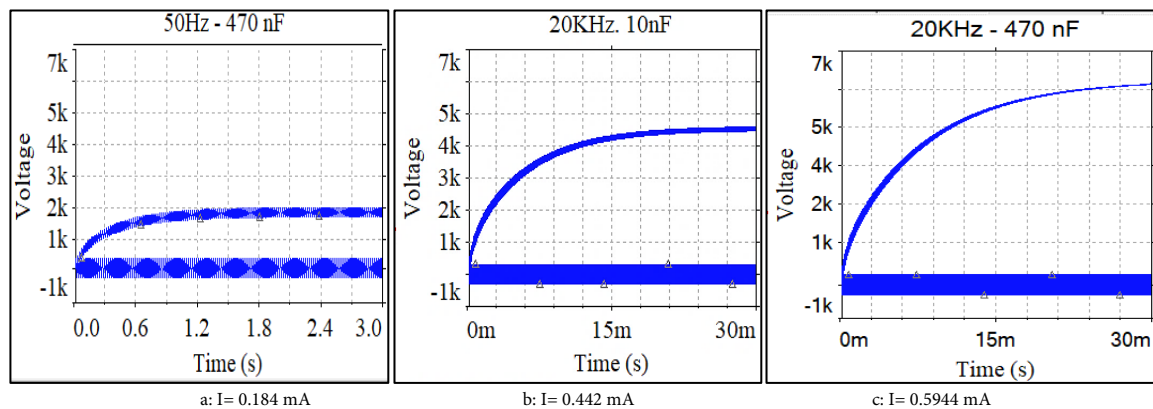


Figure 10. The effect of the loading current on the output voltage and ripple using Multisim 14.2 software

### 3.2 Response time

Since the voltage multiplier circuit consists of more than one stage, the time required to reach the final maximum value  $V_{max}$  of the output voltage increases with the number of circuit stages. To reduce this time, charging process of the first stage must be accelerated by replacing the low-frequency dc-ac inverter by a high-frequency one. The effect of replacing the low-frequency dc-ac inverter with another high-frequency one on the response time was simulated for the previous three circuits using Multisim software. According to the results shown in Figure 11, when the low-frequency inverter was used to feed the circuit, the response time required for the output voltage to reach the theoretical value equals 15 seconds. However, the high-frequency inverter has greatly decreased this response time to only 40 milliseconds. The decreasing of the response time was noted in both the second and third circuits with the same value. That indicated that capacitor capacity does not have any effect on response time.

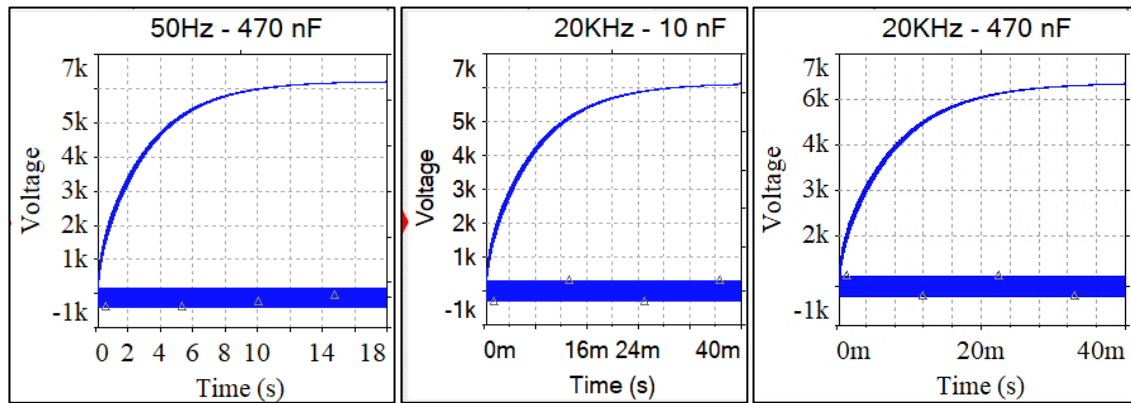


Figure 11. The effect of the low and high-frequency inverters on the response time using Multisim 14.2 software,  $I=0$ .

### 3.3 Comparing the developed voltage multiplier with the circuits in the previous literature studies

Table 1 compares the performance of the voltage multiplier circuits developed in this work with the high voltage devices working with the same principle presented in the previous literature studies.

Table 1. the comparison of the developed circuits in this study with that in the above Literature studies.

		$V_{max}$	$V_{ow}$ $I=0$	$V_o$	$\% \Delta V_o$	$2\delta V$ $I=0.5$ mA	$\% 2\delta V$	Response time
Amaya (2023)	Circuit (1) $n=10, f=50$ Hz, $C=0.47$ $\mu F$	6.15 kV	6.15 kV	1.76 kV at $I=0.16$ mA	71% ( $I=0.16$ mA)	365	5.93 %	14 s
	Circuit (2) $n=10, f=20$ kHz, $C=0.01$ $\mu F$	6.15 kV	5.62 kV	2.76 kV at $I=0.27$ mA	8.62% ( $I=0$ mA)	0.1	0.00 %	35 ms
	Circuit (3) $n=10, f=20$ kHz, $C=0.47$ $\mu F$	6.15 kV	6.15 kV	5.36 kV at $I=0.5$ mA	12.84% ( $I=0.5$ mA)	2.9 V	0.06 %	40 ms
	Mamoori et al. (2019) $n=8, f=50$ Hz, $C=0.1$ $\mu F$	4.92 kV	3.6 kV	⊗	26.53% ( $I=0$ )	⊗	⊗	⊗
	Abidin et al. (2018) $n=2, f=10-2000$ Hz, $C=47$ $\mu F$	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
	Dwivedi and Daigvane (2010) $n=6, f=50$ Hz, $C=0.22$ $\mu F$	60 kV	59.7	45.36 kV $I=0.5$ mA	24.4% ( $I=0.5$ )	1.91 kV	3.18 %	4.5 s
	Spencer et al. (2001) $n=9, f=780$ kHz, $C=0.22$ $\mu F$	1000	950	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
	Malviya and Bhardwaj (2016) $n=5, f=25$ kHz, $C=0.1$ $\mu F$	5 kV	5 kV	⊗	⊗	⊗	⊗	80 ms

$V_{max}$ : the theoretical output voltage value,  $V_{ow}$ : output voltage value without loading,  $V_o$ : output voltage value with certain loading current,  $\% \Delta V_o$ : the percentage of voltage drop,  $2\delta V$ : voltage ripple,  $\% 2\delta V$ : the percentage of voltage ripple,  $n$ : circuit stages,  $f$ : frequency,  $C$ : capacitors' capacity, ⊗: no value in the study.

As mentioned previously, it was noted that the circuit (3) in this study can provide the best performance compared to the other circuits. The circuit in the study conducted by Mamoori et al. (2019) was developed to provide a theoretical output voltage of 4.92 kV. However, this circuit provided an input voltage of only 3.6 kV even without any load current. In other words, the actual output voltage was 26.5% less than the theoretical output voltage (4.92 kV) which is supposed to be provided by the circuit. Probably that happened because of the so low values of the selected capacities of the used capacitors, especially, circuit (2) developed in this study using low values of the capacitors' capacity had the same behavior. The output high voltage in the circuit (2) also dropped from the designed value of 6.15 kV to 5.62 kV without applying any loading current. But increasing the capacities by the replacement of the 0.01  $\mu F$  capacitors in the circuit (2) with 0.47  $\mu F$  capacitors (circuit 3) removed the problem of the voltage dropping without loading current. Thus, it was not any voltage drop in the circuit (3) without applying a loading current. The study by Abidin et al. (2018) did not apply any loading current on the developed circuit to investigate the voltage drop and ripple. Only it noted that the high values of the input ac voltage frequency improve the output voltage and current. Also, when the circuit developed by Dwivedi and Daigvane (2010) was compared with circuit (3) in this study, it was noted that the

voltage drop in their device reaches about two times (24.4%) those in the circuit (3) (12.84%) at the same applied loading current (0.5 mA). Additionally, the voltage ripple in the study by Dwivedi and Daigvane (2010) was 3.18% of the theoretical output voltage, however, it was only 0.06% by the circuit (3) in this study. The response time in their study was so high (4.5 s) but it was only (40 ms) using circuit (3) in this work. The study by Spencer et al. (2001) developed a small Cockcroft-Walton circuit to power two photomultipliers. Nevertheless, it did not apply any loading current on the circuit, thus, it could not be compared its performance with the circuit present in this study. Malviya and Bhardwaj (2016) conducted a simulation study that investigated the effect of the input ac voltage frequency on the output voltage and the response time. The circuit provided better performance by using a high-frequency input ac voltage of 25 kHz. However, the study did not investigate the effect of the loading current. The response time in the circuit with 5 stages was 80 ms, whereas it was only 40 ms in the circuit (3) in this work that has 10 stages.

### 3.3 Droplet Charging efficiency by the developed C-W high voltage multiplier

After the third circuit was developed and tested, it was used to charge spray droplets of tap water electrostatically using the induction charging method. The aim was to investigate the performance of the developed circuit in some lab uses, such as droplet charging. In the induction charging method, when the high voltage electrode is placed close to an earthed conductive liquid jet leaving a hydraulic nozzle, opposite electric charges are induced from the earth to the surface of this liquid jet (Figure 12). The droplets breaking up from the charged coherent liquid carries a part of these charges, and thus become charged oppositely to the electrode [14]. The charge efficiency is usually evaluated by the Faraday cage, which measures the charge amount by milli Coulomb (mC) for the mass unit (kg) of spray droplets as ( $\text{mC.kg}^{-1}$ ) [13].

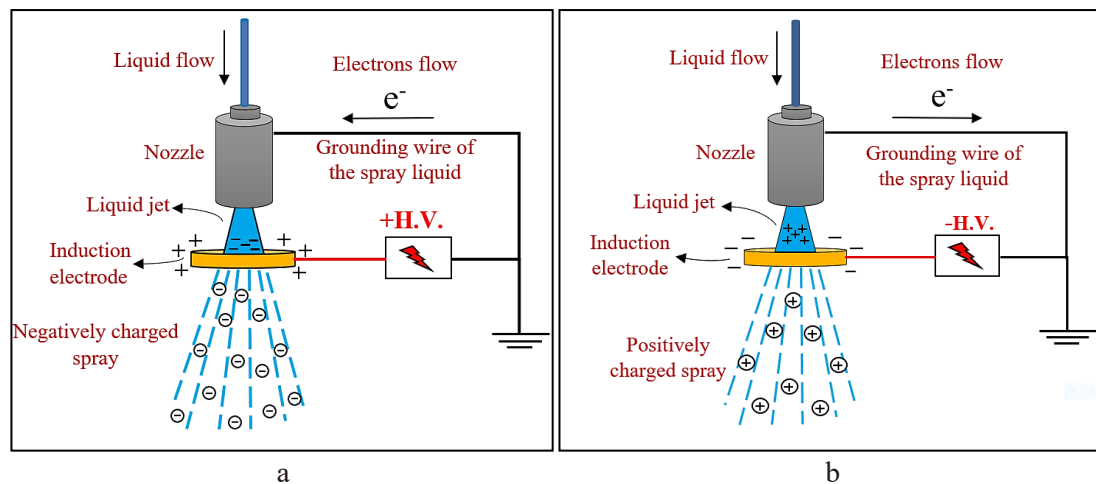


Figure 12. The working principle of the induction charging method with a positive high voltage (a) and a negative high voltage (b) applied to the induction electrode [15].

Figure 13 shows that the developed high voltage multiplier can provide the same charging efficiency required by the commercial device at all electrode voltage levels. The droplet charging efficiency increases from  $0.01 \text{ mC.kg}^{-1}$  at 1 kV to about  $0.5 \text{ mC.kg}^{-1}$  at 8 kV. This experiment indicates that the low-cost developed high voltage can be efficiently used for some lab uses that do not require high values of the load.

### 3.5 Design of a high voltage circuit with potentials of more than 10 kV for various laboratory uses

Some laboratory experiments require high voltage values that may exceed 10 kV. So previous high-voltage circuit was developed to provide an output voltage higher than 10kV. To do that, an additional number of capacitors and diodes was added to this circuit to increase stages number to 23 stages, as shown in Figure 14. Each stage was charged with a voltage value of 484 kV measured by a voltmeter. The output voltage measured by a high voltage probe without any loading current was 11.19 kV. However, this value decreased to 9.6 kV when the circuit was loaded with a current of 0.93 mA as shown in Figure 15. Increasing the input dc voltage taken from the power supply to 16.2 dc V increased the output voltage of the developed circuits from 11.19 kV to 15 kV. This value decreased to 13 kV for a loading current of 1.2 mA.

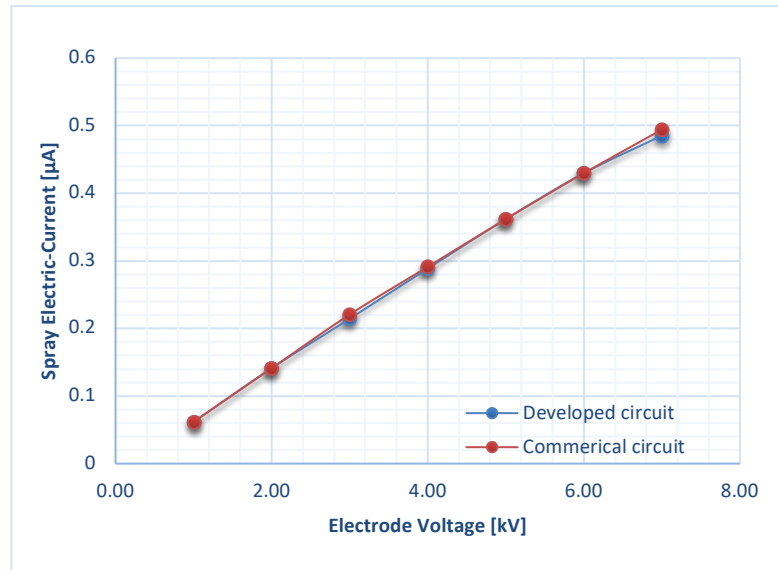


Figure 13. The charge-to-mass ratio of the spray droplets at different electrode voltage levels applied by both the developed C-W voltage multiplier and commercial circuits.

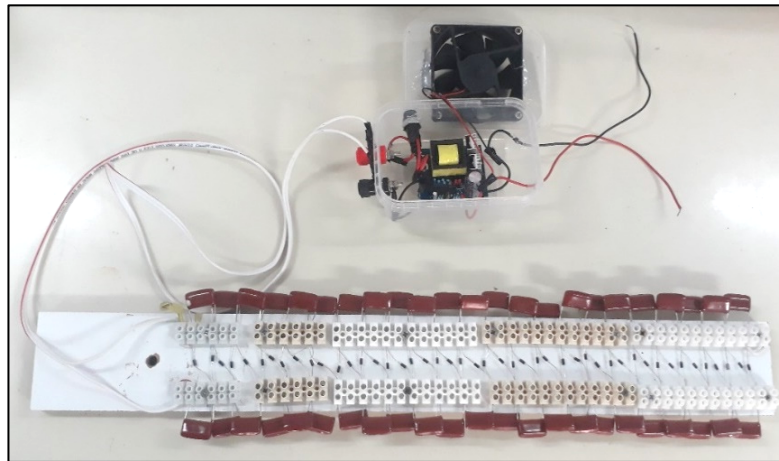


Figure 14. C-W voltage multiplier of 23 stages

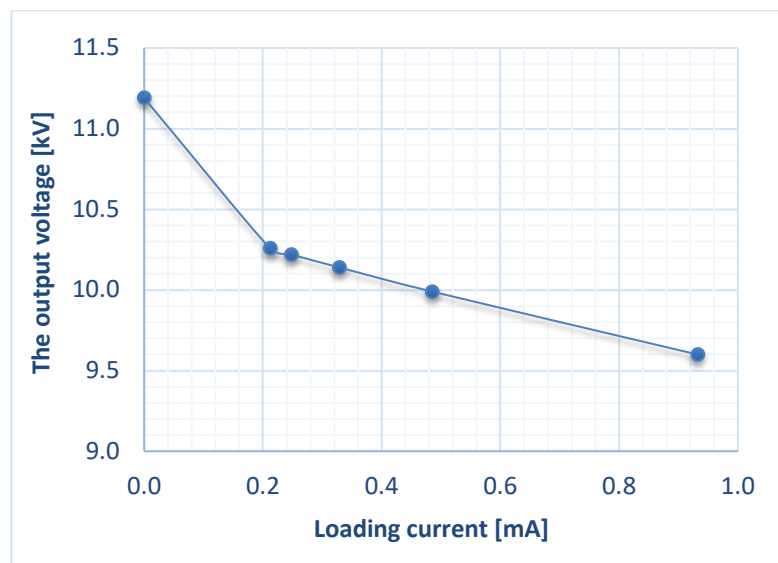


Figure 15. the effect of loading current on the C-W voltage multiplier of 23 stages

## 4. Conclusion

This study aimed to develop a low-cost high voltage circuit for laboratory uses and compare it with a commercial one in electrostatic charging of tap water droplets. Three circuits were developed to study the impact of the capacitor capacity and frequency level of the dc-ac inverters on circuit performance. The first, second, and third circuits use inverters and capacitors of 50 Hz – 470 nF, 20 kHz – 10 nF, and 20kHz and 470 nF, respectively. The experimental results showed that the values of inverter frequency and the capacitor capacity seriously affect the circuit performance (voltage drop, voltage ripple, and response time). Voltage dropping at the first circuit reached about 74% at a loading current of 0.150 mA current inverter. While it was only 44% in the second circuit and 11 % in the third circuit at the same loading current. That indicates that large-capacity capacitors and high-frequency inverters significantly improve the output voltage and voltage ripple. The response time did not exceed 40 mSec in the second and third circuits, while it reached 15 sec in the first circuit. Thus, response time is improved with the high-frequency inverter while not affected by capacitor capacity. Based on the previous, it is found that the best performance was for the third circuit using inverters and capacitors of 20kHz and 470 nF. When this circuit was compared with a commercial one to electrostatically charge water droplets, it provided the same charging efficiency. Also, the circuit (3) was enhanced by increasing the stage numbers to provide a voltage value of 15 kV. However, the third circuit with large capacities of 470 nF capacitors can store a large quantity of the electric potential with a relatively high current that can cause a risk to humans. Therefore, this charge must be discharged after each experiment to remove any danger that threatens human life. The large size of these capacitors will not have a negative effect in light of laboratory uses. On the other hand, the high-frequency dc-ac inverter has a square alternating output voltage. Still, the formulas (2), (4) that are used to calculate the ripple and the voltage drop are inferred concerning the sine wave [1]; this may affect the mathematical results of output voltage and ripple somewhat in the second and third circuits. The study helps postgraduate students to develop low-cost high voltage devices for different laboratory uses. Moreover, the electronic elements used to build the Cockcroft-Walton voltage multiplier are exposed to a small stress of the output voltage, thus, it can work for a long time without being damaged.

## Acknowledgment

I would like to thank Dr. Omaya AMAYA for her contribution to the proofreading of the paper.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals: Generation of high voltages*, Second Edition, UK: Newnes, 2000, pp. 8–76. doi:10.1016/B978-075063634-6/50003-4
- [2] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, “Experiments with high velocity positive ions.—(I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions,” in *Proc. of the royal society of London: Series A, containing papers of a mathematical and physical character*, vol. 136, no. 830, pp. 619–630, 1932.
- [3] H. Greinacher, “Erzeugung einer Gleichspannung vom vielfachen Betrage einer Wechselspannung ohne Transformator,” *Bull Schweiz Elektrotechn Vereins*, vol. 7, pp. 59–63, 1920.
- [4] M. Niu, *Advanced Electronic Circuits-Principles, Architectures and Applications on Emerging Technologies High: Voltage Energy Harvesters*, UK: IntechOpen, 2018, pp. 141–158.
- [5] C. K. Dwivedi and M. B. Daigvane, “Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit,” *International Journal of Science and Technology Education Research*, vol. 2, no. 7, pp. 109–119, 2011. doi:10.1109/ICETET.2010.150
- [6] N. M. Waghmare and R. P. Argelwar, “High voltage generation by using Cockcroft-Walton multiplier,” *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 4, no. 2, pp. 256–259, 2015.
- [7] D. H. Al-Mamoori, O. M. Neda, Z. H. Al-Tameemi, A. A. Alobaidi, and M. Aljanabi, “Generating High Voltage DC with Cockcroft-Walton Voltage Multiplier for Testing Locally Assemble Electric Field Sensor,” *Proc. of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 518, no. 4, 2019.
- [8] N. A. K. Z. Abidin, N. M. Nayan, M. M. Azizan, and A. Ali, “Analysis of voltage multiplier circuit simulation for rain energy

harvesting using circular piezoelectric,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 211–218, 2018. doi:10.1016/j.ymssp.2017.08.019

[9] D. F. Spencer, R. Aryaeinejad, and E. L. Reber, “Using the Cockcroft-Walton voltage multiplier design in handheld devices,” *The IEEE Symposium on Nuclear Science and Medical Imaging Conference (NSS/MIC): 2001 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (Cat. No. 01CH37310)*, 4-10 Nov. 2001, vol. 2, pp. 746–749. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1009666>. [Accessed: 23 Dec. 2023].

[10] D. Malviya and A. K. Bhardwaj, “Analysis and Comparison of Capacitor Diode Voltage Multiplier Fed with a High Frequency and a Low Frequency Voltage Source,” *International Journal of Advance Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 234–237, 2016. doi:10.17148/IJARCCCE.2016.5650

[11] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High-Voltage Engineering: Generation of High Voltages and Currents*, NEW DELHI: Mc Graw Hill India, 2010, pp. 142–205.

[12] M. Ruzbehani, “A Comparative Study of Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multipliers,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, Article ID 4805268, 10 pages, 2017. doi:10.1155/2017/4805268

[13] K. Amaya and A. Bayat, “Determining Effects Of Induction Electrode Geometry On Charging Efficiency Of Droplets In Pesticide Electrostatic Spraying Applications,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 4C, no. 100190, pp. 1–7, 2023. doi:10.1016/j.atech.2023.100190

[14] S. E. Law and H. D. Bowen, “Charging liquid spray by electrostatic induction,” *transactions of the ASAE*, vol. 9, no. 4, pp. 501–506, 1966. doi:10.13031/2013.40016

[15] K. Amaya and A. Bayat, “External factors affecting the electrostatic deposition of charged droplets on plant leaves,” *Proc. of the 1st Int. Conf. on Applied Sciences, April 1-3 2023 Paris, France* [Online]. Available: [https://www.iksadparis.org/\\_files/ugd/614b1f\\_93268ee8360643e0bcdbc717ea08843f.pdf](https://www.iksadparis.org/_files/ugd/614b1f_93268ee8360643e0bcdbc717ea08843f.pdf). [Accessed: 23 Dec. 2023].

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Internal Or External Thermal Superinsulation Towards Low/Zero Carbon Buildings? A Critical Report

Pinar Mert Cuce<sup>a</sup>, Erdem Cuce<sup>\*b</sup>, Emre Alvur<sup>c</sup>

Submitted: 23.09.2023 Revised: 24.10.2023 Accepted: 11.12.2023 doi:10.30855/gmbd.07050777

### ABSTRACT

**Keywords:** Internal or external insulation, thermal superinsulation, thermal bridges; aerogel blanket, vacuum insulation panel

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

<sup>b\*</sup> Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Mechanical Engineering, 53100 - Rize, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-0150-4705  
e mail: erdem.cuce@erdogan.edu.tr

<sup>c</sup> Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering and Architecture, Dept. of Mechanical Engineering, 53100 - Rize, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-4771-5025

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

The effort to create low-carbon societies is now more than just a need for a sustainable world. According to the sectoral energy analyses carried out to reduce world energy consumption figures and greenhouse gas emissions, buildings are one of the most striking potential measures within the net zero target of the International Energy Agency (IEA) by 2050. Low/zero carbon standards are developed in this regard, which basically propose low-emission design and operational performance for buildings. Rather than using conventional insulation materials and techniques, drastic measures like thermal superinsulation are required to meet these standards in buildings. Among thermal superinsulation materials, aerogel blankets (ABs) and vacuum insulation panels (VIPs) attract attention day after day owing to their very low thermal conductivity ranges. Despite the slim, lightweight, and highly thermally resistive features of building envelopes retrofitted with ABs and VIPs, there are still some challenges, such as thermal bridges, hot and cold spots, durability, and especially cost issues. The aforesaid challenges usually take place when a wrong decision is made to internal or external insulation. There are still numerous discrepancies in the pros and cons of internal and external thermal superinsulation retrofit. Therefore, this short communication deals with the said discussion through the in-situ performance findings of retrofitted buildings.

## Düşük/Sıfır Karbonlu Binalara Yönelik İç veya Dış Isı Yalıtımı? Kritik Bir Rapor

### ÖZ

Düşük karbonlu toplumlar yaratma çabası artık sürdürülebilir bir dünyaya duyulan ihtiyaçtan daha fazlasıdır. Dünya enerji tüketimi rakamlarını ve sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla yapılan sektörel enerji analizlerine göre, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2050 yılına kadar net sıfır hedefi kapsamında en dikkat çekici potansiyel önlemlerin başında binalar geliyor. Düşük/sıfır karbon standartları Bu bağlamda geliştirilen ve temel olarak binalar için düşük emisyonlu tasarım ve operasyonel performans öneren bir proje. Binalarda bu standartları karşılamak için geleneksel yalıtım malzemeleri ve tekniklerini kullanmak yerine ısı yalıtımı gibi sert önlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Isıl süper yalıtım malzemeleri arasında aerogel battaniyeler (AB'ler) ve vakum yalıtım panelleri (VIP'ler) çok düşük ısı iletkenlik aralıkları nedeniyle her geçen gün dikkat çekmektedir. AB'ler ve VIP'lerle donatılan bina kaplamalarının ince, hafif ve termal açıdan yüksek dirençli özelliklerine rağmen, termal köprüler, sıcak ve soğuk noktalar, dayanıklılık ve özellikle maliyet sorunları gibi bazı zorluklar hâlâ mevcut. Bahsedilen zorluklar genellikle iç veya dış yalıtım konusunda yanlış karar verildiğinde ortaya çıkar. İç ve dış termal süper yalıtımın güçlendirilmesinin artıları ve eksileri arasında hâlâ çok sayıda tutarsızlık var. Dolayısıyla bu kısa yazıda, güçlendirilmiş binaların yerinde performans bulguları üzerinden söz konusu tartışma ele alınmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İç veya dış izolasyon, termal süper yalıtım, termal köprüler, aerogel battaniye, vakum yalıtım paneli

## 1. Introduction

The approximately 50% increase in primary energy consumption in the last 20 years and the associated increase in carbon emissions have necessitated measures related to the effective minimisation of energy [1]. Sectoral energy consumption analyses carried out in this context have revealed that buildings are responsible for now more than 40% of total energy consumed globally [2], in which drastic measures are required in the short term. The considerable share of buildings in total energy consumption is the result of insufficient thermal resistance of building envelopes [3], airtightness problems [4], and inefficient energy systems used in heating, cooling, ventilation, and lighting. Especially building envelopes with a high overall rate of heat transfer (U-value) cause significant heat losses, thus slim, lightweight, and highly thermally resistive building elements are required for energy-efficient retrofitting of buildings rather than still sticking to conventional insulation materials [5].

Thermal superinsulation (TSI) is adopted as a key solution to overcome the abovementioned problems of building envelopes. Materials with a thermal conductivity below 0.01 W/mK are accepted as thermal superinsulation materials (TSIMs). ABs and VIPs are such materials [6]. Despite their extremely high thermal resistance features, TSIMs are not yet where they should be due to their high costs. Aerogel, for instance, is formed at different properties like ABs is made of microscopic air pores (97% of total volume). The fact that the air has truly little room to move in the aerogel prevents both convection and gas phase conduction, which makes aerogel the lowest-density material and most thermally resistive insulator. Similarly, VIPs are highly insulative building materials that provide a form of thermal insulation consisting of a gas-tight enclosure surrounding a rigid core with a perfect vacuum. VIPs are regarded as one of the most promising thermal superinsulation solutions in the market despite their fragile structure, limited application options on the building envelope, and degradation of thermal resistance over time [7].

Both ABs and VIPs are adopted as key thermal superinsulation solutions towards low/zero carbon building targets. Since cost is still an issue for these materials, retrofit applications based on ABs and VIPs usually take place at a project level. Moreover, in the post-retrofit case, undesired thermal bridging issues occur due to the inappropriate implementation of insulation material, including non-optimised insulation thickness, improperly specified insulation methodology, and unsuitable retrofit techniques for building physics. Specifically, the orientation of insulation (internal or external) is of vital importance for the entire success of the retrofit applications of ABs and VIPs. Therefore, in this short communication, internal versus external thermal superinsulation is evaluated in terms of several performance perspectives, which can be useful for researchers, builders, residents, and policymakers.

Table 1. Thermophysical properties, global market share, and application areas of TSIMs.

TSIMs	Silica aerogel	VIPs
$\rho$	30 - 180 [8]	150 - 300 [14]
$k$	~0.008 [9]	0.0041 [14]
$c$	0.7 - 1.15 [10]	800 [14]
$D_{\text{pore}}$		-
<b>Fire Resistance</b>	Excellent [11]	Low [15]
<b>Global market price</b>	USD 1.04 billion by 2022 [12]	USD 10 billion by 2027 [16]
<b>Application Areas</b>	Roofs, facades, windows, historical buildings [13], solar collector covers [11]	Refrigeration and cold storage [11], external-internal reinforcement, retrofitting of historical building [17]

Table 1 outlines the thermophysical characteristics, worldwide market expenditure, and the practical uses associated with TSIMs [8-17]. Both aerogel and VIPs are expected to be in market with a rapidly increasing rate in the near future owing to their ever-expanding application areas. Especially in modern architecture, there is an outstanding tendency to aerogel and/or VIP based retrofitting of external walls, roofs, windows as well as thermal energy storage systems. Cost is still a challenge for both aerogel and VIPs, however it can be emphasised that serious progress has been made to date in terms of cost reduction.



## 2. Aerogel and VIP Insulation

Aerogel can be utilised in buildings as thermal superinsulation material for different purposes owing to its lightest solid structure, translucent feature, and remarkably low thermal conductivity ( $\sim 0.008$  W/mK) [18]. There are three types of aerogels: silica, carbon, and alumina aerogels. Among these, silica aerogels are the most common type owing to their somewhat outstanding features.  $\text{SiO}_2$  chains with numerous air pores provide extraordinary thermal resistance to the structure. The diameter of these pores ranges from 10 to 100 nm, which yields an extremely low bulk density below  $5 \text{ kg/m}^3$ . However, in building applications, aerogels with an overall density of over  $100 \text{ kg/m}^3$  are utilised since the lighter structures are remarkably fragile. Silica aerogels are highly preferred in modern architecture as roof, façade [19], and window applications [20]. Granular aerogels are highly utilised in fenestration products for not only thermal features but also acoustic comfort [21]. The translucent feature and airtight design of aerogel glazing products make them an alternative retrofit solution for lower heat losses over glazed areas [4]. Figure 1 illustrates examples of aerogel insulation for building roofs and facades [5]. Aerogel glazing provides efficient daylighting besides its highly thermally resistive structure. For facade applications, external opaque aerogel insulation prevents possible thermal bridging issues as well as minimising undesired heat losses from the building envelope. Bob Stoker's house is reported as the first aerogel-insulated building in the UK in 2007.

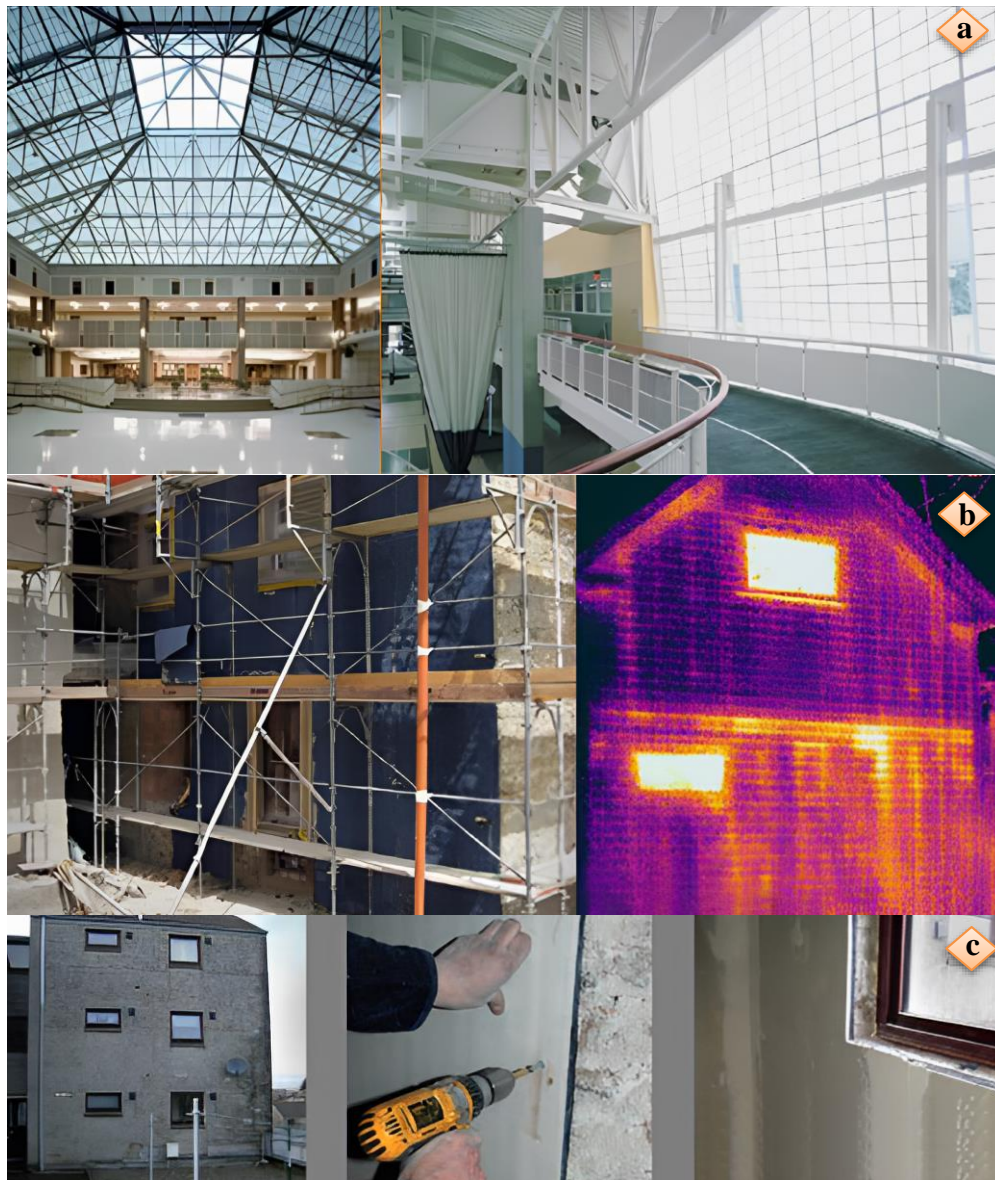


Figure 1. a) Aerogel glazing applications for building roofs and facades, b) aerogel-insulated and non-insulated building facades for heat loss assessment, c) and the first aerogel-insulated building in the UK in 2007 [5].

Vacuum technology is another key solution to meet the latest low/zero carbon building standards [22]. Vacuum medium is often considered the best-known thermal insulator owing to its complete lack of atoms. VIPs are the efficient applications of the vacuum concept in buildings. In most cases, VIPs are accepted as the most effective TSIMs since they are an ideal, reliable, and easy-to-implement option for retrofitting old and poorly insulated buildings [23]. Especially in recent years, low-cost and highly insulative VIPs are at the centre of interest, there are several attempts in this respect as shown in Figure 2. The thermal conductivity of the said VIPs is about  $0.0041 \text{ W/mK}$  at room temperature conditions, which is outstanding [23]. The fact that VIPs allow efficient insulation not only from the outside but also from the inside makes these products remarkable, especially in the restoration of historical buildings [17]. VIPs, in some cases, are also used in combination with conventional insulation materials like expanded polystyrene (EPS) foams both to maximise the surface covered by VIPs and to prevent potential thermal bridges [24].



Figure 2. a) Low-cost VIPs for energy-efficient retrofit of external walls [23], and b) hybrid external wall insulation of VIPs with EPS foams [24].

VIPs represent a great potential to achieve the nearly zero energy buildings target. In this regard, it is possible to integrate VIPs in conjunction with facade cladding elements for a remarkable reduction of heat losses or gains by means of slim wall details [25]. VIP-integrated ventilated facades draw attention in this respect besides the conventional internal insulation applications shown in Figure 3. The U-value of the said VIP-assisted ventilated facade and internal VIP-retrofitted wall is reported to be  $0.28$  and  $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ , respectively.

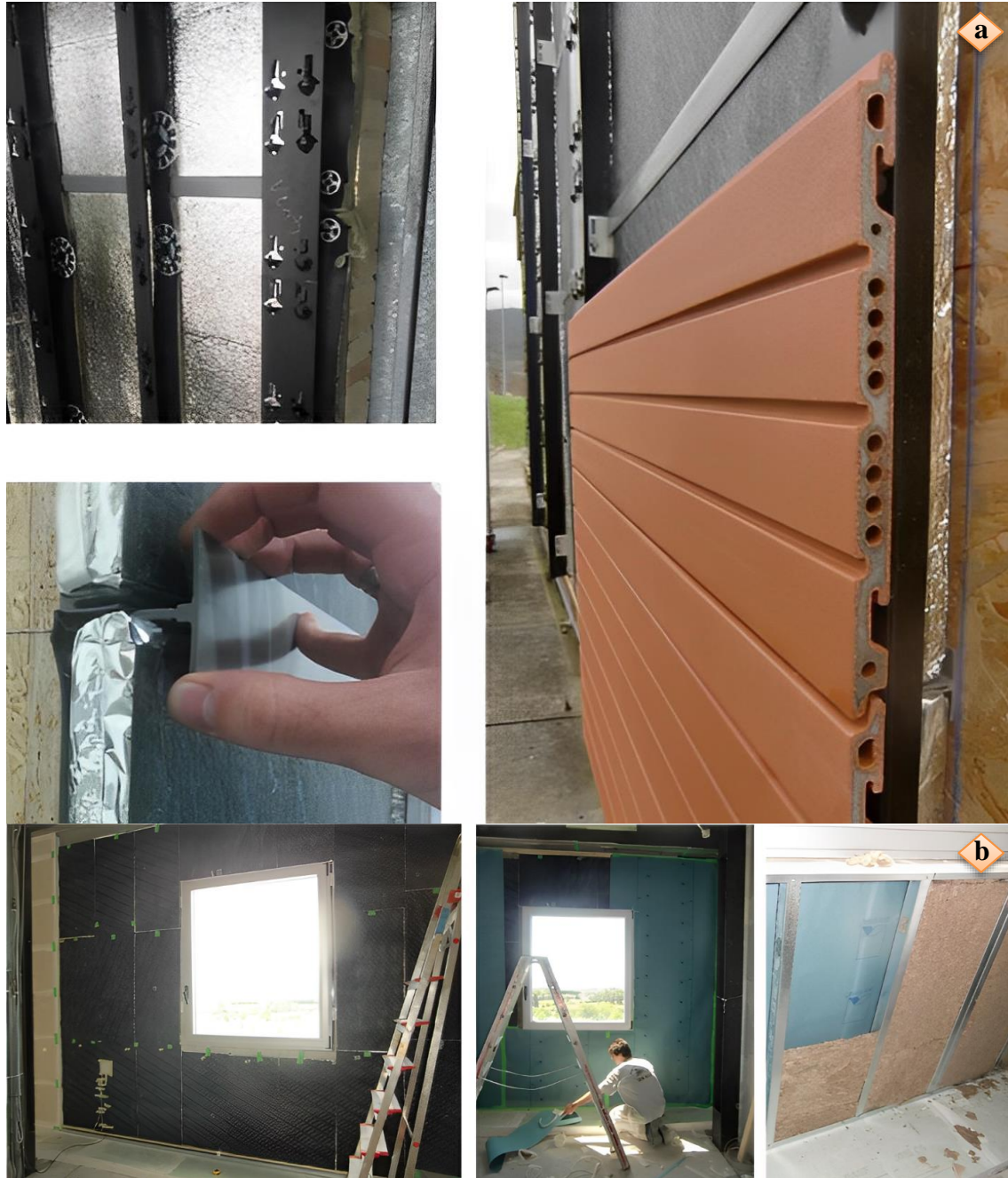


Figure 3. a) Ventilated facade design with VIP-based external wall insulation, and b) standard stud-mounted internal wall insulation of VIPs [25].

### 3. Pros and Cons of External TSI Based on Aerogel and VIP

External wall insulation obviously increases the energy efficiency of the building. For instance, if the VIP technology is used on the ventilated exterior, the U-value decreases up to almost  $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$ . With its low U-value, the airflow in the outdoor environment will be cut off so that the heat distribution will be equal at every point in the indoor environment, so unwanted air currents are eliminated, and thermal comfort conditions are reached. Therefore, once the building is heated, even if the system is turned off, it keeps giving heat to the indoor environment thanks to its return to the internal environment from the resistance of the thermal superinsulation, and the indoor environment remains at the desired level for an extended time. Approximately 35% of energy savings are achieved if all building exterior walls are insulated. In external wall insulation, it is mounted on the outer shell of the building, providing protection against external influences as well as improving the ability to withstand the elements as it acts as a support. It also offers aesthetic benefits, such as covering bad plaster and cracks. External wall insulation prevents moisture from entering the building and minimises the loud

noises that may come from the outside. It means that the floor occupants will not be disturbed since all operations are carried out outside during the reinforcement of the building's exterior insulation.

Although external wall insulation has plenty of advantages, it also has some disadvantages. As an example, in the selection of external wall insulation, attention should be paid to both material quality and the selection of the company in matters that require workmanship, like bonding or mechanical fixings. Otherwise, if the insulation is separated from the building wall after a while, it may bring about much more costly results. In most cases, either the bottom surface (the piece of roof that hangs over the wall) is more than 100 mm, so the insulation needs to be sealed from the top in order to prevent moisture from going down the back, or the roof needs to be extended over the insulation. In some cases, such as living on private property, it is not only enough to decide to insulate the outer wall, but also, in some regions, necessary permits must be obtained. The installer should not go near the damp road but rather start over with the insulation. However, this means that a cold bridge will be created there. In high-rise buildings, employees may need scaffolding, provided that the necessary precautions are taken during external wall insulation, which means extra cost.

#### 4. Pros and Cons of Internal TSI Based on Aerogel and VIP

Just as it is significant to insulate the outer wall in buildings, insulating the inner wall in various situations is of vital importance for energy saving. However, even though it has some pros, such as energy savings, it has also cons. Many people care about interior appearance; with insulation, it is easy to improve appearance. It can be a better choice to insulate one room at a time from the inside in order to prevent deterioration. Also, it is relatively easy to insulate inside compared to external. Additionally, there is no necessary for scaffolding as in external insulation. Internal insulation is preferred in mandatory situations where temporary rapid heating is required in places such as cinemas, theatres, and conference halls that are not used continuously.

On the other hand, there are some disadvantages to getting internal insulation. Internal space loss, which is a massive problem for many people, is inevitable during internal insulation. For instance, in a 5m×5m room, insulating 10 cm from all interior walls will result in both space losses and high costs relative to the material quality. Although there is an unlimited right to insulate the outer wall, it may not be possible due to limited conditions in the indoor environment. With interior wall insulation, it creates a thermal bridge between floors which means there will always be heat loss unless the floorboards are removed, and the insulation is installed continuously along the wall. Before starting the interior wall insulation, it is necessary to check whether any moisture has penetrated the walls. Otherwise, the result will become even more costly. One of the challenges installers face is that they must use a wet course layer during internal wall insulation.

#### 5. Conclusion

Although the building envelope, which is later equipped with ABs and VIPs, has very high thermal resistance, so tiny and lightweight feature, it is of vital importance to use it consciously due to thermal bridge formations and extremely high costs. Therefore, in this short paper, the pros and cons aspects of insulation from the inside and outside are discussed in order to mitigate the negative situations that may occur. The following bullet points are used in this respect:

- As the ABs have very high thermal performance properties and can be used in much thinner thicknesses, it is more reasonable to use them indoors.
- Internal TSI usage area is very restricted due to the limitation.
- It is a huge problem as there will be shrinkage in the area together with insulating from the inside. On the other hand, there is no problem with space reduction in insulation from the outside.
- Aerogel can be used to solve thermal bridge problems in buildings.
- It can also be prevented from thermal bridges which may exist in the external wall with the combination of VIP and EPS.
- Using merely 20 mm thick ABs for insulation from external walls enables it to reduce heat loss through the walls by up to 90%.
- In combination with 20 mm ABs and gypsum plaster, it can decrease the heat loss rate by up to 63% by insulating from the inside.
- External TSI is observed as an advantage in protecting building elements against corrosion.
- Due to the limited area of internal TSI, it is concluded that external TSI will be more accurate, as

understood from above.

- In 2022, the annual market budget for silica aerogel is USD 1.04 billion, but it is projected to surpass USD 10 billion for VIPs by the year 2027.
- In the forthcoming investigation, topics to be explored include enhancing energy efficiency through eco-friendly approaches and achieving low thermal conductivity by integrating TSI with conventional building components, while proactively mitigating the current high costs.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## Symbols and Abbreviations

K	Thermal conductivity (W/mK)
U	Overall heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> K)
$\rho$	Density (kg/m <sup>3</sup> )
c	Specific heat capacity (kJ/kgK)
Dpore	Pore diameter (nm)
IEA	International Energy Agency
Abs	Aerogel blankets
VIPs	Vacuum insulation panels
TSI	Thermal superinsulation
TSIMs	Thermal superinsulation materials
EPS	Expanded Polystyrene

## References

- [1] E. Cuce and S. Riffat, "A comprehensive assessment of sectoral energy consumption in the UK: past, present and future," *International Journal of Low-carbon Technologies*, vol. 11, no. 3, pp. 424–430, Jun. 2015, doi:10.1093/ijlct/ctv013
- [2] E. Cuce, "An overview of domestic energy consumption in the UK: past, present and future," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 428–435, Oct. 2014, doi:10.1080/01430750.2014.973120
- [3] E. Cuce, "Accurate and reliable U -value assessment of argon-filled double glazed windows: A numerical and experimental investigation," *Energy and Buildings*, vol. 171, pp. 100–106, Jul. 2018, doi:10.1016/j.enbuild.2018.04.036
- [4] E. Cuce, "Role of airtightness in energy loss from windows: Experimental results from in-situ tests," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 449–455, Mar. 2017, doi:10.1016/j.enbuild.2017.01.027
- [5] E. Cuce, P. M. Cuce, C. J. Wood, and S. Riffat, "Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 77, pp. 28–39, Jul. 2014, doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.034
- [6] J. Wernery, F. Mancebo, W. J. Malfait, M. J. O'Connor, and B. P. Jelle, "The economics of thermal superinsulation in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 253, p. 111506, Dec. 2021, doi:10.1016/j.enbuild.2021.111506
- [7] R. Bætens et al., "Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 2, pp. 147–172, Feb. 2010, doi:10.1016/j.enbuild.2009.09.005
- [8] C. Li et al., "Silica Aerogels: From materials research to industrial applications," *International Materials Reviews*, pp. 1–39, 2023. doi:10.1080/09506608.2023.2167547
- [9] E. Cuce, P. M. Cuce, C. J. Wood, and S. Riffat, "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 273–299, Jun. 2014, doi:10.1016/j.rser.2014.03.017
- [10] S. Mahesh and S. C. Joshi, "Thermal conductivity variations with composition of gelatin-silica aerogel-sodium dodecyl sulfate with functionalized multi-walled carbon nanotube doping in their composites," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 87, pp. 606–615, 2015. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.046
- [11] S.B. Riffat and G. Qiu, "A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings," *International Journal of Low-Carbon*

*Technologies*, vol. 8, no.1, pp. 1–6, 2012. doi:10.1093/ijlct/cts001

[12] S. Ahmad, S. Ahmad and J. N. Sheikh, "Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications: A Review," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 611, p. 122322. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2023.122322

[13] Z. Kovács, A. Csík and Á. Lakatos, "Thermal stability investigations of different aerogel insulation materials at elevated temperature," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 42, p. 101906, 2023. doi:10.1016/j.tsep.2023.101906

[14] D. Bozsaky, "Application of nanotechnology based thermal insulation materials in building construction," *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 9, no. 1, p. 29, 2016. doi:10.14513/actatechjaur.v9.n1.391

[15] S.S. Alotaibi, and S. Riffat, "Vacuum insulated panels for sustainable buildings: A review of research and applications," *International Journal of Energy Research*, vol 38, no. 1, pp. 1–19, 2013. doi:10.1002/er.3101

[16] N. Simões, et al., "Can vacuum insulation panels be cost-effective when applied in building façades?," *Building and Environment*, vol. 191, p. 107602, 2021. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107602

[17] P. Johansson et al., "Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations," *Building and Environment*, vol. 79, pp. 31–45, Sep. 2014, doi:10.1016/j.buildenv.2014.04.014.

[18] E. Cuce, P. M. Cuce, C. J. Wood, and S. Riffat, "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 273–299, Jun. 2014, doi:10.1016/j.rser.2014.03.017

[19] E. Cuce and P. M. Cuce, "The impact of internal aerogel retrofitting on the thermal bridges of residential buildings: An experimental and statistical research," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 449–454, Mar. 2016, doi:10.1016/j.enbuild.2016.01.033

[20] E. Cuce and S. Riffat, "Vacuum tube window technology for highly insulating building fabric: An experimental and numerical investigation," *Vacuum*, vol. 111, pp. 83–91, Jan. 2015, doi:10.1016/j.vacuum.2014.10.002

[21] E. Moretti, F. Merli, E. Cuce, and C. Buratti, "Thermal and acoustic properties of aerogels: Preliminary investigation of the influence of granule size," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 472–480, Mar. 2017, doi:10.1016/j.egypro.2017.03.209

[22] E. Cuce and S. Riffat, "Aerogel-Assisted Support Pillars for thermal Performance Enhancement of vacuum glazing: a CFD research for a commercial product," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 2233–2238, Jun. 2015, doi:10.1007/s13369-015-1727-5

[23] K. Biswas, T. Patel, S. Shrestha, D. L. Smith, and A. O. Desjarlais, "Whole building retrofit using vacuum insulation panels and energy performance analysis," *Energy and Buildings*, vol. 203, p. 109430, Nov. 2019, doi:10.1016/j.enbuild.2019.109430

[24] P. Johansson, C.-E. Hagentoft, and A. S. Kalagasidis, "Retrofitting of a listed brick and wood building using vacuum insulation panels on the exterior of the facade: Measurements and simulations," *Energy and Buildings*, vol. 73, pp. 92–104, Apr. 2014, doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.019

[25] A. Uriarte, I. Garai, A. Ferdinando, A. Erkoreka, O. Nicolas, and E. Barreiro, "Vacuum insulation panels in construction solutions for energy efficient retrofitting of buildings. Two case studies in Spain and Sweden," *Energy and Buildings*, vol. 197, pp. 131–139, Aug. 2019, doi:10.1016/j.enbuild.2019.05.039

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Design of Two Stage Heat Recovery System in Fluidized Bed Dryer: Environmental and Economic Analysis

Deniz Gökben<sup>a</sup>, Veysel Durak<sup>b</sup>, Merve Ulular<sup>c</sup>, Ufuk Bahçecioğlu<sup>d</sup>, Mustafa Aktaş<sup>e</sup>, Yaren Güven<sup>f</sup>

Submitted: 29.09.2023 Revised: 09.11.2023 Accepted: 29.11.2023 doi:10.30855/gmbd.0705078

### ABSTRACT

**Keywords:** Fluidized bed dryer, heat recovery, specific energy consumption, energy efficiency, sand drying

<sup>a</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0002-3410-5663

<sup>b</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0001-2352-8188

<sup>c</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2204-7689

<sup>d</sup> Erkont Sanayi A.Ş.  
06990 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0002-7824-0488

<sup>e</sup> Gazi Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi,  
Enerji Sistemleri Mühendisliği  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-1187-5120

<sup>f</sup> Gazi Üniversitesi,  
Teknoloji Fakültesi,  
Enerji Sistemleri Mühendisliği  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-0732-4692  
e mail: yarenguyen@gazi.edu.tr

\*Corresponding author:  
yarenguyen@gazi.edu.tr

Fluidized bed dryer is used to dry the silica sand used in core production in the casting industry. In this study, a heat recovery unit was designed in a drying system using waste heat recovery and the effects of specific energy consumption on heat recovery were investigated by performing energy, environmental and economic analysis. In this context, it is aimed to increase the drying efficiency, reduce carbon emissions and the effects of global warming with the heat recovery unit used in the preheating of the drying air blown by the fan. According to the results, a reduction of 12.815 m<sup>3</sup>/h in natural gas consumption and 0.032 tons CO<sub>2</sub>/h in carbon emissions will occur if the design with the 1st stage drying air preheating heat recovery unit is changed from the current design. If the current system is changed to a system with heat recovery unit, 1,428,753.81 TL can be saved annually and the payback period of the heat recovery unit was calculated 0.66 years. A reduction of 4.34 m<sup>3</sup>/h in natural gas consumption and 0.011 tons CO<sub>2</sub>/h in carbon emissions will occur if the design is changed from the current design to the design where the 2st stage in-plant water heating heat recovery unit. Thus, if the current system is changed to a system with heat recovery unit, 1,912,602,548 TL can be saved annually, and the payback period is calculated as 0.16 years. When this design is implemented, a more economical and sustainable drying system will be brought to life.

## Akışkan Yatak Kurutucuda İki Kademeli Isı Geri Kazanım Sistemi Tasarımı: Çevresel ve Ekonomik Analiz

### ÖZ

Döküm sektöründeki maça üretiminde kullanılan silis kumunun kurutulması için akışkan yataklı kurutucu kullanılmaktadır. Bu çalışmada, atık ısı geri kazanımlı kurutma sisteminde ısı geri kazanım ünitesi tasarlanarak özgül enerji tüketiminin ısı geri kazanımına etkileri enerji analizi, çevresel analiz ve ekonomik analiz yapılarak incelenmiştir. Bu kapsamda, fan ile üflenen kurutma havasının ön ısıtmasında kullanılan ısı geri kazanım ünitesi ile kurutma verimini yükseltmek, karbon salımını ve küresel ısınmanın etkilerini azaltmak amaçlanmıştır. Sonuçlara göre, mevcut tasarımdan 1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesi tasarımı geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 12.815 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.032 ton CO<sub>2</sub>/h'lik bir azalma meydana gelecektir. Mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,428,753.81 TL tasarruf edilebilecek olup ısı geri kazanım ünitesinin geri ödeme süresi 0.66 yıl olarak hesaplanmıştır. Mevcut tasarımdan 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesi tasarımı geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 4.34 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.011 ton CO<sub>2</sub>/h'lik bir azalma meydana gelecektir. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,912,602.548 TL tasarruf edilebilecek olup, geri ödeme süresi 0.16 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu tasarım uygulandığında daha ekonomik ve sürdürülebilir bir kurutma sistemi hayata geçirilmiş olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan yataklı kurutucu, ısı geri kazanımı, özgül enerji tüketimi, enerji verimliliği, kum kurutma

## 1. Giriş (Introduction)

Kurutma, katı maddelerin bünyesindeki sıvıları ısı yöntemlerle buharlaştırılarak ortamdan uzaklaştırılması anlamına gelir. Konveksiyon (taşınım) ile kurutma, temas (iletim) ile kurutma, radyasyon (ışınım) ile kurutma olmak üzere üç farklı kurutma yöntemi bulunmaktadır. Kurutma uygulamalarında ısı transferi bunlardan ikisinin ya da üçünün birleşimi şeklinde gerçekleşebilir. Konveksiyon ile kurutmada sıcak hava kurutulacak malzemenin içinden, üzerinden ve arasından geçirilir. Kabin kurutucular, sandık kurutucular, tünel kurutucular, akışkan yatak kurutucular ve püskürterek kurutucular bu yöntemlere örnek gösterilebilir. Temas ile kurutma yönteminde kurutulacak madde hareketsiz kalırken ya da hareket ederken temas ettiği sıcak yüzeyden maddeye ısı taşınır. Bu yöntemin en yaygın örneği silindirik kurutuculardır. Radyasyon ile kurutma yönteminde ise, sistemdeki bir radyasyon kaynağı ile kurutulacak malzemeye ısı ulaştırılmaktadır. Bu yöntemde mikrodalga, dielektrik veya infrared gibi elektromanyetik enerji türlerinden yararlanılmaktadır [1].

Akışkan yataklı kurutucularda ürünün küresel ya da silindirik biçiminde olması amaçlanmaktadır. Bu nedenle kurutulacak olan malzeme bir elekten geçirilerek kurutucuya gönderilir. Burada, akışkanlaştırılan malzemenin nemi uzaklaştırılır. Toz veya taneli yapıdaki kurutulmuş malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olmaktadır. Bu nedenle kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir [2].

Endüstriyel kurutma, yoğun enerji gerektiren ve zaman alıcı bir işlemdir. Gelişmiş ülkelerde enerjinin büyük bir kısmı kurutma endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu sebeple kurutma işleminde enerji miktarını azaltmak ve kurutma süresini kısaltmak kurutma teknolojisi için önemli bir konudur. Kurutma sistemlerinde enerji kazanımı sağlamak için taze hava ve egzoz havası belirli oranlarda karıştırılarak ısıtıcıya gönderilir. Kademeli kurutma sistemlerinde ise bir kademeden çıkan kurutma havası tekrar ısıtılarak sonraki kademedeki kurutma işleminde kullanılır. Egzozdan atılan havanın enerjisinin yüksek olması durumunda ısı geri kazanımlı kurutma sistemleri kullanılır [3].

Bu çalışmada, döküm sektöründe kullanılan kumun neminin alınması sürecinde kurutucunun özgül enerji tüketiminin azaltılması, atık ısı geri kazanımı sisteminin geliştirilmesi ile analizler yapılmış ve mevcut yapı detaylıca analiz edilerek enerji tüketim kaynakları belirlenmiş ve tüketim miktarları ölçülmüştür. Enerji tüketimlerini azaltacak yeni bir sistem yapısı oluşturulmuştur. Bu kapsamda ısı değiştirici kullanılarak atık ısı geri kazanımı ile daha ekonomik ve daha ekolojik sürdürülebilir bir teknoloji ortaya konması hedeflenmiştir.

## 2. Literatür Taraması (Literature Review)

Kurutucu sistemlerinin enerji kaybını azaltmaya yönelik her türlü girişim, hem sınırlı enerji kaynakları hem de çevre dostu amaçlar için büyük önem taşımaktadır. Dai vd. [4], kurutma işlemi için karbondioksit/küresel ısınma potansiyeli düşük çalışma akışkanı karışımına sahip ısı pompalarını analiz etmişler ve birincil enerji tüketiminin geleneksel kazanlı kurutma sistemlerine kıyasla %25.83-79.37 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, sistemin yaşam döngüsü iklim performansının elektrikli kazan sistemine kıyasla 4.24 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Walmsley vd. [5], endüstriyel süt püskürtmeli kurutucunun termoekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Isı geri kazanımı 75°C egzoz sıcaklığı ile uygulanmıştır. Sonuçlara göre, 4 m/s yüzey hızına ve 14 boru sırasına sahip ısı eşanjörünün kullanılmasını önermişlerdir. Golman ve Julklang [6], egzoz gazı ısı geri kazanımının kullanıldığı püskürtmeli kurutma sisteminin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, ısı eşanjörü ile donatılmış püskürtmeli kurutma sisteminde %16 oranında enerji verimliliği kazancı ve %50 oranında enerji tasarrufu elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, egzoz havası devridaimine sahip sistemde enerji verimliliğinden %34 oranında, enerji tasarrufundan %61 oranında kazanç elde edilmiştir. Delpech vd. [7], bir seramik fırını soğutma bacasının atık ısısının geri kazanılmasıyla 863 MWh enerjinin geri kazanılabileceğini ve bu atık ısı enerjisinin fırın öncesi kurutucunun besleme havasını ısıtmak için kullanılabileceğini bulmuşlardır. Patel ve Bade [8], sprey kurutucu sistemlerinde ısı geri kazanım sistemlerinin fırsatlarını araştırmışlardır. Doğrudan ısı geri kazanım sistemi ve %80 devridaim oranı ile kurutucunun verimliliğinin %30 oranında arttığı, hibrit ısı geri kazanım sistemi ve %80 devridaim oranı ile kurutucunun verimliliğinin %45 oranında arttığı sonucuna varılmıştır. Lamrani vd. [9], ahşap kurutma işlemlerinde ısı geri kazanım sistemi ve fotovoltaik/termal (PV/T) hava kolektörünün kullanımını sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, 0.8 etkinliğe sahip ısı geri kazanım sisteminin kullanılmasının güneşte kurutma süresini %40'a kadar



azalttığını ve hem ısı geri kazanım sisteminin hem de PV/T hava kolektörünün kullanılmasının kurutucunun enerji tüketimini %86.5'e kadar azalttığını göstermiştir. Ayrıca, hem PV/T hem de ısı geri kazanım sisteminin kullanılması, yıllık CO<sub>2</sub> emisyonlarını %78.5'e kadar azaltmıştır. Ogulata [10] tarafından yapılan bir başka sayısal araştırmada, tekstil kurutmada plaka tipi bir ısı eşanjöründe taze hava girişine atık ısı geri kazanımı uygulanmıştır. Golman ve Julklang [11] tarafından yapılan bir başka çalışmada, egzoz kurutma gazının kısmen geri dönüştürülmesi yoluyla enerji geri kazanımının enerji tasarrufu ve verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak için model simülasyonları kullanılmıştır. Sonuçlar, egzoz havasının devridaim oranının %20'den %80'e çıkarılmasıyla enerji verimliliğinin %10'dan yaklaşık %35'e yükseldiğini göstermiştir.

Bellocchi vd. [12], makarna kurutma işleminde gelişmiş adsorban malzemeye dayalı düşük dereceli bir atık ısı geri kazanım sisteminin kullanımına odaklanmışlardır. Sonuçlar, bu tür bir geri kazanım sisteminin kullanılmasının kurutma işlemi için toplam enerji yükünün %40 oranında azalmasına yol açacağını göstermiştir. Krokida ve Bisharat [13], ısı geri kazanım sistemi ve ısı pompası kullanımının bir kurutucu sisteminin verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Sonuçlar, bir ısı eşanjörünün tek başına egzoz akışından toplam enerjinin %25'inden daha azını geri kazanabileceğini, hem bir ısı eşanjörü hem de bir ısı pompası kullanılarak %40 ısı geri kazanımı elde edilebileceğini göstermiştir. Ishaq ve Dinçer [14], çimento fabrikasının egzoz ısısının hammaddelerin kurutulması amacıyla kullanıldığı bir sistem önermişlerdir. Bu şekilde, ortam havasının ısıtılmasındaki yüksek enerji girdisi kesilerek kurutucu sisteminden maliyet tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Atkins vd. [15], süt tozu sprey kurutucusunun egzozundan ısı geri kazanım potansiyelini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar optimum döngü kütle akış hızında ısı geri kazanım etkinliğinin %70'e ulaştığını ve bunun da giriş havası sıcaklığında 35°C'lik bir artışa karşılık geldiğini göstermiştir. Walmsley vd. [16], kurutucu egzozlarının kullanımının 10.8 MW'lık bir ısı geri kazanımı elde edilmesinde kritik bir ısı kaynağı olduğunu ve bunun 5,1 MW'lık kısmının egzoz ısı geri kazanımından elde edildiğini bulmuşlardır. Fiaschi vd. [17], performans iyileştirme amacıyla endüstriyel bir tekstil kurutucusunun ısı geri kazanım sistemini yeniden tasarlamışlardır. Çalışma, tek çiplik borulu temel konfigürasyonla karşılaştırıldığında, ikiz kutu geometrisinin benimsenmesinin ısı geri kazanımını yaklaşık %180 oranında artırdığını göstermiştir. Julklang ve Golman [18] tarafından yapılan bir başka çalışmada, %50-70 toplam etkinlik faktörüne sahip bir ısı geri kazanım sistemi ile enerji tasarrufunda %15.1 oranında iyileşme sağlandığı gösterilmiştir. Akbari vd. [19], bir kurutucunun egzoz gazından atık ısı geri kazanımı için döner ısı eşanjörünün performansını analiz etmişler ve ısı eşanjörü için ortalama %38.8 verim elde edilebileceğini bulmuşlardır. Kong vd. [20], kaplama kağıdı makinesi kurutma işleminde bir atık ısı geri kazanım ünitesinin enerji verimliliğini %7.3 oranında artırabileceğini ve spesifik enerji tüketimini %4.6 oranında azaltabileceğini kanıtlamışlardır. Guo vd. [21], linyitin kurutulması amacıyla önceden kurutulmuş linyit yakıtlı enerji santrallerine atık ısı geri kazanım sisteminin dahil edilmesi için teorik bir model geliştirmişler ve atık ısı geri kazanım sistemi ile santralin termal verimliliğinin %1.87 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Kemp [22], ısı geri kazanım yöntemini kurutucularda enerji azaltma yöntemlerinden biri olarak vurgulamış ve ısı geri kazanımının kurutucu ısı ihtiyacını üçte bir oranında azaltabileceğini göstermiştir. Baker vd. [23], iyi karıştırılmış akışkan yataklı kurutucularda egzoz ısısı geri kazanımı uygulamışlar ve ısı geri kazanım sistemi ile ısıtıcı görevinde %33.2'ye varan azalmalar olduğunu bulmuşlardır. Han vd. [24], linyit kurutma sisteminde kurutucu egzoz ısısını geri kazanmayı başarmışlar ve giriş havasını 23°C'den 55°C'ye ısıtmışlardır. Aktaş vd. [25], güneş ısı geri kazanım destekli kızılötesi kavun kurutucu üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişler ve toplam giriş enerjisinin %23-28'inin ısı geri kazanım ünitesi vasıtasıyla sağlanabileceği sonucuna varmışlardır. Aktaş vd. [26] bir başka çalışmada, kızılötesi kayısı kurutma işlemini deneysel olarak incelemişler ve ısı geri kazanım ünitesi kullanarak toplam enerji girdisinin %62'sine kadar geri kazanım sağlamışlardır. Yahya vd. [27], ısı geri kazanımı olan ve olmayan akışkan yataklı kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, ısı geri kazanımlı akışkan yataklı kurutucunun çeltiğin nem içeriğini kuru bazda %28.52'den %16.28'e getirmek için gereken süreyi yaklaşık üç dakika azalttığını göstermiştir.

Bu makalede kurutucuda özgün olarak yapılan iki kademeli atık ısı geri kazanımı ile,

- Atık ısı geri kazanımının kurutucunun özgül enerji tüketimine etkisinin belirlenmesi,
- İkinci kademe ile gerektiğinde enerjinin depolanabilmesi,
- Atık ısı geri kazanım ünitesinin geri ödeme sürelerinin belirlenmesi,
- Atık ısı geri kazanımı ile eş değer karbon emisyon azaltımı potansiyelinin ortaya konması,

amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışma literatüre iki kademeli atık ısı geri kazanımının kurutma maliyetine etkisinin ortaya konması, iki kademeli atık ısı geri kazanım metodunun akışkan yatak kurutucunun verimini nasıl etkilediğinin belirlenmesi katkılarını sunacaktır.

### 3. Materyal ve Metot (Material and Method)

#### 3.1. Mevcut kum kurutma sisteminde kurutma veriminin belirlenmesi (Determination of drying efficiency of existing sand drying system)

Çalışma kapsamında mevcut kum kurutma sisteminde yapılan ölçümler neticesinde elde edilen veriler Tablo 1’de verilmiştir. Mevcut (ısı geri kazanımsız) kurutma sisteminde yapılan ölçümler ile özgül enerji tüketimi, kurutma maliyeti ve kurutma veriminin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu anlamda, mevcut ısı ve kütle transferi yapısı ile yeni tasarım karşılaştırılarak sonuçlar enerji ve çevresel etkiler açısından irdelenmiştir.

Tablo 1. Mevcut kum kurutma sisteminin parametre değerleri (Parameter values of existing sand drying system)

Parametre	Değer
Kum giriş debisi, kg/h	7,500
Giriş kum nemi, %	4.39
Çıkış kum nemi, %	0.01
Saatlik elektrik enerjisi tüketimi, kWh	52.64
Doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	69.81

Yapılan deneylerde giriş kumunun kuru madde miktarı belirlenmiştir. Sonrasında, Tablo 1’de verilen giriş kum nem içeriği %4.39 ve çıkış kum nem içeriği ise %0.01 olarak hesaplanmıştır.

Mevcut kum kurutma fırın sisteminde başlangıç kuru kum miktarı;

$$\text{Başlangıç Kuru Kum Miktarı} = \text{Kum Giriş Miktarı} \times \left(1 - \left(\frac{\text{Giriş Kum Nemi}}{100}\right)\right) \quad (1)$$

çıkış yaş kum miktarı ise;

$$\text{Çıkış Yaş Kum Miktarı} = \frac{\text{Başlangıç Kuru Kum Miktarı}}{1 - \left(\frac{\text{Çıkış Kum Nemi}}{100}\right)} \quad (2)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Buharlaşan su miktarı;

$$\dot{m}_b = \text{Kum Giriş Miktarı} - \text{Çıkış Yaş Kum Miktarı} \quad (3)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Kurutma sürecinde özgül enerji tüketimi birim kütle nem başına harcanan enerji miktarı olup;

$$\text{ÖET} = \frac{\text{Elektrik Tüketimi} + (\text{Doğalgaz Tüketimi} \times 10.64)}{\text{Buharlaşan Su Miktarı}} \quad (4)$$

eşitliğinden [23], mevcut kurutucunun kurutma verimi ise;

$$\eta = \frac{\Sigma \dot{m}_b \times h_{fg}}{\Sigma \dot{Q}_{giren}} \quad (5)$$

eşitliğinden bulunur. Burada  $\dot{Q}_{giren}$  yakıt ve elektrik tüketiminin toplamı olup,

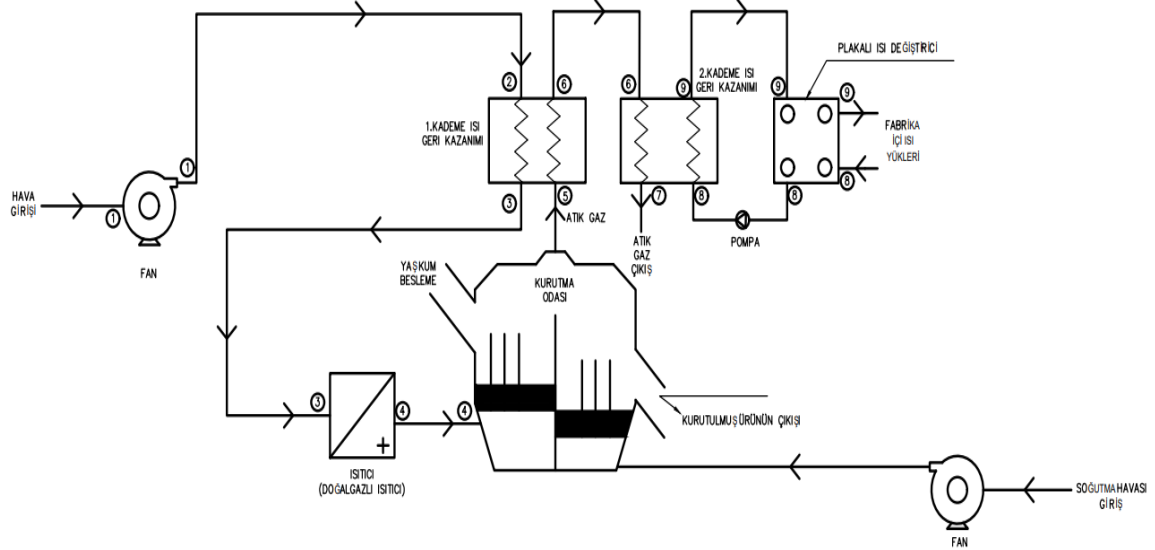
$$\dot{Q}_{giren} = \dot{Q}_{yakıt} + \dot{E}_{elektrik} \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

#### 3.2. Tasarım (Design)

Yaş olarak gelen kumlar kum (47-52 AFS) havuzuna boşaltılmaktadır. Ardından kum kurutma sistemi çalıştırılarak kepçe yardımı ile yaş kumlar siloya aktarılmaktadır. 5 kepçe (yaklaşık 10 ton) yüklem yapılmaktadır. 10 ton/h kum 100°C’de kurutulmaktadır. Makine içine giren kum alttan gelen sıcak hava

ile içerde bir hava akımı oluşturarak kumu kurutmaktadır. Kuruyan kum elekten geçerek mekanik, çift yönlü bant ile silolara taşınmaktadır. Ardından maça denilen parça içindeki boşlukların elde edilmesi için kullanılan kalıp elemanlarının yer aldığı maçahanedeki makinelere gönderilmektedir. Şekil 1'de kum kurutma fırınına ait şematik gösterim, Şekil 2'de ise kum kurutma sisteminin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1. Kum kurutma fırınının şematik gösterimi (Schematic representation of the sand drying oven)



Şekil 2. Kum kurutma sisteminin fotoğrafı (Photo of the sand drying system)

### 3.3. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma veriminin teorik analizi (Theoretical analysis of sand drying efficiency with waste heat recovery)

Çalışmada kullanılan 1. kademe ısı geri kazanım ünitesine ait bilgiler Tablo 2'de, 2. kademe ısı geri kazanım ünitesine ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 2. 1. Kademe ısı geri kazanım ünitesi parametre değerleri (1st stage heat recovery unit parameter values)

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C	30
Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C	98.41
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş debisi, m <sup>3</sup> /s	1.916
Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	1.032
Havanın özgül ısı, kJ/kg°C	1.008

Tablo 3. 2. Kademe ısı geri kazanım ünitesi parametre değerleri (2nd stage heat recovery unit parameter values)

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C	10
Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C	60
Isı geri kazanım ünitesi su giriş debisi, m <sup>3</sup> /s	0.8
Suyun yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	994.2
Suyun özgül ısı, kJ/kg°C	4.18

Mevcut kum kurutma sistemine ısı geri kazanım ünitesi eklenmesi sonucunda geri kazanılan ısı güç;

$$\dot{W} = \dot{Q} \times \rho \times c_p \times (T_2 - T_1) \quad (7)$$

ile doğalgaz tüketimindeki azalım;

$$\text{Doğalgaz Tüketimindeki Azalım} = \frac{\text{Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı güç}}{10.64} \quad (8)$$

eşitliklerinden hesaplanır. Doğalgaz tüketimindeki azalım ile ısı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı Doğalgaz Tüketimi} = \text{Doğalgaz tüketimi} - \text{Doğalgaz tüketimindeki azalım} \quad (9)$$

eşitliğinden bulunur. Isı geri kazanımlı özgül enerji tüketimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı ÖET} = \frac{\text{Elektrik tüketimi} + (\text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64)}{\text{Buharlaştırılan su miktarı}} \quad (10)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Buharlaştırma gizli ısı 2,336.1 kJ/kg'dır. Isı geri kazanımlı kurutma verimi;

$$\text{Isı Geri Kazanımlı Kurutma Verimi} = \frac{\left(\frac{\text{Buharlaştırılan su miktarı}}{3,600}\right) \times (\text{Buharlaştırma gizli ısı})}{\text{Elektrik tüketimi} + (\text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64)} \quad (11)$$

eşitliğinden, yakıt tüketimindeki % azalma ise;

$$\text{Yakıt Tüketimindeki Azalma} = \left(\frac{\text{Doğalgaz tüketimi} - \text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi}}{\text{Doğalgaz tüketimi}}\right) \times 100 \quad (12)$$

eşitliğinden hesaplanarak bulunur.

$$\text{IPCC doğalgaz} = 0.000233 \text{ ton CO}_2/\text{kWh} \quad (13)$$

Mevcut CO<sub>2</sub> salımı;

$$\text{CO}_2 \text{ Salımı} = \text{IPCC doğalgaz} \times \text{Doğalgaz Tüketimi} \times 10.64 \quad (14)$$

eşitliğinden, ısı geri kazanım ile CO<sub>2</sub> salımı;

$$\text{Isı Geri Kazanım ile CO}_2 \text{ Salımı} = \text{IPCC doğalgaz} \times \text{Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi} \times 10.64 \quad (15)$$

eşitliğinden hesaplanarak bulunur.

Çalışma kapsamında, mevcutta iki kademeli ısı geri kazanım sistemine sahip olmayan akışkan yatak kum kurutma sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen deneysel veriler Tablo 1'de sunulmuş,

bu verilere bağlı olarak ısı geri kazanım üniteleri tasarlanmış ve bu tasarıma göre analiz edilmiştir. Böylece, mevcut deneysel verilere ve ısı geri kazanım sisteminin kurulum maliyetine göre ekonomik analiz yapılarak elde edilebilecek enerji tasarrufuna göre geri ödeme süresi hesaplanmıştır.

#### 4. Bulgular (Results)

Bu çalışmada, döküm sektöründe enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik yeşil ve verimli enerji teknolojilerine dönüşümde yeni nesil bir atık ısı geri kazanımı sistemine ve yüksek kurutma verimine sahip kum kurutma sistemi tasarlanmıştır. Tablo 4'te mevcut kum kurutma tasarımına, Tablo 5'te 1. kademe kum kurutma tasarımına, Tablo 6'da 2. kademe kum kurutma tasarımına ait değerler verilmiştir.

Tablo 4. Mevcut kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (Parameter values of the existing sand drying design)

Parametre	Değer
Başlangıç kuru kum miktarı, kg/h	7,170.75
Çıkış yaş kum miktarı, kg/h	7,171.47
Buharlaşan su miktarı, kg/h	328.53
Mevcut özgül enerji tüketimi, kWh/kg	2.42
Mevcut kurutma verimi, %	26.86

Tablo 5. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (1. kademe: kurutma havası ön ısıtma) (Parameter values of sand drying design with waste heat recovery (1st stage: drying air preheating))

Parametre	Değer
Geri kazanılan ısı güç, kW	136.350
Doğalgaz tüketimindeki azalım, m <sup>3</sup> /h	12.815
Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	56.995
Isı geri kazanımlı özgül enerji tüketimi, kWh/kg	2.01
Isı geri kazanımlı kurutma verimi, %	32.35
Yakıt tüketimindeki azalma, %	18.36
Mevcut CO <sub>2</sub> salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.173
Isı geri kazanım ile CO <sub>2</sub> salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.141
Yıllık karbon salımındaki azalma, ton CO <sub>2</sub> /yıl	217.3

Tablo 6. Atık ısı geri kazanımlı kum kurutma tasarımına ait parametre değerleri (2. kademe: fabrika içi su ısıtma) (Parameter values for sand drying design with waste heat recovery (2nd stage: in-plant water heating))

Parametre	Değer
Isı geri kazanım ünitesi su giriş sıcaklığı, °C	10
Isı geri kazanım ünitesi su çıkış sıcaklığı, °C	60
Isı geri kazanım ünitesi su giriş debisi, m <sup>3</sup> /h	0.8
Suyun yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>	994.2
Suyun özgül ısı, kJ/kg°C	4.18
Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı güç, kW	46.175
Doğalgaz tüketimindeki azalım, m <sup>3</sup> /h	4.339
Isı geri kazanımlı doğalgaz tüketimi, m <sup>3</sup> /h	52.65
Yakıt tüketimindeki azalma, %	6.2165
Isı geri kazanım ile karbon salımı, ton CO <sub>2</sub> /h	0.162
Yıllık karbon salımındaki azalma, ton CO <sub>2</sub> /yıl	73.59

Tablo 4, 5 ve 6'da görüldüğü gibi ısı geri kazanımı ile özgül enerji tüketimi 2.42 kWh/kg değerinden 2.01 kWh/kg değerine azaltılmış, yakıt tüketimi de mevcut sisteme göre %18.36 oranında azalmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Şekil 1'de verilen noktalara ait sıcaklık değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

##### 4.1. Ekonomik analiz (Economic analysis)

Döküm sektöründe kullanılan kumun kurutulması sürecinde kurutucunun özgül enerji tüketiminin azaltılması, atık ısı geri kazanımı sisteminin geliştirilmesi için ısı geri kazanım ünitesi tasarımı yapılacaktır. Mevcut durumda kum kurutma fırınında günde 7.5 ton/h ve 22 saatte ortalama 165 ton silis kumu kurutulmaktadır. Elektrik tüketimi saatte 52.64 kWh, doğalgaz saatteki tüketimi 69.81 m<sup>3</sup>/h'tir. Mevcut kurutma verimi %26.8 ve karbon salımı ton başına 0.173 CO<sub>2</sub>/h olarak hesaplanmıştır. Sistemin net bugünkü değerleri göz önünde bulundurularak bir ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7. Sistemdeki sıcaklık değerleri (Temperature values in the system)

Nokta	Sıcaklık değeri (°C)
1: Fan giriş-çıkış	30.0
2: 1. kademe ısı değiştirici giriş	30.0
3: 1. kademe ısı değiştirici çıkış	98.4
4: Doğalgazlı ısıtıcı çıkış-kurutma odası giriş	270.5
5: Kurutma odası atık ısı çıkış	210.5
6: 1. kademe ısı değiştirici atık ısı çıkış-2. kademe ısı değiştirici atık ısı giriş	92.1
7: 2. kademe ısı değiştirici atık ısı çıkış	59.8
8: 2. kademe ısı değiştirici soğuk su girişi	10.0
9: 2. kademe ısı değiştirici sıcak su çıkışı	60.0

1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklenmesi ile kurutma veriminin %32.35 olması öngörülmektedir. Karbon salımı azaltılıp ton başına 0.141 CO<sub>2</sub>/h'e düşecektir. Isı geri kazanımı ile doğalgaz tüketimi saatte 56.99 m<sup>3</sup>/h'e düşerek yakıt tüketimindeki azalma %18.35 olacaktır. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi entegreli sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,428,753.81 TL tasarruf edilmesi mümkündür. Isı geri kazanım ünitesinin yatırım maliyeti 938,940 TL olup geri ödeme süresi 0.64 yıldır. 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklenmesi ile kurutma veriminin %28.45 olması öngörülmektedir. Karbon salımı azaltılıp ton başına 0.162 CO<sub>2</sub>/h'e düşecektir. Isı geri kazanımı ile doğalgaz tüketimi saatte 52.65 m<sup>3</sup>/h'e düşerek yakıt tüketimindeki azalma %18.35 olacaktır. Böylece mevcut sistemden ısı geri kazanım ünitesi entegreli sisteme geçildiği takdirde yıllık 1,912,602.548 TL tasarruf edilmesi mümkündür. Isı geri kazanım ünitesinin yatırım maliyeti 156,600 TL olup geri ödeme süresi 0.16 yıldır.

Elde edilen sonuçların enerji sistemleri açısından önemli bir ölçüde olduğu kanıtlanmış ve bu çalışma ile bu akışkan yatak kurutucuda ısı geri kazanımının etkileri ve önemi ortaya konmuştur.

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, döküm sektöründe kullanılan kumun kurutulmasını sağlayan kurutucuda atık ısı geri kazanım sisteminin kullanılarak özgül enerji tüketiminin azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir ısı geri kazanım ünitesi tasarımı ve gerekli analizler yapılmıştır. Sistemde kullanılan mevcut tasarım ile atık ısı geri kazanımlı tasarımdan elde edilen sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Mevcut tasarım ve atık ısı geri kazanımlı tasarım parametre değerleri (Existing design and waste heat recovery design parameter values)

	Mevcut Tasarım	Atık Isı Geri Kazanımlı Tasarım (1. Kademe Kurutma Havası)	Atık Isı Geri Kazanımlı Tasarım (2. Kademe Su Isıtma)	İyileşme Oranı	
				1.Kademe	2.Kademe
<b>Kurutma Verimi, %</b>	%26.8	%32.35	-	%5.55	-
<b>Doğalgaz Tüketimi, m<sup>3</sup>/h</b>	69.81	56.995	52.655	12.815	17.155
<b>Karbon Salımı, ton CO<sub>2</sub>/h</b>	0.173	0.141	0.162	0.032	0.011

Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki sonuçlar literatüre kazandırılmıştır;

- Mevcut tasarımdan 1. kademe kurutma havası ön ısıtma ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklendiği tasarıma geçildiği takdirde kurutma veriminde %5.55'lik bir artış, doğalgaz tüketiminde 12.815 m<sup>3</sup>/h'lik bir düşüş, karbon salımında ise 0.032 ton CO<sub>2</sub>/kWh'lik bir azalma meydana geleceği hesaplanmıştır.
- Mevcut tasarımdan 2. kademe fabrika içi su ısıtma için tasarlanan ısı geri kazanım ünitesinin çevrime eklendiği tasarıma geçildiği takdirde doğalgaz tüketiminde 4.34 m<sup>3</sup>/h'lik, karbon salımında ise 0.011 ton CO<sub>2</sub>/kWh'lik bir azalma meydana geleceği hesaplanmıştır.
- Birinci kademe kurutma veriminin artışı, ikinci kademe yakıt tüketimindeki azalma oranları ortaya konularak yenilikçi bir ısı geri kazanım ünitesi tasarımı ortaya konmuştur.
- Atık ısının geri kazanıldığı bu tasarımda kurutma verimi yükselerek enerji maliyetinin azalması

öngörülmektedir.

- Enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan bu yeni tasarım ile atmosfere salınan sera gazı emisyonlarının azaltılması, Paris İklim Anlaşması'nın hedeflerinin gerçekleşmesine katkı sağlanması öngörülmektedir.

Tasarlanan sistemin enerji, ekonomik ve çevresel analizlerinin yapıldığı bu çalışmada, karbon salımının düşürülerek kurutma veriminin artırılması ve enerji tüketiminin minimize edilmesi öngörülmektedir.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Çalışmaya vermiş olduğu katkılardan dolayı Erkunt Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Semboller ve Kısaltmalar (Symbols and Abbreviations)

$c_p$	Havanın özgül ısısı, kJ/kg°C
$h_{fg}$	Buharlaştırma gizli ısısı, kJ/kg
$\dot{m}_b$	Buharlaştırma su miktarı, kg/h
PV/T	Fotovoltaik/termal
$\dot{Q}$	Isı geri kazanım ünitesi hava giriş debisi, m <sup>3</sup> /s
$\dot{Q}_{giren}$	Yakıt ve elektrik tüketiminin toplamı, kWh
$T_1$	Isı geri kazanım ünitesi hava giriş sıcaklığı, °C
$T_2$	Isı geri kazanım ünitesi hava çıkış sıcaklığı, °C
$\dot{W}$	Isı geri kazanım ünitesinde geri kazanılan ısı gücü, kW
$\eta$	Kurutma verimi, %
$\rho$	Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>

### Kaynaklar (References)

- [1] H. Genççele, "Kurutma Ders Notları," Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Gıda Teknolojisi Anabilim Dalı, [Erişildi: Eylül 2023].
- [2] Bayrock, D. and W. M. Ingledew. "Mechanism of Viability Loss During Fluidized Bed Drying of Baker's Yeast," *Food Research International*, vol. 30, pp. 417-425, 1997. doi:10.1016/S0963-9969(97)00072-0
- [3] A. Güngör ve N. Özbalta, "Endüstriyel Kurutma Sistemleri," *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, Türkiye, 20-23 Kasım, 1997*, pp. 737-747.
- [4] B. Dai, P. Zhao, S. Liu, M. Su, D. Zhong, J. Qian, X. Hu and Y. Hao, "Assessment of Heat Pump with Carbon Dioxide/Low-Global Warming Potential Working Fluid Mixture for Drying Process: Energy and Emissions Saving Potential," *Energy Conversion and Management*, vol. 222, pp. e113225, 2020. doi:10.1016/j.enconman.2020.113225
- [5] T. G. Walmsley, M. R. W. Walmsley, M. J. Atkins, J. R. Neale and A. H. Tarighaleslami, "Thermo-Economic Optimisation of Industrial Milk Spray Dryer Exhaust to Inlet Air Heat Recovery," *Energy*, vol. 90, pp. 95-104, 2015. doi:10.1016/j.energy.2015.03.102
- [6] B. Golman and W. Julklang, "Simulation of Exhaust Gas Heat Recovery from A Spray Dryer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 73, pp. 899-913, 2014. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.08.045
- [7] B. Delpéch, M. Milani, L. Montorsi, D. Boscardin, A. Chauhan, S. Almahmoud, B. Axcell and H. Jouhara, "Energy Efficiency Enhancement and Waste Heat Recovery in Industrial Processes by means of the Heat Pipe Technology: Case of the Ceramic Industry," *Energy*, vol. 158, pp. 656-665, 2018. doi:10.1016/j.energy.2018.06.041

- [8] S. K. Patel and M. H. Bade, "Energy Analysis and Heat Recovery Opportunities in Spray Dryers Applied for Effluent Management," *Energy Conversion and Management*, vol. 186, pp. 597-609, 2019. doi:10.1016/j.enconman.2019.02.065
- [9] B. Lamrani, A. Draoui and F. Kuznik, "Thermal Performance and Environmental Assessment of a Hybrid Solar-Electrical Wood Dryer Integrated with Photovoltaic/Thermal Air Collector and Heat Recovery System," *Solar Energy*, vol. 221, pp. 60-74, 2021. doi:10.1016/j.solener.2021.04.035
- [10] R. T. Oğulata, "Utilization of Waste-Heat Recovery in Textile Drying," *Applied Energy*, vol. 79, pp. 41-49, 2004. doi:10.1016/j.apenergy.2003.12.002
- [11] B. Golman and W. Julklang, "Analysis of Heat Recovery from A Spray Dryer by Recirculation of Exhaust Air," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 641-649, 2014. doi:10.1016/j.enconman.2014.09.012
- [12] S. Bellochi, G. L. Guizzi, M. Manno, M. Pentimalli, M. Salvatori and A. Zaccagnini, "Adsorbent Materials for Low-Grade Waste Heat Recovery: Application to Industrial Pasta Drying Processes," *Energy*, vol. 140, pp. 729-745, 2017. doi:10.1016/j.energy.2017.09.008
- [13] M. K. Krokida and G. I. Bisharat, "Heat Recovery from Dryer Exhaust Air," *Drying Technology*, vol. 22, pp. 1661-1674, 2004. doi:10.1081/DRT-200025626
- [14] H. Ishaq and İ. Dinçer, "A New Energy Efficient Single-Stage Flash Drying System Integrated with Heat Recovery Applications in Industry," *Drying Technology*, vol. 38, pp. 735-746, 2019. doi:10.1080/07373937.2019.1702557
- [15] M. J. Atkins, M. R. W. Walmsley and J. R. Neale, "Integrating Heat Recovery from Milk Powder Spray Dryer Exhausts in the Dairy Industry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 2101-2106, 2011. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.006
- [16] T. G. Walmsley, M. R. W. Walmsley, M. J. Atkins and J. R. Neale, "Integration of Industrial Solar and Gaseous Waste Heat into Heat Recovery Loops Using Constant and Variable Temperature Storage," *Energy*, vol. 75, pp. 53-67, 2014. doi:10.1016/j.energy.2014.01.103
- [17] D. Fiaschi, G. Manfrida, L. Russo and L. Talluri, "Improvement of Waste Heat Recuperation on An Industrial Textile Dryer: Redesign of Heat Exchangers Network and Components," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 924-940, 2017. doi:10.1016/j.enconman.2017.05.053
- [18] W. Julklang and B. Golman, "Effect of Process Parameters on Energy Performance of Spray Drying with Exhaust Air Heat Recovery for Production of High Value Particles," *Applied Energy*, vol. 151, pp. 285-295, 2015. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.069
- [19] A. Akbari, S. Kouravand and G. Chegini, "Experimental Analysis of A Rotary Heat Exchanger for Waste Heat Recovery from the Exhaust Gas of Dryer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 138, pp. 668-674, 2018. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.103
- [20] L. Kong, H. Liu, J. Li and J. Tao, "Waste Heat Integration of Coating Paper Machine Drying Process," *Drying Technology*, vol. 29, pp. 442-450, 2011. doi:10.1080/07373937.2010.506620
- [21] X. Guo, M. Liu, F. Lai, D. Chong, J. Yan and F. Xiao, "Theoretical Study and Case Analysis of A Predried Lignite-Fired Power Plant with the Waste Heat Recovery System," *Drying Technology*, vol. 30, pp. 425-434, 2012. doi:10.1080/07373937.2011.645981
- [22] I. C. Kemp, "Reducing Dryer Energy Use by Process Integration and Pinch Analysis," *Drying Technology*, vol. 23, pp. 2089-2104, 2005. doi:10.1080/07373930500210572
- [23] C. G. J. Baker, Y. M. Al-Roomi and G. Al-Sharrah, "Optimal Design of Well-Mixed Fluidized Bed Dryers," *Drying Technology*, vol. 18, pp. 1509-1535, 2000. doi:10.1080/07373930008917791
- [24] X. Han, M. Liu, J. Wang, J. Yan, J. Liu and F. Xiao, "Simulation Study on Lignite-Fired Power System Integrated with Flue Gas Drying and Waste Heat Recovery - Performances Under Variable Power Loads Coupled with Off-Design Parameters," *Energy*, vol. 76, pp. 406-418, 2014. doi:10.1016/j.energy.2014.08.032
- [25] M. Aktaş, S. Şevik, A. Amini and A. Khanlari, "Analysis of Drying of Melon in A Solar-Heat Recovery Assisted Infrared Dryer," *Solar Energy*, vol. 137, pp. 500-515, 2016. doi:10.1016/j.solener.2016.08.036
- [26] M. Aktaş, A. Sözen, A. Amini and A. Khanlari, "Experimental Analysis and CFD Simulation of Infrared Apricot Dryer with Heat Recovery," *Drying Technology*, vol. 35, pp. 766-783, 2017. doi:10.1080/07373937.2016.1212871
- [27] M. Yahya, A. Rachman and R. Hasibuan, "Performance Analysis of Solar-Biomass Hybrid Heat Pump Batch-Type Horizontal Fluidized Bed Dryer Using Multi-Stage Heat Exchanger for Paddy Drying," *Energy*, vol. 254, e124294, 2022. doi:10.1016/j.energy.2022.124294





GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## e-ksper: A Convolutional Neural Network Based System for Seedless Raisin Quality Grading

Emre Gülsoylu<sup>a\*</sup>, Zeynep Cipiloglu Yıldız<sup>b</sup>

Submitted: 22.01.2023 Revised: 22.08.2023 Accepted: 25.09.2023 doi:10.30855/gmbd.0705079

### ABSTRACT

**Keywords:** Raisin grading, raisin classification, convolutional neural networks, foreign matter detection

Seedless raisins are graded according to their quality which is determined based on several features such as color, size, texture, and humidity. Currently, most of the raisin grading process is performed by human experts manually, which is laborious and subjective work. Therefore, an automated system that enables objective evaluation of the raisins would be helpful for both producers and experts during this process. In this study, we propose a simple machinery prototype that takes images of raisins under standard background and illumination conditions and an automated system that performs quality grading of raisins using convolutional neural networks. The proposed model not only targets color classes but also aims to identify foreign matters and defected raisins. The model achieves about 88.2% average classification accuracy on five classes including four color classes and a defected raisin class; whereas the model's accuracy becomes 98.6% if defected raisins are excluded. Hence, the proposed model is very successful in differentiating color classes and has also considerable success in detecting foreign matters and defected raisins. We provide a comprehensive analysis and discussion on these results.

<sup>a</sup> University of Hamburg,  
Department of Informatics  
22527 - Hamburg, Germany  
Orcid: 0000-0002-3834-3645  
e mail: emre.guelsoylu@informatik.uni-hamburg.de

<sup>b</sup> Manisa Celal Bayar University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Computer Engineering  
45140 - Manisa, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-4129-591X

\*Corresponding author:  
emre.guelsoylu@informatik.uni-hamburg.de

## e-ksper: Çekirdeksiz Kuru Üzüm Kalite Değerlendirmesi için Evrişimsel Sinir Ağları Temelli Sistem

### ÖZ

Çekirdeksiz kuru üzümler, renk, boyut, doku ve nem gibi çeşitli özelliklere göre belirlenen kaliteler doğrultusunda değerlendirilir. Mevcut şartlarda kuru üzüm sınıflandırma işleminin çoğu insan uzmanlar tarafından manuel olarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin manuel olarak yapılması insan gücü açısından zahmetli olmakla birlikte öznel sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, kuru üzümlerin objektif bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan otomatik bir sistem, bu süreçte hem kuru üzüm üreticilerine hem de uzmanlara yardımcı olacaktır. Bu çalışmada, standart arka plan ve aydınlatma koşulları altında kuru üzümlerin görüntülerini alan basit bir makine prototipi ve evrişimsel sinir ağları kullanarak kuru üzümlerin kalite derecelendirmesini yapan otomatik bir sistem öneriyoruz. Önerilen model sadece renk sınıflarını değil, aynı zamanda yabancı maddeleri ve kusurlu çekirdekleri de tespit etmeyi amaçlamaktadır. Model, dört renk sınıfı ve bir kusurlu çekirdek sınıfı dahil olmak üzere beş sınıf üzerinde ortalama %88,2 sınıflandırma doğruluğu elde ederken, kusurlu çekirdekler hariç tutulduğunda modelin doğruluğu %98,6 olmaktadır. Dolayısıyla, önerilen model renk sınıflarını ayırt etmede çok başarılıdır ve ayrıca yabancı maddeleri ve kusurlu kuru üzümleri tespit etmede de önemli bir başarıya sahiptir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar üzerine kapsamlı bir analiz ve tartışma sunuyoruz.

**Anahtar Kelimeler:** Kuru üzüm değerlendirme, kuru üzüm sınıflandırma, evrişimsel sinir ağları, yabancı madde tespiti

## 1. Introduction

In today's world, applying technological tools and techniques in agriculture has become vital to survive in the competitive world market and ensure sustainable agriculture. The continuous increase in population and prosperity comes with a food demand that agricultural production is struggling to meet. Although agricultural mechanization has come close to meeting this demand in the past centuries, artificial intelligence (AI) applications can produce sustainable solutions to the ever-increasing demand for food [1]. The progress in the field of internet-of-things and machine learning (ML) has enabled many applications of smart systems in food and agriculture sectors. Recently, AI started to reform the processes in the agricultural sector as well as other sectors. The use of AI can be seen throughout the food supply chain, starting from crop planting scheduling [2], irrigation management [3], pest monitoring [4], autonomous harvesting [5] to product quality evaluation [6] and food logistics [7].

Seedless raisin is one of the main agricultural products in the world and the main exporters are Turkey, USA, China, India, and Iran. It is one of the major agricultural products in Turkey, especially for the Aegean Region. Turkey, which realizes 27% of seedless raisins in the world, is the biggest seedless raisin producer and exporter (32%) in the world [8]. The price of a bulk of raisins is determined based on its quality grade which depends on factors such as color, texture, size, and humidity. Currently, most raisin grading is done manually by human experts under daylight, which is a labor-intensive, subjective and error-prone process due to varying light conditions and the human factor in general. Thus, an AI-powered automated system that enables objective evaluation of the raisins would be helpful for both producers and experts during this process. Such a system would pave the way for the validation of the process in terms of ethical concerns such as fairness, transparency, and explainability.

The main objective of this study is to develop an automated process for classifying seedless raisins according to their quality. Within the scope of this work, we only consider image-based features like color, size, and texture by omitting humidity and mass. In this work, we propose a hardware prototype and a software methodology for classifying raisins into one of four color classes or defected raisins. The current system targets Turkish standards for raisin grading; though, it is possible to adapt and calibrate the system for other countries' standards.

The hardware component is constructed for taking photos of raisins under standard illumination conditions since color is the main factor in determining the quality and it is highly affected by illumination. Yet, the hardware is designed to be used for materials other than raisins. For the software part, we employ convolutional neural networks (CNN) as one of the state-of-the-art machine vision techniques to obtain a mapping between the input raisin images and expert labels. We named our automatic raisin grading system as "e-ksper".

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 reviews the literature in the field of food and raisin grading. Section 3 includes the details about our data, hardware prototype, and software methodology. Quantitative and qualitative results are elaborated in Section 4; and Section 5 wraps up the study.

## 2. Related Work

In the literature, computer vision techniques are widely employed for quality inspection of agricultural products such as fruits and grains. Some examples include grain classification [9, 10], quality assessment of cocoons [11], and fruit maturity grading [12]. Surveys on the application of computer vision techniques for agricultural product grading and characterization can also be found [13, 14, 15, 16].

Although there are a number of studies on raisin or grape variety classification using machine vision and deep learning methods [17, 18, 19], in different wavelengths [20], these studies do not take raisin quality into account. The studies on raisin quality grading can be analyzed based on their methodologies, extracted features, or classes. Omid et al. [21] proposed a simple algorithm to identify good and bad raisins on a given image, by analyzing their color and size features. Wang et al. [22] proposed a machine vision system based on hybrid image features of color, texture, and morphological properties to classify raisins into four varieties produced in China. They compared several classifiers

including partial least squares (PLS), linear discriminant analysis (LDA), soft independent modeling of class analogy (SIMCA), and least squares support vector machine (LS-SVM) with linear and radial basis function (RBF) kernels. They achieved up to 99% accuracy using LDA. Yu et al. [23] combined HSI color space and texture features and utilized LS-SVM classifier. They showed that integrating texture features to the system improves the classification accuracy when compared to using color features solely. Pawar and Sarkar [24] proposed a fuzzy classification system using hue, saturation, and intensity features. The main difference of their study from the others is that the classification is done based on the whole image, instead of dealing with individual raisins.

Li and Liu [25] proposed an artificial neural network (ANN) architecture to classify raisins into three grading classes, based on color and size features. Another grading algorithm that uses ANN was developed by Angadi and Hiregoudar [26] and employs color and size features such as RGB mean, RGB variance, RGB moment, area, aspect ratio, etc. They achieved about 95% average classification accuracy on seven industrial classes. Mollazade et al. [27] compared the performance of several data mining classifiers such as ANN, SVM, Bayesian networks, and decision trees (DT) on raisin classification. They obtained up to 96% classification accuracy using ANN. Karimi et al. [28] used a Principle Components Analysis (PCA)-reduced subset of texture features such as gray-level co-occurrence matrix (GLCM), gray-level run-length matrix (GLRM), and local binary patterns (LBP); and then compared the performance of ANN and SVM classifiers. Their purpose is to classify mixtures of raisins based on 10 mixture percent. They achieved about 93% classification accuracy with SVM. Similarly, a machine vision system for classifying bulk raisins was developed using several texture features including GLCM, GLRM, and LBP [29]. They compared the performance of SVM and LDA classifiers and obtained about 86% and 70% classification accuracy for six classes and fifteen classes of good and bad raisin, respectively. Zhao et al. [30] trained a neural network by extracting waveform resolution features on hyperspectral images of raisin samples, to classify raisins into eight categories produced in China region and obtained about 93% classification accuracy.

Several machines were also developed for automatically sorting raisins using conveyor belts. Shinde and Patil [31] used average color values to classify and sort raisins into four categories; namely green, golden, brown, and black. Abbasgholipour et al. [32] developed a machine vision system to segment image pixels into desired and undesired raisin regions under varying luminance conditions, using genetic algorithm on HSI color space.

As the literature review indicates, the studies on automatic raisin grading are very limited. Most of them classify raisins into just two categories as good and bad. The rest are generally proposed for region-specific grading criteria. The standards used in Turkey differ from those criteria. For example, possible defects on raisins have a significant effect on the Turkish standard for grading raisins. Detecting foreign matters and defections is a challenging task compared to just color classification. Furthermore, most of the proposed methods require a hand-crafted feature extraction process, which is labour-intensive. Instead, the application of modern machine vision techniques such as CNN would remove the necessity for manual feature extraction and explore descriptive features and their hierarchical and non-linear interactions automatically.

### 3. Materials and Methods

In this section, we explain the hardware/software methods and algorithms that are employed in the study. We have developed a simple hardware prototype that takes images of raisin samples under standard illumination conditions. These images are then fed into a CNN model to be classified according to their quality. The details are explained in the subsequent sections.

#### 3.1. Data

In the development process, Sultana-1 seedless raisins were used. The origin of this variety is Asia Minor and commercially it is very popular around the world and commonly cultivated in the Aegean Region of Turkey. Raisin samples were classified and labeled by experts into five classes according to the Seedless Raisin Quality Grading Standard of Turkish Standards Institute [33]. These classes are shown in Figure 1 and shortly explained below.

- Class1: raisins of light yellow or similar color.

- Class2: raisins of light brown or similar color. Raisins of light yellow-light brown mottled color are also included in this class.
- Class3: raisins of dark brown or similar color. Raisins of dark brown-black mottled color are also included in this class.
- Class4: raisins of black color.
- Class5: Defected raisins and foreign matters:
  - Capstems: The small stems that attach the raisins to the branches of the bunch.
  - Immature raisin: Raisins with a very small mass, with no sugared tissue indicating that growing is incomplete, completely wrinkled, with almost no flesh, hard structure, and raisins of less than 5 mm diameter.
  - Moldy raisin: Raisins with visible mold filaments.
  - Defected raisin: Raisins with significant defects in appearance, consumption, quality, transport, and storage due to visible sunburn, mechanical injury, insect defeat, and so on.
  - Sugared raisin: Raisins with sugar crystals inside and outside, which affect the appearance.
  - Conjoint raisin: Raisins stuck together, usually due to exocarp injury.
  - Foreign matters: Any other material than raisins.

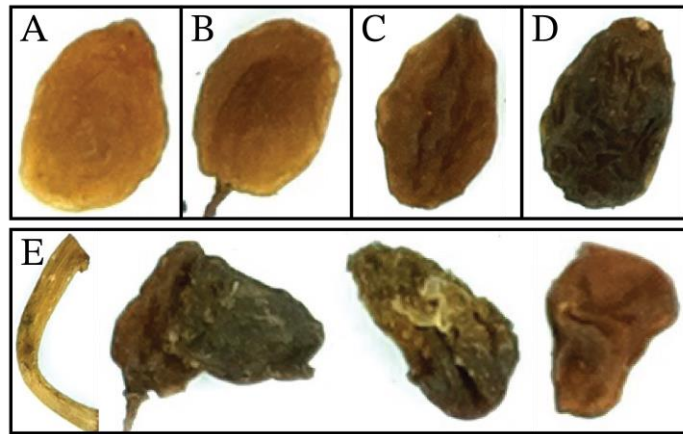


Figure 1. Samples for four color classes and the class of defected raisins and foreign matters. A) Class1, B) Class2, C) Class3, D) Class4, E) Class5: Defected raisins and foreign matters.

In this study, our main aim is to cover five classes including defected raisins. However, we also compare the prediction performance when only four color classes are targeted. For five classes, a total of 1751 sample raisin images were captured and labeled by experts. There are 409 Class1, 300 Class2, 314 Class3, 410 Class4 and 318 Class5 raisin images in the dataset. For four classes, defected raisin class is excluded and 1433 raisin images were used. The datasets were divided into three sets: Training (70%), validation (15%), and testing sets (15%). All images were resized to 64 x 64 pixels and online data augmentation techniques were used to mitigate overfitting by randomly rotating and flipping the raisin images. Unlike offline data augmentation, which generates images once before training, online data augmentation generates images randomly for each batch based on the predefined augmentation rules during the training.

In Figure 2, the distribution of class samples in RGB and HSV color spaces are plotted. Each datapoint in the figure represents the average color for a raisin image in a color space. The plots show that the classes are not trivially separable in both spaces. Instances of Class5 (purple) are spread over the whole samples and they are especially intertwined with Class3 and Class4 instances. Thus, it is not straightforward to classify the samples using just a rule-based system.

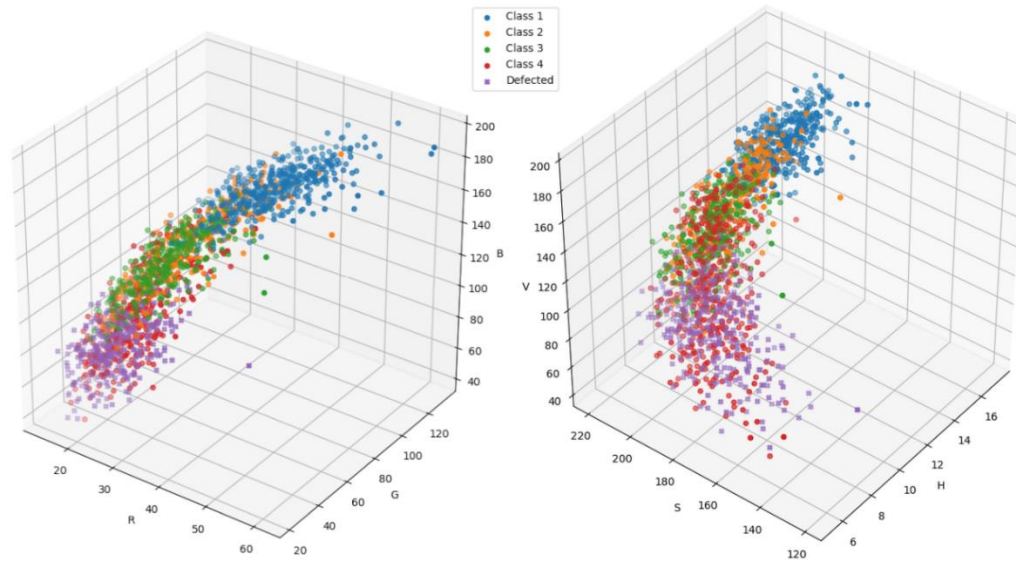


Figure 2. Distribution of the samples in RGB space (left), in HSV space (right).

### 3.2. Hardware

Since raisin quality is mainly determined by the color which is highly affected by illumination conditions; we have developed a machine prototype (Figure 3) which takes images of raisin samples under standard illumination conditions. A white fiberglass tray is used as a background. The tray is illuminated with two LED panels. The color temperature of those panels was selected as 3000K. The panels were placed at a 45° angle with the tray to reduce the shadows. To capture the RGB images of the raisins, a Raspberry Pi Camera Rev 1.3 which is placed 28 cm above the tray was employed. The resolution of the captured images was 1920x1200 pixels.



Figure 3. The hardware in which the photos of raisin samples to be evaluated are taken and processed.

Raisins were manually placed on the tray, and then each of them was separated from each other; similar to the process during human expert evaluation. Defected raisin clusters such as twin raisins were not separated because those raisins are defined as defected in the standards. After distributing the raisins, images were captured by the integrated Raspberry Pi camera.

Due to its small size, Raspberry Pi 3 Model B is used as a micro-computer. It has a quad-core 64-bit ARM Cortex-A53 (1.2 GHz) processor and a dual-core Videocore IV (400MHz) multimedia processor. Its 1 GB of LPDDR2 memory is sufficient for image processing. This micro-computer was not used for the training of the CNN model, it is just used for test queries. Raspberry Pi compatible LCD touch screen, which is 5-inch in size and 800x480 resolution, is used to facilitate the image acquisition process and display the results.

### 3.3. Methodology

The raisin quality classification process is illustrated in Figure 4. All the raisins are annotated by human experts according to their quality class and their images are taken. After capturing the images of randomly distributed raisins on the tray, images of individual raisins are obtained through several preprocessing steps. The constructed dataset is randomly split into train, test, and validation sets. A CNN model is trained to produce predictions of quality classes based on color and texture properties. Lastly, the size analysis of the raisins is performed and the user is presented with a report on the quality of the sample being tested.

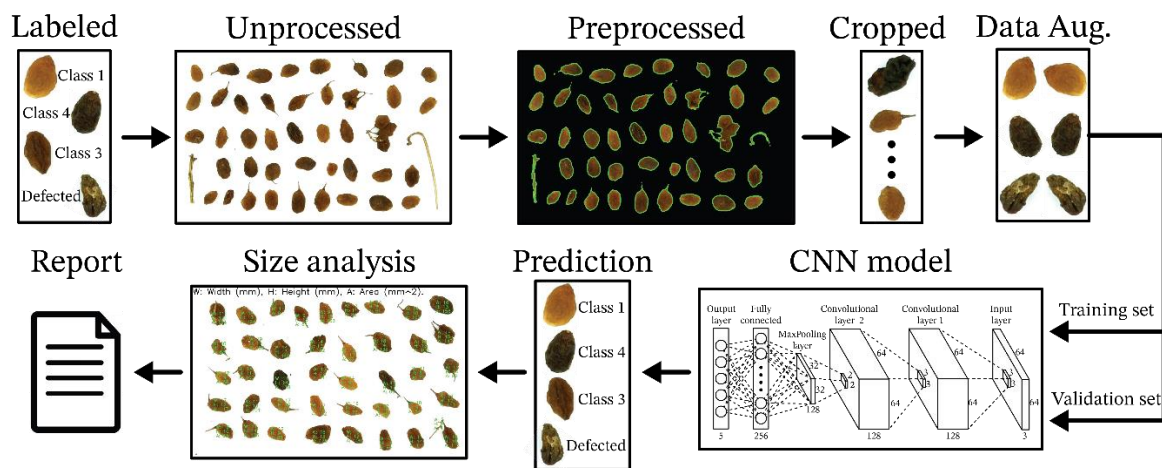


Figure 4. Raisin quality classification process.

#### 3.3.1. Preprocessing

After capturing RGB images of raisins as described above, the images go through several preprocessing stages before the CNN model. The main objective of the preprocessing is to crop the individual raisin images from the overall picture. The preprocessing stages operate on the greyscale version of the input image.

Although we take the images in a box under standard lighting, they are still exposed to some noise. We first remove this noise by applying a 5x5 median filter. Afterwards, to segment the image into background (tray) and foreground (raisin) pixels, we apply Otsu's thresholding algorithm [34]. As in other thresholding methods, the image pixels with intensity values lower than a threshold value are labeled as foreground. Otsu determines the optimum threshold value which separates two classes so that their inter-class variance is maximal, using the histogram of the image. Thresholding segments the image into two classes but the result may contain some gaps or surplus pixels. Therefore, the exact boundaries of the raisins are extracted by morphological operations using erosion and dilation. Then the foreground images were cropped from the overall image and resized to 64x64 pixels.

#### 3.3.2. Classification

Although the characteristics of the quality classes are outlined in the standard, the expressions used such as "light yellow", "similar", etc. are vague expressions. The fact that the color and size ranges are not clearly defined makes it difficult to use a rule-based approach. In addition, there is no clear definition of defected raisins and foreign matters. In this case, the best way is to learn the quality classes from the data labeled by experts. Therefore, at this stage, modern machine learning techniques have been utilized.

Convolutional neural networks, a class of deep learning methods, have been developed with inspiration from the interconnection of neurons in the visual cortex. One of the most important advantages of the CNN model is that it creates spatial and hierarchical relationships in the image through hierarchical filters without the need for manual feature extraction. Today, this method, which has become the basis of computer vision, gives very successful results in fields such as image/video classification and object recognition [35].

In our study, cropped raisin images feed a CNN model. The input to the model is the cropped RGB image in the shape of  $64 \times 64 \times 3$  and the output is the class label to which the corresponding image belongs with the highest probability. Since our problem is not as complex as standard image categorization problems, we have not used a standard CNN architecture such as AlexNet [36] or GoogLeNet [37] pre-trained on the ImageNet dataset [38]. Instead, we have constructed the simple CNN architecture shown in Figure 5 and trained it from scratch.

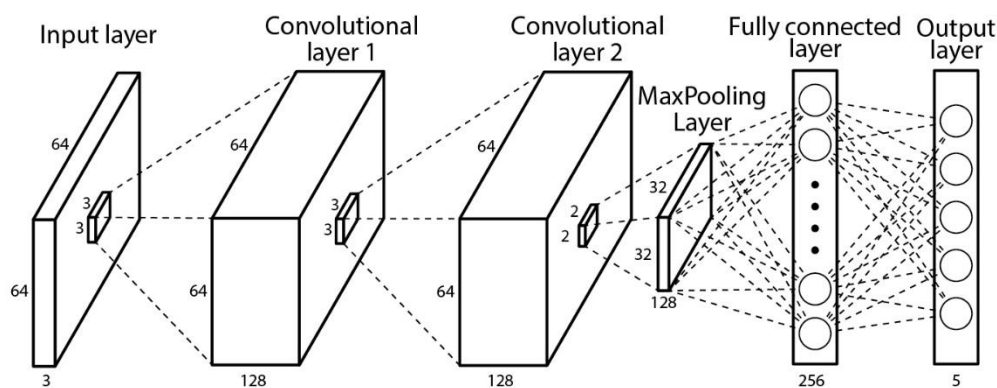


Figure 5. The CNN architecture developed for raisin quality classification.

There are six layers in this CNN model. The first layer is the input layer including the raisin images. After that, there are two convolutional layers, both of which apply 128 filters on the given image. The properties obtained with these layers are condensed with the MaxPooling layer and transmitted to a fully connected layer of 256 artificial neurons. The last layer is the output layer which predicts the class of the raisin. The application was implemented using Python. OpenCV libraries were used for the preprocessing steps and Keras was used for the development of the CNN model.

### 3.3.3. Reporting Application

Our hardware prototype and software methodology were designed to be flexible enough to be used even for the classification of objects other than raisins. However, our primary concern in this study is to grade seedless raisins according to the Turkish grading standards. Therefore, we demonstrate the sample application of our system in this section. Please note that all the parameters and thresholds used here can be calibrated for different grading standards and preferences of different corporations.

According to the Turkish standards, the proportion of each color class must be in a certain range and based on these proportions, the type of the raisin sample is determined as one of Type 7 through 11. These proportions are given in Table 1 for each type. These values have a 10% tolerance. One drawback of the manual grading process occurs at this stage. Counting the total number of raisins and calculating the proportions of each class is a tedious work for human experts. Thus, our automated system is also effective at objectively determining the type number of the whole sample, in addition to identifying color classes of the individual raisins.

Table 1. Type properties of raisin groups.

Type	Class1	Class2	Class3	Class4
7	10%	20%	55%	15%
8	26%	34%	32%	8%
9	45%	11%	12%	2%
10	64%	30%	6%	0%
11	75%	25%	0%	0%

Besides the color properties, size is also a key factor in determining the quality of raisins. For this reason, the size of each raisin on the tray is also calculated. Size of each object is first determined in pixels using OpenCV functions. Then the values in pixels are converted to millimeters according to the focal length of the camera. Width, height, and area of each raisin is displayed on the screen.

Finally, all these results regarding the test sample are reported to the user in a simple text file format. In the report, the number and proportion of each color class, the total number of raisins, type number, minimum, maximum, and average area, and size category of the sample based on the preferences of the client are listed.

## 4. Results

In this section, we present the quantitative results of the proposed method and discussion on these results.

### 4.1. Quantitative Results

Although we aim to develop a method for predicting five classes including defected raisins, we compare our results to just predicting four color classes. The annotated datasets were split into three sets as training (70%), validation (15%), and test (15%) sets. Table 2 lists the parameters used in the training of the CNN model. Training of the model was performed on an NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB GPU and it took about one hour to train for 650 epochs.

Table 2. Parameters of the CNN architecture.

Parameter Name	Value
Loss function	Categorical crossentropy
Optimizer	RMSProp
Learning rate	0.0005
Decay	0.000001
Activation function (middle layers)	ReLU
Activation function (last layer)	Softmax

The results were evaluated according to the following metrics: *prediction accuracy*, *precision*, *recall*, and *F1 score*. Prediction accuracy is the correct classification rate and it is the primary metric to evaluate the overall success. Metrics are calculated for each class according to the following equations.

$$Precision = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Positives} \quad (1)$$

Precision (Eq. 1) for a class  $x$ , measures how many of the objects that are predicted as class  $x$  actually belong to that class

$$Recall = \frac{True\ Positives}{True\ Positives + False\ Negatives} \quad (2)$$

Recall (Eq. 2) calculates how many of the class  $x$  objects are correctly predicted as class  $x$  by our model.

$$F1\ Score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall} \quad (3)$$

F1 score (Eq. 3) is the harmonic mean of precision and recall metrics. It measures the balance between them.

#### 4.1.1. Results for 5-Class Prediction

Accuracy and loss plots are given in Figure 6 for 5-class prediction case. According to the plots, one can observe that overfitting starts after about epoch 160 since training and validation curves move away



from each other. For this reason, we evaluate the accuracy of the test set for five classes based on the model which is trained for 156 epochs.

Feature maps for the convolutional layers were analyzed to determine the number of filters as we preferred to keep the architecture simple by not adding new layers after this stage to avoid overfitting. In the first convolutional layer, shape, color, and texture properties of the raisin image are extracted using 128 filters. In the second layer, 128 filters extract high-level features based on those previous low-level features.

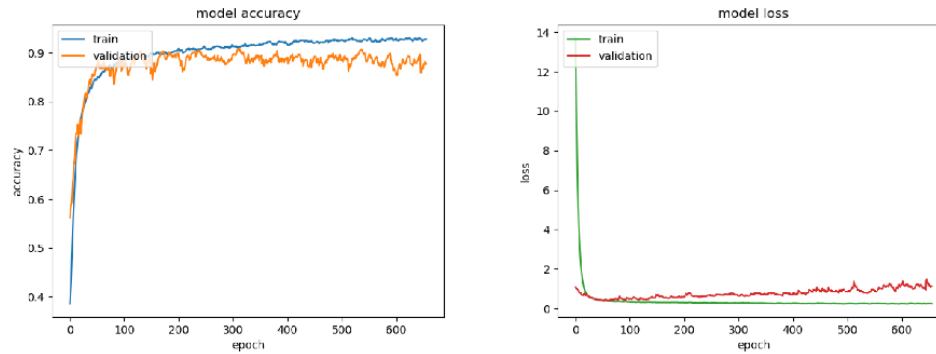


Figure 6. Accuracy (left) and loss (right) plots for 5-class training and validation sets.

The average prediction accuracy is measured as 88.21% and the confusion matrix is given in Figure 8. The confusion matrix shows that the Class5 is confused with all other, as the defected raisins can originally belong to any other class before a defect occurs. It is also clear that the Class1 and Class4 can be easily classified as those classes consist of the brightest and the darkest raisins, respectively. Based on the confusion matrix values; precision, recall, and F1 score metrics were also calculated for each class and listed in Table 3.

Table 3. Precision, recall, and F1 Score (5-class).

Class	Precision	Recall	F1 Score
Class1	98.21%	94.83%	96.49%
Class2	88.64%	88.64%	88.64%
Class3	93.02%	86.96%	89.89%
Class4	85.48%	84.13%	84.80%
Class5	77.59%	86.54%	81.82%

#### 4.1.2. Results for 4-Class Prediction

Figure 7 shows the accuracy and loss plots for the 4-class prediction case. Based on these plots, the test set for four classes was evaluated according to the model trained for 637 epochs. Similar to 5-class scenario, confusion matrix for the 4-class prediction (Figure 8) also shows that the model can successfully classify the brightest and darkest raisins while struggling for the Class2 and Class3. Performance of the 4-class model is shown in Table 4 with the evaluation metrics. In this case, the overall prediction accuracy is calculated as 98.60%.

Table 4. Precision, recall, and F1 Score (4-class).

Class	Precision	Recall	F1 Score
Class1	100.00%	100.00%	100.00%
Class2	95.56%	100.00%	97.73%
Class3	97.37%	94.87%	96.10%
Class4	100.00%	98.44%	99.21%

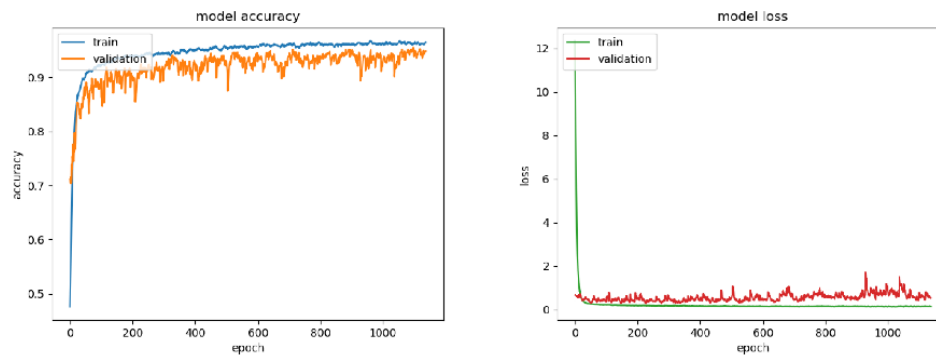


Figure 7. Accuracy (left) and loss (right) plots for 4-class training and validation sets.

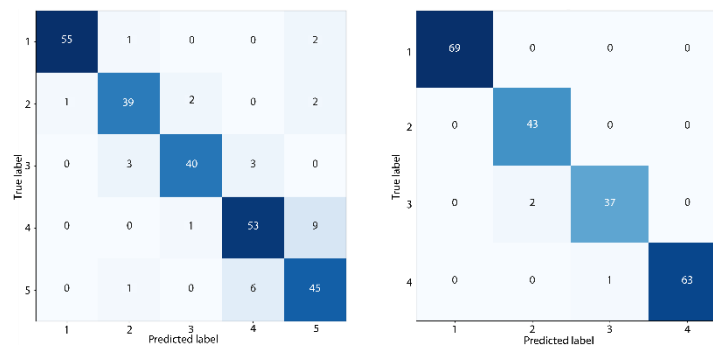


Figure 8. Confusion matrices for 5-class model (left) and 4-class model (right).

## 4.2. Discussion

The most prominent observation from the results given in Section 4.1 is that detecting defected raisins is a demanding task compared to identifying color classes. This is validated by both the significant improvement in the prediction accuracy and relatively low values for precision, recall, and F1 scores of the defected raisins class (Class5) in Table 3. The reason behind this may be two-fold: First, Class5 is a complex class that comprises many different categories like stems, foreign matters, immature raisins, etc. Considering such kind of items are not common in the market, it is difficult to collect a sufficient number of samples in the dataset to let the model learn the characteristic patterns of each category. Expanding the dataset with more samples could alleviate this problem to some extent. Secondly, using 2D images from a single viewpoint may not capture all the characteristics of the raisins. This second reason will be scrutinized in the next section with some examples.

Correctly classified instances of Class5 in our test set are displayed in Figure 9. As seen from the figure, our test set has sufficient diversity to encompass different categories of Class5 such as stems, foreign matters, and immature/defected/conjoint raisins. The proposed model correctly recognizes apparent instances of Class5. The only misclassified instances are the raisins that are difficult to differentiate by just inspecting visual features from a single viewpoint. These failure cases will be discussed in the next section.

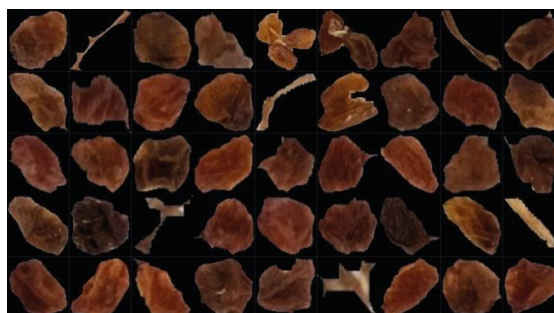


Figure 9. Correctly classified instances of Class5 in the test set.

#### 4.2.1. Limitations

As one can observe in the confusion matrix given in Figure 8, there are incorrect predictions in the first four color classes which are predicted as one of the neighboring classes. This is plausible since their colors are close. It can be tackled by increasing the number of samples per class in the dataset. Nevertheless, there are also a notable amount of misclassified raisins that are predicted as defected raisins although they belong to a color class. Furthermore, most of the false positives and false negatives in Class5 are in Class4. As the color of the raisins in Class4 is black, it is possible to confuse them with foreign matters or defected raisins (See Figure 1). It can also be explained by the fact that since black color reveals any dust or similar defects clearly, Class4 raisins are more prone to be recognized as defected raisins compared to other color classes.

We see that metric values are very close to 100% (Table 4) and prediction accuracy is very high for the 4-class case. Therefore, we speculate that foreign matters and defected raisins deteriorate the prediction performance and one reason behind this is using 2D images of the raisins from a single viewpoint. Raisins that are practically lacking in flesh with a very small mass are typical members of Class5. We refer such kind of raisins as "empty raisins" in the rest of the paper. In Figure 10, sample misclassifications because of empty raisins are shown. Raisins in the first row are predicted as Class5, although they are not empty. Conversely, in the second row, there are actually empty raisins but predicted as one of the color classes. As seen from the figure, their color properties are very similar to each other but their mass is different. In such cases, 2D images are not sufficient to detect defected raisins and alternative methods are needed such as taking images from several views, using infrared cameras, or incorporating mass information into the prediction algorithm.

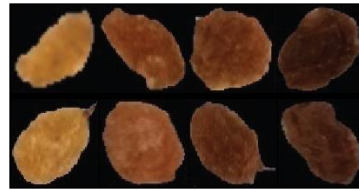


Figure 10. Samples of misclassification due to empty raisins. First row: Actually not empty but predicted as empty. Second row: Actually empty but predicted as Class1, Class2, Class3, and Class4 respectively.

Another typical misclassification reason is illustrated in Figure 11. These raisins look mottled from this view. They are predicted worse than their labels and assigned to the neighboring class. In this respect, our system may be considered as low-tolerant to mottles. We also think that different sides of raisins may produce different class predictions. It is even possible that experts would annotate raisins differently if they checked them from opposite sides.

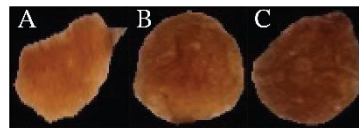


Figure 11. Samples of misclassification due to mottled raisins. A) Label: Class1, Prediction: Class2. B) Label: Class2, Prediction: Class3. C) Label: Class3, Prediction: Class4.

At this point, it is pertinent to note that an inherent problem of supervised machine learning algorithms is their high dependency on the dataset which is eventually annotated by human experts. Although experts perform the annotation according to the standards, vague expressions such as "light yellow, brownish, etc." in the standards lead to subjective annotations. We are planning to suppress this problem and improve the prediction accuracy by increasing the size of our dataset to obtain better generalization for the model and the number of experts for labeling to reduce human factor. Nevertheless, updating the standards to make the terms more quantifiable would be a better solution. We believe that our machine prototype will also make way for such a good standardization in the medium term.

#### 4.2.2. Comparison to Related Work

We also compare our results to the related studies in the literature and these results are tabulated in Table 5. By inspecting the table, we can say that our results are on par with the results of state-of-the-

art studies in terms of prediction accuracy. However, it is not fair to directly compare these studies since their target classes and standards are quite different. Although the prediction accuracy for the 5-class case is relatively low, this is still a promising result since the model also includes foreign matters and defected raisin class. The superior aspects of our study can be summarized as follows:

- It covers defected raisins and foreign matters in addition to color classes. Therefore, it has a diverse dataset.
- It is the first study that applies deep learning methods in the problem of quality classification of raisins, as far as we know.
- It does not require manual feature extraction thanks to the CNN classification method.
- The size of the dataset is larger than most of the datasets in other studies.
- It has a general-purpose hardware component that can be used for taking images of other objects under standard illumination conditions.

Table 5. Comparison to other studies. The studies who used classes defined by a national standard are indicated with the issuing country in parentheses.

Study	Target classes	Method(s)	Accuracy
Omid et al. [8]	2 classes: Good and bad	Rule-based	96%
Wang et al. [9]	4 classes (China)	PLS, LDA, SIMCA, LSSVM	99%
Yu et al. [10]	4 classes (China)	LSSVM	95%
Angadi et al. [13]	7 classes (India)	ANN	95%
Mollazade et al. [14]	4 classes: Green and black (with and without stem)	MLP, SVM, Bayesian, DT	96%
Karimi et al. [15]	Classes based on mixture percentages	ANN, SVM	93%
Our (5-class)	5 classes: 4 color classes + defected raisins and foreign matters (Türkiye)	CNN	88%
Our (4-class)	4 color classes (Türkiye)	CNN	99%

## 5. Conclusion

In this paper, we propose a simple device and an algorithm for determining the quality class of seedless raisins. We have designed a hardware module that helps taking photos of raisins under standard illumination and background conditions. RGB images of raisins are cropped using several image processing operations and they are used for training a CNN model that predicts the quality class of the raisin. We obtain about 88% prediction accuracy for five classes including foreign matters and defected raisins. On the other hand, when foreign matters and defected raisins are excluded, the model achieves almost 99% prediction accuracy. Size features are also extracted to determine the overall quality of the sample and a summary report is provided to the user. We have used Sultana-1 seedless raisins and developed our system based on Turkish standards. However, it is possible to calibrate and train the model to operate on other varieties and standards.

For the future, our first objective is to improve the prediction accuracy by increasing the size and quality of the dataset and fine-tuning the parameters of the CNN architecture. We are also planning to integrate mass and humidity measurement sensors into the system since these are also important factors in determining raisin quality, especially for defected raisins. We have concluded that visual cues alone are not sufficient to detect some kind of defected raisins. Another future work can be designing a conveyor belt which sorts raisins based on detected quality class. In addition to these, a similar system can be developed for measuring the quality of other fruits and grains such as olives, dried figs, and apricots. Our hardware system is already designed flexible enough for general-purpose usage. A similar CNN architecture can be constructed and trained for this purpose.

## Acknowledgements

This work was supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (No: 1919B011803858). The authors would like to thank Güray Oktar from TARIŞ for providing raisin samples and annotating the dataset, Ege Kacar from TEKBAĞ Fidancılık and Ege University Faculty of Agriculture for their guidance.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] H. Ü. Evcim, A. Yazgi, E. Gülsoylu, E. Aykas, B. Çakmak, V. Demir, H. Yürdem, H. Güler, E. Urkan, F. Alayunt, H. Yalçın, H. Bilgen ve T. Günhan, "Tarımsal Mekanizasyonda Mevcut Durum ve Gelecek," *Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi, 2020*, ss. 497-526.
- [2] S. S. Sajid and G. Hu, "Optimizing Crop Planting Schedule Considering Planting Window and Storage Capacity," *Frontiers in Plant Science*, vol. 13, pp. 762446, 2022. doi: 10.3389/fpls.2022.762446
- [3] E. A. Abioye, O. Hensel, T. J. Esau, O. Elijah, M. S. Z. Abidin, A. S. Ayobami, O. Yerima and A. Nasirahmadi, "Precision irrigation management using machine learning and digital farming solutions," *AgriEngineering*, vol. 4, no. 1, pp. 70-103, 2022. doi: 10.3390/agriengineering4010006
- [4] J. G. A. Barbedo, "Detecting and classifying pests in crops using proximal images and machine learning: A review," *AI*, vol. 1, no. 2, pp. 312-328, 2020. doi: 10.3390/ai1020021
- [5] E. J. Van Henten, J. Hemming, B. A. J. Van Tuijl, J. G. Kornet, J. Meuleman, J. Bontsema and E. A. Van Os., "An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses," *Autonomous robots*, vol. 13, no. 2, 241-258, 2002. doi: 10.1023/A:1020568125418
- [6] X. Zhang, J. Yang, T. Lin, Y. Ying, "Food and agro-product quality evaluation based on spectroscopy and deep learning: A review," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 112, pp. 431-441, 2021. doi: 10.1016/j.tifs.2021.04.008
- [7] S. Jagtap, F. Bader, G. Garcia-Garcia, H. Trollman, T. Fadji, K. Salonitis, *Food logistics 4.0: Opportunities and challenges. Logistics*, vol. 5, no. 1, 2020. doi: 10.3390/logistics5010002
- [8] T. Halstead, "Raisins: World Markets and Trade," *Foreign Agricultural Service U.S. Department of Agriculture*, 2018. Available: <https://www.fas.usda.gov/data/raisins-world-markets-and-trade>. [Accessed: 20.01.2023].
- [9] A. Kayabasi, A. Toktas, K. Sabanci and E. Yigit, "Automatic classification of agricultural grains: Comparison of neural networks," *Neural Network World*, vol. 28, no. 3, pp. 213-224, 2018. doi: 10.14311/nnw.2018.28.013
- [10] K. Sabanci, A. Toktas and A. Kayabasi, "Grain classifier with computer vision using adaptive neuro-fuzzy inference system," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 97, no. 12, pp. 3994-4000, September 2017. doi: 10.1002/jsfa.8264
- [11] P. P. Prasobh Kumar, C.R. Francis and S.S. Gorthi, "Automated quality assessment of cocoons using a smart camera based system," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 11, no. 4, pp. 202-210, 2018. doi: 10.1016/j.eaef.2018.05.002
- [12] K. Rai, M. Dutta and S. Aggarwal, "A Grading System For Fruits Maturity Using Neural Networks Approach," *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 2, no. 6, pp. 451-454, 2011. doi: 10.26483/ijarcs.v2i6.868
- [13] J. A. Kodagali and S. Balaji, "Computer vision and image analysis based techniques for automatic characterization of fruits-a review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 451-454, 2012. doi: 10.5120/7773-0856
- [14] M. P. Raj and P. Swaminarayan, "Applications of image processing for grading agriculture products," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, no. 3, pp. 1194-1201, March 2015. doi: 10.17762/ijritcc.v3i3.4000
- [15] D. Saha and A. Manickavasagan, "Machine learning techniques for analysis of hyperspectral images to determine quality of food products: A review," *Current Research in Food Science*, vol. 4, pp. 28-44, 2021. doi: 10.1016/j.crfs.2021.01.002
- [16] H. Chopra, H. Singh, M. S. Bamrah, F. Mahubani, A. Verma, N. Hooda, P. S. Rana, R. K. Singla and A. K. Singh, "Efficient fruit grading system using spectrophotometry and machine learning approaches," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 16162-16169, 2021. doi: 10.1109/JSEN.2021.3075465
- [17] I. Cinar, M. Koklu and S. Tasdemir, "Classification of Raisin Grains Using Machine Vision and Artificial Intelligence Methods," *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol. 6, no. 3, pp. 200-209, December, 2020, doi: 10.30855/gmbd.2020.03.03
- [18] S. Kılıçarslan, "Kurum Üzüm Tanelerinin Sınıflandırılması İçin Hibrit Bir Yaklaşım", *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, cilt 4, sayı 1, ss. 62-71, 2022, doi:10.46387/bjesr.1084590
- [19] I. Terzi, "Derin Öğrenme Teknikleri ile Üzüm Çeşitlerinin Belirlenmesi," Doktora Tezi, Biyosistem Mühendisliği, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, 2023.
- [20] J. Guo, C. Chen, C. Chen, E. Zuo, B. Dong, X. Lv and W. Yang, "Near-infrared spectroscopy combined with pattern recognition algorithms to quickly classify raisins," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 7928, 2022. doi: 10.1038/s41598-022-12001-1
- [21] M. Omid, M. Abbasgolipour, A. Keyhani and S. S. Mohtasebi, "Implementation of an efficient image processing algorithm for grading raisins," *International Journal of Signal and Image Processing*, vol. 1, no. 1, pp. 31-34, 2010.

- [22] S. Wang, K. Liu, X. Yu, D. Wu and Y. He, "Application of hybrid image features for fast and non-invasive classification of raisin," *Journal of Food Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 531-537, 2012. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.10.028
- [23] X. Yu, K. Liu, D. Wu and Y. He, "Raisin quality classification using least squares support vector machine (LSSVM) based on combined color and texture features," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 1552-1563, 2012. doi: 10.1007/s11947-011-0531-9
- [24] S. P. Pawar and A. Sarkar, "Cost Effective Grading Process for Grape Raisins based on HSI and Fuzzy Logic Algorithms," *International Journal of Computer Applications*, vol. 67, no. 22, pp. 18-22, April 2013.
- [25] X. Li and X. Liu, "Detection Level of Raisins Based on Neural Network and Digital Image," *2011 Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System*, pp. 1-3, 2011. doi: 10.1109/PACCS.2011.5990209
- [26] S. A. Angadi and N. Hiregoudar, "A Cost Effective Algorithm for Grading Raisins Using Image Processing," *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, vol. 2, pp. 2455-1457, 2016.
- [27] K. Mollazade, M. Omid and A. Arefi, "Comparing data mining classifiers for grading raisins based on visual features," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 84, pp. 124-131, June 2012. doi: 10.1016/j.compag.2012.03.004
- [28] N. Karimi, R. R. Kondrood and T. Alizadeh, "An intelligent system for quality measurement of Golden Bleached raisins using two comparative machine learning algorithms," *Measurement*, vol. 107, pp. 68-76, September 2017. doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.009
- [29] M. Khojastehnazhand and H. Ramezani, "Machine vision system for classification of bulk raisins using texture features," *Journal of Food Engineering*, vol. 271, no. 3, pp. 109864, April 2020. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109864
- [30] Y. Zhao, X. Xu and Y. He, "A Novel Hyperspectral Feature-Extraction Algorithm Based on Waveform Resolution for Raisin Classification," *Applied Spectroscopy*, vol. 69, no. 12, pp. 1194-1201, 2015.
- [31] K. G. Shinde and B. G. Patil, "Sorting of raisins using computer vision approach," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 6, pp. 2540-2544, June 2017.
- [32] M. Abbasgholipour, M. Omid and A. Keyhani, "Color image segmentation with genetic algorithm in a raisin sorting system based on machine vision in variable conditions," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 3671-3678, April 2011. doi: 10.1016/j.eswa.2010.09.023
- [33] TSE Ziraat İhtisas Grubu, "Seedless raisin (TS 3411)," *Turkish Standards Institution*, vol. TR3411, 2011.
- [34] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, January 1979.
- [35] Y. LeCun, Y. Bengio and G. E. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, May 2015. doi: 10.1038/nature14539
- [36] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," *Communications of the ACM*, vol. 60, no. 6, pp. 84-90, June 2017. doi: 10.1145/3065386
- [37] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke and A. Rabinovich, "Going Deeper With Convolutions," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, USA, June 7-12, 2015*, pp. 1-9.
- [38] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, A. Rabinovich, "Imagenet: A large-scale hierarchical image database," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Miami, FL, USA, June 20-25, 2009*, pp. 248-255.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Elastic Analysis of Functionally Graded Rotating Spherical Pressure Vessels

Durmuş Yarımabuç<sup>a</sup>, Mehmet Eker<sup>b</sup>, Aybegüm Çalışkan<sup>c</sup>

Submitted: 16.04.2023 Revised: 10.07.2023 Accepted: 04.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705080

### ABSTRACT

**Keywords:** Thick-walled sphere, rotating sphere, Functionally graded materials, Halpin-Tsai method, Pseudospectral Chebyshev method

<sup>a</sup> Osmaniye Korkut Ata University,  
Faculty of Arts and Sciences,  
Dept. of Mathematics  
80000 - Osmaniye, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-8763-1125

<sup>b</sup> Tarsus University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Mechanical Engineering  
33400 - Mersin, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-6785-1710  
e mail: mehmeteker@tarsus.edu.tr

<sup>c</sup> Osmaniye Korkut Ata University,  
Faculty of Arts and Sciences,  
Dept. of Mathematics  
80000 - Osmaniye, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-8515-7466  
e mail: aybegum.mat@gmail.com

\*Corresponding author:  
durmusyarimpabuc@osmaniye.edu.tr

**Anahtar Kelimeler:** Kalın cidarlı küre, Dönen küre, Fonksiyonel dereceli malzemeler, Halpin-Tsai yöntemi, Pseudospektral Chebyshev yöntemi

In this study, elastic analysis of functionally graded rotating hollow spherical pressure vessels is investigated. It is assumed that the material properties of these structures, thought to be formed gradually from a mixture of metal and aluminum in the radial direction, are graded using the Halpin-Tsai homogenization scheme. These conditions result in an variable coefficient boundary value problem that may difficult to be solved by conventional analytical methods. The solution to this problem is handled by the Pseudospectral Chebyshev Method. Based on the differential matrix approach, this method transforms the differential equation into a linear equation system, making it easily solvable by any decomposition method. The solutions available in the literature are used to validate the results. The effects of internal pressure and rotation with a mixture of randomly selected metal and aluminum on the stress and displacement distributions are demonstrated.

## Kalın Cidarlı Fonksiyonel Dereceli Dönen Küresel Basıncılı Kapların Elastik Analizi

### ÖZ

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş, dönen, kalın cidarlı küresel basınçlı kaplar elastik olarak incelenmiştir. Radyal doğrultuda metal ve alüminyum karışımından oluşan kürenin malzeme özelliklerinin Halpin-Tsai homojenleştirme şeması kullanılarak derecelendirildiği varsayılmıştır. Bu koşullar, geleneksel analitik yöntemlerle çözülmesi zor, değişken katsayılı sınır değer problemi ile sonuçlanır. Problemin çözümü pseudospektral Chebyshev yöntemi ile ele alınmıştır. Diferansiyel matris yaklaşımına dayanan bu yöntem, diferansiyel denklemi doğrusal bir denklem sistemine dönüştürerek herhangi bir ayrıştırma yöntemiyle kolayca çözülebilir hale getirir. Elde edilen sonuçları doğrulamak için literatürde mevcut analitik çözümler kullanılmıştır. Rastgele seçilen metal ve alüminyum karışımı ile iç basınç ve döndürmenin gerilme ve yer değiştirme dağılımları üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

## 1. Giriş (Introduction)

Kalın cidarlı basınçlı kaplar kimya, petrol, nükleer ve havacılık alanlarında yaygın kullanım alanına sahip ekipmanlardır. Genellikle silindirik ve küresel geometriye sahip olan kalın cidarlı kaplar, birçok mühendislik tasarımında ortak bir yapısal bileşen olarak kullanılmaktadır. İç/dış basınç, sıcaklık, döndürme ve manyetik alan gibi etkilerin bir veya birden çoğunun etkisinde çalışan bu tür mühendislik elemanları, yapısal başarımlarını belirleyecek yer değiştirme, gerinim ve gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, bu yapıların malzeme tasarımları yüksek basınç/sıcaklık, korozif ortamlar, dönme ve kırılmaya da dayanacak şekilde yapılmalıdır.

Teknolojideki hızlı ilerleme, mühendislik elemanları için de zorlu işletme koşullarını beraberinde getirmektedir. Bu durum da tasarımların daha özgün olmasını ve tercih edilecek malzemelerin daha yetkin olmasını gerekli kılmaktadır. Özelliklerinde dereceli bir değişim sergileyen fonksiyonel dereceli malzemeler hem yapı için hem de çevresel koşullara dayanıklı tabakalı kompozitlere alternatif olarak geliştirilmeye ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır [1-3]. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin bileşimi homojen olmadığı için elastisite modülü, Poisson oranı, yoğunluğu ve akma dayanımı gibi tüm özellikleri makroskobik anlamda bir yüzeyden diğerine sürekli değişebilmektedir. Özel kompozit sınıfı malzeme kategorisinde yer alan ve üretimi daha zor olan bu malzemelerin üretilmeden önce özelliklerinin iyi tanımlanması gerekmektedir. Genellikle metal-seramik ve metal-metal kombinasyonları şeklinde oluşan bu malzemelerin özelliklerinin etkili bir şekilde tahmin edilmesinde birçok malzeme modeli mevcuttur ve yeni modeller oluşturmak için araştırmalar devam etmektedir [4-6]. Katı mekaniği bakış açısından da fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FGM'ler) homojen olmayan elastik ortamlardır.

Literatürde fonksiyonel derecelendirilmiş küresel basınçlı kapların elastik analizi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda analitik çözüm ancak Poisson oranını sabit tutulması ve derecelendirme için belirli fonksiyonların (kuvvet/üstel) seçilmesi ile mümkündür [7, 12]. Benzer kabullerle Çelebi, ve ark., eksponansiyel derecelendirilmiş kürenin ısilelastik analizini tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile sayısal olarak yapmışlardır [13]. Elastik modülü ile yoğunluk özelliklerinin aynı oranda derecelendirildiği varsayılan bu çalışmalar, matematiksel olarak mümkün olmasına karşın, fiziksel olarak böyle bir malzemenin tanımlanması konusunda zorluk yaşanmaktadır. Bunlarla birlikte literatürde, sadece sabit bir açısız hızla dönen [14], sadece manyetik alana maruz [15] ve her ikisinin etkilerini [16] dikkate alan elastik analizler de tartışılmıştır. Chen ve Lin, çeşitli fonksiyonlarla (eksponansiyel, üstel, sinüzoidal vb.) derecelendirildiği varsayılan kalın silindir ve kürenin elastik analizini yer değiştirme fonksiyonunu temel alan sayısal bir entegrasyon yöntemi ile yapmışlardır [17], [18]. İç ve dış yüzeyleri arasındaki bölgenin seramikten metale farklı karışım oranlarına göre derecelendirilen içi boş silindir, disk ve küresel basınçlı kapların aksel simetrik yer değiştirme ve gerilme analizleri, düzlem elastisite teorisi kullanılarak Tütüncü ve Temel tarafından sayısal olarak yapılmıştır [19]. Fonksiyonel derecelendirilmiş dönen küresel basınçlı kaplar Shrivastava ve ark., tarafından durağan toplam potansiyel prensibine dayanan sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir [20]. Çalışmada, malzeme özellikleri Mori-Tanaka şeması ile radyal yönde derecelendirilmiştir. Derecelendirmenin kürenin yer değiştirme, gerinim ve gerilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış ve metal-seramik karışımı içeren küredeki farklı derecelendirme parametrelerinin sonuçlara etkisi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Homojen küreye kıyasla, fonksiyonel derecelendirmenin kürenin yer değiştirme ve gerilmenin azalmasına katkı sağladığını gözlemlemişlerdir. Arslan ve Marc, iç basınç ve homojen ısıtma altındaki fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş elastik küresel yapılarıdaki parametre belirsizliklerinin sıcaklık ve gerilme dağılımları üzerindeki etkileri incelemişlerdir [21]. Son zamanlarda Yıldırım ve ark. [22], Halpi-Tsai homojenizasyon şemasını kullanarak derecelendirdikleri kürenin ısilelastik davranışını incelemişlerdir. Metal/seramik karışımından oluşan kürenin tüm malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı olarak ele alınmış, bundan dolayı ortaya çıkan doğrusal olmayan diferansiyel denklem sisteminin çözümünü pseudospektral Chebyshev yöntemi ile elde etmişlerdir.

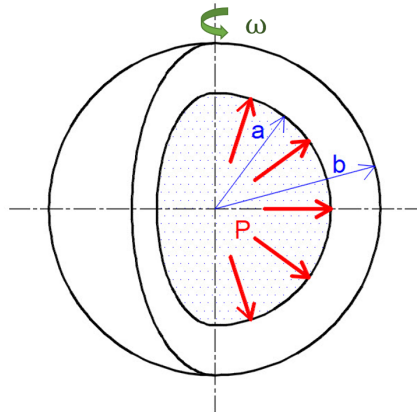
Bu çalışmada, sabit bir açısız dönme ve iç basınç etkisi altındaki fonksiyonel dereceli küresel basınçlı kaplar incelenmiştir. Radyal doğrultuda malzeme özelliklerini etkin bir şekilde tahmin edebilmek için, deneysel verilerle uyumlu Halpin-Tsai modeli [21-23] kullanılarak kürenin metal-metal karışımından oluşacak şekilde derecelendirildiği varsayılmıştır [24, 25]. Bu koşullar altında elde edilen değişken katsayılı sınır değer probleminin çözümü, diferansiyel matris yaklaşımına dayanan pseudospektral Chebyshev yöntemi ile doğrusal bir denklem sistemine dönüştürülmüştür [15, 26-28]. Bu lineer denklem sistemine, problemin sınır koşulları entegre edildikten sonra uygun bir ayrıştırma yöntemi ile aşık olmayan çözüm elde edilmiştir.



Keyfi seçilen paslanmaz çelik ve alüminyum karışımı malzeme çiftinin ve döndürmenin, yer değiştirme, gerinim ve gerilme dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. Temel Formülasyon (Basic Formulation)

Sabit bir açısal hızla ( $\omega$ ) dönen, içi boş, kalın cidarlı, işlevsel derecelendirilmiş bir kürenin elastik analizi problemi ele alınmıştır. Mühendislik açısından özellikleri birbirinden farklı iki metalin derecelendirilerek oluşturduğu kürenin aynı zamanda iç basınca ( $P$ ) maruz kaldığı varsayılmaktadır. Probleme ait küre kesiti Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. İşlevsel derecelendirilmiş, içi boş, kalın cidarlı kürenin kesiti (Cross-section of a functionally graded, hollow, thick-walled sphere)

Kürenin malzeme bileşiminin radyal doğrultu boyunca düzgün bir şekilde değiştiği varsayılmaktadır. İç yüzeyde çelik ve dış yüzeyde alüminyum olan bu yapıların bileşenlerinin hacim oranları, basit bir kuvvet yasasına göre aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$V_s(r) = \left(\frac{r-b}{a-b}\right)^k, \quad V_a(r) = 1 - V_s(r) \quad (1)$$

Burada  $V_s$  ve  $V_a$  sırasıyla çelik ve alüminyumun hacim oranlarını gösterirken,  $k$  ( $\geq 0$ ) hacim oranı indeksini ifade eder. Hacim oranı indeksinin sıfır ( $k = 0$ ) (1) olarak alınması durumunun tamamen çelikten oluşan homojen bir malzemeye karşılık geldiği kolaylıkla görülebilir. Halpin-Tsai homojenizasyon şeması, deneysel verilerle eğri uydurarak geliştirilen ampirik denkleme dayalı olarak malzemelerin derecelendirilmesinde kullanılmaktadır [21], [23].

$$P(r) = P_s \left(\frac{1+\xi\eta V_a}{1-\eta V_a}\right), \quad \eta = \frac{P_a/P_s - 1}{P_a/P_s + \xi} \quad (2)$$

Burada  $P$ , elastik modül, yoğunluk ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerine karşılık gelmektedir. Halpin-Tsai homojenizasyonundaki  $\xi$  elyaf geometrisine bağlı bir parametre olup, derecelendirilmiş malzeme oluşturulurken kullanılan parçacığın, uzunluğunun genişliğine oranının iki katına eşittir. Bu çalışmada parçacığın dairesel/kare şeklinde (uzunluk/genişlik=1) olduğu varsayılmış ve  $\xi = 2$  alınmıştır [6]. Kalın cidarlı küresel kabın, sabit bir açısal döndürme ile iç cidarında sabit basınç altında olduğu ve dış cidarında herhangi bir etkinin olmadığı (traction free) durumda gerilme dağılımları elastik olarak incelenmektedir. Bu durumu tanımlayan sınır koşulları aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\sigma_r(a) = -P, \quad \sigma_r(b) = 0 \quad (3)$$

Kürenin iç cidarının ( $r = a$ ) mukavemete dayanıklı saf çelik ve dış cidarının duvarın ( $r = b$ ) daha hafif olan saf alüminyum olduğu varsayılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş kalın cidarlı kürenin, düzlem gerinim koşulu varsayımı altında aksel simetrik olduğu varsayılır. Simetrik yer değiştirme durumunda yer değiştirme ( $u$ ) sadece radyal ( $r$ ) yönde gerçekleşir. Küresel koordinatlarda kürenin ( $r, \theta, \varphi$ ) gerinim-yer değiştirme denklemleri [14]:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_\phi = \frac{u}{r} \quad (4)$$

ile gerilme-gerinim denklemleri [14],

$$\sigma_r = C_{11}(r)\varepsilon_r + C_{12}(r)\varepsilon_\theta + C_{12}(r)\varepsilon_\phi \quad (5a)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi = C_{12}(r)\varepsilon_r + C_{11}(r)\varepsilon_\theta + C_{12}(r)\varepsilon_\phi \quad (5b)$$

ve  $C_{11}$  ve  $C_{12}$  katsayıları,

$$C_{11}(r) = \frac{E(r)(1-\nu(r))}{(1+\nu(r))(1-2\nu(r))} \quad C_{12}(r) = \frac{E(r)\nu(r)}{(1+\nu(r))(1-2\nu(r))} \quad (6)$$

şeklinde. Sabit bir dönüş altında küresel basınçlı kabın denge denklemi şu şekildedir:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} + \rho w^2 r = 0 \quad (7)$$

Gerilme-yer değiştirme (4) ve gerilme-gerinim denklemlerini (5) gerilme denge denkleminde (7) yerine koyarak, yer değiştirmelere bağlı değişken katsayılarla sahip homojen olmayan ikinci dereceden adi diferansiyel denklem aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u'' + \left[ \frac{C'_{11}}{C_{11}} + \frac{2}{r} \right] u' + \left[ \frac{C'_{12}}{C_{11}} \frac{2}{r} - \frac{2}{r^2} \right] u = -\frac{\rho w^2 r}{C_{11}} \quad (8)$$

Radyal gerilmeye bağlı sınır koşulları (3) ve gerilme-gerinim denklemi (5a) kullanılarak, yer değiştirmeler cinsinden sınır koşulu denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[C_{11}(r)u' + 2C_{12}(r)u/r]_{r=a} = -P \quad (9a)$$

$$[C_{11}(r)u' + 2C_{12}(r)u/r]_{r=b} = 0. \quad (9b)$$

### 3. Pseudospektral Chebyshev Yöntemi (Pseudospectral Chebyshev Method)

Tanımlanan problemin çözümü, birinci tip Chebyshev polinom yaklaşımına dayanan pseudospektral Chebyshev yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Periyodik olmayan aralıklar için tercih edilen bu yöntemde örgü (kollokasyon) noktalarında interpolasyonu sağlamak için ayrık fonksiyon yaklaşımı kullanılır. Bu tür yaklaşımlar, interpolasyonda eşit aralıklı noktalar kullanıldığında ve trigonometrik polinom yerine cebirsel polinom tercih edildiğinde, yakınsama kötüleşir ve yeterinde hassas sonuçlar veremezler. Bu nedenle, hatayı en aza indirecek bir nokta dağılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Chebyshev-Gauss-Lobatto noktaları, sınıra yakın yerlerde daha sık, sınırın uzağında nispeten daha seyrek nokta dağılımı yaparak bu ihtiyaca cevap verebilmektedir.

$$r_j = \cos(j\pi/N), \quad j = 0, 1, \dots, N \quad (10)$$

Chebyshev-Gauss-Lobatto bu özelliğini, noktaları eşit aralıklı olarak yarım çember üzerinde yerleştirmesinden ve bu noktaların yatay ekseninde gerçekleşen izdüşümlerinden almaktadır. Tayin edilen bu noktalar Lagrange interpolasyon polinomunda  $[-1, 1]$  aralığında  $(N + 1) \times (N + 1)$  boyutunda bir Diferansiyel Matris ( $D_N$ ) oluşturmak için kullanılırlar. Chebyshev diferansiyel matrisinin oluşturulma aşamaları Trefethen'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır [26].

Chebyshev diferansiyel matrisi, vektörlerin türevlerine yüksek hassasiyetli yaklaşımlar sunar. Öyleki, yer değiştirme vektörünün ( $u$ ) sol taraftan diferansiyel matris ile bir kere çarpılması birinci türevi ( $u' = D_N u$ ), iki kere çarpılması ikinci türeve ( $u'' = D_N^2 u$ ), üç kere çarpılması üçüncüye ( $u''' = D_N^3 u$ ) karşılık gelmektedir. Chebyshev diferansiyel matrisinin kurulum adımları ve Matlab paket program kodları için bkz. [26]. Bu hesaplama işleminde Chebyshev polinomları  $[-1, 1]$  aralığında tanımlandığı için oluşturulan örgü noktaları ve diferansiyel matris bu aralıkta elde edilmektedir. Basit bir değişken ikamesi ile  $[-1, 1]$  aralığı, keyfi bir  $[a, b]$  aralığına dönüştürülebilir.

Sabit açılma hızla ( $w$ ) dönen, fonksiyonel dereceli kalın cidarlı kürenin elastik analizinde elde edilen ikinci dereceden adi diferansiyel denklemdeki (8) türevler, Chebyshev diferansiyel matrisi yardımıyla ( $D_N$ ), matris vektör çarpımı olarak  $u' = D_N u$  ve  $u'' = D_N^2 u$  şeklinde ifade edilir. Bu ifadeler (8) denkleminde yerine yazılarak aşağıdaki gibi bir doğrusal denklem sistemi elde edilir.

$$L_N u = R_N \quad (11)$$

Burada, doğrusal operatör matrisi  $L_N$  ve sağ taraf vektörü  $R_N$ ,

$$L_N = D_N^2 + P(r)D_N + Q(r), \quad R_N = -\frac{\rho w^2 r}{c_{11}} \quad (12)$$

olup, elde edilen doğrusal denklem sisteminde radyal doğrultuya bağlı değişken katsayılar aşağıdaki şekildedir.

$$Q(r) = \left[ \frac{D_N c_{11}}{c_{11}} + \frac{2}{r} \right], \quad P(r) = \left[ \frac{D_N c_{12}}{c_{11}} \frac{2}{r} - \frac{2}{r^2} \right]. \quad (13)$$

Doğrusal denklemler sisteminde (11) sınır koşulları (9) uygulandıktan sonra, herhangi bir ayırıştırma yöntemiyle çözümlenerek aşikâr olmayan bir çözüm elde edilir. Doğrusal denklem sisteminde sınır koşullarını yerleştirme işlemlerinin ayrıntısı için [29]'e başvurulabilir. Metal ve alüminyum ile kürenin radyal doğrultuda derecelendirilmesi ve malzeme özelliklerinin tayini Halpin-Tsai homojenleştirme şeması kullanılarak yapılmaktadır. Bu koşullar, geleneksel analitik yöntemlerle çözülmesi zor, değişken katsayılı bir sınır değer problemi ortaya çıkarmaktadır.

#### 4. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

Bu çalışmada, kalın cidarlı küresel basınçlı kapların sabit/değişken açılma hız ve iç basınç altında elastik olarak ele alınmıştır. Paslanmaz çelik ve alüminyum karışımından radyal yönde fonksiyonel olarak oluşturulan kürenin malzeme özelliklerinin tayininde Halpin-Tsai homojenleştirme şeması kullanılmıştır. Probleme ait homojen olmayan değişken katsayılı sınır değer problemi, pseudospektral Chebyshev yöntemi (PCY) ile sayısal olarak çözülmüştür. Kalın cidarlı kürenin iç yarıçapı  $a = 0.6$  ve dış yarıçapı  $b = 1$  olarak alınmıştır. Kürenin homojen (paslanmaz çelik) olması durumuna göre daha hafif bir yapı elde etmek üzere tasarlanan metal-metal karışımının malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Derecelendirmede kullanılan malzemelerin özellikleri (Properties of materials used in grading) [30]

Malzeme	$E$ (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$
Paslanmaz Çelik (SUS 304)	207.899	8166	0.318
Alüminyum (Al)	70	2702	0.3

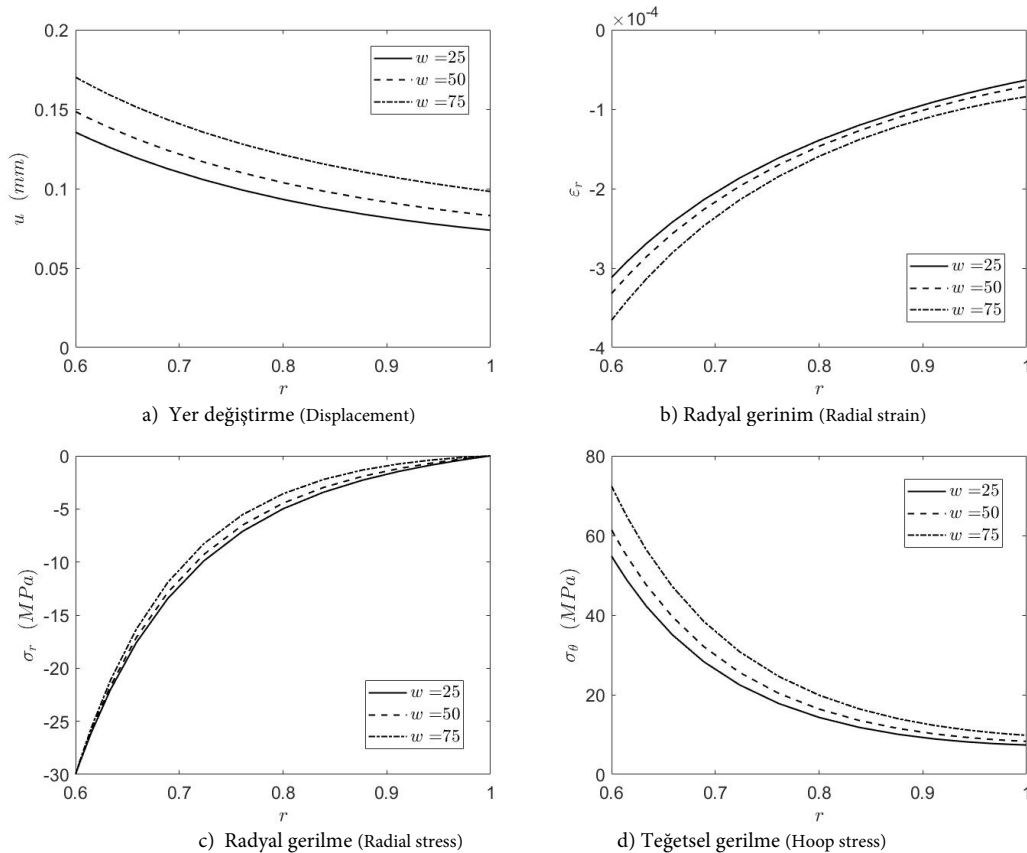
Çalışmada kullanılan sayısal yöntemin hassasiyetini test edebilmek için Kaçar'ın [14] küresel basınçlı kaplar için yaptığı analitik çalışma çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Referans çalışmada, sonuçlara etkisi çok az olduğunu düşünülen Poisson oranı sabit alınmış ve diğer malzeme özellikleri (elastik modül ve yoğunluk gibi) belirli matematiksel modellere göre (üssel değişim gibi) derecelendirilerek analitik çözüm elde edilmiştir. Ancak kullanılan bu modellere dayanan tasarımlar, dereceli malzemeyi fiziksel gerçeklikten uzaklaştırmaktadır. Bu sebeple, deneye dayalı verilere uyumlu olduğu gösterilen Halpin-Tsai modeli [21], [23] ile kürenin tüm malzeme özelliklerinin derecelendirilmesi bu çalışmayı literatürdeki çalışmalardan farklılaştırmaktadır.

Kaçar'ın [14] çalışmasında, kürenin iç ve dış yarıçapları sırasıyla  $a = 0,5$  m ve  $b = 1$  m, seramik iç duvardaki malzeme özellikleri  $E_a = 116,4$  GPa ve  $\rho_a = 3657$  kg/m<sup>3</sup> ve açılma hızı  $w = 100$  rad/s olarak alınmıştır. Küre, basınçsız ve iç/dış cidarlarda basınçlı halde olmak üzere ayrı ayrı durumlar için ele alınmıştır. Pseudospektral Chebyshev yönteminin Kaçar'ın [14] analitik çözümü ile mukayesesi Tablo 2'de verilmiştir. Dokuz (9) örgü noktası kullanılarak elde edilen PCY çözümünün, analitik çözümle uyum içinde olduğu ve en az altı haneli hassasiyete sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Sabit açılmal hızla dönen fonksiyonel dereceli basınçlı küresel bir kabın yer değiştirme, radyal ve teğetsel gerilmelerinin Kaçar [14] ile mukayesesi (Comparison of displacement, radial and tangential stresses of a functionally graded pressurized spherical vessel rotating with constant angular velocity with Kaçar [14]) ( $P = 0$ )

$r$	$u$		$\sigma_r \times 10^{-9}$		$\sigma_\theta \times 10^{-9}$	
	PÇY	Kaçar [14]	PÇY	Kaçar [14]	PÇY	Kaçar [14]
0.5000	0.000073650	0.000073651	0.000000000	0.000000000	0.024961145	0.024961325
0.5190	0.000071268	0.000071269	0.001432483	0.001435149	0.024616438	0.024617898
0.5732	0.000066008	0.000066009	0.004443375	0.004443312	0.023758554	0.023758852
0.6543	0.000060819	0.000060821	0.006768036	0.006770463	0.022556911	0.022558464
0.7500	0.000056735	0.000056736	0.007198739	0.007198661	0.020928513	0.020929006
0.8457	0.000053399	0.000053401	0.005735368	0.005737665	0.018807212	0.018808853
0.9268	0.000050513	0.000050515	0.003223546	0.003223519	0.016493159	0.016493788
0.9810	0.000048374	0.000048377	0.000921854	0.000924116	0.014635950	0.014637639
1.0000	0.000047566	0.000047568	0.000000000	0.000000000	0.013921446	0.013922122

Fonksiyonel dereceli kürenin sabit iç basınç ( $P = 30 \text{ MPa}$ ) etkisi altında farklı açılmal hızlarda ( $\omega = 25, 50, 75$ ) döndürülmesi esnasında gerçekleşen yer değiştirme, gerinim, radyal ve teğetsel gerilme dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir. Açılmal hız arttıkça yer değiştirmenin (Şekil 2(a)) ve buna bağlı olarak radyal gerinimin (yer değiştirmedeki değişim) (Şekil 2(b)) arttığı gözlenmiştir. Yer değiştirmedeki değişimin iç cidardaki etkisinin dış cidardakine göre daha fazla olmasının nedeni iç cidarda etkin olan basınçtır. Oransal olarak bakıldığında,  $\omega$  değerinin 50 ile 75 olması halinde yer değiştirme ve gerinim sonuçları arasındaki fark, 25 ile 50 olması durumuna göre daha büyük olmaktadır. Bu durum, artan açılmal hızın sonuçlar üzerindeki etkisini göstermektedir. Radyal gerilmeler (Şekil 2(c)) iç basınç sebebiyle cidar boyunca basma yönünde olup, sınır koşullarına uygun şekilde basıncın etki ettiği iç cidarda en büyük değerde, dış cidarda ise sıfır olarak gerçekleşmektedir. Şekil 2(d)'de teğetsel gerilmeler basma yönünde ve tüm hızlar için iç cidarda en büyük değerlerindedir. İç cidardan dış cidara doğru teğetsel gerilmeler hem büyüklük olarak azalmakta hem de farklı hız değerleri arasındaki farklar azalmaktadır. Artan açılmal hızın, her iki gerilmelerde de büyüklükleri arttırdığı görülmektedir (Şekil 2(c)-2(d)).

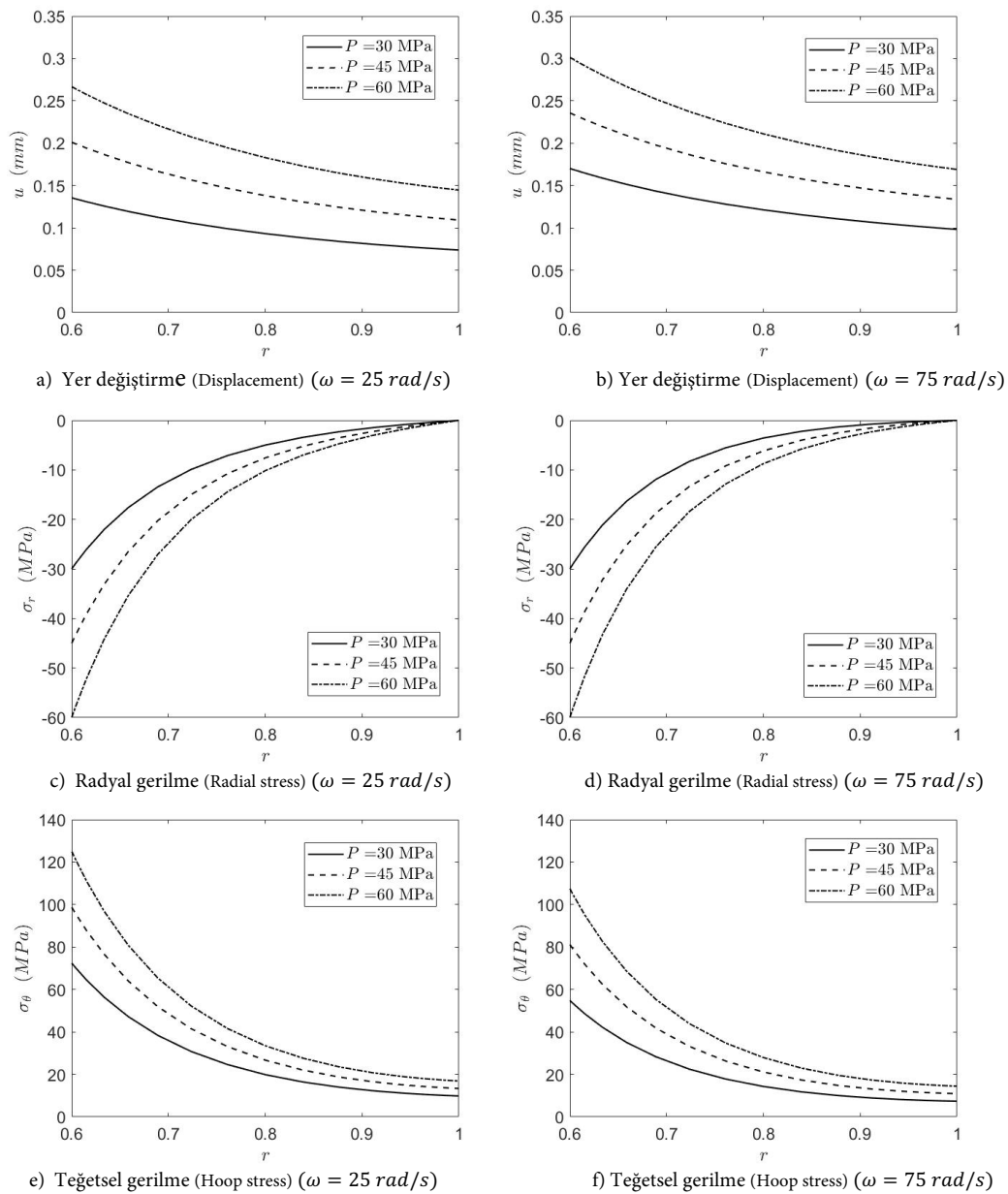


Şekil 2. Farklı açılmal hızların fonksiyonel dereceli kürenin yer değiştirme, gerinim ve gerilmelerine etkisi (Effect of different angular velocities on displacement, strain and stress of a functionally graded sphere) ( $P = 30 \text{ MPa}$ )

Fonksiyonel dereceli kürenin farklı iç basınç değerlerinde ( $P = 30, 45, 60 \text{ MPa}$ ) iki farklı sabit açılmal hızda

( $\omega = 25, 75 \text{ rad/s}$ ) dönmesi durumunda meydana gelen yer değiştirme, radyal ve teğetsel gerilme dağılımları Şekil 3'te verilmiştir. Düşük ve sabit bir açısal hızda ( $\omega = 25 \text{ rad/s}$ ), artan iç basınç, yer değiştirmede (Şekil 3(a)) radyal (Şekil 3(c)) ve teğetsel gerilme (Şekil 3(e)) değerlerinde artış sebep olmakta ve bu artış iç cidarda daha yüksek değerlerde gerçekleşmektedir. Açısal hız  $\omega = 75 \text{ rad/s}$  değerine yükseltildiğinde özellikle yer değiştirme ve teğetsel gerilme büyüklüklerinde önemli artışlar gerçekleştiği gözlenmektedir. Düşük açısal hızda ( $\omega = 25 \text{ rad/s}$ ), iç ve dış cidar arasındaki radyal yöndeki ortalama (üç basınç durumu için) yer değiştirme değişimi yaklaşık 1.84 birim (Şekil 3(a)) iken, bu oran  $\omega = 75 \text{ rad/s}$  açısal hızında (Şekil 3(b)) yaklaşık 1.75 birime gerilemektedir.

Artan iç basınç değerlerinin, küre cidarının her noktasında basma yönündeki radyal gerilme değerlerini (Şekil 3(c)-3(d)) önemli ölçüde arttırdığı gözlemlense de, bu değerlerin açısal hız artışından benzer oranda etkilenmediği görülmektedir. Şekil 3(e)-3(f)'de iki koşulda, iç cidarda en büyük değerlerinde olan teğetsel gerilmeler (çekme yönünde), iç cidardan dış cidara gidildikçe azalmaktadır. Bununla beraber, açısal hız ve iç basınç büyüklüğü arttıkça, teğetsel gerilme değerlerinin arttığı ancak grafiklerin genel eğiliminin bozulmadığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 3. Farklı iç basınçların, iki farklı sabit açısal hızla dönen fonksiyonel dereceli kürenin yer değiştirme, gerilim ve gerilmelerine etkisi (Effect of different internal pressures on the displacement, strain and stress of a functionally graded sphere rotating at two different constant angular velocities) ( $\omega = 25, 75 \text{ rad/s}$ )

Bu analizlere ek olarak, kürenin iç ve dış cidarları arasındaki radyal gerilim ve teğetsel gerilme oranları

incelenmiş ve Tablo 3’de sunulmuştur. Açısal hız arttıkça, iç ve dış cidarlar arasındaki radyal gerinim ve teğetsel gerilme oranlarının azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Radyal gerinime kıyasla, teğetsel gerilmelerdeki değişim oranları arasında daha az fark olduğu gözlenmektedir.

Tablo 3. Artan açısal hızlar için fonksiyonel dereceli sabit basınçlı kürenin iç ve dış cidarı arasındaki radyal gerinim ve teğetsel gerilmelerin değişim oranı (Rate of change of radial strain and tangential stresses between the inner and outer wall of a functionally graded constant pressure sphere for increasing angular velocities) ( $P = 30 \text{ MPa}$ )

Açısal Hız (rad/s)	Radyal Gerinim	Teğetsel Gerilme
25	4.9274	7.4266
50	4.6686	7.4043
75	4.3441	7.3763

## 5. Bulgular ve Tartışma (Conclusion and Discussion)

Bu çalışmada, sabit açısal hız ve iç basınç altında kalın cidarlı küresel basınçlı kap problemi elastik olarak çözülmüştür. Kürenin radyal doğrultudaki derecelendirilmesi Halpin-Tsai şeması yardımıyla paslanmaz çelik ve alüminyum karışımı ile yapılmıştır. Probleme ait bünye denklemi pseudospektral Chebyshev yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Yöntemin doğruluğu, literatürde analitik çözümü mevcut, Poisson oranı sabit olan ve kuvvet kuralı ile derecelendirilen bir küre çalışmasıyla doğrulanmıştır. Bu varsayımlar matematiksel olarak uygun olsa da, tasarlanan malzemeyi gerçeklikten uzaklaştırmaktadır. Bu çalışmanın özgünlüğü, deneysel verilerle uyumlu olduğu gösterilen Halpin-Tsai modelinin kullanılması ve PCY kullanımının yüksek hassasiyetli çözümler sağlamasına dayanmaktadır. Kürenin mekanik davranışı, sabit basınç altında farklı açısal hızlarda ve sabit açısal hızda farklı basınçlar altında ayrı ayrı incelenmiştir. Son olarak, çalışma aşağıdaki gibi bazı önemli bulguları ortaya koymaktadır:

- Sabit iç basınç altında, açısal hızdaki artış küre cidarındaki yer değiştirmeleri ve gerinimleri arttırmaktadır. Bu koşulda yer değiştirmeler ve gerinimler iç cidarda en büyük değerlerindedir.
- Radyal gerilmeler her durumda basma yönünde olup artan iç basınç ve açısal hızla artmaktadır. Bu artış açısal hız değişimi için görece azdır.
- Teğetsel gerilmeler çekme yönünde olup her iki koşulda iç cidardan dış cidara azalan bir eğri oluşturmaktadır. Açısal hız ve iç basıncın artması teğetsel gerilme büyüklüklerini arttırmaktadır.
- Sabit açısal hız durumunda, iç basınç arttıkça yer değiştirme, radyal ve teğetsel gerilme değerlerinde artış olmakta ve bu artış iç cidarda daha fazla görülmektedir. Aynı koşullarda açısal hız arttırıldığında ise sonuçlar benzer eğilimde elde edilmekle birlikte sayısal büyüklük olarak artmaktadır. Bu durum iç cidar cidarında daha belirgin olarak gerçekleşmektedir.

## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] F. Erdogan, "Fracture mechanics of functionally graded materials," *Composites Engineering*, vol. 5, no. 7, 1995, doi:10.1016/0961-9526(95)00029-M
- [2] M. Koizumi, "FGM activities in Japan," *Composite Part:B Engineering*, vol. 28, no. 1–2, pp. 1–4, Jan. 1997, doi:10.1016/S1359-8368(96)00016-9
- [3] Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki, and R.G. Ford, *Functionally graded materials design, process, and applications*, USA: Springer, 1999. doi:10.1007/978-1-4615-5301-4
- [4] A. S. Kaddour and M. J. Hinton, "Maturity of 3D failure criteria for fibre-reinforced composites: Comparison between theories and experiments: Part B of WWFE-II," *Journal of Composite materials*, vol. 47, no. 6–7, pp. 925–966, Mar. 2013, doi:10.1177/0021998313478710
- [5] L. L. Vignoli, M. A. Savi, P. M. C. L. Pacheco, and A. L. Kalamkarov, "Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae," *Composite Part:B Engineering*, vol. 174, Oct. 2019, doi:10.1016/j.compositesb.2019.106961

- [6] R. Madan and S. Bhowmick, "Modeling of functionally graded materials to estimate effective thermo-mechanical properties," *World Journal of Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 291–301, 2022. doi:10.1108/WJE-09-2020-0445
- [7] E. Arslan, "Analysis on multi-layered and functionally graded spherical pressure vessels," *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 23, no. 1, pp. 24–35, 2017, doi:10.5505/pajes.2016.56688
- [8] A. N. Eraslan and T. Akis, "Analytical Solutions To Elastic Functionally Graded Cylindrical And Spherical Pressure Vessels," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, vol. 2, no. 10, pp. 2687–2693, 2015.
- [9] M. R. Eslami, M. H. Babaei, and R. Poultangari, "Thermal and mechanical stresses in a functionally graded thick sphere," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 82, no. 7, pp. 522–527, Jul. 2005, doi:10.1016/J.IJPVP.2005.01.002
- [10] M. Z. Nejad, M. Abedi, M. H. Lotfian, and M. Ghannad, "An exact solution for stresses and displacements of pressurized FGM thick-walled spherical shells with exponential-varying properties," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 4081–4087, Dec. 2012, doi:10.1007/s12206-012-0908-3
- [11] N. Tutuncu and M. Ozturk, "Exact solutions for stresses in functionally graded pressure vessels," *Composite Part:B Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 683–686, Dec. 2001, doi:10.1016/S1359-8368(01)00041-5
- [12] L. H. You, J. J. Zhang, and X. Y. You, "Elastic analysis of internally pressurized thick-walled spherical pressure vessels of functionally graded materials," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 82, no. 5, pp. 347–354, May 2005, doi:10.1016/J.IJPVP.2004.11.001
- [13] K. Celebi, D. Yarimpabuc, and I. Keles, "A unified method for stresses in FGM sphere with exponentially-varying properties," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 57, no. 5, pp. 823–835, 2016, doi:10.12989/sem.2016.57.5.823
- [14] İ. Kacar, "Exact elasticity solutions to rotating pressurized axisymmetric vessels made of functionally graded materials (FGM)," *Materwiss Werksttech*, vol. 51, no. 11, pp. 1481–1492, Nov. 2020, doi:10.1002/mawe.202000148
- [15] D. Yarimpabuc and A. Temo, "The Effect of Uniform Magnetic Field on Pressurized FG Cylindrical and Spherical Vessels," *European Mechanical Science*, vol. 3, no. 4, pp. 133–141, Dec. 2019, doi:10.26701/ems.585130
- [16] M. A. Nematollahi, A. Dini, and M. Hosseini, "Thermo-magnetic analysis of thick-walled spherical pressure vessels made of functionally graded materials," *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, vol. 40, no. 6, pp. 751–766, Jun. 2019, doi:10.1007/s10483-019-2489-9
- [17] Y. Z. Chen and X. Y. Lin, "An alternative numerical solution of thick-walled cylinders and spheres made of functionally graded materials," *Computational Materials Science*, vol. 48, no. 3, pp. 640–647, May 2010, doi:10.1016/J.COMMATSCI.2010.02.033
- [18] Y. Z. Chen and X. Y. Lin, "Elastic analysis for thick cylinders and spherical pressure vessels made of functionally graded materials," *Computational Materials Science*, vol. 44, no. 2, pp. 581–587, 2008, doi:10.1016/J.COMMATSCI.2008.04.018
- [19] N. Tutuncu and B. Temel, "A novel approach to stress analysis of pressurized FGM cylinders, disks and spheres," *Composite Structures*, vol. 91, no. 3, pp. 385–390, Dec. 2009, doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2009.06.009
- [20] S. Kumar Shrivastava, L. Sondhi, and J. Kumar Tiwari, "Elastic Analysis of Rotating Spherical Pressure Vessel of Functionally Graded Material Modeled by Mori-Tanaka Scheme," *International Journal of Engineering Research & Industrial Applications*, vol. 9, no. 3, pp. 1–12, 2016.
- [21] E. Arslan, W. Mack, and T. Apatay, "Thermo-mechanically loaded steel/aluminum functionally graded spherical containers and pressure vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 191, 2021, doi:10.1016/j.ijpvp.2021.104334
- [22] A. Yıldırım, D. Yarimpabuc, V. Arikan, M. Eker, and K. Celebi, "Nonlinear thermal stress analysis of functionally graded spherical pressure vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 200, p. 104830, Dec. 2022, doi:10.1016/J.IJPVP.2022.104830
- [23] J. C. Halpin Affdl and J. L. Kardos, "The Halpin-Tsai equations: A review," *Polymer Engineering & Science*, vol. 16, no. 5, pp. 344–352, 1976. doi: 10.1002/pen.760160512
- [24] Y. Fukui, H. Okada, N. Kumazawa, Y. Watanabe, N. Yamanaka, and Y. Oya-Seimiya, "Manufacturing of Al-Al3Fe functionally graded material using the vacuum centrifugal method and measurements of its mechanical properties," *Journal of Japan Institute of Light Metals*, vol. 49, no. 1, pp. 35–40, 1999.
- [25] J. M. Lee, S. B. Kang, T. Sato, H. Tezuka, and A. Kamio, "Microstructures and Mechanical Properties of Al3Fe Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by a Plasma Synthesis Method," *Materials Transactions*, vol. 43, no.10, pp. 2487–2493, 2002.
- [26] L. N. Trefethen, *Spectral Methods in Matlab*. Philadelphia: SIAM, 2000.
- [27] M. Eker, D. Yarimpabuc, and K. Celebi, "Thermal stress analysis of functionally graded solid and hollow thick-walled structures with heat generation," *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, vol. 38, no. 1, pp. 371–391, Jan. 2021, doi:10.1108/EC-02-2020-0120
- [28] D. Yarimpabuc, "A Unified Approach to Hyperbolic Heat Conduction of the Semi-infinite Functionally Graded Body with a Time-Dependent Laser Heat Source," *Iranian Journal of Science and Technology- Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 43, no. 4, 2019, doi:10.1007/s40997-019-00312-0

[29] A. Çalışkan, "Fonksiyonel Derecelenmiş Dönen Basınçlı Kapların Elastik Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye, 2021.

[30] C. Boğa, "Elastic Analysis of an Hollow Cylinder Made from Functionally Graded Material Exposed to Internal Pressure," *ISVOS Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 56-66, 2018

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





# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Blockchain-Based Secure Authentication Solution for Web Applications

Mustafa Tanrıverdi\*

Submitted: 18.10.2023 Revised: 17.11.2023 Accepted: 08.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705081

#### ABSTRACT

**Keywords:** Blockchain, security, authentication, web application, Web3, ethereum, MetaMask

\* Gazi University,  
 Faculty Of Applied Sciences,  
 Management Information Systems  
 06560 - Ankara, Türkiye  
 Orcid: 0000-0003-3710-4965  
 e mail: mustafatanriverdi@gazi.edu.tr

Corresponding author:  
 mustafatanriverdi@gazi.edu.tr

In the age of information and technology, web applications have become an important part of daily life. The communication of these web applications, where important personal and corporate information is managed, with the outside world is provided by authentication methods. Today, most applications use the traditional username-password method for authentication. This method, which is vulnerable to brute force attacks, causes serious security vulnerabilities. In this method, since most users use the same login credentials in different applications, an attack can affect many applications. Some applications also prefer to rely on third-party systems such as Google and Facebook for authentication. Due to their nature, these systems have risks such as data security problems and single point failure. For more security in the authentication area, studies have been carried out on the Two-Factor Authentication (2FA) method. This method has serious disadvantages such as GSM network problems, SMS cost or centralization. To overcome these problems, blockchain is appropriate solution thanks to its distributed, transparent, secure and immutable structure. In an important and sensitive issue such as identity control, it is thought that it may be risky to present blockchain technology, which is still under development, as the only method. Considering the current situation, in this study, a proposal has been made to offer a secure blockchain-based solution as an alternative to the authentication methods that currently work for web applications. The new technologies and tools used in the proposed solution are explained with visuals.

### Web Uygulamaları için Blokzinciri Tabanlı Güvenli bir Kimlik Doğrulama Çözümü

#### ÖZ

İçinde bulunduğumuz bilgi ve teknoloji çağında web uygulamaları günlük yaşamının önemli bir parçası haline gelmiştir. Önemli kişisel ve kurumsal bilgilerin yönetildiği bu web uygulamalarının dış dünya ile irtibatı kimlik doğrulama yöntemleri ile sağlanmaktadır. Günümüzde çoğu uygulama kimlik doğrulama için geleneksel kullanıcı adı-şifre yöntemini kullanmaktadır. Kaba Kuvvet (Brute force) saldırılarına karşı savunmasız olan bu yöntem ciddi güvenlik açıklarına neden olmaktadır. Bu yöntemde çoğu kullanıcı aynı giriş bilgilerini farklı uygulamalarda kullandığından dolayı bir saldırı birçok uygulamayı etkileyebilmektedir. Bazı uygulamalar da kimlik doğrulaması için Google ve Facebook gibi üçüncü taraf sistemlere güvenmeyi tercih etmektedir. Bu sistemler de veri güvenliği ve tek nokta hatası gibi nedenlerden dolayı riskler barındırmaktadır. Kimlik doğrulama alanındaki daha fazla güvenlik için iki Faktörlü Kimlik Doğrulama (2FA) yöntemi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemin de GSM şebeke problemleri, SMS maliyeti, merkezi yapılara bağımlılığı gibi sorunları bulunmaktadır. Bu yaşanan sorunların üstesinden gelmek için blockchain, dağıtık, şeffaf, güvenli ve değişmez yapısı sayesinde uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Kimlik doğrulama gibi önemli ve hassas bir konuda henüz gelişimi devam eden blokzinciri teknolojisini tek yöntemin olarak sunulmasının da riskli olabileceği düşünülmüştür. Mevcut durum değerlendirildiğinde bu çalışmada halihazırda hizmet veren web uygulamaları için çalışan kimlik doğrulama yöntemlerine ek olarak blokzinciri tabanlı güvenli bir çözümün alternatif olarak sunulmasına ilişkin bir öneride bulunulmuştur. Önerilen çözümde kullanılan yeni teknoloji ve araçlar görsellerle desteklenerek açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Blokzinciri, güvenlik, kimlik doğrulama, web uygulaması, Web3, ethereum, MetaMask

## 1. Introduction

The Internet has grown quickly, and as a result, many uses, including online payments, smart homes, online commerce, online public affairs, etc., have become essential to people's everyday lives [1]. However, at the same time, the complexity and vulnerabilities of the Internet bring along several security concerns and people pay close attention to information security [2]. Today, many services are provided through web applications. Most of the information transmitted and stored through web applications that provide these many services contains personal, commercial and even confidential information of the state and will be targeted by hackers in the future as in the past [3]. For this reason, authentication, which refers to the verification of the User's identity on the Internet, plays an important role in protecting information security [4].

Authentication of users is usually provided by their own usernames and passwords. Users often use multiple applications, and two-thirds of these users reuse the same IDs and passwords for easier memorization [5]. Although this situation provides great convenience to users, it poses a potential security risk for both them and web applications. Authentication with username and password is the simplest and easiest method to implement, but it is not resistant to replay attacks [6]. This method is especially vulnerable to brute force attacks and user passwords can be captured by hackers. Simple passwords created by users also increase the probability of success of these attacks. The security of the SMS verification method via mobile phone is also relatively high, but SMS may not be received when the network signal is not good, which may cause users to wait. In addition, the cost of SMS verification method is relatively high [3]. Thanks to the developments in recent years, many applications can be accessed via third party authentication platforms like Google and Facebook, as depicted in Figure 1. These centralised solutions have serious problems such as privacy, security issues, single point of failure and poor transparency. Moreover, with these authentication methods where only username and password are used, web applications have become more vulnerable to threats [7]. Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) provides a high level of security, single sign-on (SSO) and ease of use for users by managing user information in a central directory [8]. However, single point of failure problems encountered in this method cause access to applications to stop completely.

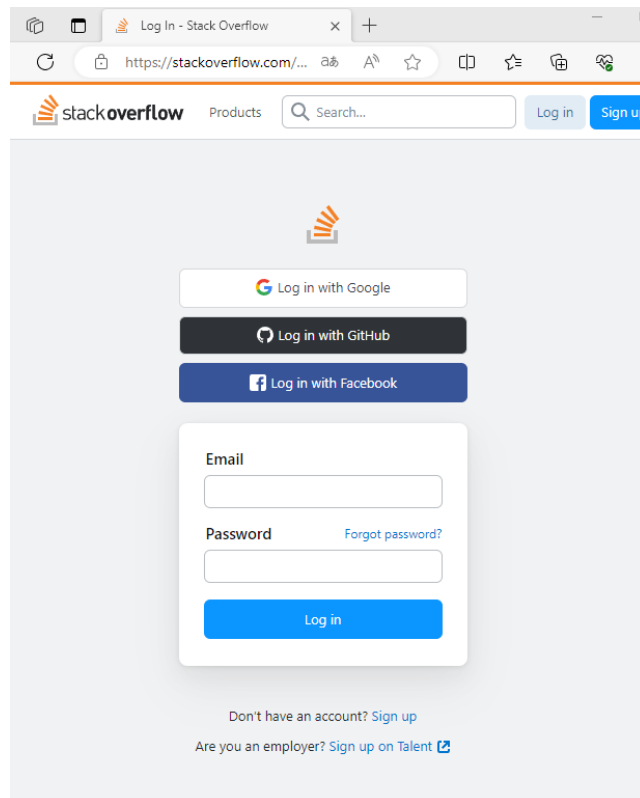


Figure 1. authentication with third party applications such as Google etc.

It is thought that blockchain technology is the most appropriate and secure solution to overcome problems such as the vulnerability of traditional username and password authentication which is still mostly used in the field of authentication in web applications, the inappropriateness of SMS authentication in terms of access

and cost, and the problematic structure of third parties such as Google etc. in terms of centralisation and transparency.

Blockchain, which was first recognized in 2008 with the publication of a paper by a person or a group with the name Satoshi Nakamoto [9], is a cutting-edge technology that applies to many fields of computer science, including cryptography-based digital signature and distributed consensus mechanisms [10]. Due to its decentralized and open architecture, blockchain allows peer-to-peer data exchange in a secure and encrypted way, without the need for a centralized authority. Founded as the foundation of digital currencies, blockchain technology has revolutionized many areas of life in recent years, from finance and supply chain to health care, public services and education. Despite the services and opportunities offered by blockchain, there are still various challenges [11]- [13]. For example, according to Saberi et al. (2018), blockchain is still considered an immature technology as it is still in the early stages of its development [14]. Therefore, it still suffers from various issues related to scalability, interoperability, security, and privacy. There is also the problem of how to integrate blockchain technology into existing systems [15].

As in other fields, blockchain-based solutions are encountered in the field of identity control in the literature and IT (Information Technology) world. In addition to the advantages of blockchain, decentralised structure and autonomous operation, it is difficult to find an interlocutor on the other side in cases such as problems in the management of credentials or the reversal of an accidental transaction. In addition, for the use of blockchain in identity control, qualified professionals are needed for integrations with existing applications and continuous updating as it is a developing technology. The low number of competent personnel and access to these personnel is also an important problem. Considering the possibility of problems such as performance and scalability in real-world applications running on blockchain networks, it is thought that it may be risky to carry out the entire workflow in the field of identity control over blockchain.

For the reasons stated above, it is thought that it may be risky to transfer the authentication of web applications, especially those that are already running and have many users with different profiles such as age and technology usage skills, to a completely blockchain-based solution. Instead, it would be better to offer a secure blockchain-based authentication method as an option in addition to the existing authentication methods. When the literature is examined, there is no study in which a blockchain-based method is presented in addition to the existing authentication methods. Within the scope of this study, current literature on blockchain and authentication is given and a solution is proposed to offer a blockchain-based secure authentication option as an alternative on applications that perform authentication with traditional methods.

## 2. Literature Review

### 2.1. Brute force attack

Brute force attacks constitute an important part of cyber-attacks. They target systems that use the username-password authentication method, which is still widely used in web applications [16]. Brute force is a type of attack that enables the capture of targeted login information by trial and error in different combinations. Hackers usually use automated software to try these combinations. Brute force attacks rely on weak login credentials. If you have a simple and predictable password, hackers can use automated software to enter your site [17]. Frequently used password data is utilised in this software. For example, "rockyou.txt" file containing 14 million password data is used in attacks [18].

Brute force attacks are increasing. At the end of 2021, a 160 per cent increase in brute force attacks was recorded. It is stated that the recent Optus data breach in Australia was caused by a brute force attack [19]. If the website is compromised by a brute force attack, it can lead to the following consequences [17].

- The hacker can steal your private data.
- The hacker can add malware to your site.
- It will reduce web credibility.
- The hacker can remove your content completely.

### 2.2. Blockchain

Blockchain was born with Bitcoin at a time when some world-famous banks went bankrupt and people's trust

in banks was shaken and panicked [20]. Blockchain was first defined in 2008 by a person or group under the pseudonym Nakamoto as a distributed ledger structure where each record is saved in a distributed platform and shared by participants in the network [9]. Reyna et al. [21] describe blockchain as a “distributed, transparent, and immutable data warehouse” where data is stored on the basis of an agreement between participants. As stated by Glaser [22], blockchain serves as a public and anonymous database allowing participants to maintain records of their assets without requiring any intermediaries or central authorities. Johar et al. [23] define blockchain as a distributed ledger technology protected by cryptography to deal with trust issues that users have long faced. Lewis [24] stated that the difference between blockchain and traditional databases is that in blockchain, operations such as adding and verifying records are performed by participants through the consensus mechanism on the P2P network.

One of the most important services provided by blockchain technology is smart contracts. It is believed that smart contracts can replace traditional contracts by decentralising work within predetermined rules on a blockchain network [21]. In other words, smart contracts are computer codes that exist transparently on the blockchain network, cannot be changed and are automatically executed. Smart contracts provide significant advantages in terms of cost, speed and security by eliminating banks, notaries and similar third parties. It is believed that smart contracts, which are already used in many areas, have great potential and will become more popular and widespread in the future.

We can divide the development of blockchain from its emergence until today into three stages [25]- [27]. The first stage is the blockchain 1.0 stage, where blockchain is considered as the technology that forms the infrastructure of Bitcoin and other digital currencies. Following digital currencies, the period in which blockchain is applied to financial applications in the form of smart contracts is called Blockchain 2.0. In recent years, the application of blockchain in many areas such as health, agriculture, education, public administration, internet of things is called blockchain 3.0.

Existing blockchain systems are divided into three categories: public blockchain, private blockchain and consortium blockchain [28].

*Public blockchain:* A public blockchain is an open platform where individuals, whether associated with organizations or acting independently, can participate, add records, and engage in mining activities. This type of blockchain operates without restrictions, which is why it is often referred to as a permissionless blockchain. The public chain is completely open and transparent and does not contain any private validation nodes. In this blockchain, anyone can download all the chain data and start mining, so you can ensure that there are many active copies of the chain. This increases the security and consistency of the blockchain network. In a distributed structure without any control mechanisms, the consensus protocol must do a lot of work when making changes to the chain due to the increased amount of data on the existing network.

*Private blockchain:* A blockchain structure that is managed by a person or group, allowing sharing and data exchange between people in one or more organisations is called a private blockchain. It can also be called permissioned blockchain because people without special permission cannot join the chain. A node's participation and access to the network is based on rules set by the group that manages the network. This reduces compliance with the decentralised and transparent nature of the blockchain.

*Consortium blockchain:* A consortium blockchain is a blockchain network characterized by its partial privacy and permissioned nature. In this type of blockchain, a specific group of nodes, predetermined in advance, partake in the processes of block validation and consensus as decision-makers, rather than being controlled by a single organization. These nodes decide who can join the network and who can mine. For block verification, a multi-signature scheme is used, where only blocks signed by authorised nodes are considered valid. The federation decides whether the network is public or restricted and whether everyone on the network has permission to read and write data. While Blockchain technology holds significant potential, its widespread adoption could encounter several challenges. One of these challenges lies in the energy consumption and substantial investment in computing resources associated with Blockchain systems utilizing the "Proof of Work" consensus protocol. For example, as of 2021, the Bitcoin blockchain using the "proof of work" protocol consumes more electricity than many countries [29]. At the same time, the excessive demand for many computer components, such as graphics cards used in Bitcoin mining, has led to a significant increase in their prices. Similarly, storing and verifying all data in the blockchain by all participants can lead to insufficient performance under high transaction loads. In a blockchain system, transactions performed by users are transparently shared and encrypted. By analysing this publicly shared data, it is possible to access the relationships between accounts or the real identities of users. In addition to the difficulties encountered in the

implementation and dissemination of applications, new skills may be needed as new technologies develop. Blockchain continues to evolve as a new technology and researchers and companies are working hard to overcome these challenges.

### 2.3. Authentication with blockchain

Today, many services are provided over the Internet, and authentication processes are very important for service providers. It is no secret that current authentication systems have many problems. For example, many service providers rely on third-party authentication providers that have emerged in recent years to provide access to user information and services. However, whether it is third-party authorised login or traditional username and password login, it can be subject to various network attacks [30]. To overcome these problems, the following facilities can be provided if blockchain is used for authentication.

- Due to the decentralised nature of blockchain, service providers do not need a trusted central authority.
- The information stored within the blockchain is tamper-proof, which serves as a deterrent against certain illegal activities.
- When service providers are granted access to participate in private blockchains with permissions, users gain the advantage of accessing these services using a single account. This streamlines and enhances account management, offering greater ease and efficiency for users.
- The functionality of public and private keys in blockchain allows users to send their credentials securely. Instead of transmitting credentials directly to the service provider, users can encrypt the information with their private key, ensuring a higher level of security during data transmission.

Blockchain-based authentication technology has been the focus of researchers' attention in recent years [31], [32]. It was first proposed in 2014 by Conner et al. [33]. They introduced a blockchain-based Public Key Infrastructure (PKI) system named Certcoin, aiming to address specific security concerns. The transparency inherent in blockchain technology gives rise to concerns regarding user privacy in this solution. Furthermore, a privacy-conscious blockchain Public Key Infrastructure (PKI) guarantees user anonymity by implementing short-lived online public keys, a concept proposed by Axon and Goldsmith[34]. This work ignores storage and efficiency while ensuring user privacy. In the following years, the development of blockchain technology, improvements in performance and storage, and the use of smart contracts have made significant contributions to the authentication process.

When the literature is examined, it is possible to see many blockchain-based authentication and authorisation studies for Internet of Things (IoT) devices. Jiang et al. [32] and Khalid et al. [35] can be used as examples of these studies. There is a limited amount of network application research in this area. One of the few recent studies in this area is by Ezawa et al [36]. In this study, authentication and authentication are provided more securely by using blockchain-based PKI structures and smart contracts through authentication and authorisation servers. In this study, the fact that network users have to enter information such as public key certificates, random numbers and signatures on the login screen is considered extremely inconvenient in terms of data security and ease of use. In another study in this area, Xiong et al. [31] propose a privacy-sensitive authentication system suitable for multi-server environments, although it suffers from single point failure due to the centralised architecture. In addition to defending against various malicious attacks, the proposed system meets many security requirements such as mutual authentication and user anonymity. The solution proposed in this work is a theoretical framework and cannot be applied to any specific scenario. Ethereum-based cloud user identity management protocol was developed by Wang et al [30]. In this work, as in the work of Xiong et al. [31], network users were required to enter their key data and encrypted hash values on the login screen. Patel et al. [37] also developed a decentralized web authentication system using a prototype of an Ethereum-based blockchain system called DAuth. This study employed users' private keys and smart contracts to improve security and privacy. Similar to the research in this field, this study has limitations regarding the use of internet users in their daily lives. Petcu et al. [38] conducted a study on secure and decentralised authentication on the Ethereum network in accordance with the concept of Web3, which has been defined as the new decentralised version of the Internet in recent years. The researchers developed and experimentally implemented an end-to-end authentication application for web applications with Java and JavaScript languages. This authentication method, which is provided by connecting to the public Ethereum network through the MetaMask wallet application, was compared with 2FA and SMS

authentication. These three methods were compared in 50 consecutive experimental logins and the proposed method was found to be much more efficient than the others. Chen et al. [39] proposed a framework called XAuth to provide security and privacy in authentication using Public Key Infrastructure (PKI) and Multiple Merkle Hash Tree protocols. Security analyses and experimental results for XAuth using Zero-Knowledge Proof (ZKP) Algorithm for encryption and blockchain-based IPFS for storage have shown that XAuth is effective and suitable in practice. Olanrewaju et al. [40] also conducted a study in which three options were presented for authentication: traditional username-password, one-time generated and used tokens, and digital certificates. According to the experimental results of this study, which uses Oracle database and Amazon cloud services as infrastructure, it is stated that it is more efficient in terms of performance and memory usage.

### 3. Proposed Solution

In this section, a solution proposal is given to provide a blockchain-based secure option in addition to the authentication controls made with username-password, LDAP or third-party applications in web applications currently in service. Blockchain is generally operated in two types of networks, private and public. The installation, maintenance and management of private networks are carried out by a specific person, group or institution. These networks move away from the structure and philosophy of blockchain in terms of decentralisation, openness to everyone and transparency. They also require investment and management costs for hardware, installation and maintenance. Public networks, on the other hand, allow application development in a public and fully decentralised environment without requiring any investment costs. Bolivar et al. [41] also stated that public networks will be easier to manage and less costly compared to private networks. Mohammed and Vargas [42], in a qualitative study in which 15 domain experts from the academic and management fields were interviewed, stated that factors such as the type of blockchain used (public-private) and the developer community behind it will affect the difficulty of integration studies. For this solution proposal, the public Ethereum network was deemed appropriate as a blockchain. The most important reason for this is that the Ethereum network operates in a completely decentralised, secure and automated manner without any investment and maintenance costs. One of the most important reasons why the public Ethereum network is preferred is that it has the potential to serve as an infrastructure where decentralised applications will increase in the future with web3, which we can express as the new version of the Internet, and where people can own the content on the Internet. According to the data in the Etherscan web application, where all transactions made in the Ethereum network can be monitored, there are 245 million active users in the Ethereum network and approximately 100 thousand new users create Ethereum accounts every day [43]. When the transaction density is analysed, 1000 verified smart contracts are created daily on the Ethereum network and more than 1 million transactions are made on average. Looking at these numbers, it is seen that decentralised web3 applications are increasing and the Ethereum network plays a major role in this.

People can manage their accounts on public blockchain networks from mobile devices and browsers using wallet applications such as MetaMask [44] and TrustWallet [45]. Thanks to these wallet applications, people can use their blockchain addresses for tasks such as authentication and data management on the internet. Nowadays, in addition to e-mail and third parties such as Google, some applications add the option to log in with blockchain accounts through these wallets. The most widely used among these wallet applications is MetaMask. In 2023, there are 21 million monthly active users using MetaMask wallet application [46]. In this study, it was deemed appropriate to use the MetaMask application to access the Ethereum network.

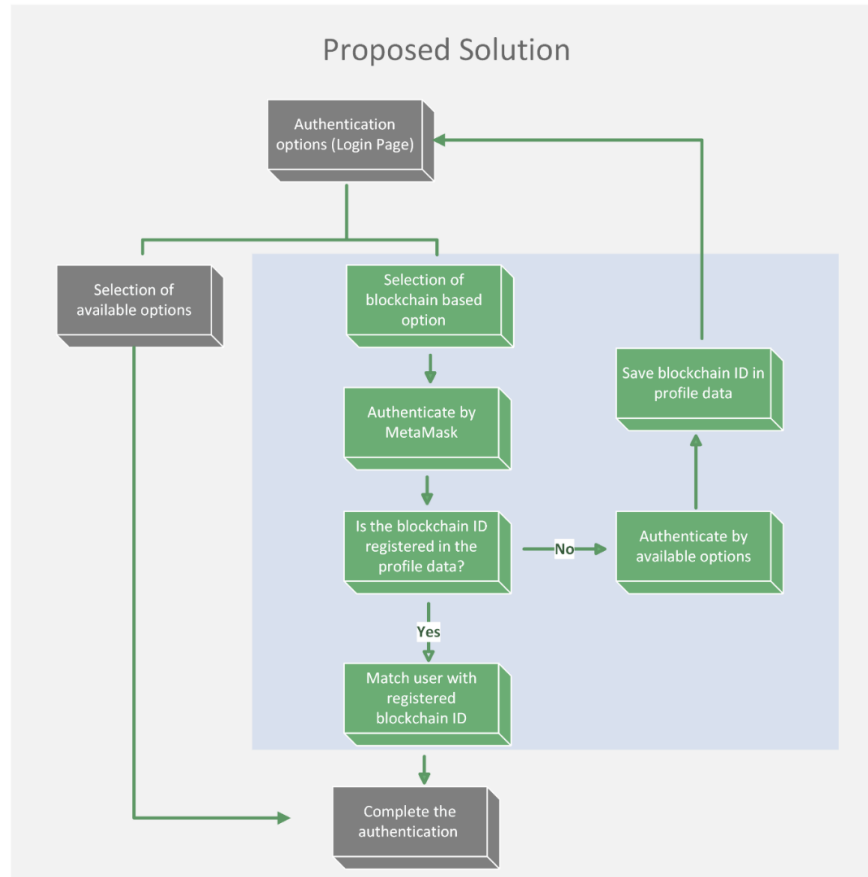


Figure 2. General structure of the proposed solution

Figure 2 shows the general structure of the proposed solution. With this solution, a blockchain-based secure method is added as an option in addition to the authentication methods currently provided by username-password, LDAP or third parties such as Google. In this structure, users can continue to use the current authentication methods if they wish. Here, users can also select a blockchain-based authentication on the login page of the web application if they wish. In the first step, the user who chooses the blockchain-based authentication option on the login page is expected to access his address in the Ethereum network with the MetaMask application. The user who chooses this option must first install the MetaMask plugin in the browser and create an address on the Ethereum network. When the Ethereum network is accessed by successfully logging in with MetaMask in the browser, the address information in this network is used as the ID value and transmitted to the web application. In the next step, it is checked whether this blockchain ID value is saved in the profile information by any user. If this blockchain ID is saved in a profile, the user with that profile is identified and the authentication process is successfully completed. If no profile associated with this blockchain ID is found, it is understood that the user has chosen the blockchain-based authentication method for the first time and is directed to add the blockchain ID to the profile information. For this, a small development is needed to add the blockchain ID field to the profile information in the web application, such as e-mail, mobile phone, etc. fields. In this way, the user will be able to log in with the currently working authentication methods and register their own blockchain ID from the profile information page. After this process, the user who is directed to the login screen will now be able to use the blockchain authentication method and enter the web application.

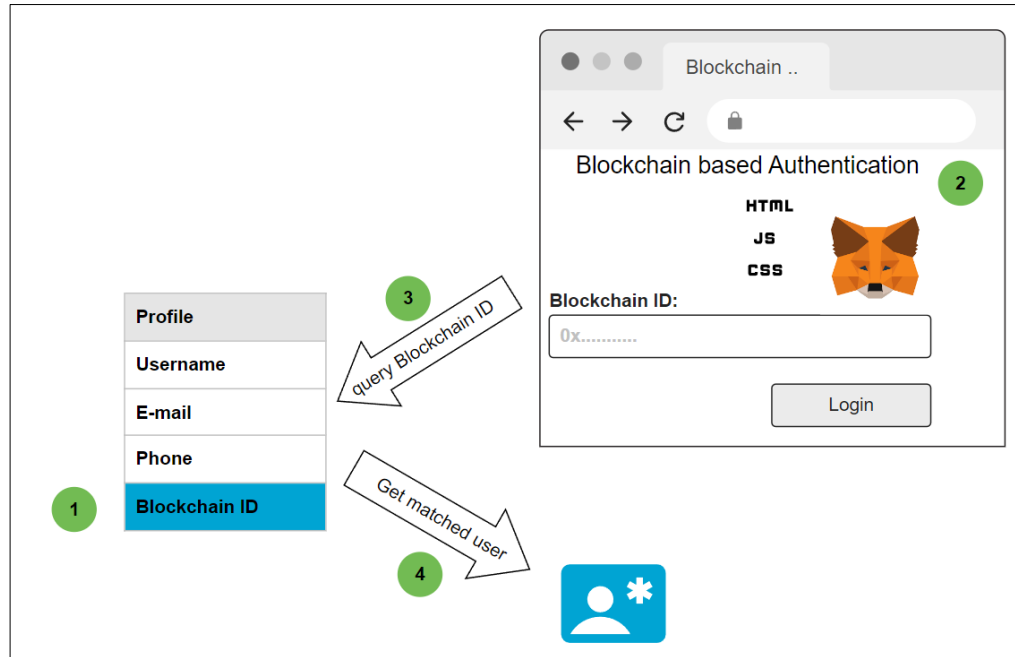


Figure 3. Integration of the proposed solution

Figure 3 shows a visualisation of how the proposed solution can be integrated into an already running web application. In this visualisation, the technical improvements needed are sequentially and numbered. In the first step, another field named "Blockchain ID" should be added to the table where user profile information is stored in the database of the web application and the user should be able to update this field from the profile screen. The Blockchain ID value should be defined as a "unique key" while saving it to the profile table, so that an ID value can only be used by one user. In the second step, a new web page should be created that calls the MetaMask plugin and obtains the user's Blockchain ID value as a result of the process. There are many libraries that allow this to be done in HTML, JavaScript and CSS. To develop this page, one can make use of the publicly available resource repository developed by Marountas, J. [47]. On this screen, brute force attacks can be prevented because the MetaMask plugin provides secure control instead of the structure that allows hackers to try passwords over and over again. In the third step, the user's Blockchain ID should be queried in the profile table. If the Blockchain ID does not match any user, a warning should be shown to the user trying to log in to save this blockchain ID value to his profile. In the fourth step, after the login process is completed, the information of the user whose blockchain ID value is matched in the profile table should be transferred to the next step.

In the introduction, Figure 1 shows a visualisation of the username-password and third-party authentication on the Stackoverflow website. In Figure 4, it is seen that Skiff website, which provides webmail service, offers users wallet applications as an option for authentication, thus taking precautions against cyber-attacks [48]. It is thought that the solution presented in this study will contribute to the increase of these examples.

#### 4. Discussion

It can be said that this solution, which is presented as an alternative to currently working authentication methods, is very advantageous in terms of initial and management cost, implementation process, privacy, data security and resilience against attacks. This method can be quickly integrated into a web application by making use of many repositories and documentation on the internet without requiring any hardware or licence costs. An expert staff with software skills may be sufficient for this. Since there is no third party in this method, it can be considered reliable in terms of data security and privacy. One of the most important advantages of this method is that it is resistant to attacks such as brute force etc. thanks to the wallet applications and blockchain structure used. This solution is not dependent on the MetaMask app, other alternative wallet apps can also be used to access the blockchain network. Unlike other methods, in this method, users must have the ability to create an account in the blockchain network with wallet applications and to manage this account correctly.



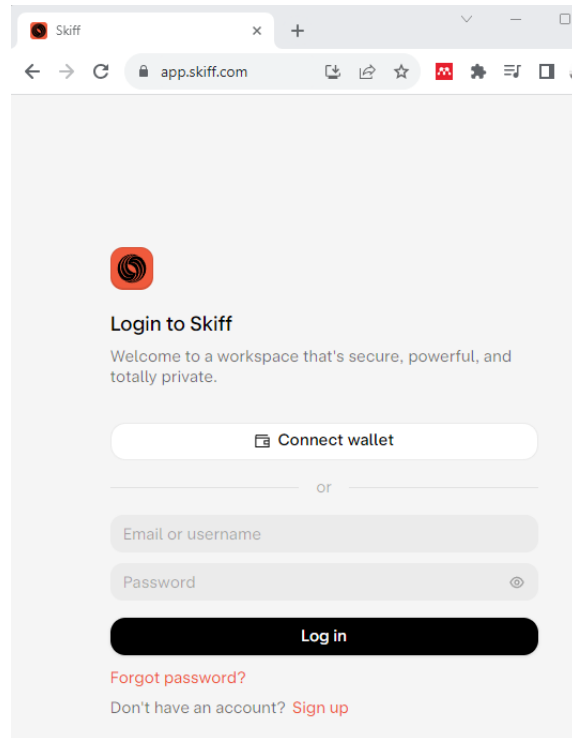


Figure 4. Authentication option with wallet applications on the Skiff website.

In the table below, the presented method and other authentication methods are compared in terms of providing resistance against cyber-attacks, data privacy, initial and management cost, and not being affected by the single point of failure.

Table 1. Comparison of authentication methods

Authentication method	Resistance against cyber attacks	Data privacy	Free (start-up and management cost)	Not affected by single point of failure
Traditional username and password	✗	✗	✓	✓
E-mail- LDAP	✗	✗	✓	✗
SMS	✓	✓	✗	✗
2FA	✓	✓	✓	✗
Proposed Blockchain based solution	✓	✓	✓	✓

Traditional username and password authentication is vulnerable to cyber-attacks such as Brute force. At the same time, it can be considered weak in terms of data privacy and data security because users generally use the same login information for many applications. This method does not require any start-up and management costs and is not affected by single point errors since it usually runs in the database of the application. Authentication via e-mail and LDAP are also not fully resistant to cyber-attacks. Since these systems are usually provided by third parties, data confidentiality cannot be ensured and become inoperable in case of single point of failure. SMS, which is the only method that brings additional cost to operate among the authentication methods, is successful in data confidentiality and resistance to cyber-attacks, but it becomes unable to respond to single point of failure. The 2FA method, which has become widespread in recent years, can also be considered resistant to attacks and successful in terms of data privacy. At this point, the fact that Google infrastructure is generally preferred for 2FA service brings a significant risk in terms of data privacy and being affected by single point of failure. It can be said that the blockchain-based authentication method, which is presented as an alternative to the existing methods within the scope of the study, is successful and has a high potential for the future in terms of resistance to cyber security attacks, data privacy, not requiring any start-up and management costs, and not being affected by single point errors due to its distributed structure.

## 5. Limitations and Future Works

The advantages of public blockchain networks such as decentralisation, autonomous operation and no start-up and management costs are mentioned. In the presented solution, the Ethereum network, which is widely used in IT sector and academia and has a large developer base behind it, was preferred as a public blockchain network. In order for the solution to be valid, the Ethereum network must be operational, in other words, if the Ethereum network is shut down or stops providing service for any reason, the authentication option will also become inoperable.

In the proposed solution, users are expected to have the ability to create accounts on the Ethereum network with wallet applications such as MetaMask, manage their accounts and access these accounts on web browsers. In addition, there will be no solution for problems that may arise in this process in terms of password security, backing up and transferring account information, since there is no interlocutor in the Ethereum network.

Looking at the studies on blockchain in the literature, it can be said that blockchain has found application in many sectors and has become one of the main technologies. Considering the number of uses of the Ethereum network and MetaMask application mentioned in the previous sections and the increase in these numbers, it can be said that they play an important role in the popularisation of blockchain technologies. Today, information and communication technologies are developing and spreading very rapidly. Blockchain cryptocurrency, smart contract, NFT and Metaverse applications, which are considered as Web3 applications with their distributed and transparent structure, have recently entered our lives rapidly in many areas [49]. In the future, it is predicted that people will prefer Web3 applications that adopt trust in information systems instead of third-party intermediaries and applications. In the future, it is thought that there will be a need for solutions that eliminate the dependency on centralised systems and work on decentralised infrastructures as in this study.

It will be much more beneficial to implement the solution proposed in this study in real life. At the end of such an implementation process, it may be possible to access important information about the difficulties experienced by users when using the blockchain-based authentication solution, their attitudes towards this solution, and performance and efficiency.

## 6. Conclusion

Nowadays, web applications are used extensively by people in many areas, and a significant part of the attacks on web applications are made in the field of authentication, which is the gateway of these applications to the outside. In web applications, authentication is usually done through traditional username-password or third parties such as Google and Facebook. Authentication with username-password can be vulnerable to cyber-attacks as a result of easily guessable passwords or misuse. Third-party applications, on the other hand, carry risks in terms of privacy, data security and single point of failure. When the literature and sector studies are examined, it is seen that the most suitable way to solve these problems is blockchain-based methods thanks to their features such as secure, decentralised and autonomous operation.

It may be inconvenient to use blockchain technology, which is still in the development stage, as the only option in an important and sensitive area such as authentication. Instead, it is thought that it would be more appropriate to present a blockchain-based method as an option in addition to the existing methods. In order to fill this gap in the literature, this study proposes a blockchain-based secure identity management solution as an alternative for web applications that currently serve with traditional methods. New concepts and technologies such as Ethereum public network and MetaMask wallet application used in the proposed solution are explained and the general structure of the solution is explained with visuals. The steps to be followed in order to add a blockchain-based authentication option to an existing web application are also explained in a sequential manner. Compared to traditional authentication methods such as username and password, e-mail, LDAP, SMS, 2FA, etc., the proposed method has a significant advantage in that it is not affected by single point of failure due to its distributed structure. Thanks to the structure of the Ethereum network and the use of the MetaMask tool, the proposed method shows great resistance to cyber-attacks. The fact that blockchain networks work in an automated manner and are not under the control of any person or institution is extremely important in terms of data privacy and security. The method presented in this study is proposed to work as an alternative to existing authentication methods. In this way, when a problem is encountered in the existing centralised methods, the proposed system will be a life saver for web applications.

In addition, thanks to this method to be implemented as an alternative, it is thought that the service disruptions encountered due to the density experienced during special periods such as some announcements and registration periods made through web applications can be prevented.

## Conflict of Interest Statement

The author declares that there is no conflict of interest.

## References

- [1] A. Szymkowiak, B. Melović, M. Dabić, K. Jeganathan, and G. S. Kundi, "Information technology and Gen Z: The role of teachers, the internet, and technology in the education of young people," *Technology in Society*, vol. 65, p. 101565, May 2021. doi:10.1016/J.TECHSOC.2021.101565
- [2] W. Liang, Y. Wang, Y. Ding, H. Zheng, H. Liang, and H. Wang, "An efficient blockchain-based anonymous authentication and supervision system," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, vol. 16, no. 5, pp. 2492–2511, Sep. 2023. doi:10.1007/S12083-023-01518-5/FIGURES/6
- [3] J. Zhu, Y. Wei, and X. Shang, "Decentralized Dynamic Identity Authentication System Based on Blockchain," *Proceedings - 2021 International Conference on Networking Systems of AI, INSAI 2021*, 2021, pp. 1–4. doi:10.1109/INSAI54028.2021.00012
- [4] W. Ao, S. Fu, C. Zhang, Y. Huang, and F. Xia, "A Secure Identity Authentication Scheme Based on Blockchain and Identity-based Cryptography," in *2019 IEEE 2nd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET)*, 2019, pp. 90–95. doi:10.1109/CCET48361.2019.8989361
- [5] L. Xiong, F. Li, S. Zeng, T. Peng, and Z. Liu, "A Blockchain-Based Privacy-Awareness Authentication Scheme with Efficient Revocation for Multi-Server Architectures," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 125840–125853, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939368
- [6] K. Greene, D. Rodgers, H. Dykhuizen, K. McNeil, Q. Niyaz, and K. Al Shamaileh, "Timestamp-based defense mechanism against replay attack in remote keyless entry systems," *Digest of Technical Papers - IEEE International Conference on Consumer Electronics*, vol. 2020-January, Jan. 2020, doi:10.1109/ICCE46568.2020.9043039
- [7] M. Tanrıverdi, "Design and Implementation of Blockchain Based Single Sign-On Authentication System for Web Applications," *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 343–354, Dec. 2020. doi:10.35377/SAUCIS.03.03.757459
- [8] R. F. Sari and S. Hidayat, "Integrating web server applications with LDAP authentication: Case study on human resources information system of UI," *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies, 2026*, pp. 307–312. doi:10.1109/ISCIT.2006.340053
- [9] S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-toPeer Electronic Cash System." *bitcoin.org*, 2008. [Online]. Available: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. [Accessed: Oct. 15, 2023].
- [10] X. Li, Z. Zheng, and H. N. Dai, "When services computing meets blockchain: Challenges and opportunities," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 150, pp. 1–14, Apr. 2021. doi:10.1016/J.JPDC.2020.12.003
- [11] C. Delgado-Von-eitzen, L. Anido-Rifón, and M. J. Fernández-Iglesias, "Blockchain Applications in Education: A Systematic Literature Review," *Applied Sciences 2021*, vol. 11, no. 24, p. 11811, Dec. 2021. doi:10.3390/APP112411811
- [12] J. Park, "Promises and challenges of Blockchain in education," *Smart Learning Environments*, vol. 8, no. 1, Dec. 2021. doi:10.1186/S40561-021-00179-2
- [13] R. Raimundo and A. Rosario, "Blockchain System in the Higher Education," *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education 2021*, vol. 11, no. 1, pp. 276–293, Mar. 2021. doi:10.3390/EJHPE11010021
- [14] S. Saberi, M. Kouhizadeh, J. Sarkis, and L. Shen, "Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management," *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 7, pp. 2117–2135, Apr. 2018. doi:10.1080/00207543.2018.1533261
- [15] A. A. Khan, A. A. Laghari, A. A. Shaikh, S. Bourouis, A. M. Mamlouk, and H. Alshazly, "Educational Blockchain: A Secure Degree Attestation and Verification Traceability Architecture for Higher Education Commission," *Applied Sciences 2021*, vol. 11, no. 22, p. 10917, Nov. 2021. doi:10.3390/APP112210917
- [16] S. Salamatian, W. Huleihel, A. Beirami, A. Cohen, and M. Medard, "Centralized vs Decentralized Targeted Brute-Force Attacks: Guessing with Side-Information," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 15, pp. 3749–3759, 2020. doi:10.1109/TIFS.2020.2998949
- [17] P. G. Shah and J. Ayoade, "An Empirical Study of Brute Force Attack on Wordpress Website," *Proceedings - 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology, 2023*, pp. 659–662. doi:10.1109/ICSSIT55814.2023.10060966

- [18] R. A. Grimes, *Brute-Force Attacks: Hacking Multifactor Authentication*. New Jersey: Wiley, 2020, pp. 295–306. doi:10.1002/9781119672357.CH14
- [19] A. Nursetyo, D. R. Ignatius Moses Setiadi, E. H. Rachmawanto, and C. A. Sari, “Website and Network Security Techniques against Brute Force Attacks using Honeypot,” *Proceedings of 2019 4th International Conference on Informatics and Computing*, Oct. 2019. doi:10.1109/ICIC47613.2019.8985686
- [20] A. Rustemi, F. Dalipi, V. Atanasovski, and A. Risteski, “A Systematic Literature Review on Blockchain-Based Systems for Academic Certificate Verification,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 64679–64696, 2023. doi:10.1109/ACCESS.2023.3289598
- [21] A. Reyna, C. Martín, J. Chen, E. Soler, and M. Díaz, “On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, pp. 173–190, Nov. 2018. doi:10.1016/j.future.2018.05.046
- [22] F. Glaser, “Pervasive Decentralisation of Digital Infrastructures: A Framework for Blockchain enabled System and Use Case Analysis,” *HICSS*, 2017. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Pervasive-Decentralisation-of-Digital-A-Framework-Glaser/859d0535e16095f274df4d69df54954b21258a13>. [Accessed: Oct. 15, 2023].
- [23] S. Johar, N. Ahmad, W. Asher, H. Cruickshank, and A. Durrani, “Research and Applied Perspective to Blockchain Technology: A Comprehensive Survey,” *Applied Sciences* 2021, vol. 11, no. 14, p. 6252, Jul. 2021. doi:10.3390/APP11146252
- [24] A. Lewis, “So, You Want to Use a Blockchain for That?” *CoinDesk*, Jul. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.coindesk.com/want-use-blockchain/>. [Accessed: Oct. 15, 2023].
- [25] K. Burgess, “The Promise of Bitcoin and the Blockchain,” *Consumers’ Research Primary*, 2015. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/23117440/The\\_Promise\\_of\\_Bitcoin\\_and\\_the\\_Blockchain\\_A\\_product\\_of](https://www.academia.edu/23117440/The_Promise_of_Bitcoin_and_the_Blockchain_A_product_of). [Accessed: Oct. 15, 2023].
- [26] M. Swan, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. California: O’Reilly Media, 2015. doi:10.1109/CANDAR.2017.50
- [27] J. L. Zhao, S. Fan, and J. Yan, “Overview of business innovations and research opportunities in blockchain and introduction to the special issue,” *Financial Innovation*, vol. 2, no. 1, p. 28, Dec. 2016. doi:10.1186/s40854-016-0049-2
- [28] D. Puthal, N. Malik, S. P. Mohanty, E. Kougianos, and G. Das, “Everything You Wanted to Know about the Blockchain: Its Promise, Components, Processes, and Problems,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 6–14, Jul. 2018. doi:10.1109/MCE.2018.2816299
- [29] BBC News, “Bitcoin consumes,” *BBC News*, Feb. 10, 2021, [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/technology-56012952>. [Accessed: Oct. 15, 2023].
- [30] S. Wang, R. Pei, and Y. Zhang, “EIDM: A Ethereum-Based Cloud User Identity Management Protocol,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 115281–115291, Aug. 2019. doi:10.1109/access.2019.2933989
- [31] L. Xiong, F. Li, S. Zeng, T. Peng, and Z. Liu, “A Blockchain-Based Privacy-Awareness Authentication Scheme with Efficient Revocation for Multi-Server Architectures,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 125840–125853, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939368
- [32] W. Jiang, H. Li, G. Xu, M. Wen, G. Dong, and X. Lin, “PTAS: Privacy-preserving Thin-client Authentication Scheme in blockchain-based PKI,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 185–195, Jul. 2019. doi:10.1016/j.future.2019.01.026
- [33] C. Fromknecht and S. Yakoubov, “CertCoin: A NameCoin Based Decentralized Authentication System 6.857 Class Project,” 2014.
- [34] L. Axon and M. Goldsmith, “PB-PKI: A privacy-aware blockchain-based PKI,” in *ICETE 2017 - Proceedings of the 14th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications*, SciTePress, 2017. pp. 311–318. doi:10.5220/0006419203110318
- [35] U. Khalid, M. Asim, T. Baker, P. C. K. Hung, M. A. Tariq, and L. Rafferty, *A decentralized lightweight blockchain-based authentication mechanism for IoT systems: Cluster Computing*. New York: Springer, 2020, pp. 1–21. doi:10.1007/s10586-020-03058-6
- [36] Y. Ezawa, M. Takita, Y. Shiraishi, S. Takei, M. Hiroto, Y. Fukuta, M. Mohri, M. Morii, “Designing Authentication and Authorization System with Blockchain,” *14th Asia Joint Conference on Information Security (AsiaJCS)*, IEEE, Aug. 2019, pp. 111–118. doi:10.1109/AsiaJCS.2019.00006
- [37] S. Patel, A. Sahoo, B. K. Mohanta, S. S. Panda, and D. Jena, “DAAuth: A Decentralized Web Authentication System using Ethereum based Blockchain,” *International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking, ViTECoN 2019*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. doi:10.1109/ViTECoN.2019.8899393
- [38] A. Petcu, B. Pahontu, M. Frunzete, and D. A. Stoichescu, “A Secure and Decentralized Authentication Mechanism Based on Web 3.0 and Ethereum Blockchain Technology,” *Applied Sciences* 2023, vol. 13, no. 4, p. 2231, Feb. 2023. doi:10.3390/APP13042231
- [39] J. Chen, Z. Zhan, K. He, R. Du, D. Wang, and F. Liu, “XAuth: Efficient Privacy-preserving Cross-domain Authentication,” *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2021. doi:10.1109/TDSC.2021.3092375
- [40] R. F. Olanrewaju, B. U. I. Khan, M. A. Morshidi, F. Anwar, and M. L. B. M. Kiah, “A Frictionless and Secure User Authentication in Web-Based Premium Applications,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 129240–129255, 2021. doi:10.1109/ACCESS.2021.3110310
- [41] M. P. Rodríguez Bolívar, A. Pozzebon, A. Mohammad, and S. Vargas, “Barriers Affecting Higher Education Institutions’ Adoption

of Blockchain Technology: A Qualitative Study,” *Informatics 2022*, vol. 9, no. 3, p. 64, Aug. 2022. doi:10.3390/INFORMATICS9030064

[42] A. Mohammad and S. Vargas, “Challenges of Using Blockchain in the Education Sector : A Literature Review,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 13, Jul. 2022. doi:10.3390/APP12136380

[43] Etherscan, “Ethereum Charts and Statistics | Etherscan,” *etherscan.io*, [Online]. Available: <https://etherscan.io/charts>. [Accessed: Sep. 15, 2023].

[44] Metamask, “MetaMask,” *metamask.io*, [Online]. Available: <https://MetaMask.io/>. [Accessed: Oct. 15, 2023].

[45] Trust Wallet, “Trust Wallet,” *trustwallet.com*, [Online]. Available: <https://trustwallet.com/>. [Accessed: Oct. 15, 2023].

[46] MetaMask, “MetaMask Statistics 2023,” *earthweb.com*, Mar. 16, 2023. [Online]. Available: [https://earthweb.com/MetaMask-statistics/#Detailed\\_MetaMask\\_Statistics\\_2023](https://earthweb.com/MetaMask-statistics/#Detailed_MetaMask_Statistics_2023). [Accessed: Oct. 15, 2023].

[47] Pragathoys, “GitHub pragathoys,” *github.com*, Apr. 28, 2022. [Online]. Available: <https://github.com/pragathoys/web3-simple-login-with-MetaMask>. [Accessed: Sep. 18, 2023].

[48] Skiff, “Skiff-Log in with MetaMask,” *skiff.com*, Feb. 12, 2021. [Online]. Available: <https://skiff.com/blog/log-in-with-metamask>. [Accessed: Oct. 16, 2023].

[49] A. Zohar, “Bitcoin,” *Communications of the ACM*, vol. 58, no. 9, 2015. doi:10.1145/2701411

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



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Stochastic Goal Programming for the Nurse Scheduling Problem with Uncertain Demand

Seyit Hamza Cavga<sup>a\*</sup>, Nezir Aydın<sup>b</sup>

Submitted: 31.03.2023 Revised: 30.10.2023 Accepted: 17.11.2023 doi:10.30855/gmbd.0705082

#### ABSTRACT

**Keywords:** Shift scheduling, goal programming, stochastic modeling

<sup>a\*</sup> Istanbul Gelisim University,  
Vocational School of Health Services,  
Dept. of Biomedical Device Technology  
34310 - İstanbul, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-6784-5698  
e mail: shcavga@gelisim.edu.tr

<sup>b</sup> Yildiz Technical University,  
Machine Faculty,  
Dept. of Industrial Engineering  
34349 - İstanbul, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3621-0619

\*Corresponding author:  
shcavga@gelisim.edu.tr

Shift scheduling, which has a direct impact on the productivity of enterprises, is a problem that should always be considered. On the basis of the problem, it is aimed to assign people to shifts according to their competencies, to have a fair distribution of overtime expected from each other and to have minimum deviation from each other. In this study, nurse scheduling chose for the assignment problem. In determining the constraints, the mandatory situations determined by the law, the needs determined by the hospital, the competencies/responsibilities of the employees and annual leave situations taken into consideration. Goal programming has been used in order to achieve multiple goals that may conflict with each other, where all the constraints are met, with minimum deviation. In addition, stochastic parameters were added to the model in order to respond to the demands in different scenarios based on probabilistic real-life data. In the content of the selected problem, a modeling that provides fair distribution by providing the necessary constraints for twenty-eight nurses with different competencies working in two different units and can provide the appropriate response to uncertainty situations has been made. The model was solved by using mixed integer programming (MIP) with GAMS program.

### Belirsiz Taleplerle Hemşire Çizelgeleme Problemi için Stokastik Hedef Programlama

#### ÖZ

İşletmelerin verimliliklerine direkt etkili olan vardiya çizelgeleme daima göz önünde bulundurulması gereken bir problemdir. Problemin temelinde kişilerin yetkinliklerine göre vardiyalara atanması, kişilerden beklenen mesailerin birbirinden minimum sapmada olması ve adil bir dağıtım olması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada vardiya çizelgeleme probleminin modellenmesi için atama problemi türlerinden sıklıkla kullanılan hemşire çizelgeleme alanı seçilmiştir. Kısıtların belirlenmesinde yasaların belirlediği zorunlu durumlar, hastanenin belirlediği ihtiyaçlar, çalışanların yetkinlik/sorumlulukları ve izin durumları göz önünde bulundurulmuştur. Bunun yanında adil bir çizelgeleme olması için personellerin vardiyalara eşit dağıtımın sağlanması ve izin günlerinin mümkün olduğunda art arda olması hedeflenmiştir. Tüm kısıtların sağlandığı ve birden fazla sayıdaki birbiriyle çelişebilecek hedeflerin minimum sapma ile gerçekleştirilmesi için hedef programlamadan yararlanılmıştır. Bunların yanında gerçek hayat verileri içeren olasılık temelli farklı senaryolardaki taleplere cevap verilebilmesi için stokastik parametreler de modele eklenmiştir. Seçilen problemin içeriğinde iki farklı birimde çalışan farklı yetkinlikteki yirmi sekiz hemşire için gerekli kısıtları sağlayarak adil dağıtımı sağlayan ve belirsizlik durumlarına uygun cevabı verebilecek bir modelleme yapılmıştır. Kurulan model, GAMS programı ile stokastik karma tam sayılı hedef programlama (MIP) kullanılarak çözüm aranmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Vardiya çizelgeleme, hedef programlama, stokastik modelleme

## 1. Giriş (Introduction)

Vardiya çizelgeleme personel veya iş gücü çizelgelemenin bir alt dalıdır. Tanım olarak; belirli periyotta yasal, sosyal ve organizasyonel kısıtlar altında iş gücü ile işlerin karşılanmasını sağlayan atama planının yapılmasıdır [1]. Personellere uygun olan atamaların yapılması için personel tercihleri ve yeterlilikleri, işin gereklilikleri gibi pek çok kriter kullanılmaktadır. Bu sebeple de analitik yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Doğru planlamanın yapılması sağlanarak personel verimi, dolayısıyla işin/hizmetin verimi artırılıp ve müşteri ihtiyaçları daha hızlı ve kaliteli şekilde karşılanabilmektedir [2].

Doğrusal programlama modellerinde bir amaç fonksiyonu belirlenerek bu optimize edilmeye çalışılmaktadır. Ancak idealize edilmemiş problemlerde birbiri ile çelişen ve birden fazla amaç fonksiyonun kullanılması gereken durumlar oluşabilmektedir. Bu ihtiyaca hedef programlama cevap vermektedir. Hedef programlama ile bir ya da daha fazla amacı içeren problemler, hedeflerden sapmaları minimize edecek kısıtları amaç edinerek çözülebilmektedir [3].

Çalışmamızda; yasal kısıtlar, karar vericilerin sürekli ve değişken ihtiyaçları, çalışanların adaletli vardiya çizelgelenmesi probleminin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Adil dağıtım için hedef programlama, değişken durumlara göre optimizasyon yapılması için de stokastik programlama kullanılmıştır. Bu iki yapının birlikte kullanılması bu çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Çalışmada vardiyalama problemi için birden fazla amaç göz önünde bulundurularak çözüm aranması durumu incelenmiştir. Vardiyalama için zorunlu kısıtların yanında adil dağılımın da sağlanması için hedef programlama metodu kullanılmıştır. Bununla birlikte çizelgelemenin gerekliliklerinde rastlantısal olarak değişen durumlar söz konusu olduğundan stokastik programlama metodundan da faydalanılmıştır. Her iki metot da birçok çalışmada farklı problemlerin çözümünde kullanılmıştır. Çalışmada iki metodun birlikte kullanılmasıyla elde edilen hibrit yapı sayesinde gerçek hayat problemlerinin belirsizliği ve birden fazla amaç güdümesi gereken problemlerin daha doğru ve optimal çözülmesi amaçlanmıştır.

Hedef programlama yönteminin temelleri 1955 yılında Charles ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya dayanmaktadır. Doğrusal programlama modellerinde tek bir amaç kullanılmaktadır fakat ideal olmayan veya gerçek hayat problemlerinde birçok amacın göz önünde bulundurularak çözüm aranması gerekmektedir. Hedef programlama bu ihtiyaca çözüm sunmak için geliştirilmiştir. Bu yöntemde problemin gerekliliklerine göre hazırlanmış amaç fonksiyonundaki ağırlık ve öncelikler ile birbiriyle çelişen hedeflerden sapmaların minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Hedef programlama modelinin kısıtlarında, herhangi bir şekilde ihlalin istenmediği durumlar modellenerek hedeflerin minimum sapma ile karşılanması sağlanır. Modellerin çözümlerinde doğrusal programla teknikleri kullanılır. Modelin matematiksel gösterim aşağıdaki eşitlik (1 a-c)' de paylaşılmıştır [4].

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^t d_i^+ + d_i^- \quad (1a)$$

$$\sum_{j=1}^n W_{ij} * X_j - d_i^+ + d_i^- = k_i \quad (1b)$$

$$X_j, d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1 \dots t \quad j = 1 \dots n \quad (1c)$$

Yukarıdaki denklemlerdeki değişkenlerin anlamları şöyledir;

$X_j$ ;  $i$ . karar değişkenini,  
 $W_{ij}$ ;  $i$ . hedefin  $j$ . karar değişkeni katsayısını,  
 $k_i$ ;  $i$ . hedef için ulaşılmak istenen değeri,  
 $d_i^+$ ;  $i$ . hedefin pozitif yönlü sapma değişkeni,  
 $d_i^-$ ;  $i$ . hedefin negatif yönlü sapma değişkeni,

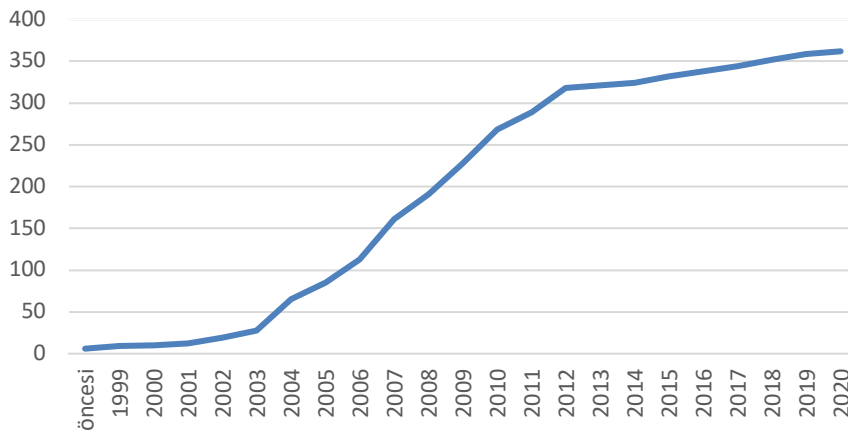
Bu çalışmada hedeflerden minimum sapmanın gerçekleştirilebilmesi için kullanılan matematiksel model 2.4. bölümdeki problem çözümünde açıklanmıştır.

Matematiksel programlamanın bir diğer dalı olan stokastik programlamadaki modellerde, parametrelerin rassal değişkenlerle tanımlandığı durumlara optimal çözüm aranır. Bu yöntem, parametrelerin belirlenmesinin zor olduğu veya gerçek hayat problemlerinde sıklıkla kullanılır. Stokastik programlamanın temelinde 3 yaklaşım vardır. Bunlar; probabilistik, çok aşamalı ve senaryo tabanlı yaklaşımdır.

Probabilistik veya diğer adıyla şans kısıtlı yaklaşımda, olaylar veya şartlarla ilgili belirsizlikler gerçekleşme olasılıklarıyla birlikte kısıta eklenir. Bu durum konveks olmayan kısıtlar kümesiyle karşılaşılmasına neden olabilir ki bu durumda çözüm oldukça zor bir hal almaktadır. Çok aşamalı veya diğer adıyla telafi yaklaşımında, gelecekteki bir durumun modellenmesi amaçlanır. Bu tip durumlar rassal olaylar kümesini gerçekleşmesinden sonra süreç hakkında bilgi alınmasını da içermektedir. Gözlemlenen çıktı grubu için bir yanıt modellenmeye çalışılır. Rassal çıktılar gözlemlenmeden önce proaktif olan birinci aşama kararlarıyla eşleştirilen çıktılara dayalı kararlar, reaktif kararlar veya ikinci aşama kararlar olarak adlandırılır. Bu tür problemlerdeki temel güçlük telafi (ikinci aşama) fonksiyonunun beklenen değerinin hesaplanmasında çok boyutlu integral hesabı gerekmesidir. Daha da zor olanı, ayrık rassal değişken içeren stokastik programlama modellerinde söz konusu fonksiyon diferansiyellenememektedir. Son yaklaşım türü stokastik problemin çözümünde senaryo tabanlı analizi içeren yaklaşımdır. Senaryo kökeni, bilinen ayrık bir olasılık dağılımından, sınırlı örnek bilgisinden, bazı yaklaşım tiplerinden ya da bir uzman fikrine dayandırılan olasılıksal önceki analizlerden elde edilebilir. Senaryo yaklaşımında ikiden fazla senaryo oluşabilmektedir [5].

### 2.1. Literatür taraması (Literature review)

Vardiya çizelgeleme çalışmaları; kamu kurumları, turizm, otelcilik, ulaşım, çağrı merkezleri, askeri sistemler ve hastanecilik gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu problemlerin çözümünde sezgisel yöntemlerden, matematiksel modellerden veya farklı hibrit modellerden faydalanılabilir. Personel çizelgeleme problemleri yıllar içinde güncelliğini korumuştur ve bu alandaki çalışmalara olan ihtiyaç artmıştır. Bu sebeple literatürde sıklıkla çalışılmaktadır. Şekil 1’de bu alandaki çalışmaların sayıları paylaşılmıştır [6].

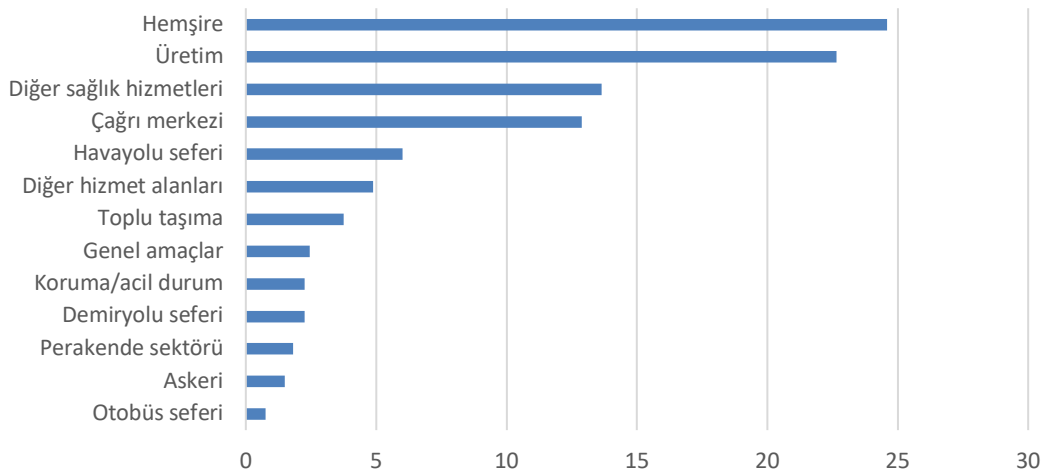


Şekil 1. Personel çizelgeleme çalışmalarında yıllara göre kümülatif dağılım (Cumulative distribution by years in personnel scheduling studies) [6]

Personel çizelgeleme problemleri farklı uygulama alanlarını içermektedir. Bu alandaki çalışmalar şekil 2’de yüzdelik dağılımlarıyla birlikte paylaşılmıştır.

Vardiya çizelgeleme problemi çözümü amaçlayan bir çalışmada, stajyer doktorların onkoloji ve hematoloji bölümlerine dengeli şekilde dağıtımını sağlayan 7 kısıttan oluşan matematiksel model kurulmuştur [7]. Tayvan’daki bir mağazada müşteri hizmetleri bölümündeki çalışanlar için ekip çizelgeleme yapılmıştır. Müşterilerle ilgilenme süresi için bulanık mantık kullanılmış ve çözüm hedef programlama ile yapılmıştır [8]. Hemşirelerin farklı mesai saatlerine göre 11 personelin 3 vardiyada çizelgelenmesinin modellendiği bir çalışmada 11 farklı kısıt ile dengeli çalışma süresinin sağlanması için hedef programlama kullanılmıştır [9]. Farklı kliniklerde çalışan stajyer doktorların tecrübe seviyeleri göz önünde bulundurularak, karışık tam sayılı matematiksel modelleme yapılmıştır [10].





Şekil 2. Personel çizelgeleme uygulama alanları (Personnel scheduling application areas) [6]

Türkiye’de bir devlet hastanesindeki 11 hemşire ve 4 sağlık memurunun üroloji ve kulak burun boğaz servislerinde 3 vardiya için çizelgenmesi operasyonel kısıtlara göre ağırlıklı hedef programlama kullanılarak çözülmüştür. Ağırlıkların bulunması için analitik ağ prosesi yöntemi kullanılmıştır [11]. Hemşire çizelgenmesi problemi için mesai saatlerinin başlangıçlarında ve farklı çalışma/mola seçenekleriyle esneklik sağlayan 0-1 tam sayılı programlama ile çözüm sunulmuştur [12]. 3 vardiyada üretim yapan bir firmada çalışan şeflerin kıdem seviyelerine göre vardiya ihtiyaçlarına göre çalışmalarının çizelgenmesini yapan sistemde analitik hiyerarşik prosesi ve hedef programlama kullanılarak modelleme yapılmıştır [13]. Hastanenin yönetsel/operasyonel kararları, değişken ve sabit koşullar dikkate alınarak 0-1 tam sayılı modelde 4 haftalık periyot için çalışan çizelgemesi yapılmıştır [14]. Çalışan memnuniyetini maksimum seviyede tutmaya çalışan bir modelde hemşirelerin vardiya ve izin günü tercihleri göz önünde bulundurularak çalışılmıştır. Tam sayılı programlama ve genetik algoritma kullanılarak iki model oluşturulup sonuçlar incelenmiştir [15].

Vardiyalama problemi gerçek hayat verileriyle düzeltilmeden çalışıldığında belirsiz durumlarla karşılaşabilmektedir. Bu durumda farklı senaryoların gerekliliklerine cevap verebilecek modeller oluşturulmalıdır. Sürekli çalışan ve değişken durumda ihtiyaca cevap verebilecek şekilde icapçı çalışan olarak iki hemşire grubunun çalışmasını programlamak için çok amaçlı sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Çalışmanın önerdiği model CPLEX kullanılarak çözülerek, manuel ve matematiksel modelden elde edilen çözümlerle; eşitlik, kısıtların sağlanması, eşitlik, çalışan tercihlerin karşılanması, alternatif vardiya sayısı ve ergonomi başlıkları kistas kabul edilerek karşılaştırılmıştır [16]. Hemşire taleplerini göz önünde bulundurarak makul seviyede talep ettikleri vardiyada çalışmasını sağlayıp, fazla mesainin en küçüklenmeye çalışıldığı modelde, bu belirsizliklere göre çizelgeleme yapılmıştır. Çözüm için 4 farklı bulanık mantık yaklaşım türü kullanılmıştır; minimum, ağırlıklı ortalama, bulanık ve operatör yaklaşımı, iki fazlı yaklaşım [17].

Ortalama yaklaşım yöntemi kullanılarak oluşturulan modelde, hemşire ihtiyacındaki, hemşirelerin tercihlerindeki, hasta sayılarındaki, hastaların kalma süreleri ve beklenmeyen durumlardaki belirsizlikler göz önünde bulundurularak maliyeti en küçüklemeye çalışılmıştır [18]. 2 farklı birimdeki 3 vardiyada çalışması planlanan hemşireler için hedef programlama kullanılarak çizelgeleme yapılmıştır [19]. İlk adımında Augmecon2 adlı epsilon tekniği kullanılarak oluşturulan çok amaçlı matematiksel model ile ikinci adımda oluşturulan planlayıcı ve yönetimin belirlediği parametreler ile çizelgeleme yapılmıştır [20]. Organizasyonel kısıtlamalar ve genel kabul görmüş kurallara ek olarak hemşire tercihleri, izin talepleri ve hemşire hasta oranı kullanılarak hazırlanan model çok amaçlı karma tam sayılı hedef programlama ile çözülmüştür [21]. Bir hastanenin acil bölümündeki hemşirelerin mesai süresi ve iş yüklerinin adil şekilde dağıtılması için üç farklı gruba ayrılan hemşireler yönetimin ve hemşire taleplerinin doğrultusunda mesai ücretlerinin en küçüklenmesi amaç edinilerek çizelgelendirilmiştir [22].

Bir çizelgeleme probleminde; doğumhanedeki çalışanlar hemşire, yarı zamanlı çalışan özel durumlarda kullanılan çalışan olarak gruplandırıp, çalışma günlerini normal, icapçı ve izin günü olarak düzenlenmiştir. Modelin amacı bir bölümdeki eksikliğin diğer bölümlerden tamamlanmasını en aza indirmektir. Çalışmada ayrıca periyodun sonunda iş yükü hesaplanmakta ve bu bilgi diğer periyodun girdisi olmaktadır, bununla modele dinamik bir yapı kazandırılmıştır [23]. Personel ihtiyacının belirsizliği durumu için iki aşamalı

stokastik bir çözüm yolu izlenen modelde, birinci aşamada personel atamaları yapıp ikinci aşamada ise yeni talep bilgilerine göre beklenti dışı (non-anticipativity) kriterine göre karar değişkenleri düzenlenmiştir [24]. Bir sağlık hizmet sağlayıcısının fiyasyon ekibi personellerinin hedef programlama ile modeli kurulmuştur. Model GAMS paket programı kullanılarak CPLEX çözücüsü ile başarılı şekilde çözülmüştür [25]. Türkiye'deki bir devlet hastanesinin çocuk acil departmanındaki çalışanlar için yapılan çizelgeleme çalışmasında, 20 hemşire için 2 aylık periyotta, tam sayılı hedef programlama ile dinamik modelleme yapılmıştır. Modelin çözümünde GAMS programı aracılığıyla Gurobi çözücüsü kullanılmıştır. [26].

Literatür taramasında da görüldüğü gibi ilgilenilen vardiya çizelgeleme (hemşire çizelgeleme) probleminin için pek çok model denenmiştir. Yukarıda incelenen tam sayılı veya karışık sayılı doğrusal programlama, hedef programlama gibi modellere ek olarak yapay zekâ teknikleri [27-29] veya genetik algoritma [30-32], tabu arama [32-34] vs. gibi sezgisel yaklaşımlar ile oluşturulmuş modeller de mevcuttur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde vardiyalama çizelgeleme için yapılan birçok çalışma olduğu görülmektedir. Bu problemin farklı tipleri için farklı çözüm yöntemleri denenmiştir. İhtiyaçlar ve kaynaklar farklı olduğundan her çözüm probleme özel kısıtlar gerektirmektedir. Bu çalışmada ele alınan problemin literatürdekilerden farkı hem adil dağılım hem de belirsizlik içeren durumlara da cevap verebilecek şekilde çizelgeleme istenmesidir. Bu problemin çözümünde; adil dağılımın sağlanması için hedef programlama, belirsizlik içeren senaryolar için de stokastik programlama kullanılmıştır. Çalışma bu yönüyle literatürden ayrılmaktadır.

## 2.2. Problemin tanımlanması (Defining the problem)

Bir hastane artan talebi karşılamak için yeni bir hizmet binası açmıştır. Poliklinikleri büyüterek veya sayısını artırarak hasta talebine cevap vermeye çalışmıştır. Fakat bu durum ameliyathane çalışanlarının vardiya dağıtımında sıkıntılara yol açmıştır. Hali hazırda yapılan sistemde ameliyathane sorumlu hemşireleri fazladan mesai harcayarak hemşirelerini vardiyalara dağıtmakta ve bu durum da hemşireler adaletli dağıtılmadığını iddia etmektedir. Bu soruna çözüm bulabilmek adına vardiya dağıtımının matematiksel modelleme ile düzenlenmesi istenmektedir. Gerekli kısıtlar aşağıdaki gibi bildirilmiştir;

- Haftalık çalışma saati 45 saattir.
- Günlük hemşire ihtiyacı kesinlikle karşılanmalıdır. Hemşire ihtiyaçları için literatürdeki bir çalışma seçilmiştir [19].
- Her bir hemşire bir günde yalnızca tek vardiyada (vardiya detayları Tablo 1 ve Tablo 2'de paylaşılmıştır) çalışabilir.
- Tam vardiyada çalışan hemşire vardiya bitiminden itibaren 48 saat izinli olmak zorundadır.
- Hemşireler her bir hafta sonunda en fazla bir gün çalışmalıdırlar.
- Aml1 ve Aml2 ameliyathane sorumlu hemşireleri sadece hafta içi sabah vardiyalarında çalışmalıdırlar (Aml: Ameliyathane kısıltmasıdır. Modelde 1. ve 2. hemşireler sorumlu hemşirelerdir).
- 3 no'lu hemşire 15-22 günlerinde yıllık izinlidir (Ay pazartesi ile başlayacak ve 4 hafta sürecektir)
- 4,5,6 no'lu hemşireler sadece Aml1 ve 7,8 no'lu hemşireler sadece Aml2 ameliyathanelerinde çalışacaktır (Demirbaş hemşiresi olduklarından envanter hakimiyetleri olması istenmektedir).
- Tam ve gece vardiyasında minimum sayıda hemşire çalışmalıdır.

Hemşireler şu an ki vardiya programlarının adaletli olmadığını iddia ettiğinden bu modele aşağıdaki kısıtlar eklenmelidir;

- Tam vardiya atamaları eşit olmalı.
- Gece vardiya atamaları eşit olmalı.
- Toplam vardiya atamaları eşit olmalı.

Bu kısıtlar dışında hastane bazı hafta sonları Aml1 ameliyathanesini dışarıdan gelen saç ekimi veya estetik operasyonları gibi küçük işlerde de ameliyathane malzemesi ve hemşire desteği vermektedir. Bu işlem süreklilik arz etmediğinden programda aksamalara yol açmaması için dışarıdan hemşire alınabilmektedir. Bu olayın gerçekleşme olasılığını %50 ve gerekebilecek hemşire sayısının 5 artabildiğini bildirmiştir.

### 2.3. Problemin çözümü (Solution of the problem)

Problem; tam sayılı hedef programlama stokastik parametrelerle desteklenerek modelleme kullanılmıştır. Çözümün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir. Çözümde kullanılan GAMS programı için hazırlanan kod Ek1.'de paylaşılmıştır.

- İndisler, Sabitler ve Parametreler

$a$ : İlgili bölümde çalışan toplam hemşire sayısı  $a = 28$

$b$ : Gün sayısı (4 hafta)  $b = 28$

$c$ : Vardiya sayısı (sabah, tam, gece)  $c = 3$

$d$ : Bölüm sayısı (aml1, aml2)  $d = 2$

$i$ : Hemşire indisi  $i = 1, 2, \dots, a$

$j$ : Gün indisi  $j = 1, 2, \dots, b$

$k$ : Vardiya indisi  $k = 1, 2, \dots, c$

$l$ : Bölüm indisi  $l = 1, 2, \dots, d$

$|C_t|$  = Toplam tam vardiya atama sayısı; maks 3, min 2(toplam tam vardiyası sayısı/ sorumlular hariç toplam hemşire sayısı)

$|C_g|$  = Toplam gece vardiya atama sayısı; maks 5, min 4(toplam gece vardiyası sayısı/ sorumlular hariç toplam hemşire sayısı)

$T$  = Toplam atama sayısı; 13 (toplam vardiya sayısı/toplam hemşire sayısı)

$X_c$  = Hastane çalışanı olan hemşirenin maliyeti; 1

$Q_c$  = Dışarıdan çağırılan hemşirenin maliyeti; 1

$W_k$  =  $k$ . vardiyanın çalışma süresi; sabah 8, tam 16, gece 8

$P_{1jk}$  = 1. senaryoda Aml1'in  $j$ . gün  $k$ . vardiyada gerekli hemşire sayısı

$P_{2jk}$  = 2. senaryoda Aml1'in  $j$ . Gün  $k$ . vardiyada gerekli hemşire sayısı

$r_{jk}$  = Aml2'nin  $j$ . gün  $k$ . vardiyada gerekli hemşire sayısı

$Q_{P(s)}$  = Senaryolar için ek operasyon yapılma ihtimali; 1. senaryo ( $S_1$ ) 0,5; 2. senaryo ( $S_2$ ) 0,5

Tablo 1. Günlük hemşire ihtiyaçları (Daily nurse needs)

Günler	Vardiyalar					
	Aml1			Aml2		
	Sabah	Tam	Gece	Sabah	Tam	Gece
Pazartesi	3	1	2	3	1	2
Salı	3	1	2	3	1	2
Çarşamba	3	1	2	3	1	2
Perşembe	3	1	2	3	1	2
Cuma	3	1	2	3	1	2
Cumartesi	2 ( $S_2+3$ )	2	2	2	2	2
Pazar	2 ( $S_2+3$ )	2	2	2	2	2

Tablo 2. Vardiya saat ve süreleri (Shift hours and times)

Vardiyalar	Saatler	Toplam Süre
Sabah	08:00 - 16:00	8 saat
Tam	20:00 - 12:00	16 saat
Gece	16:00 - 00:00	8 saat

- Karar değişkenleri

$X_{ijkl}$  = Hastanedeki  $i$ . hemşire,  $j$ . gün,  $k$ . vardiya,  $l$ . bölüme atanırsa '1', aksi durumda '0'

$Q_j$  =  $j$ . gün dışarıdan çağırılan hemşire sayısı

$|M_i|$ : Gece vardiya atamaları sapma değişkeni

$|N_i|$ : Tam vardiya atamaları sapma değişkeni

$|Y_{ij}|$ : Hemşirelere verilen izinlerin sapma değişkeni  
 $|Z_i|$ : Toplam vardiya atamaları sapma değişkeni

- Kısıtlar

Bu bölümde problemin tanımlanması bölümünde açıklanan kısıtların modelleri ve gerekçeleri paylaşılmıştır.

$$\sum_{j=1}^7 W_1 * X_{ij1l} + W_2 * X_{ij2l} + W_3 * X_{ij3l} \leq 45 \quad \forall i, l \quad (2a)$$

$$\sum_{j=8}^{14} W_1 * X_{ij1l} + W_2 * X_{ij2l} + W_3 * X_{ij3l} \leq 45 \quad \forall i, l \quad (2b)$$

$$\sum_{j=15}^{21} W_1 * X_{ij1l} + W_2 * X_{ij2l} + W_3 * X_{ij3l} \leq 45 \quad \forall i, l \quad (2c)$$

$$\sum_{j=22}^{28} W_1 * X_{ij1l} + W_2 * X_{ij2l} + W_3 * X_{ij3l} \leq 45 \quad \forall i, l \quad (2d)$$

Eşitlik (2 a-d) ile her bir hemşirenin yasal limit olan haftalık 45 saat çalışma limitini aşmaması sağlanmıştır.

$$\sum_{i=1}^a X_{ijk1} = p1_{jk} \quad \forall j, k = 2,3 \quad (3a)$$

$$\sum_{i=1}^a X_{ijk2} = r_{jk} \quad \forall j, k \quad (3b)$$

$$\sum_{i=1}^a X_{ij11} + Q_j = p2_{j1} \quad \forall j \quad (3c)$$

Eşitlik (3 a-c) ile kurumun olası tüm durumlar için ihtiyaç duyduğu hemşire sayısının karşılanması sağlanmıştır.

$$\sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i, j \quad (4)$$

Eşitlik (4) ile her bir hemşirenin çalıştığı her bir gün için yalnızca bir vardiyada çalışması sağlanmıştır.

$$\sum_{l=1}^d X_{ij2l} + X_{i(j+1)1l} + X_{i(j+1)3l} + X_{i(j+2)1l} + X_{i(j+2)2l} + X_{i(j+2)3l} \leq 1 \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, (b-2) \quad (5)$$

Eşitlik (5) ile tam vardiyada çalışan hemşirelerin mesai bitiminden itibaren 48 saat izinli olması sağlanmıştır.

$$\sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d X_{i6kl} + X_{i7kl} \leq 1 \quad \forall i \quad (6a)$$

$$\sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d X_{i13kl} + X_{i14l} \leq 1 \quad \forall i \quad (6b)$$

$$\sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d X_{i20kl} + X_{i21l} \leq 1 \quad \forall i \quad (6c)$$

$$\sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d X_{i27kl} + X_{i28kl} \leq 1 \quad \forall i \quad (6d)$$

Eşitlik (6 a-d) ile hafta sonları çalışan hemşirelerin art arda hafta sonu çalışmaması sağlanmıştır.

$$X_{1jk1} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 2, 3; \quad X_{2jk1} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (7a)$$

$$X_{1jk2} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c \quad X_{2jk2} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 2, 3; \quad (7b)$$

$$X_{1j11} = 0 \quad j = 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28 \quad X_{2j12} = 0 \quad j = 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28 \quad (7c)$$

Eşitlik (7 a-c) ile sorumlu hemşirelerin hafta içi, sabah vardiyasında ve kendi ameliyathanelerinde çalışması sağlanmıştır.

$$Q_j = 0 \quad j = b - \{6,7,13,14,20,21,27,28\} \quad (8)$$

Eşitlik (8) ile dışarıdan sadece hafta sonları operasyonları için hemşire çağırılabilmesi sağlanmıştır.

$$X_{3jkl} = 0 \quad j = 15, 16, \dots, 22; \quad k = 1, 2, \dots, c; \quad l = 1, 2, \dots, d \quad (9)$$

Eşitlik (9) ile 3. hemşirenin 15-22 günleri arasında yıllık izinli olması sağlanmıştır.

$$X_{ijk2} = 0 \quad i = 4,5,6; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (10a)$$

$$X_{ijk1} = 0 \quad i = 7,8; \quad j = 1, 2, \dots, b; \quad k = 1, 2, \dots, c \quad (10b)$$

Eşitlik (10 a-b) ile 4,5,6 hemşirelerin Aml1, 7,8 numaralı hemşirelerin Aml2'de çalışması sağlanmıştır.

$$\sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d X_{ij2l} \leq Ct \quad i = 3,4, \dots, a \quad (11a)$$

$$\sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d X_{ij3l} \leq Cg \quad i = 3,4, \dots, a \quad (11b)$$

Eşitlik (11 a-b) ile tam ve gece vardiyasında minimum sayıda hemşirenin çalışması sağlanmıştır.

- Adil Çizelgeleme Sağlayan Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d X_{ij2l} + |n_i| = Ct \quad i = 3,4, \dots, a \quad (12)$$

Eşitlik (12) ile tam vardiya atamalarının eşit olması sağlanmıştır.

$$\sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d X_{ij3l} + |m_i| = Cg \quad i = 3,4, \dots, a \quad (13)$$

Eşitlik (13) ile gece vardiya atamalarının eşit olması sağlanmıştır.

$$\sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d X_{ij1l} + X_{ij2l} + X_{ij3l} + |z_i| = 1 \quad \forall i \quad (14)$$

Eşitlik (14) ile toplam vardiya atamalarının eşit olması sağlanmıştır.

- Amaç Fonksiyonu: Eşitlik (15) ile tam/gece/toplam vardiya sayılarının eşitlikten sapması, dışarıdan çağırılan hemşirelerin maliyet değerlerinin en küçüklenmesi sağlanmıştır.

$$\text{Min}(z) = \sum_{i=3}^a (|n_i| + |m_i|) + \sum_{i=1}^a |z_i| + Q_{P(1)} * Q_C * \sum_{j=1}^b Q_j + Q_{P(2)} * Q_C * \sum_{j=1}^b Q_j$$

$$X_{ijkl} : 0,1; \quad Q_j, |M_i|, |N_i|, |Y_{ij}|, |Z_i| \geq 0 \quad (15)$$

Tam ve gece vardiyalarındaki sapmaların hesaplanmasında sorumlu hemşireler sadece sabah vardiyasında çalıştığı için hariç tutulmuştur. Bunun yanında her bir hemşirenin toplam vardiya atamalarının eşit olması hedef kısıtı olduğundan bu değerdeki sapmanın da amaç fonksiyonuyla minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Bunlar dışında maliyet kısıtı için dışarıdan çağrılan hemşire sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Dışarıdan çağrılan hemşire sayısı değişkeni, senaryo olasılığı ve ücret parametreleriyle çarpılarak amaç fonksiyonuna eklenmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Modelin GAMS kodu Ek1’de, optimizasyon sonuçları Ek2’de verilen Tablo’da paylaşılmıştır. Aynı şekilde elle yapılan çizelgeleme sonucu Ek3’de verilen Tablo’da paylaşılmıştır. Amaç fonksiyonu parametreleri olan tam vardiyası atama sayısı sapması, gece vardiyası atama sayısı sapması, toplam vardiyaya atama sayısı ve dışarıdan çağrılan hemşire sayısı parametrelerine göre değişim Tablo 3’de paylaşılmıştır.

Tablo 3. Optimizasyonun Değerlendirilmesi (Evaluation of optimization)

Parametreler	Elle Yapılan Çizelgeleme	Optimizasyon Sonucu
Tam Vardiyası Atama Sayısı Sapması	69	13
Gece Vardiyası Atama Sayısı Sapması	128	15
Toplam Vardiya Atama Sayısı Sapması	159	32
Dışarıdan Çağrılan Hemşire Sayısı	40	25

Elle hazırlanan hemşire çizelgesi için ilgili parametrelere göre hesaplanan amaç fonksiyonu değeri yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere 396’dır. Bunun yanında optimizasyon sonucu oluşturulan çizelgeleme için amaç fonksiyonu değeri 85 bulunmuştur. Hazırlanan değerlendirme tablosuna göre elde edilen faydalar; tam vardiyaya sapması için 5,3, gece vardiyaya ataması sapması için 8,5, toplam vardiyaya atama sapması için 4,9 ve dışarıdan çağrılan hemşire sayısı için 1,6 olmuştur. Buna göre amaç fonksiyonu değerindeki toplam fayda yaklaşık 4,7 ‘dir.

Hedef programlamanın çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılmasına ek olarak gerçek hayat problemlerinin dinamikliği ve belirsizliğinin çözümü için bu çalışmada stokastik modelleme parametrelerinin kullanılması önerilmiştir. Sonraki çalışmalar için önceki ayın çizelgelemesini de göz önünde bulundurarak sonraki ayları çizelgeleyen modeller kurulabilir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] Q-K. Pan, P. N. Suganthan, T. J. Chua, and T. X. Cai, “Solving manpower scheduling problem in manufacturing using mixed-integer programming with a two-stage heuristic algorithm,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 9–12, pp. 1229–1237, Jul. 2009. doi:10.1007/s00170-009-2175-8
- [2] S. Topaloglu and I. Ozkarahan, “An Implicit Goal Programming Model for the Tour Scheduling Problem Considering the Employee Work Preferences,” *Annals of Operations Research*, vol. 128, no. 1–4, pp. 135–158, Apr. 2004. doi:10.1023/b:anor.0000019102.68222.df
- [3] U. Ozcan and B. Toklu, “Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models,” *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 6, pp. 1955–1965, Jun. 2009. doi:10.1016/j.cor.2008.06.009
- [4] M. Timor, *Yöneylem Araştırması*. Turkmen Kitabevi, Istanbul, 2010
- [5] O. Onalan, *Stokastik Süreçler*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2022
- [6] E. H. Ozder, E. Ozcan, and T. Eren, “A Systematic Literature Review for Personnel Scheduling Problems,” *International Journal of*

*Information Technology & Decision Making*, vol. 19, no. 06, pp. 1695–1735, Oct. 2020. doi:10.1142/s0219622020300050

[7] Adel Elomri, S. Elthlatiny, and Zainab Sidi Mohamed, “A Goal Programming Model for Fairly Scheduling Medicine Residents,” *International Journal of Supply Chain Management*, vol. 4, no. 2, Jun. 2015.

[8] H.-T. Lin, Y.-T. Chen, T.-Y. Chou, and Y.-C. Liao, “Crew rostering with multiple goals: An empirical study,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 483–493, Sep. 2012. doi:10.1016/j.cie.2012.04.013

[9] H. Sulak and Mustafa Bayhan, “A Model Suggestion and an Application for Nurse Scheduling Problem,” *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*, Apr. 2016. doi:10.5281/zenodo.3965502

[10] S. Topaloglu, “A shift scheduling model for employees with different seniority levels and an application in healthcare,” *European Journal of Operational Research*, vol. 198, no. 3, pp. 943–957, Nov. 2009. doi:10.1016/j.ejor.2008.10.032

[11] Nurgül Bag, Necati Ozdemir, and T. Eren, “Solving A 0-1 Goal Programming and ANP Methods with Nurse Scheduling Problem,” *International Journal of Engineering Research and Development*, Jan. 2012.

[12] Y. Ozturkoglu and F. Caliskan, “Hemşire Çizelgelemede Esnek Vardiya Planlamasi ve Hastane Uygulamasi,” *Dokuz Eylul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 16, no. 1, p. 115, Apr. 2014. doi:10.16953/deusbed.07850

[13] E. Varli and T. Eren, “Vardiya Cizelgeleme Problemi ve Bir Örnekle Uygulama,” *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, pp. 185–185, Apr. 2017. doi:10.17671/gazibtd.309302

[14] Ediz Atmaca, Ceydanur Pehlivan, C. Begum Aydogdu, and Mehmet Yakici, “Hemşire çizelgeleme problemi ve uygulaması,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 28, no. 4, pp. 351–358, Aug. 2012.

[15] C.-C. Lin, J.-R. Kang, D.-J. Chiang, and C.-L. Chen, “Nurse Scheduling with Joint Normalized Shift and Day-Off Preference Satisfaction Using a Genetic Algorithm with Immigrant Scheme,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, no. 7, p. 595419, Jul. 2015. doi:10.1155/2015/595419

[16] A. Legrain, H. Bouarab, and N. Lahrichi, “The Nurse Scheduling Problem in Real-Life,” *Journal of Medical Systems*, vol. 39, no. 1, Dec. 2014. doi:10.1007/s10916-014-0160-8

[17] H. Jafari, S. Bateni, P. Daneshvar, S. Bateni, and H. Mahdioun, “Fuzzy Mathematical Modeling Approach for the Nurse Scheduling Problem: A Case Study,” *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 320–332, Jul. 2015. doi:10.1007/s40815-015-0051-2

[18] M. Bagheri, A. Gholinejad Devin, and A. IZANLOO, “An application of stochastic programming method for nurse scheduling problem in real word hospital,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 96, pp. 192–200, Jun. 2016. doi:10.1016/j.cie.2016.02.023

[19] E. Varli, B. Ergisi, and T. Eren, “Ozel Kistli Hemsire Cizelgeleme Problemi: Hedef Programlama Yaklasimi,” *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 0, no. 49, pp. 189–189, Jun. 2017. doi:10.18070/erciyesiibd.323910

[20] M. M. Nasiri and M. Rahvar, “A two-step multi-objective mathematical model for nurse scheduling problem considering nurse preferences and consecutive shifts,” *International Journal of Services and Operations Management*, vol. 27, no. 1, p. 83, 2017. doi:10.1504/ijssom.2017.083338

[21] B. Y. Ang, S. W. S. Lam, Y. Pasupathy, and M. E. H. Ong, “Nurse workforce scheduling in the emergency department: A sequential decision support system considering multiple objectives,” *Journal of Nursing Management*, vol. 26, no. 4, pp. 432–441, Dec. 2017. doi:10.1111/jonm.12560

[22] Nasr Al-Hinai, Noor Al-Yazidy, Anfal Al-Hooti, and Ekhlas Al-Shereiqi, “A goal programming model for nurse scheduling at emergency department,” *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 99–103, Jan. 2018.

[23] S. Zanda, P. Zuddas, and C. Seatzu, “Long term nurse scheduling via a decision support system based on linear integer programming: A case study at the University Hospital in Cagliari,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 126, pp. 337–347, Dec. 2018. doi:10.1016/j.cie.2018.09.027

[24] S. Batun and E. Karpuz, “Belirsizlik Varken Hemsire Cizelgeleme Problemi,” *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 38, no. 1, pp. 75–95, Mar. 2020. doi:10.17065/huniibf.483986

[25] M. Arslan and B. Ozcan, “Hemsire Cizelgeleme Problemi ve Bir Saglik Kurulusunda Uygulama,” *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Nov. 2021. doi:10.25092/baunfbed.947636

[26] E. Bayraktar and E. A. Adali, “Hemsire Cizelgeleme Probleminde Tam Sayili Hedef Programlama Modeli ve Cocuk Acil Bolumunde Bir Uygulama,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 15, no. 2, pp. 246–260, Apr. 2022. doi:10.25287/ohuiibf.855824

[27] H. Li, A. Lim, and B. Rodrigues, “A hybrid AI approach for nurse rostering problem,” Mar. 2003. doi:10.1145/952532.952675

[28] L.H. Tein, R. Ramli, “Recent advancements of nurse scheduling models and a potential path,” in *Proceedings of the 6th IMT-GT Conference on Mathematics, Statistics and its Applications (ICMSA2010)*, Citeseer, 2009, pp. 395–409.

[29] C. Chang, H. Jen, and W. Su, “Trends in artificial intelligence in nursing: Impacts on nursing management,” *Journal of Nursing*

*Management*, vol. 30, no. 8, Aug. 2022. doi:10.1111/jonm.13770

[30] U. Aickelin and K. A. Dowsland, "An indirect Genetic Algorithm for a nurse-scheduling problem," *Computers & Operations Research*, vol. 31, no. 5, pp. 761–778, Apr. 2004. doi:10.1016/s0305-0548(03)00034-0

[31] A. Amindoust, M. Asadpour, and S. Shirmohammadi, "A Hybrid Genetic Algorithm for Nurse Scheduling Problem considering the Fatigue Factor," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2021, pp. 1–11, Mar. 2021. doi:10.1155/2021/5563651

[32] J. Schrack, R. Ortega, K. Dabu, D. Truong, M. Aibin, and A. Aibin, "Combining Tabu Search and Genetic Algorithm to Determine Optimal Nurse Schedules," *IEEE Xplore*, Sep. 01, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9569111> [accessed Jan. 27, 2023].

[33] R. Ramli, S. N. I. Ahmad, S. Abdul-Rahman, and A. Wibowo, "A tabu search approach with embedded nurse preferences for solving nurse rostering problem," *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, vol. 11, p. 10, 2020. doi:10.1051/smdo/2020002

[34] A. A. Abayomi-Alli, F. O. Uzedu, S. Misra, O. O. Abayomi-Alli, and O. T. Arogundade, "Hybrid model of genetic algorithms and Tabu search memory for Nurse Scheduling Systems," *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, vol. 13, no. 1, pp. 1–20, 2022. doi:10.4018/ijssmet.297494

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



## Ek-1. (Apendix-1.)

Hemşire vardiyalama probleminin çözümü için önerilen modelin GAMS kodu aşağıda paylaşılmıştır.

```
sets
i hemşireler /1*28/
j günler /1*28/
k vardiyalar /sabah, tam, gece/
l bölüm /aml1, aml2/
s senaryo /s1, s2/;
scalar
a toplam hemşire /28/
b toplam gün /28/
c toplam vardiya /3/
d toplam bölüm /2/
xc hast hemş maliyet /1/
qc dışarıdan hemş maliyet /1/
Cti toplam tam vardiya /3/
Cgi toplam gece vardiya /5/
Cte toplam tam vardiya /2/
Cge toplam gece vardiya /4/
T toplam atama /13/;
parameters
W(k) vardiyaların mesai süresi /sabah 8, tam 16, gece 8/
qp(s) senaryoların olasılığı /s1 0.5, s2 0.5/;
```

Table p1(j,k) 1. senaryo için aml1 gerekli hemşire

	sabah	tam	gece
1	3	1	2
2	3	1	2
3	3	1	2
4	3	1	2
5	3	1	2
6	2	2	2
7	2	2	2
8	3	1	2
9	3	1	2
10	3	1	2
11	3	1	2
12	3	1	2
13	2	2	2
14	2	2	2
15	3	1	2
16	3	1	2
17	3	1	2
18	3	1	2
19	3	1	2
20	2	2	2
21	2	2	2



22	3	1	2
23	3	1	2
24	3	1	2
25	3	1	2
26	3	1	2
27	2	2	2
28	2	2	2;

Table p2(j,k) 2. senaryo için aml1 gerekli hemşire  
sabah tam gece

1	3	1	2
2	3	1	2
3	3	1	2
4	3	1	2
5	3	1	2
6	5	2	2
7	5	2	2
8	3	1	2
9	3	1	2
10	3	1	2
11	3	1	2
12	3	1	2
13	5	2	2
14	5	2	2
15	3	1	2
16	3	1	2
17	3	1	2
18	3	1	2
19	3	1	2
20	5	2	2
21	5	2	2
22	3	1	2
23	3	1	2
24	3	1	2
25	3	1	2
26	3	1	2
27	5	2	2
28	5	2	2;

Table r(j,k) aml2 gerekli hemşire  
sabah tam gece

1	3	1	2
2	3	1	2
3	3	1	2
4	3	1	2
5	3	1	2
6	2	2	2
7	2	2	2
8	3	1	2
9	3	1	2
10	3	1	2
11	3	1	2
12	3	1	2
13	2	2	2
14	2	2	2
15	3	1	2
16	3	1	2
17	3	1	2
18	3	1	2
19	3	1	2
20	2	2	2
21	2	2	2
22	3	1	2
23	3	1	2
24	3	1	2
25	3	1	2
26	3	1	2
27	2	2	2
28	2	2	2;

binary variables  
x(i,j,k,l)

positive variables

```

q(j), ny(i), ne(i), my(i), me(i), yy(i,j), ye(i,j), zy(i), ze(i);
variables z;
equations
amac.. z=e+sum((i)$ (ord(i) ge 3), ne(i)+me(i))+ sum(i, zy(i)+ ze(i))+qp('s1')*qc*sum(j,q(j))+qp('s2')*qc*sum(j,q(j));
kis1(i,l).. sum((j) $(ord(j) le 7), W('sabah')*X(i,j,'sabah',l)+ W('tam')*X(i,j,'tam',l)+ W('gece')*X(i,j,'gece',l))=l=45;
kis2(i,l).. sum((j) $(ord(j) ge 8 and ord(j) le 14), W('sabah')*X(i,j,'sabah',l)+ W('tam')*X(i,j,'tam',l)+ W('gece')*X(i,j,'gece',l))=l=45;
kis3(i,l).. sum((j) $(ord(j) ge 15 and ord(j) le 21), W('sabah')*X(i,j,'sabah',l)+ W('tam')*X(i,j,'tam',l)+ W('gece')*X(i,j,'gece',l))=l=45;
kis4(i,l).. sum((j) $(ord(j) ge 22 and ord(j) le 28), W('sabah')*X(i,j,'sabah',l)+ W('tam')*X(i,j,'tam',l)+ W('gece')*X(i,j,'gece',l))=l=45;
kis6(j,k).. sum(i, X(i,j,k,'aml2'))=e=r(j,k);
kis7(i,j).. sum((k,l), X(i,j,k,l))=l=1;
kis8(i,j)$ (ord(j) le 26).. sum((l), X(i,j,'tam',l)+X(i,j+1,'sabah',l)+X(i,j+1,'tam',l)+X(i,j+1,'gece',l)+X(i,j+2,'sabah',l)+X(i,j+2,'tam',l)+X(i,j+2,'gece',l))=l=1;
kis10(i).. sum((k,l), X(i,'6',k,l)+X(i,'7',k,l))=l=1;
kis11(i).. sum((k,l), X(i,'13',k,l)+X(i,'14',k,l))=l=1;
kis12(i).. sum((k,l), X(i,'20',k,l)+X(i,'21',k,l))=l=1;
kis13(i).. sum((k,l), X(i,'27',k,l)+X(i,'28',k,l))=l=1;
kis14(j,k)$ (ord(k) ge 2).. X('1',j,k,'aml1')=e=0;
kis15(j,k).. X('1',j,k,'aml2')=e=0;
kis16..
X('1','6','sabah','aml1')+X('1','7','sabah','aml1')+X('1','13','sabah','aml1')+X('1','14','sabah','aml1')+X('1','20','sabah','aml1')+X('1','21','sabah','aml1')+X('1','27','sabah','aml1')+X('1','28','sabah','aml1')=e=0;
kis17(j,k)$ (ord(k) ge 2).. X('2',j,k,'aml2')=e=0;
kis18(j,k).. X('2',j,k,'aml1')=e=0;
kis19..
X('2','6','sabah','aml2')+X('2','7','sabah','aml2')+X('2','13','sabah','aml2')+X('2','14','sabah','aml2')+X('2','20','sabah','aml2')+X('2','21','sabah','aml2')+X('2','27','sabah','aml2')+X('2','28','sabah','aml2')=e=0;
kis20(j,k,l)$ (ord(j) ge 15 and ord(j) le 22).. X('3',j,k,l)=e=0;
kis21(i,j,k)$ (ord(i) ge 4 and ord(i) le 6).. X(i,j,k,'aml2')=e=0;
kis22(i,j,k)$ (ord(i) ge 7 and ord(i) le 8).. X(i,j,k,'aml1')=e=0;
kis23(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'tam',l))=l=Cti;
kis24(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'gece',l))=l=Cgi;
kis25(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'tam',l))=g=Cte;
kis26(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'gece',l))=g=Cge;
kis27(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'tam',l)+ny(i)-ne(i))=e=Cte;
kis28(i)$ (ord(i) ge 3).. sum((j,l),X(i,j,'gece',l)+my(i)-me(i))=e=Cge;
kis30(i).. sum((j,l),X(i,j,'sabah',l)+X(i,j,'tam',l)+X(i,j,'gece',l)+ zy(i)-ze(i))=e=T;
kis31(j).. sum(i, X(i,j,'sabah','aml1'))+q(j)=e=p2(j,'sabah');
kis32(j)$ (ord(j) le 5).. q(j)=e=0;
kis33(j)$ (ord(j) ge 8 and ord(j) le 12).. q(j)=e=0;
kis34(j)$ (ord(j) ge 15 and ord(j) le 19).. q(j)=e=0;
kis35(j)$ (ord(j) ge 22 and ord(j) le 26).. q(j)=e=0;
kis36(j,k)$ (ord(k) ge 2).. sum(i, X(i,j,k,'aml1'))=e=p1(j,k);
model ori/all;
solve ori using mip minimizing z;
display z,l,x;

```

**Ek-2.** (Apendix-2.)

Önerilen modelin sonuçlarına göre hazırlanan aylık hemşire vardiyalama sonuçları aşağıdaki tabloda paylaşılmıştır. Tabloda “S”, “G”, “T” ile sembolize edilen vardiyalar sırasıyla “sabah”, “gece” ve “tam” vardiyalara karşılık gelmektedir. “Aml1” ve “Aml2” ifadeleri ise hemşirelerin çalışacağı bölümleri yani “ameliyathane 1” ve “ameliyathane 2” için kullanılan kısaltmalardır.

Hemşire	Bölüm	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün	13. Gün	14. Gün	15. Gün	16. Gün	17. Gün	18. Gün	19. Gün	20. Gün	21. Gün	22. Gün	23. Gün	24. Gün	25. Gün	26. Gün	27. Gün	28. Gün
1.	Aml1	S	S			S			S		S		S			S		S		S			S		S		S		
	Aml2																												
2.	Aml1																												
	Aml2	S	S		S				S		S		S			S		S		S			S		S		S		
3.	Aml1									S			G		T										G		T		G
	Aml2				T			G																					
4.	Aml1			G		T			S		G		S		G		S		S		S		G		G		T		
	Aml2																												
5.	Aml1	S	S		S		G		T					G		T					T		S		G		G		S
	Aml2																												
6.	Aml1		G				S			G		T			T			G		G		T				S			S
	Aml2																												
7.	Aml1																												
	Aml2	G		T			S		S		G			G		G		S		S		T			T			G	
8.	Aml1																												
	Aml2			S			T			S		G		S		G		G		G		T			G		G		S
9.	Aml1	G		S						T					G										S				
	Aml2					S		S					S				S		G		S						G		T
10.	Aml1		S							G				S			S		T								G		
	Aml2				G		T					S										G		T					S
11.	Aml1			G							S		T						T										
	Aml2					S		T							S						S		G		S		G		G
12.	Aml1					G		G				S		T							S		S		T				
	Aml2			G						G							S		S										S
13.	Aml1																		S								S		
	Aml2		T			G		G		T			G		T						G		S		S				G

Hemşire	Bölüm	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün	13. Gün	14. Gün	15. Gün	16. Gün	17. Gün	18. Gün	19. Gün	20. Gün	21. Gün	22. Gün	23. Gün	24. Gün	25. Gün	26. Gün	27. Gün	28. Gün	
14.	Aml1					G		G				G		T			G		S											S
	Aml2			S						S											T			G		T				
15.	Aml1					S									S						G		T							
	Aml2	S		G				T			S		G				G		G							S		S		
16.	Aml1						S		G								S		G		T								T	
	Aml2		G		S						S		T											S		G				
17.	Aml1	T							S			S				S		G				T					S			
	Aml2				G		G						G								S				G				T	
18.	Aml1						G				S		G								S						G			
	Aml2		S		S				G						S		T					S		G				T		
19.	Aml1			T			S		G		T			S		G								G		S				
	Aml2																		T			G						S		
20.	Aml1				G											S										G		G		
	Aml2	T					S		S		S		T					S		G		T								
21.	Aml1		G		S		T			S				G				S			T			S					T	
	Aml2											G				S											G			
22.	Aml1																G							S				T		
	Aml2			S		T			G		G		S		G				S		T					S				
23.	Aml1	S		S					S				G							S		G		T						
	Aml2					G				S					T			G										T		
24.	Aml1				G																	G							T	
	Aml2	S					G		T			T			G		S		S					S		S		S		
25.	Aml1	G		S		S		T						S		G								G		S		S	S	
	Aml2										T											G								
26.	Aml1		T														T				G		G						G	
	Aml2					S		S		G		S		T											S					
27.	Aml1				T				T				S						S		S						S			
	Aml2		G												S		G								S				G	
28.	Aml1				S		T			S		S							G										G	
	Aml2	G	S											S		T						G		T			S			

**Ek-3.** (Apendix-3.)

Önerilen modelin kıyaslanması için elle hazırlanan aylık hemşire vardiyaları aşağıdaki tabloda paylaşılmıştır. Tabloda “S”, “G”, “T” ile sembolize edilen vardiyalar sırasıyla “sabah”, “gece” ve “tam” vardiyalara karşılık gelmektedir. “Aml1” ve “Aml2” ifadeleri ise hemşirelerin çalışacağı bölümleri yani “ameliyathane 1” ve “ameliyathane 2” için kullanılan kısaltmalardır.

Hemşire	Bölüm	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün	13. Gün	14. Gün	15. Gün	16. Gün	17. Gün	18. Gün	19. Gün	20. Gün	21. Gün	22. Gün	23. Gün	24. Gün	25. Gün	26. Gün	27. Gün	28. Gün
1.	Aml1	S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S		
	Aml2																												
2.	Aml1																												
	Aml2	S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S		
3.	Aml1																												G
	Aml2	S	S	S	S	S			S	S		S	S	G															
4.	Aml1	S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S		
	Aml2																												
5.	Aml1	S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	S	S	S		
	Aml2																												
6.	Aml1	T			T			G						G								G							
	Aml2																												
7.	Aml1																												
	Aml2	S		S	S	S		S	S	S		S	S	S		S	S	S	S		S		S	S	S	S	S		S
8.	Aml1																												
	Aml2	G	G		G	G		G	G	G		G	G	S		S	S	S	S		S		S	S	S	S	S		S
9.	Aml1																												
	Aml2	G		G	G	G	G		G	G	G	G	G			G	G	G	G		G		G	G	G	G	G		G
10.	Aml1																					G							
	Aml2	T			T			T			T			G		G	G		G	G			G	G	G	G		G	
11.	Aml1																												
	Aml2		T			T			T			T						T			T			T			T		
12.	Aml1																												
	Aml2			T			T			T			T			T			T			T			T			T	

Hemşire	Bölüm	1. Gün	2. Gün	3. Gün	4. Gün	5. Gün	6. Gün	7. Gün	8. Gün	9. Gün	10. Gün	11. Gün	12. Gün	13. Gün	14. Gün	15. Gün	16. Gün	17. Gün	18. Gün	19. Gün	20. Gün	21. Gün	22. Gün	23. Gün	24. Gün	25. Gün	26. Gün	27. Gün	28. Gün		
13.	Aml1		T																												
	Aml2						T							T			T			T				T			T			T	
14.	Aml1			T																											
	Aml2							T						T								T							T		
15.	Aml1																														
	Aml2		G					G							T						G		T					G		T	
16.	Aml1																														
	Aml2			G			S				S				G							G						G		G	
17.	Aml1																														
	Aml2		S				S				S				G					S		G					S		G		
18.	Aml1																														
	Aml2							S			G				S					S		S					S		S		
19.	Aml1					T																									
	Aml2														S							S							S		
20.	Aml1					G		T			T				G	T				T				T			T				
	Aml2																														
21.	Aml1						T			T							T				T				T			T			
	Aml2																														
22.	Aml1						T				T											T				T			T		
	Aml2														T																
23.	Aml1							T																					T		
	Aml2																														
24.	Aml1							T							T															T	
	Aml2																														
25.	Aml1				G	G		G				G	G		T					G	G						G	G		T	
	Aml2																														
26.	Aml1				G	G		G				G	G		T						G	G					G	G		G	
	Aml2																		G												
27.	Aml1	G	G	G			G		G	G	G				G	G	G	G								G	G	G	G		G
	Aml2																														
28.	Aml1	G	G	G			G		G	G	G				G		G	G	G										G		
	Aml2																														

# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Hydroponic Agriculture with Machine Learning and Deep Learning Methods

Nurten Bulut<sup>a</sup>, Mehmet Hacıbeyoğlu<sup>b</sup>

Submitted: 05.12.2022 Revised: 17.08.2023 Accepted: 11.10.2023 doi:10.30855/gmbd.0705083

#### ABSTRACT

**Keywords:** Smart Agriculture, Machine Learning, Deep Learning

<sup>a</sup> Abdullah Gul University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Computer Engineering  
38080 - Kayseri, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-1895-8749  
e-mail: nurten.bulut@agu.edu.tr

<sup>b</sup> Necmettin Erbakan University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Computer Engineering  
42090 - Konya, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-1830-8516  
e-mail: hacibeyoglu@erbakan.edu.tr

\*Corresponding author:  
nurten.bulut@agu.edu.tr

In the face of the rapidly increasing world population today, researchers have turned to studies aiming to use existing resources more effectively and efficiently, while also exploring new resources to meet the increasing demands, such as raw materials and nutrients. Hydroponic agriculture has been gaining popularity day by day as one of the alternative methods to fulfill crucial human needs. Its characteristics, including resistance to weather conditions, indoor applicability, and vertical orientation, set hydroponic agriculture apart from traditional methods. The absence of soil in this agricultural approach necessitates more observation and supervision. In this study, the use of machine learning was investigated to overcome the observation and surveillance processes that must be done continuously for the healthy growth of plants. Firstly, we developed a hydroponic prototype to assess this goal. With the developed hydroponic prototype, plant water and wastewater data to be used in the evaluation of the growth and development of plants were obtained by sensors. The data obtained through Arduino was stored in the database and used in the training processes of machine learning algorithms. Our experimental study, which utilized five machine learning and deep learning methods, demonstrated a significant increase in hydroponic agricultural efficiency. Notably, deep learning outperformed other methods with a 99.7% success rate. In conclusion, our study shows that machine learning can be used effectively in hydroponic agriculture by providing observation and surveillance of plants.

### Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemleri ile Hidroponik Tarım

#### ÖZ

Bugün dünyanın hızla artan nüfusu karşısında, araştırmacılar var olan kaynakları daha etkili ve verimli bir şekilde kullanmayı amaçlayan çalışmalara dönmüşler, aynı zamanda hammaddeler ve besin maddeleri gibi artan talepleri karşılamak için yeni kaynakları keşfetmişlerdir. Hidroponik tarım, kritik insan ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılacak alternatif yöntemlerden biri olarak gün geçtikçe popülerlik kazanmaktadır. Hidroponik tarımın, hava koşullarından etkilenmemesi, kapalı alanlarda uygulanabilmesi ve dikey yönlendirilebilmesi gibi özellikleri, onu geleneksel yöntemlerden ayıran özelliklerdir. Bu tarım yönteminde toprak eksikliği, daha fazla gözlem ve denetim gerektirir. Bu çalışmada bitkilerin sağlıklı büyümesi için sürekli yapılması gereken gözlem ve gözetim işlemlerinin üstesinden gelmek için makine öğrenmesinin kullanımı araştırılmıştır. Bu hedefi değerlendirmek için ilk olarak hidroponik bir prototip geliştirilmiştir. Geliştirilen hidroponik prototip ile bitkilerin büyüme ve gelişmesinin değerlendirilmesinde kullanılacak bitki suyu ve atıksu verileri sensörler aracılığıyla elde edilmiştir. Arduino üzerinden elde edilen veriler veri tabanında saklanarak makine öğrenmesi algoritmalarının eğitim süreçlerinde kullanılmıştır. Beş makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemlerini kullanan deneysel çalışmalarımız, hidroponik tarım verimliliğinde önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle derin öğrenme yöneteni %99,7 başarı oranıyla diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak çalışmamız, bitkilerin gözlem ve gözetiminide sağlayarak makine öğreniminin topraksız tarımda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı Tarım, Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme

## 1. Introduction

The rate at which resources are used up or worn down is much higher than the rate at which they are replaced around the world [1]. As food sources like soil and water get less, the need for nutrients keeps going up. This makes it harder to find enough food for everyone. This stress causes the need for researchers to conduct urgent studies with the aim of finding alternative, sustainable, and reliable methods for existing resources.

In the calculations made by the researchers on the population growth rates in the coming years, it is estimated that the global population will increase to about 10 billion by 2050. With this estimate, it has been found that a 50% increase in nutrients around the world is needed to meet the growing population's nutritional needs. This rate of increase in the need for food source production was compared with the decrease in the rural labor force, which decreased due to increasing urbanization. The researchers also predicted that 66% of the world's total population will live in cities by 2050. People have noticed that the world's food production needs to go up by 70% in the next few years compared to what it is now because the population is expected to grow and the number of people working in rural areas is going down.

For this needed increase in food production, researchers have looked into ways to make food that is more efficient and lasts longer than traditional farming methods. One of these methods, hydroponic farming, is becoming more popular around the world because it makes better use of water and fertilizer and gives farmers better control over the weather and other bad things [2].

With the advantage of hydroponic agriculture over climatic conditions, it has become possible to grow tropical climate plants in places that would not be suitable under natural conditions. [3], in his research aim is tropical hydroponic cultivation which needs to control the humidity, temperature, water level, pH and EC factors suitable for a tropical climate. In order to grow qualified hydroponic plants, the nutrient solution must constantly pass through the subchannels, and the pH and EC factors in the solution must control the hydroponic plant varieties as the plant ages, as well as the food safety adequacy. Some researchers, such as [4], [5], [6], [7] have investigated using microcontrollers for system controls, while some researchers, such as [8], have used some sensors and controls to control the nutrient solution. And others, such as [9], used machine learning methods for disease detection of hydroponic plants.

The implementation of sophisticated technologies, including the Internet of Things (IoT), machine learning, and artificial intelligence (AI), is utilized in smart farming to enhance agricultural processes and efficiency [10, 11]. The methodology employed in this study involves the utilization of sensors and Internet of Things (IoT) devices for the purpose of gathering real-time data pertaining to soil moisture, temperature, and crop health. This data-driven approach facilitates informed decision-making processes [11].

One significant advantage is in the realm of operational efficiency. The utilization of monitoring sensor data in agricultural practices enables farmers to optimize the allocation of resources such as water and fertilizer, resulting in enhanced crop yields and minimized resource wastage [11]. According to [12], the implementation of smart farming techniques has been found to effectively decrease the utilization of pesticides, hence mitigating the potential environmental consequences associated with their usage.

Another benefit that may be derived from this is the optimization of budget allocation. According to [11], the use of automation and data analysis in large-scale farms has been found to result in reduced labor costs and improved equipment efficacy. The use of smart farming techniques has been found to enhance energy efficiency, namely in the areas of irrigation and greenhouse management, hence contributing to the promotion of sustainability [10,12].

The practice of forecasting has significant value as it enables professionals to make predictions regarding agricultural yields, market demand, and weather patterns [10]. This facilitates the process of strategy planning and the establishment of market positioning.

According to [12], the utilization of Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI) enables farmers to effectively monitor and manage irrigation and greenhouse conditions, hence enhancing operational efficiency.



Notwithstanding the advantages outlined above, smart farming encounters many problems. According to [11], there exist notable obstacles in the form of implementation costs, knowledge acquisition, and data protection issues.

An experimental hydroponic farming system has been installed for the study. Arduino based systems have been used to create tasks such as monitoring the system and collecting system data. Machine learning and deep learning techniques are used to process the collected data. The goal of this study is to look at the problem of attention and supervision that can be fixed with machines. In addition to the deep learning technique, the SVM, kNN, naive bayes, decision tree, and logistic regression techniques were also used in this study. As a result of the research, machine learning techniques for the system have reached a high level of performance. However, deep learning methods demonstrated the highest performance.

Table 1. Comparison of Sensors Used in Various Studies

Research	Observation	Control	pH	EC	TDS	Water Level	Temperature and Humidity	Light	Water Temperature	light intensity
[13]	X	X	X			X	X			
[14]	X	X					X	X		
[15]	X	X	X	X						
[16]	X	X	X	X						
[17]	X	X	X	X			X			
[18]	X	X	X	X						X

The remainder of the paper consists of the following: Section II provides background information on machine learning techniques, deep neural networks, and IoT-based hydroponic system. Section III contains the results and analysis. Section IV concludes the paper and discusses the future direction of the topic. Section V concludes the feature work.

## 2. Methods

### 2.1. Prototype Setup

In this study, an experimental system has been established to support our thesis. Arduino sensors were used in the experimental system. The reason for choosing Arduino sensors is that it's an open and comprehensive network of smart objects with the capacity to automatically organize, share information, data, and resources, react, and take action in the face of situations and changes in the environment. [2]. Arduino is first and foremost an open-source computer hardware and software company. Additionally, it is widely utilized and accessible. It is inexpensive and simple to access.

The techniques shown in Figure 1 is the Arduino design. Which was made as a prototype, were used to get the data set that was used in this study. In hydroponic agriculture, the measurement of production in large areas is carried out once or twice a day. In this article, however, data was collected every 4 hours to track how plants grew, taking into account that the system was made up of 12 tomato seedlings.

The system used has a nutrient solution arrangement that works with artificial light and a drip system, as shown in Figure 2. The value measurement in the nutrient solution was collected with the help of Arduino sensors. The collected values are pH, EC, ppm, and water temperature values, which are valuable in terms of following the development of the plant.

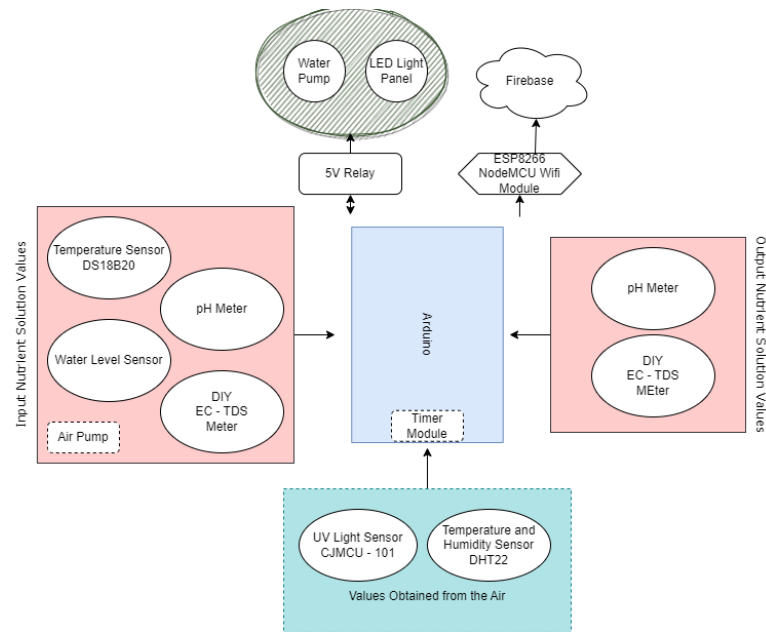


Figure 1. Prototype Arduino installation diagram and demonstration

In the same way, Arduino sensors were used to measure the air temperature, humidity, and the amount of artificial light. In addition to collecting all this data, Arduino has also decided on the irrigation and light status with the help of the timer module. At the same time, the water level in the nutrient solution was measured with a water level sensor.

The operation of the system utilized an Arduino Uno board. After measuring the nutrient solution for values, it was sent to the system, and the aim was to obtain information about the system by measuring the wastewater after plant usage. In the water solution input basin of the system, a water temperature sensor (DS18B20), a pH module for measuring the water's pH level, and a water level sensor were used in conjunction with a homemade EC-TDS meter to measure the presence of water in the reservoir.

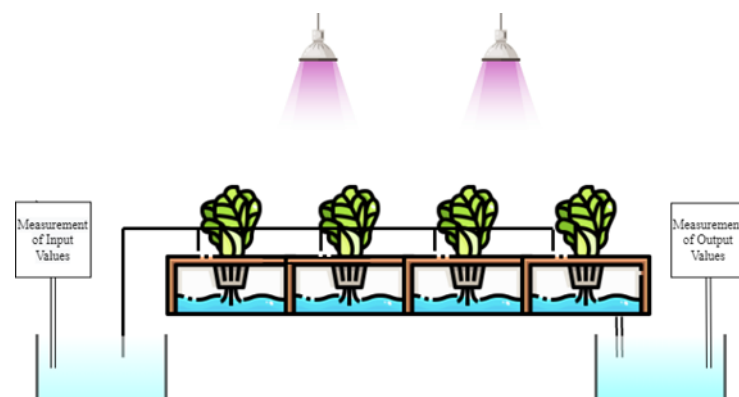


Figure 2. Hydroponic agriculture prototype scheme

After the system used the nutrient solution, pH, EC, and TDS meter modules were employed to gather information about the wastewater produced by the system. Furthermore, the water and light provided to the system were controlled by a 5V relay connected to an Arduino Uno through a timer. The weather conditions at the location of the experiment were also monitored. The humidity and temperature sensor (DHT22) was used for continuous monitoring of humidity and temperature in the air. Additionally, the light intensity, which is another factor affecting plant growth, was monitored using an analog light intensity sensor (CJMCU-101).

To enable the transfer of all these collected values to the Firebase database system, a NodeMCU ESP8266 was used as the Wi-Fi module. When transferring the values to the database, input values such as pH, EC, and TDS, as well as output values, were labeled as "In" and "Out," respectively. To carry out all of these processes,

the Arduino Uno was programmed using the Arduino IDE with the C programming language.

## 2.2. Dataset

Out of all the values that were measured, pH and EC need to be put into groups so that the state of the system can be better understood. This classification for pH is used when the system is basic, acidic, or natural. Classification for EC, the nutrient solution requires water, the nutrient solution requires additional nutrients, and the solution is balanced.

Table 2. pH and EC classifications

pHIn-pHOut=pH	-0.5 < pH < 0.5	0	Natural
	pH < - 0.5	1	Basic
	pH > 0.5	2	Acidic
ECIn-ECOut=EC	-1 < EC < 1	0	Balance
	EC < -1	1	Add Nutrient To Solution
	EC > 1	2	Add Water To Solution

To comprehend how the plant utilizes the nutrient solution, it is essential to examine the difference between the waste nutrient solution obtained after the plant's use and the nutrient solution provided to the plant. This allows for insights into how the plant utilizes nutrients in the given solutions. In many studies, various pH and EC (Electrical Conductivity) values are suggested for tomato cultivation. Generally accepted pH values typically fall within the range of 5.0 to 7.0, while the EC value is commonly recommended to be between 0.5 and 1.8. These values can vary depending on the plant species. For this system, equilibrium points were chosen not only as zero but also as positions closest to zero, considering the system's margin of error.

For the system, the light and irrigation status, which are the main factors in the development of the plant, were transferred to the database with a value called "Status". How this value is classified and the number of examples in this classification are explained in the example of Table 2 below.

Table 3. System status and the number of data corresponding to the states

Irrigation Status	Light Status	Status
Close	Close	0
Close	Open	1
Open	Close	2
Open	Open	3

## 2.3. Algorithms

Machine learning is a field of computer algorithms that are currently being used to mimic human intelligence by learning from their surroundings. In numerous areas of research, including pattern recognition, computer vision, spacecraft engineering, finance, entertainment, computational biology, and biomedical applications, machine learning techniques have been successfully implemented [19]. In this study, SVM, kNN, logistic regression, decision tree, and naive bayes were used to determine the system state and nutrient solution values. All algorithms were written using Python language with Keras, scikit learn libraries via Google collab.

### 2.3.1. Support Vector Machine (SVM)

Support Vector Machines (SVM) have seen an increasing demand due to their accuracy rate in classification, robustness, and independence from the input data type. The SVM method, which was initially designed for use in binary classification, was created by Vapnik [20] in order to solve the quadratic optimization problem [21]. As an application of statistical learning theory, the SVM was created to solve classification problems with large margins. It creates a separating hyperplane and a maximum margin in the absence of training data by selecting a subset of  $SV \subset X$  known as support vectors [22].

### 2.3.2. Naive Bayes

The basic idea behind the naive Bayesian method is that it is a classification method based on probability that assumes the dependent variable is not important. It is also a Bayesian conditional model [23] based on Bayes'

theorem. The naive Bayesian method is a classification technique. It is founded on the Bayes theorem and the notion that characteristic conditions are true by themselves [24]. The naive Bayesian algorithm has stable classification accuracy and a solid mathematical basis. In this method, each attribute is separate from the others and doesn't affect the others. This makes it easier to determine the likelihood of something [25].

### 2.3.3. Decision Tree

A decision tree is a tree-based method where each node, starting with the root, represents an attribute and a set of data classifications until the last node, the leaf, gives a boolean result. In real-life practice, each path in the decision tree is a decision rule that can be easily translated into human languages or programming languages. When all paths (rules) are examined beginning at the root. The entire tree resembles a conjunctive expression. Disjunctions are used to make classification boolean decisions that take each attribute test into account [26, 27].

### 2.3.4. K-Nearest Neighbor

K-Nearest Neighbors is one of the most popular and widely used machine-learning algorithms. Its applications include image or data retrieval, data mining, medical and satellite imaging, computer vision, speech recognition, text categorization, big data analysis, data compression, computational genomics, and predictive analysis [28, 29]. Calculate their distance to all of the sample data in a training set with known classes. The class that occurs the most frequently among the k training samples that are closest to the classified data is then decoded [30].

### 2.3.5. Logistic Regression

The logistic regression analysis model is a generalized linear regression analysis model that is widely used in economic forecasting, automated disease diagnosis, data mining, and other fields. It is a method of regression analysis that is frequently used as a correlation analysis. The appropriate regression model is chosen in order to determine a more precise quantitative correlation between its parameters. The variables that influence logistic regression can be classified into two or more groups [31].

### 2.3.6. Deep Neural Network (DNN)

Deep learning is a machine learning technique that has existed for the past decade. It is distinguished by its refined approach. Learning through deep neural networks enables computational models to acquire multiple levels of abstraction in their data representations. These models consist of several processing layers. These techniques have significantly advanced the state of the art in numerous fields, including drug discovery and genomics, speech recognition, the recognition of visual objects and objects in general, as well as genomics. In the past, it was thought that neural networks could be effective with only one or two layers and a small amount of data. Today, neural networks are utilized with a great deal more learning capacity [32]. Deep learning identifies complex structures in large data sets by using the backpropagation algorithm to indicate how the internal parameters of a machine used to compute the representation in each layer from the representation in the previous layer should be modified. Deep convolutional neural networks have advanced the processing of images, video, speech, and audio, whereas recurrent neural networks have shed light on sequential data such as text and speech [33].

In this study, seven layers were utilized in the neural network architecture. Sigmoid activation was employed in all layers up to the final one. Softmax activation was used in the last layer. Adamax was the optimization algorithm of choice. Categorical cross-entropy was employed as the loss function, typically used in multi-class classification tasks. These are used in tasks where an instance can belong to one of several possible categories, and the model needs to make a decision among them.

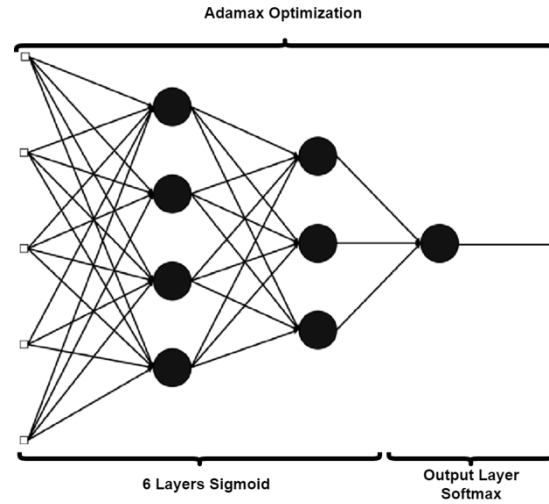


Figure 3. Deep learning model

### 2.3.7. Convolutional Neural Network (CNN)

CNNs are particularly effective in image recognition and classification tasks. They are designed to automatically learn and extract features from images through convolutional layers, pooling layers, and fully connected layers. CNNs have been widely used in applications such as object detection, facial recognition, and image segmentation [34].

The neural network in this study is seven-layered. 'ReLU' activated convolutional layer non-linearity and feature extraction. Max-pooling with 2 pools used less space. A one-dimensional vector was constructed from multidimensional data. Two deep layers with 128 neurons increased the model's complex data pattern interpretation. The last layer, essential for multi-class classification, employs the 'Softmax' activation function to convert the network's output into probability distributions for the four classes. The 'Adam' optimizer with 'categorical cross-entropy' loss function improved the model's parameters for tasks where examples may belong to many categories and the model must make intelligent judgments. The dataset-learning model ran 10 64-batch data processing epochs.

### 2.3.8. Recurrent Neural Network (RNN)

RNNs, on the other hand, are designed to process sequential data, such as text or time series data. They have a recurrent structure that allows them to retain information from previous steps and use it to make predictions or generate output. RNNs are commonly used in tasks such as language modeling, machine translation, and speech recognition [34].

This study created a classification neural network model using the Simple Recurrent Neural Network (SimpleRNN) architecture. A 64-neuron SimpleRNN layer uses the 'ReLU' activation function to introduce non-linearity to the network in the model's three levels. Two thick layers with 128 'ReLU-activated neurons' follow this layer. Multi-class classification requires the last layer to use the 'Softmax' activation function to generate probability distributions over the four classes to help the model classify input examples. For tasks containing examples belonging to several categories, the 'Adam' optimizer with a 'categorical cross-entropy' loss function was used to optimize model parameters. The model was trained for 10 epochs with 64-batch data to iteratively learn from the dataset.

### 2.3.9. Long Short-Term Memory (LSTM)

LSTMs are a type of RNN that address the vanishing gradient problem, which can occur when training traditional RNNs on long sequences. LSTMs have a more complex architecture that includes memory cells and gates, allowing them to capture long-term dependencies in the data. LSTMs have been successful in tasks such as sentiment analysis, speech recognition, and handwriting recognition [34].

This study used LSTM architecture to build a neural network model that captures sequential data interactions. The model contains three layers, starting with a 64-memory LSTM. This layer uses the 'ReLU' activation

function to encode temporal information in the data to make the model non-linear. The LSTM layer is followed by two thick layers with 128 neurons and 'ReLU' activation functions. The final layer's 'Softmax' activation function turns model output into probability distributions across the four target classes, making it essential to multi-class classification. The 'Adam' optimizer and 'categorical cross-entropy' loss function optimized and trained the model for multi-category problems. The model learns and improves during ten 64-batch data processing epochs.

### 3. Results and Discussion

The primary objective of this article is to address the fundamental issue that hydroponic agriculture is significantly more susceptible to environmental variables than soil-based agriculture. For this purpose, the performance criteria used when applying machine learning methods are given in the Table 3.

Performance Metric	Equation
Accuracy	$(TN + TP) / \text{Total Test Data}$
Precision	$TP / (FP + TP)$
Recall	$TP / (FN + TP)$
F1-Score	$2 * ((\text{Precision} * \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}))$

In the first step, it was determined whether the machine learning methods had learned the fundamental lighting and irrigation techniques that made the prototype functional. Figure 3 displays the results obtained by the "Status" value using various machine learning techniques.

According to the results, SVM, Guessean Naive Bayes, and Decision Tree are the most appropriate techniques for predicting the system state. In all types of evaluations, it has achieved a success rate of greater than %95 using these techniques. As a result of these findings, it has been determined that machine learning techniques can be relied upon for system control.

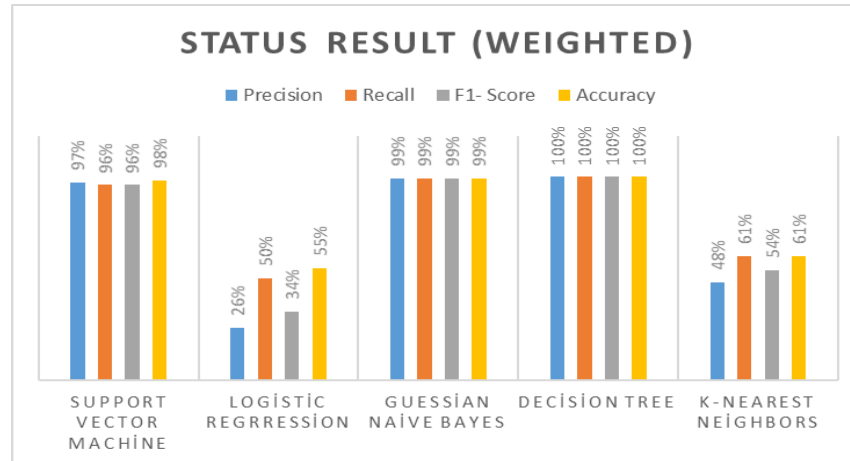


Figure 4. Machine learning results for the status value

In hydroponic systems, the values of EC and pH must be constantly monitored. Changes in these values indicate whether or not the system as a whole is healthy. This is the area in which this person's expertise in agriculture management is most needed. Therefore, can machine learning methods be used to automatically control these areas? Figure 4 depicts the outcomes of evaluating various machine learning algorithms on their ability to predict the answer values to this question.

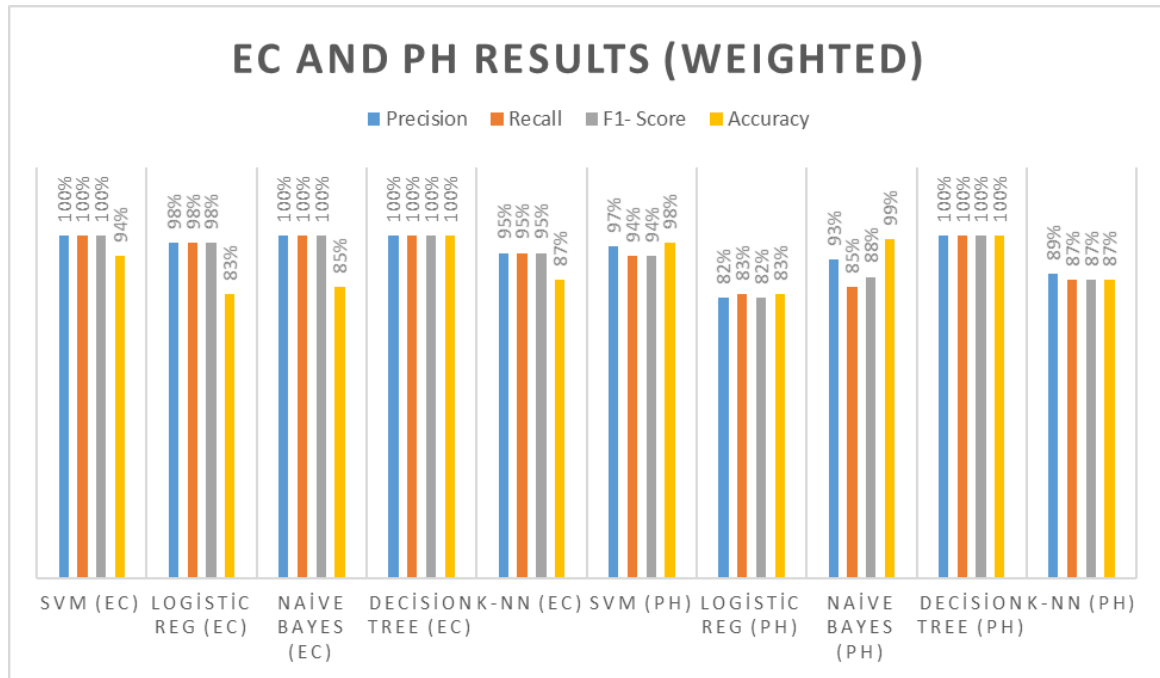


Figure 5. Results of machine learning for the EC and pH value

As seen in the table above, the results of machine learning now exceed 80%. Compared to this situation, when machine learning methods were employed, the estimated EC and pH values produced superior results compared to all other methods.

In addition to machine learning, deep learning techniques were used to determine the operation of the system. Since these methods work primarily with large data sets, the data were augmented using the SMOTE data analysis method, and an equal number of data samples were collected for each classification. The results are shown in Table 3.

Table 5. Before and after smote data analysis

Class	Before smote	After smote
0	91	177
1	177	177
2	24	177
3	41	177
Sum	333	708

After the SMOTE data analysis process, deep learning was applied to the augmented data. Deep learning has a structure consisting of layers. Seven layers were used in this study. Sigmoid activation was used until the last layer. The sigmoid activation function introduces additional adaptive parameters to control the maximum value, steepness, and scaled horizontal displacement of the sigmoidal curve [35]. In the last layer, Softmax is used. The Softmax function is often used in the final layer of DNN-based classifiers. Softmax function contains massive exponential and division operations, resulting in high resource usage when implemented as hardware [36]. Adamax was used for optimization, an algorithm for first-order gradient-based optimization of stochastic objective functions, based on adaptive estimates of lower-order moments [37]. Categorical cross entropy is a loss function used in multi-class classification tasks. These are tasks in which a sample can belong to only one of many possible categories, and the model must decide one of them. Formally, it is decisively designed to measure the difference between two probability distributions.

Table 6. DNN results

Model	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
DNN	0.997	0.997	0.997	99,7%
CNN	0.256	0.5	0.338	50%
RNN	0.018	0.095	0.030	9.5%
LSTM	0.405	0.511	0.428	51.19%

This study aimed to evaluate the efficacy of different machine learning models, including CNN, RNN, LSTM, and DNN, in the context of a four-class classification job. The summary findings for each model are presented below.

The convolutional neural network (CNN) model demonstrated a 50% accuracy rate, suggesting a performance superior to that of random guessing in the context of a four-class issue. Nevertheless, there is scope for enhancement, namely in terms of accuracy and the F1-Score, indicating a higher occurrence of false positive predictions and overlooked real positives.

The recurrent neural network (RNN) model demonstrated suboptimal performance, achieving just a 9.5% accuracy rate. Significant deficiencies in accuracy and recall metrics suggest difficulties in accurately categorizing positive situations and identifying true positives. The poor F1-Score serves as evidence of the general insufficiency of this model.

The LSTM model exhibited superior performance compared to the other models, with an accuracy rate of 51.2%. The results exhibited superior precision and recall in comparison, indicating enhanced accuracy in predicting positive class instances and detecting genuine positives. A higher F1-Score is indicative of improved overall performance.

The deep neural network (DNN) model demonstrated outstanding performance, with a precision, recall, F1-Score, and accuracy of 99.7%. The aforementioned model demonstrated a high level of accuracy in correctly classifying positive cases and effectively identifying real positives, hence establishing itself as the most successful model among those that were assessed.

In summary, it can be concluded that the LSTM model had superior performance compared to the CNN and RNN models. However, it is noteworthy that the DNN model shown much better performance than all other models. Nevertheless, there is still potential for further enhancement in all models. Subsequent research endeavors should take into account many elements such as the size of the dataset, the selection of features, and the optimization of model hyperparameters in order to improve the outcomes of classification.

When all of this is taken into consideration, it has been found that the performance rate achieved by using the data set with the DNN model that was created is higher than that achieved by using any other machine learning models.

#### 4. Conclusions

The concern over meeting the nutritional needs of the world's growing population has focused researchers on new methods. Hydroponic agriculture, which is one of these methods, has come forward with advantages such as being independent of climatic conditions, having a lot of production capacity in a small area, and not using soil. With all these advantages, the lack of soil also brings with it the problem that plants are more sensitive to stimuli. In this research, machine learning methods such as SVM, kNN, decision trees, naive bayes, and logistic regression are used to solve the problem, as well as deep learning methods.

The primary objective of this research is to explore whether qualified individuals necessary for hydroponic agricultural techniques may be replaced by machines. This article's findings show that machine learning algorithms potentially replace humans in hydroponic agriculture with an accuracy of above 80%. Furthermore, deep neural networks(DNN) have such a 99% successful rate in replacing qualified personnel. The results of the research, based on data obtained from a prototype system, indicate that machines can predict the system with higher accuracy, especially in forecasting EC and pH values. In addition, the developed machine learning based prototype be used desicion support system for hydroponic farmers.

#### 5. Feature Work

The subsequent research may investigate the use of hybrid algorithmic approaches. Another approach is to use different DNN layers and optimizations. On the other hand, the system's dependability can be compared to that of a system that is well-prepared and well-grounded.



## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

## References

- [1] D. Vuuren, A. Bouwman, & A. Beusen, "phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion", *Global Environmental Change*, vol. 20, no. 3, p. 428-439, 2010. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004
- [2] S. Madakam, R. Ramaswamy, & S. Tripathi, "internet of things (iot): a literature review", *journal of computer and communications*, vol. 03, no. 05, p. 164-173, 2015. doi:10.4236/jcc.2015.35021
- [3] J. Chaiwongsai, "Automatic Control and Management System for Tropical Hydroponic Cultivation," 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Sapporo, Japan, 2019, pp. 1-4, doi:10.1109/ISCAS.2019.8702572
- [4] O. Gandhi, M. Ramdhani, M. A. Murti and C. Setianingsih, "Water Flow Control System Based on Context Aware Algorithm and IoT for Hydroponic," 2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoT&IS), Bali, Indonesia, 2019, pp. 212-217, doi:10.1109/IoT&IS47347.2019.8980373
- [5] Iswanto, P. Megantoro and A. Ma'arif, "Nutrient Film Technique for Automatic Hydroponic System Based on Arduino," 2020 2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE), Lombok, Indonesia, 2020, pp. 84-86, doi:10.1109/ICIEE49813.2020.9276920
- [6] A. Satoh, "A Hydroponic Planter System to enable an Urban Agriculture Service Industry," 2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Nara, Japan, 2018, pp. 281-284, doi:10.1109/GCCE.2018.8574661
- [7] H. Andrianto, Suhardi and A. Faizal, "Development of Smart Greenhouse System for Hydroponic Agriculture," 2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI), Bandung, Indonesia, 2020, pp. 335-340, doi:10.1109/ICITSI50517.2020.9264917
- [8] A. V. Korzhakov, S. V. Oskin and S. A. Korzhakova, "Acoustic and Magnetic Treatment Process Automatization in Hydroponic Solution Preparation System," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5, doi:10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867684
- [9] K. Lisha Kamala and S. Anna Alex, "Apple Fruit Disease Detection for Hydroponic plants using Leading edge Technology Machine Learning and Image Processing," 2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), Trichy, India, 2021, pp. 820-825, doi:10.1109/ICOSEC51865.2021.9591903
- [10] A. Raghuvanshi et al., "Intrusion Detection Using Machine Learning for Risk Mitigation in IoT-Enabled Smart Irrigation in Smart Farming," *J. Food Qual.*, vol. 2022, p. 3955514, Feb. 2022, doi:10.1155/2022/3955514.
- [11] E. Elbasi et al., "Artificial Intelligence Technology in the Agricultural Sector: A Systematic Literature Review," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 171-202, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2022.3232485
- [12] T. Karanisa, Y. Achour, A. Ouammi, and S. Sayadi, "Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar," *Environ. Syst. Decis.*, vol. 42, no. 4, pp. 521–546, Dec. 2022, doi:10.1007/s10669-022-09862-2
- [13] C. J. G. Aliac and E. Maravillas, "IOT Hydroponics Management System," 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), Baguio City, Philippines, 2018, pp. 1-5, doi:10.1109/HNICEM.2018.8666372
- [14] J. Pitakphongmetha, N. Boonnam, S. Wongkoon, T. Horanont, D. Somkiadcharoen and J. Prapakornpilai, "Internet of things for planting in smart farm hydroponics style," 2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Chiang Mai, Thailand, 2016, pp. 1-5, doi:10.1109/ICSEC.2016.7859872
- [15] D. Yolanda, H. Hindersah, F. Hadiatna and M. A. Triawan, "Implementation of Real-Time Fuzzy logic control for NFT-based hydroponic system on Internet of Things environment," 2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Bandung, Indonesia, 2016, pp. 153-159, doi:10.1109/ICSEngT.2016.7849641
- [16] T. Kaewwiset and T. Yooyativong, "Electrical conductivity and pH adjusting system for hydroponics by using linear regression," 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 2017, pp. 761-764, doi:10.1109/ECTICon.2017.8096350
- [17] M. Mehra, S. Saxena, S. Sankaranarayanan, R. J. Tom, and M. Veeramanikandan, "IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 155, pp. 473–486, Dec. 2018, doi:10.1016/j.compag.2018.10.015

- [18] M. I. Alipio, A. E. M. Dela Cruz, J. D. A. Doria and R. M. S. Fruto, "A smart hydroponics farming system using exact inference in Bayesian network," 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Nagoya, Japan, 2017, pp. 1-5, doi:10.1109/GCCE.2017.8229470
- [19] El Naqa ve M. J. Murphy, "What is machine learning?," Machine Learning in Radiation Oncology, Springer, Cham, 2015, ss. 3-11.
- [20] V. N. Vapnik, The Nature of Statistical Learning Theory, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995, ISBN: 0387945598.
- [21] X. -z. Wang and S. -x. Lu, "Improved Fuzzy Multicategory Support Vector Machines Classifier," 2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, China, 2006, pp. 3585-3589, doi:10.1109/ICMLC.2006.258575
- [22] A. C. Braun, U. Weidner and S. Hinz, "Support vector machines, import vector machines and relevance vector machines for hyperspectral classification — A comparison," 2011 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), Lisbon, Portugal, 2011, pp. 1-4, doi:10.1109/WHISPERS.2011.6080861
- [23] H. Hairani, A. Anggrawan, A. I. Wathan, K. A. Latif, K. Marzuki and M. Zulfikri, "The Abstract of Thesis Classifier by Using Naive Bayes Method," 2021 International Conference on Software Engineering & Computer Systems and 4th International Conference on Computational Science and Information Management (ICSECS-ICOCSIM), Pekan, Malaysia, 2021, pp. 312-315, doi:10.1109/ICSECS52883.2021.00063
- [24] M. S. Nair, K. Revathy and R. Tatavarti, "An Improved Decision-Based Algorithm for Impulse Noise Removal," 2008 Congress on Image and Signal Processing, Sanya, China, 2008, pp. 426-431, doi:10.1109/CISP.2008.21
- [25] D. Wang, D. Yuan and C. Miao, "Sparse Naive Bayes Base on Entropy Correlation for GPR Image Denoising," 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering (ICECE), Xi'an, China, 2020, pp. 167-171, doi:10.1109/ICECE51594.2020.9353029
- [26] S. S. Gavankar and S. D. Sawarkar, "Eager decision tree," 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Mumbai, India, 2017, pp. 837-840, doi:10.1109/I2CT.2017.8226246
- [27] F. -J. Yang, "An Extended Idea about Decision Trees," 2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA, 2019, pp. 349-354, doi:10.1109/CSCI49370.2019.00068
- [28] X. Song, T. Xie and S. Fischer, "POSTER: A Memory-Access-Efficient Adaptive Implementation of kNN on FPGA through HLS," 2019 28th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT), Seattle, WA, USA, 2019, pp. 503-504, doi:10.1109/PACT.2019.00066
- [29] Y. Peng, G. Kou, Y. Shi, & Z. Chen, "a descriptive framework for the field of data mining and knowledge discovery", International Journal of Information Technology & Decision Making, vol. 07, no. 04, p. 639-682, 2008. doi:10.1142/s0219622008003204
- [30] J. Vieira, R. P. Duarte and H. C. Neto, "kNN-STUFF: kNN STreaming Unit for Fpgas," in IEEE Access, vol. 7, pp. 170864-170877, 2019, doi:10.1109/ACCESS.2019.2955864
- [31] Y. -h. Wang, Y. Ou, X. -d. Deng, L. -r. Zhao and C. -y. Zhang, "The Ship Collision Accidents Based on Logistic Regression and Big Data," 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Nanchang, China, 2019, pp. 4438-4440, doi:10.1109/CCDC.2019.8832686
- [32] L. Zhang, S. Wang, & B. Liu, "deep learning for sentiment analysis: a survey", Wiley Interdisciplinary Reviews Data Mining and Knowledge Discovery, vol. 8, no. 4, 2018. doi:10.1002/widm.1253
- [33] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," Nature, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, May 2015, doi:10.1038/nature14539
- [34] P. Haddad, C. Brain, & J. Scott, "nonadherence with antipsychotic medication in schizophrenia: challenges and management strategies", patient related outcome measures, p. 43, 2014. doi:10.2147/prom.s42735
- [35] C. Zhang and P. C. Woodland, "Parameterised sigmoid and ReLU hidden activation functions for DNN acoustic modelling," in Interspeech 2015, ISCA, Sep. 2015, pp. 3224-3228. doi:10.21437/Interspeech.2015-649
- [36] Z. Li, H. Li, X. Jiang, B. Chen, Y. Zhang and G. Du, "Efficient FPGA Implementation of Softmax Function for DNN Applications," 2018 12th IEEE International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID), Xiamen, China, 2018, pp. 212-216, doi:10.1109/ICASID.2018.8693206
- [37] Q. Zhou et al., "Enhanced Multi-Level Signal Recovery in Mobile Fronthaul Network Using DNN Decoder," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 30, no. 17, pp. 1511-1514, 1 Sept.1, 2018, doi:10.1109/LPT.2018.2852601



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Optimization of the Process Parameters by the Bees Algorithm in Milling of Austempered Ductile Cast Iron (GGG70) Material

Gürkan Ataş<sup>a\*</sup>, Mete Kalyoncu<sup>b</sup>, Mevlüt Aydın<sup>c</sup>, Muhammet Hüseyin Çetin<sup>d</sup>

Submitted: 22.03.2023 Revised: 08.06.2023 Accepted: 11.09.2023 doi:10.30855/gmbd.0705084

### ABSTRACT

The machinability of a material depends not only on its mechanical properties and microstructure, but also on the selection and control of process variables. By changing the cutting fluid, speed and depth in GGG-70 material, channels have been opened on the material surface by milling process with a width of 10 mm and a length of 50 mm. The machining process was carried out using a minimum amount of lubricant (MQL). As a result of experiments with different processing parameters, the surface roughness and surface hardness of the material were measured. Compared to the uncut surface hardness, an average hardness reduction of 2%-10% occurred as a result of milling. The level of cutting parameters did not cause a statistically significant change in the surface hardness value. The mathematical model between different cutting parameters and surface roughness was obtained decisively by regression analysis. The optimum parameters of the cutting fluid, its speed and depth were found by the Bees Algorithm, which is a meta-heuristic methods optimization method. According to the Bees Algorithm, the optimum milling conditions are vegetable oil, 180 m/min cutting speed and 0.5 mm cutting depth. Especially, the optimum performance of vegetable oil compared to boron oil is important from the point of view of sustainable environment.

**Keywords:** Minimum quantity lubrication, Bees Algorithm, Austempered ductile cast iron, Machining, Optimization.

<sup>a\*</sup> Tarsus University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Mechanical Engineering  
33400 - Mersin, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7361-3789  
e mail: gurkanatas@tarsus.edu.tr

<sup>b</sup> Konya Technical University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Mechanical Engineering  
42250 - Konya, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-2214-7631

<sup>c</sup> Konya Technical University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Mechanical Engineering  
42250 - Konya, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-5457-8340

<sup>d</sup> Konya Technical University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Mechanical Engineering  
42250 - Konya, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-0429-5507

\*Corresponding author:  
gurkanatas@tarsus.edu.tr

**Anahtar Kelimeler:** Minimum miktarda yağlama, Arı Algoritması, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir, Talaşlı imalat, Optimizasyon.

## Östemperlenmiş Sfero Dökme Demir (GGG70) Malzemenin Frezelenmesinde Proses Parametrelerinin Arı Algoritması ile Optimizasyonu

### ÖZ

Bir malzemenin işlenebilirliği sadece mekanik özelliklerine ve mikro yapısına değil aynı zamanda proses değişkenlerinin seçimine ve kontrolüne de bağlıdır. GGG-70 malzemenin frezelenmesinde kesme sıvısı türü, kesme hızı ve talaş derinliğini değerleri değiştirilerek, malzeme yüzeyinde 10 mm genişliğinde 50 mm uzunluğunda kanallar açılmıştır. Kesme sıvısı uygulaması minimum miktarda yağlayıcı (MMY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı işleme parametreleri ile yapılan deneyler sonucunda malzeme yüzeyinin pürüzlülüğü ve sertliği ölçülmüştür. İşlenmemiş yüzey sertliğine kıyasla frezelenmiş yüzeylerde ortalama %2-%10 arasında sertlik düşüşü meydana gelmiştir. Sertlik değerlerinin değişimi ile parametre seviyelerinin değişimi arasında anlamlı bir istatistik oluşmamıştır. Farklı kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki matematiksel model 1. dereceden regresyon analizi ile elde edilmiştir. Kesme sıvısının, kesme hızının ve talaş derinliğinin optimum parametreleri metasezgisel optimizasyon metodu olan Arı Algoritması ile bulunmuştur. Arı Algoritmasına göre optimum frezeleme koşulları bitkisel yağ, 180 m/dk kesme hızı ve 0,5 mm kesme derinliğinin kullanıldığı şartlarda elde edilmiştir. Özellikle bitkisel yağın bor yağına kıyasla optimum performans sağlaması, sürdürülebilir çevre açısında önem arz etmektedir.

## 1.Giriş (Introduction)

Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (GGG-70) malzemeler, küresel grafitli dökme demire östenitleme ve östemperleme ısıl işlemi uygulanması sonucu elde edilir [1]. GGG-70 malzemeler ösferrit bir mikro yapıya (ferrit+ östenit) sahiptir [2]. Karbonla zenginleştirilmiş östenit miktarı, GGG-70'in mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca, talaşlı imalat sırasında sıcaklığa bağlı oluşan martenzit yapı, parçanın işlenebilirliğinin azalmasına neden olmaktadır [3].

Endüstriyel verimliliği artırmak ve maliyetlerini düşürmek için tasarım için uygun malzeme seçimi önemli bir esastır. Ham malzemeyi talaşlı imalat işlemi ile tasarımı şeklini vermek üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen unsurlardandır. Bu nedenle istenilen mekanik özelliklere ve işlenebilirliği kolay yapıya sahip malzemenin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir [4][5]. GGG-70 malzemesinin yüksek mukavemet, aşınma direnci, süneklik ve yorulma mukavemeti gibi üstün özelliklerinin yanında endüstride kullanılabilirliğini kısıtlayan en önemli etken zayıf işlenebilirliğidir [6]. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin talaşlı imalat ile işlenmesi sonucunda oluşan kesme kuvveti ve yüzey kalitesine östemperleme sıcaklığının, katılan alaşım element çeşidi, mikroyapısal özelliklerinin önemli etkileri olduğu ifade edilmiştir [7]. Bir malzemenin işlenebilirliği sadece mekanik özelliklerine ve mikro yapısına değil aynı zamanda proses değişkenlerinin uygun seçimine ve kontrolüne de bağlıdır. GGG-70 malzemesinin işlenmesinde, kesme hızının ve soğutma stratejilerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahip parametre olduğu görülmüştür [8][9]. GGG-70'in işlenebilirliği üzerine yapılan bir diğer araştırma neticesinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti düşerken yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. İlerleme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin de arttığı ancak yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Çalışmada kesme sıvısı olarak bor yağı kullanılmıştır [10].

Genel ifadeyle yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin orta düzlemden sapmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü, herhangi bir iş parçasının yorulma davranışı, korozyon direnci, sürünme, sürtünme, aşınma ömrü vd. tribolojik özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir [11]. GGG-70'in işlenebilirliğinde araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Son araştırmalar yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine odaklanmıştır [12][13][14]. Talaşlı imalat prosesi sırasında takım ile parça arasında oluşan ısının atılması, sürtünmenin azaltılması, çıkan talaşın uzaklaştırılması, takım ömrünü uzatılması, işleme verimliliğinin ve yüzey kalitesinin iyileştirmesi için kesme sıvıları kullanılmaktadır [15][16]. Kesme sıvısı, talaş kaldırma işlemi sırasında önemli bir rol oynar. Ancak soğutma sıvısının genel olarak kullanımı minimize edilmediğinde insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca imalat sanayinde üretim maliyetinin ciddi bir miktarını oluşturmaktadır[17]. Sürdürülebilirlik açısından kesme sıvılarının talaşlı imalatta kullanım etkinliğini artırmak için minimum miktarda yağlama olarak adlandırılan MMY cihazları kullanılmaktadır. MMY'de temel amaç, belirli bir işleme koşuluna soğutma sıvısı ve yağlayıcı ihtiyaçlarını karşılayacak minimum miktarda kesme sıvısı sağlamaktır. Bunun yanında takım ömrü, işleme performansı, kesme sıvısının verimli kullanılması ve zararlı çevresel etkilerinin daha az olması açısından günümüzde MMY cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır [18][19].

Talaşlı imalat endüstrisinde kullanılan kesme sıvıları sentetik-yarı-sentetik, bitkisel ve mineral esaslı olarak sınıflandırabiliriz. Afonso vd. [20] bitkisel yağların frezeleme işlemindeki performansını sürtünme katsayısı, aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık parametrelerine etkisini istatistiksel olarak araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı seviyede mil devri, ilerleme hızı ve eksenel derinlik parametreleri ile kuru, ticari yağ ve bitkisel yağ koşullarında frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bitkisel yağın ticari yağa kıyasla daha fazla soğutma etkisinin olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri analiz edildiğinde ticari yağ ve bitkisel yağ ile yakın değerler elde edildiği belirlenmiştir. Fakat bitkisel yağın ekolojik açıdan olumsuz etkileri nedeniyle bitkisel yağ kullanımının avantaj olduğu belirtilmiştir. Alshibi vd. [21] bitkisel esaslı yağlayıcının frezeleme uygulamalarındaki performansını AZ91 malzemenin takım aşınması, talaş genişliği, talaş temas uzunluğu, talaş oranı, talaş segmentasyon oranı ve kesme açısı parametreleri açısından araştırmışlardır. Frezeleme işleminin maksimum verimle gerçekleştirilebilmesi için MMY akış hızı, kesme hızı ve ilerleme hızı parametreleri deneysel ve tahmin metodu (gri ilişki analizi) ile optimize edilmiştir. Deneysel ve tahmin metodu ile elde edilen sonuçlara göre 40 mL/sa MMY akış hızı, 300 m/dk kesme hızı ve 0,3 mm/dev ilerleme hızı parametreleri optimum parametreler olarak belirlenmiş ve MMY yöntemi ile kullanılan bitkisel yağın sürtünme kuvveti ve kesme sıcaklığının minimizasyonunda önemli rol oynadığı görülmüştür. Cönger [22], AA6061 malzemesinin frezelenmesi

işleminde nano MoS<sub>2</sub> takviyeli bitkisel esaslı yağlayıcının kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme ve ilerleme kuvveti, kesici takım yüzey aşınması parametrelerini analiz ederek araştırmışlardır. Çalışma kapsamında deneyler kuru, MMY ve nano MoS<sub>2</sub> takviyeli yağlayıcı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hem bitkisel yağın hem de nano MoS<sub>2</sub> takviyeli bitkisel esaslı yağlayıcının yüzey kalitesini arttırdığı belirlenmiştir. Li ve Chou [23], MMY yöntemi ile mikro frezeleme işleminin takım ömrünü etkisini deneysel olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada mil dönme hızı, ilerleme oranı ve hava debisi parametreleri için üçer seviye belirlenmiş olup deneyler kuru ve bitkisel esaslı yağlayıcı (MMY) ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1,88 ml/sa yağ debisi ve 40 l/dk hava akış oranı optimum parametreler olarak belirlenmiştir. MMY yöntemi ile bitkisel yağ kullanımının iş parçasının yüzey kalitesini ve takım ömrünü arttırdığı sonucuna varılmıştır. Uysal vd. [24], MMY yöntemi ile kullanılan bitkisel yağ ve nano MoS<sub>2</sub> takviyeli (ağırlıkça %1) bitkisel esaslı yağın talaşlı imalat uygulamalarındaki tribolojik performansını yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması analizi ile araştırmışlardır. Deneyler 20 ml/sa ve 40 ml/sa olmak üzere iki farklı debi seviyesinde MMY yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre debi arttıkça (40 ml/sa) ve yağlayıcı kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının azaldığı belirlenmiştir. Kuram vd. [25], bitkisel yağ ve yarı sentetik yağların frezeleme işlemindeki performansını takım aşınması ve kesme kuvveti analizi ile araştırmışlardır. Çalışma kapsamında AISI 304 paslanmaz çelik malzemesi kanola yağı, ayçiçek yağı ve yarı sentetik ticari yağ kullanılarak frezeleme işlemine tabi tutulmuş olup kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve yağlayıcı parametrelerinin etkisini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre ayçiçek esaslı bitkisel esaslı yağın yarı sentetik yağla kıyasla takım aşınması ve kesme kuvvetinin minimizasyonu açısından daha etkili olduğu belirlenmiştir. Çelik [26], nano MoS<sub>2</sub> takviyeli yarı sentetik yağın GGG70 küresel grafitli dökme demir malzemesinin frezelenmesi işlemindeki performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada MMY yöntemi kullanılmış ve üç farklı oranda (%0,5, %1, %1,5) nano MoS<sub>2</sub> takviye edilmiş olup deneyler üç farklı seviyede basınç (3, 5 ve 7 bar) ve iki farklı seviyede akış oranında (160 ve 310 ml/sa) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yağlayıcıların takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre minimum yüzey pürüzlülüğü değeri (0,47 µm) MMY + % 0,5 MoS<sub>2</sub> yağlayıcı ortamında, 5 bar basınç ve 160 ml/dak akış oranı parametreleri ile elde edilmiştir. Çetin vd. [27], bitkisel esaslı yağlar ve yarı sentetik yağların tornalama işlemindeki performansını takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre AISI 304 paslanmaz çeliğin tornalanmasında bitkisel esaslı yağların yarı sentetik yağlara kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Makhesana vd. [28], Bitkisel esaslı yağlayıcı ve katı yağlayıcının tornalama işlemindeki performansını yüzey pürüzlülüğü, takım-talaş arayüzündeki sıcaklık, talaş morfolojisi parametrelerine etkisi ile araştırmışlardır. Çalışma kapsamında AISI 4140 malzemesi iki farklı kesme hızında (100 ve 170 m/dak) parametrelerinde ve yağlayıcı ortamında tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre bitkisel esaslı yağlayıcının katı yağlayıcıya kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bitkisel esaslı yağlayıcının yüzey pürüzlülüğünü ve takım-talaş arayüzündeki sıcaklığı sırasıyla %27 ve %31 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır. Lu vd. [29], sıkıştırılmış grafit dökme demirin frezelenmesi işleminde yüzey pürüzlülüğü için etkili kesme parametrelerini deneysel ve Gauss regresyon analizi metodu ile araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu açısından en etkili parametrelerin kesme hızı ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir. Ek olarak deneylerden elde edilen sonuçlarla Gauss regresyon analizinden elde edilen sonuçların uyumluluk gösterdiği sonucuna varılmıştır.

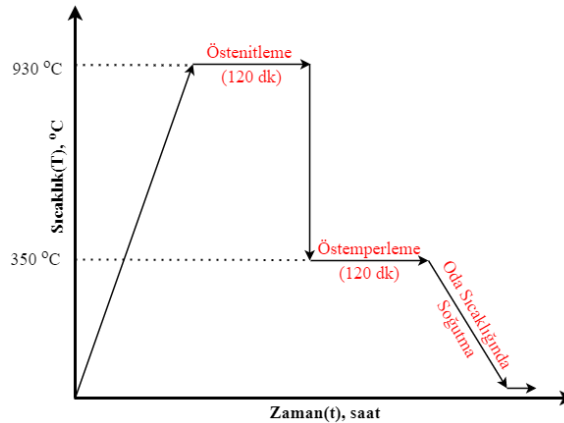
Talaşlı imalatta proses işleme parametrelerinin doğrusal olmayan ilişkileri ve karmaşık olmasından dolayı matematiksel teoriler kullanılmaktadır. Gelişen yapay zekâ teknikleri sayesinde talaşlı imalat prosesleri daha yüksek güvenilirlik seviyesinde optimize edilebilmektedir. Talaşlı imalatta optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyon için klasik ve sezgisel algoritmalar kullanılabilir. Yaygın kullanılan algoritmalar Yapay Sinir Ağları (YSA), Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Genetik Algoritma (GA), Bulanık Mantık (BM), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO), Arı Algoritması (AA) şeklindedir [30]. Arı Algoritması (AA) Pham ve ark. (2006) tarafından ileri sürülmüş bal arılarının kaynak tarama davranışından esinlenen sürü tabanlı bir algoritmadır. Arı Algoritması doğadaki arıların problem çözme yeteneklerini dikkate alan metasezgisel bir yöntemdir [31]. Talaşlı imalat proseslerinin optimize edilmesi ile ilgili literatür çalışmalarına baktığımızda; işleme parametreleri değiştirilerek (kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı) kuru şartlarda Nikel-Demir bazlı alaşım (Inconel 718) 'ın talaş kaldırılarak yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre değerleri regresyon analizi ile elde edilmiş ve Genetik Algoritma (GA) kullanılarak doğrulanmıştır[32]. Yüksek mukavemet, iyi termal direnç ve düşük aşınma gibi mekanik özelliklerinden dolayı Inconel 800 alaşımı havacılık endüstrisinde

kullanılmaktadır. Bu iyi mekanik özelliklerinin yanında düşük işlenebilirliği bir dezavantajdır. Bu malzemeye tel erozyonla işlenebilirliğinde kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve tel tüketim oranı gibi proses parametreleri Hibrit Parçacık Sürü Algoritması (PSO) kullanılarak optimize edilmiştir [33].

Bu çalışmanın özgün değeri GGG-70 malzemenin frezelenmesinde dikkate alınan kesme parametrelerinin Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesidir. Kesme parametresi olarak farklı kesme hızı, talaş derinliği parametreleri ve farklı kesme sıvıları kullanılmıştır. Bor, yarı sentetik ve bitkisel yağın dikkate alındığı çalışmada, kesme sıvılarının Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesi literatür için tektir. Çıkış parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü ve sertlik incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Küresel grafitli dökme demir deney numuneleri Konya OSB'de bulunan Motus A.Ş.'de kum kalıba döküm yöntemi ile dikdörtgenler prizması şeklinde 300x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. Üretim sonrası numunelere 930°C'de 120 dk süre boyunca östenitleme, daha sonra 350°C'de 120 dk süre boyunca östemperleme ısı işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Döksan Isıl İşlem Tesisleri'nde yapılmıştır (Şekil 1)[10]. Küresel grafitli dökme demirin dayanımının artırılması ve içyapıdaki çarpılmaların azaltılması için östemperleme işlemi yapılmıştır. Östemperleme işlemi yapılmış küresel grafitli dökme demirin mikro yapısında yüksek oranda küresel karbonlu kalıntı östenit ve beyitlik bir mikro yapı oluşmaktadır. Bu mikroyapı, küresel grafitli dökme demir malzemede tokluk, mukavemet ve işlenebilirliğine olumlu katkısı vardır[34].



Şekil 1. Küresel grafitli dökme demire östemperleme işlemi(austempering process of spheroidal cast iron) [10]

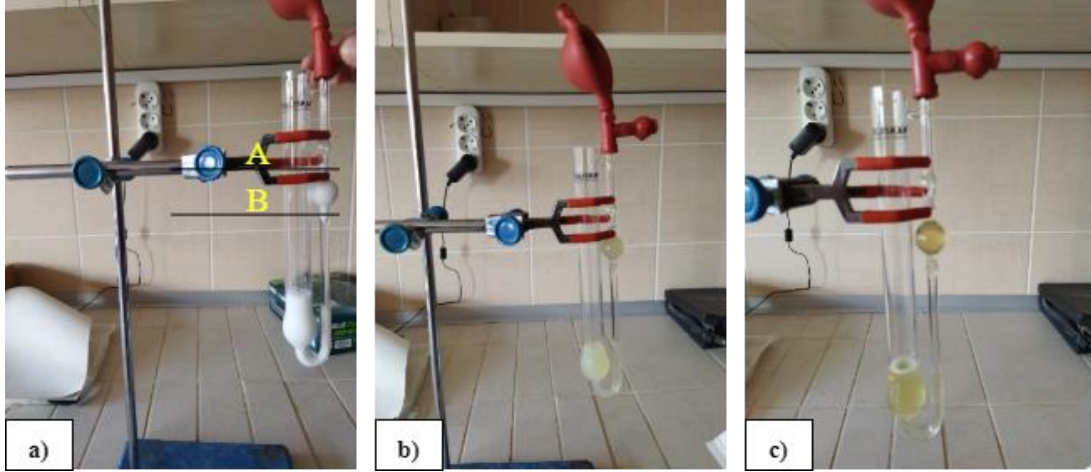
Deney numunelerinin kimyasal analizi, OBLF RS1000- 162 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak Motus A.Ş.'de yapılmıştır. Dökülen numunelere ait kimyasal analiz çıktısı Tablo 1'de verilmiştir [10].

Tablo 1. GGG-70 test numunelerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of GGG-70)[10]

Fe	C	Si	Mn	Cu	Mg	Ni	Mo
Bal.	3,56	0,08	2,33	0,826	0,033	0,599	0,191

GGG70 malzemesinin frezelenmesinde kesme sıvısı olarak bor, yarı sentetik ve bitkisel yağ kullanılmıştır. Deneysel çalışmada GENEREX URS marka yarı sentetik ve GENEREX SE-LF/14 marka bitkisel yağ kullanılmıştır. GENEREX URS marka yarı sentetik yağ, su ile stabil şekilde karışabilen ve talaşlı imalat işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yarı emülsiyon soğutma sıvısıdır. GENEREX SE-LF/14 marka bitkisel yağ su ile karışabilen, çevreye zarar vermeyen ve işlenen malzemelerin korozyon direncini arttıran soğutma sıvısıdır. Mevcut çalışmada kullanılan yarı sentetik ve bitkisel yağlar, su ile karışabilme kolaylığı ve yüksek tribolojik performansları sebebiyle kesme sıvısı olarak tercih edilmiştir.

Kesme sıvıları, literatür verileri dikkate alınarak saf suda %5 konsantrasyon ile hazırlanmıştır [35]. Kullanılan kesme sıvılarının karakteristik özelliklerinin belirlemek amacıyla Ubbelohde Viskozimetresi kullanılarak dinamik viskoziteleri ölçülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2. Ubbelohde viskozimetresi ile kesme sıvılarının viskozitelerinin ölçümü a) bor b) yarı sentetik c) bitkisel yağ (Measurement of viscosities of cutting fluids with Ubbelohde viscometer a) boron b) semisynthetic c) vegetable fluid)

Kesme sıvılarının (%5 konstrasyon ile hazırlanmış) kapiler içerisine yerleştirilmeden piknometre ile gerçek yoğunlukları ( $\rho$ ) ölçülmüştür. Şekillerdeki kapilerler üzerinde

A ve B noktaları arasındaki V hacmine yerleştirilen saf suyun (referans sıvı) akış süresi belirlenmiştir. Kesme sıvılarına da aynı işlem uygulanmıştır. Poiseuille tarafından geliştirilmiş olan bağıntıya dayanılarak sıvıların dinamik viskozitesi ( $\eta$ ) hesaplanmıştır. Denklem 1'de Poiseuille bağıntısı verilmiştir. Burada 2 indisıyla gösterilen büyüklükler viskozitesi tayin edilmek istenen sıvıyla alakalı, 1 indisıyla gösterilen büyüklük ise viskozitesi bilinen referans sıvının değeridir.

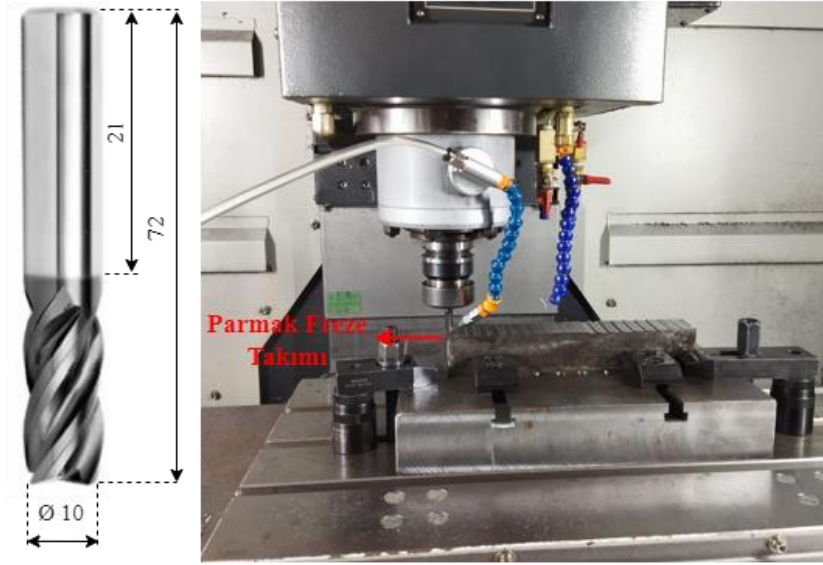
$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \quad (1)$$

Tablo 2'de elde edilen yoğunluklar ve akış süresi verilmiştir. Poiseuille bağıntısında iki ayrı sıvı için aynı denklemde yazılıp taraf tarafa oranlanarak viskozite değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 2. Kesme sıvılarının dinamik viskozite değerlerinin hesaplanması (Calculation of dynamic viscosity values of cutting fluids)

Kesme Sıvısı	Yoğunluk, $\rho$ , (gr/ml)	Akış Süresi, t, (sn)	Dinamik Viskozite (cp)
Bor Yağı	0,9950	53,39	1,3648
Yarı Sentetik Yağ	0,9990	53,03	1,3611
Bitkisel Yağ	0,9997	48,79	1,2531

Dikdörtgen prizması (300x50x50 mm) şeklinde olan deney numuneleri bağlama aparatları yardımıyla CNC dik işlem tezgahına yerleştirilmiştir. Talaş kaldırmak için kesici takım olarak 10 mm çapında, 4 ağızlı, AlCrN (Alüminyum krom nitrid) kaplı karbür parmak freze kullanılmıştır (Şekil 3). Deneylerde dikkate alınan frezeleme değerleri Tablo 3'te verilmiştir. GGG70 malzemenin boyuna frezelenmesinde, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı etkisi olmaması sebebiyle deney tasarımında ilerleme hızı (0,05 mm/diş) sabit alınmıştır [10]. Parametrelerin belirlenmesinde ön deneyler ve literatür dikkate alınmıştır [10][8][36]. Deney tasarımı tam faktöriyel tasarım metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

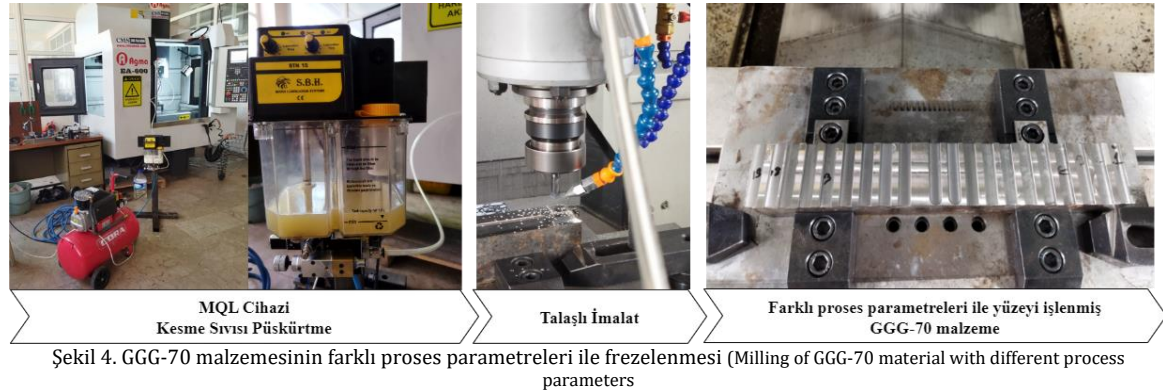


Şekil 3. CNC Dik İşlem Merkezi ve karbür parmak freze takımı (CNC Vertical Processing Center and carbide milling cutter tool)

Tablo 3. Frezeleme işleme parametreleri (Milling machining parameters)

Parametreler	1. Seviye (Alt seviye)	2. Seviye (Orta seviye)	3. Seviye (Üst seviye)
Kesme Hızı (m/dk)	60	120	180
Talaş Derinliği (mm)	0,5	1	1,5
Kesme Sıvıları (cp)	Bor solüsyonu (1,3648)	Yarı sentetik (1,3611)	Bitkisel esaslı (1,2531)

Frezeleme esnasında minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi CNC'ye entegre edilmiştir. MMY cihazı kompresöre bağlanmış ve yüksek basınçlı hava yardımıyla kesme sıvısı 30 ml/dk. debiyle talaş kaldırma bölgesine gönderilmiştir (Şekil 4).

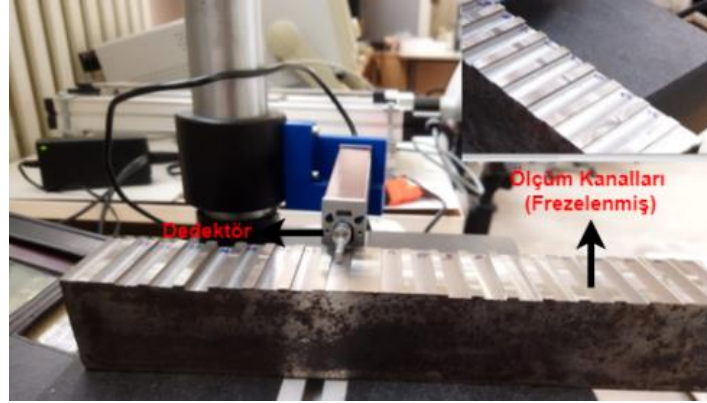


Şekil 4. GGG-70 malzemesinin farklı proses parametreleri ile frezelenmesi (Milling of GGG-70 material with different process parameters)

## 2.1. Yüzey Pürüzlülük (Surface roughness)

Farklı kesme sıvısı, talaş derinliği ve kesme hızı parametreleri kullanılarak yapılan frezeleme işleminde her numunenin yüzey pürüzlülüğü değerleri üç farklı noktadan alınan üç adet ölçüm değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde örnekleme uzunluğu (cut-off) 0,8 mm ve örnekleme sayısı 3 olarak seçilmiştir. Parçanın eksenine paralel olarak yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo marka, SJ-301 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Şekil 5). Pürüzlülük ölçümlerinde ortalama pürüzlülük değeri olan Ra dikkate alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin anlamlılığı regresyon katsayısı ve varyans analizi (ANOVA) değerleri ile belirlenmiştir.





Şekil 5. Yüzey pürüzlülük ölçüm ekipmanı (Surface roughness measuring equipment)

## 2.2. Rockwell Sertlik Ölçümü (Surface roughness)

İşlenen yüzeylerin sertlik ölçümü Rockwell sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. İşlenen her bir yüzeyin üç farklı noktasından sertlik ölçümü gerçekleştirilerek yüzeylerdeki sertlik değişiminin homojenliği test edilmiş ve homojen dağılımı sağlayan verilerin ortalaması sertlik değeri olarak dikkate alınmıştır. Sertlik değerlerinin anlamlılığı regresyon katsayısı ve varyans analizi (ANOVA) değerleri ile belirlenmiştir. Frezelenmemiş yüzey sertliği ise 32 HRC olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. Rockwell sertlik ölçüm deney ekipmanı (Rockwell hardness measurement experimental equipment)

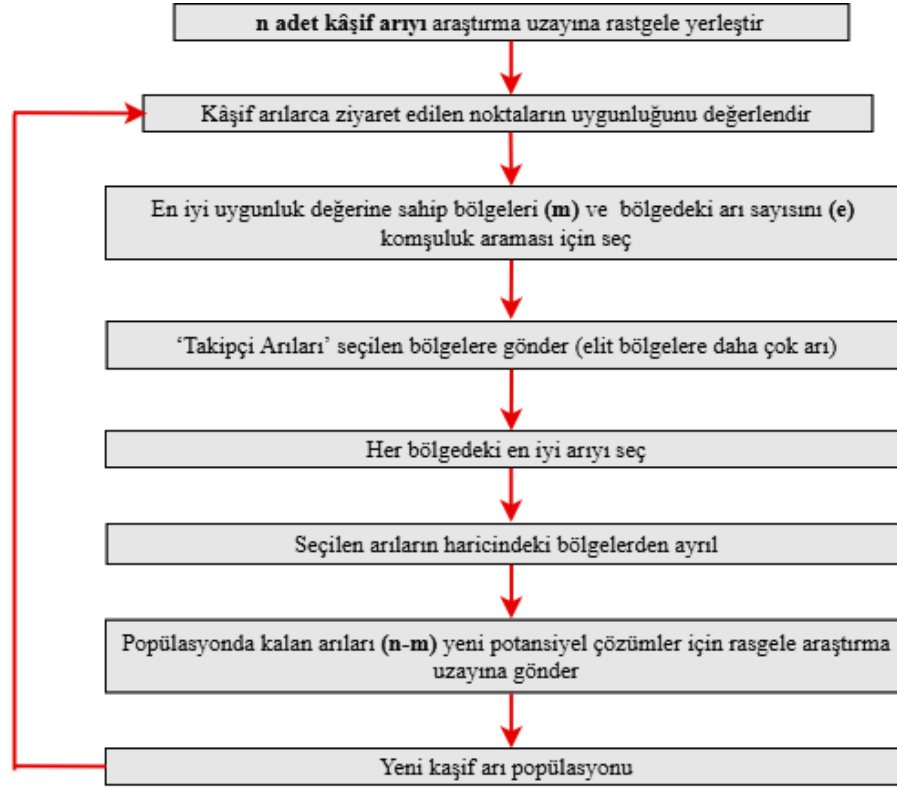
## 2.3. Arı Algoritması (The Bees Algorithm)

Bu çalışmada temel amaç GGG70 östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin frezelenmesi sonucunda yüzey pürüzlülüğünü minimum yapan kesme parametrelerini belirlemektir. Arı Algoritması (AA) problem çözümünde amaç fonksiyonunu dikkate alarak çözüm üretmektedir. Amaç fonksiyonu için tam faktöriyel deney tasarımlarında regresyon denklemi kullanılabilir. Arı Algoritması genel olarak kâşif arı sayısı ( $n$ ), ziyaret edilen  $n$  nokta içinden seçilen bölge sayısı ( $m$ ), seçilen  $m$  bölge içindeki en iyi bölge sayısı ( $e$ ), en iyi  $e$  bölgeye gönderilen arı sayısı ( $nep$ ), kalan ( $m-e$ ) bölgeye gönderilen arı sayısı ( $nsp$ ), bölge boyutu ( $ngh$ ) ve durdurma kriteri ( $itr$ ) parametrelerini içermektedir. Bu parametrelerin optimizasyonda neleri ifade ettikleri tablo şeklinde aşağıda verilmiştir (Tablo 4)[31] [37] [38].

Tablo 4. Arı Algoritması parametreleri (Bees algorithm parameters) [31] [37] [38]

AA Parametresi	Açıklama
$n$	Kâşif arı sayısı
$m$	Ziyaret edilen ' $n$ ' noktadan seçilen bölge sayısı
$e$	Seçilen ' $m$ ' bölge içindeki en iyi bölge sayısı (elit bölge)
$nep$	En iyi ' $e$ ' bölgeye gönderilen arı sayısı
$nsp$	Kalan ( $m-e$ ) bölgeye gönderilen arı sayısı
$ngh$	Komşuluk araması boyutu
$itr$	Durdurma kriteri (iterasyon sayısı)

Pham ve ark. (2006) tarafından hazırlanan temel AA akış şeması Şekil 7' deki gibidir [31] [37] [38];



Şekil 7. Arı Algoritması akış şeması (The flow chart of the Bees Algorithm) [31][37][38].

AA'da kısıtların belirlenmesi önem taşımaktadır. Amaç fonksiyonunda dikkate alınan değişkenlerin alt ve üst sınırları aşağıda verilmiştir.

1,253 cp < Kesme Sıvısı Viskozitesi < 1,364 cp  
 0,5 mm < Kesme Derinliği < 1,5 mm  
 60 m/dk < Kesme Hızı < 180 m/dk

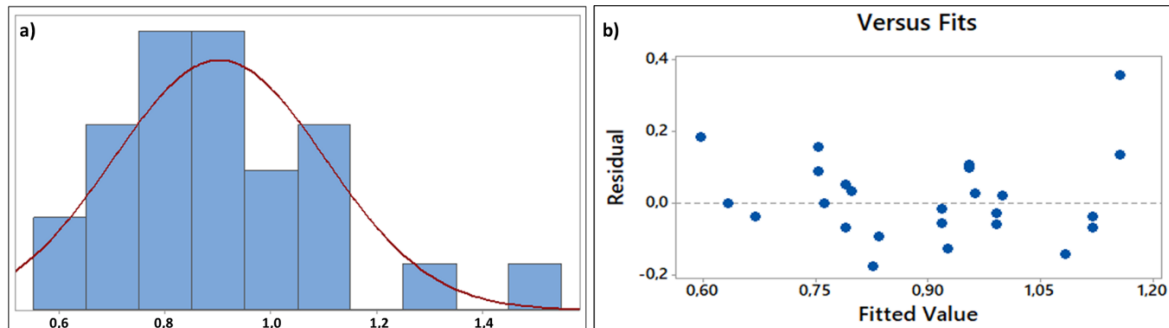
Sınırlayıcılar doğrultusunda ve regresyon denklemi kullanılarak AA ile minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametreleri araştırılmıştır. AA programında başlangıç kâşif arı sayısı 50 olarak seçildi. Diğer başlangıç parametreleri ise şu şekilde alınmıştır; itr=100; n=70 ; m=8; e=5; nsp=7; nep=10; ngh=0,01 AA için kullanılacak değerler literatürden elde edilmiştir [31] [37] [38].

### 3. Deneysel Sonuçlar, Analiz ve Tartışma (Experimental Results, Analysis and Discussion)

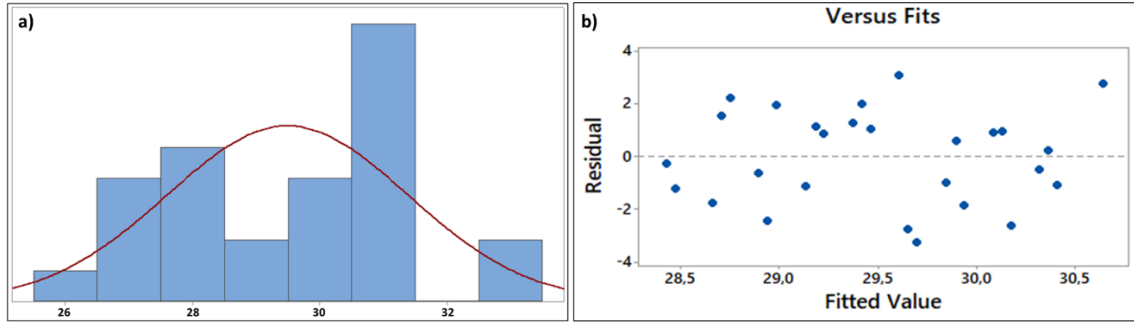
Frezeleme deneylerinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama 0,90  $\mu\text{m}$  ve standart sapma değeri 0,20  $\mu\text{m}$  olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen histogram grafiği ve saçılım grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Elde edilen grafik normal dağılım eğrisi ile uyum göstermektedir. Tablo 6'da verilen ANOVA ile elde edilen sonuçlarda regresyon katsayısı değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Regresyon katsayısı değerinin yüksek olmasına bağlı olarak fit değerleri de merkez regresyon eğrisi etrafında konumlanmış ve çok düşük sapma değerleriyle (maksimum 0,4) regresyon doğrusundan uzaklaşmıştır. Bu duruma bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü verilerinin istatistiksel olarak anlamlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Sertlik için ortalama değer 29,492 HRC ve standart sapma değeri 1,896 HRC olarak elde edilmiştir. Yüzey sertliği için elde edilen histogram grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Elde edilen grafiğin normal dağılım eğrisi ile uyum göstermediği görülmektedir. Sertlik parametresi için elde edilen saçılım grafiğinde fit değerlerinin regresyon eğrisinden uzaklaştığı görülmektedir. Bu durum normal dağılım grafiğini destekler nitelikte olup sertlik verilerinden istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilemeyeceği öngörülmüştür. İstatistiksel anlamlılığın ileri analizi amacıyla hem yüzey pürüzlülüğü hem de sertlik için elde edilen varyans analizi tabloları ve regresyon katsayısı değerleri Tablo 6 (Ra) ve Tablo 7'de (HRC) verilmiştir.

Tablo 5. Talahlı imalat proses parametrelerine bağlı GGG-70 malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Change of surface roughness of GGG-70 material depending on machining process parameters)

Deneş No	Kesme Sıvısı(cp)	Kesme Derinliği (d; mm)	Kesme Hızı (v; m/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			Sertlik (HRC)		
				1.Deneş	2.Deneş	3.Deneş	Genel Ort.	Genel Ort.	
1	Bor Yağı	0,5	60	0,92	0,97	0,93	0,94	33,40	
2			120	0,90	0,85	0,84	0,86	29,30	
3			180	0,77	0,90	0,85	0,84	27,55	
4		1	1,5	60	1,03	1,01	1,11	1,05	28,05
5				120	1,03	1,15	1,01	1,06	26,45
6				180	0,71	0,76	0,68	0,72	30,50
7		Yarı Sentetik Yağ	0,5	60	1,55	1,46	1,52	1,51	30,10
8				120	1,02	0,92	0,94	0,96	30,95
9				180	0,60	0,71	0,64	0,65	30,95
10	1		1,5	60	1,03	0,90	0,88	0,94	30,60
11				120	0,84	0,94	0,92	0,90	31,10
12				180	0,91	0,86	0,97	0,91	30,50
13	Bitkisel Yağ		0,5	60	1,09	1,08	1,06	1,08	26,87
14				120	1,12	0,98	1,05	1,05	31,40
15				180	0,85	0,88	0,78	0,84	30,30
16		1	1,5	60	1,33	1,21	1,33	1,29	26,50
17				120	0,93	1,03	0,82	0,93	30,23
18				180	0,65	0,64	0,67	0,65	27,23
19		Bitkisel Yağ	0,5	60	0,84	0,75	0,82	0,80	29,80
20				120	0,81	0,74	0,72	0,76	31,00
21				180	0,83	0,80	0,71	0,78	28,85
22	1		1,5	60	1,08	0,99	0,91	0,99	32,70
23				120	0,82	0,82	0,85	0,83	30,65
24				180	0,67	0,57	0,64	0,63	28,00
25	1,5		1,5	60	1,04	1,03	1,00	1,02	28,27
26				120	0,77	0,68	0,78	0,74	26,87
27				180	0,61	0,66	0,61	0,63	28,17



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğü verileri için normal dağılım grafiği (Normal distribution plot for surface roughness data)



Şekil 9. Sertlik verileri için normal dağılım grafiği (Normal distribution plot for surface hardness data)

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analiz tablosu (Variance analysis table for surface roughness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Etki
Kesme Sıvısı	2	0,14727	0,073633	13,08	0,003	14,09
Kesme Derinliği	2	0,02629	0,013144	2,34	0,159	2,55
Kesme Hızı	2	0,49020	0,245100	43,55	0,0002	46,95
Kesme Sıvısı*Kesme Derinliği	4	0,02278	0,005694	1,01	0,456	2,18
Kesme Sıvısı*Kesme Hızı	4	0,02627	0,006567	1,17	0,394	2,51
Kesme Derinliği*Kesme Hızı	4	0,28604	0,071511	12,71	0,002	27,40
<b>Error</b>	8	0,04502	0,005628			4,32
<b>Total</b>	16	1,04387				100

**R-Sq: %95,69      R-Sq (Adj): %85,98**

Tablo 7. Yüzey sertliği için varyans analiz tablosu (Variance analysis table for surface hardness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Etki
Kesme Sıvısı	2	0,5619	0,2809	0,07	0,929	0,63
Kesme Derinliği	2	9,1883	4,5941	1,21	0,346	9,83
Kesme Hızı	2	2,0572	1,0286	0,27	0,769	2,20
Kesme Sıvısı*Kesme Derinliği	4	22,9982	5,7496	1,52	0,284	24,61
Kesme Sıvısı*Kesme Hızı	4	20,2763	5,0691	1,34	0,335	21,70
Kesme Derinliği*Kesme Hızı	4	8,0617	2,0154	0,53	0,716	8,63
<b>Error</b>	8	30,2737	3,7842			32,40
<b>Total</b>	26	93,4173				

**R-Sq: %67,59      R-Sq (Adj): %0,00**

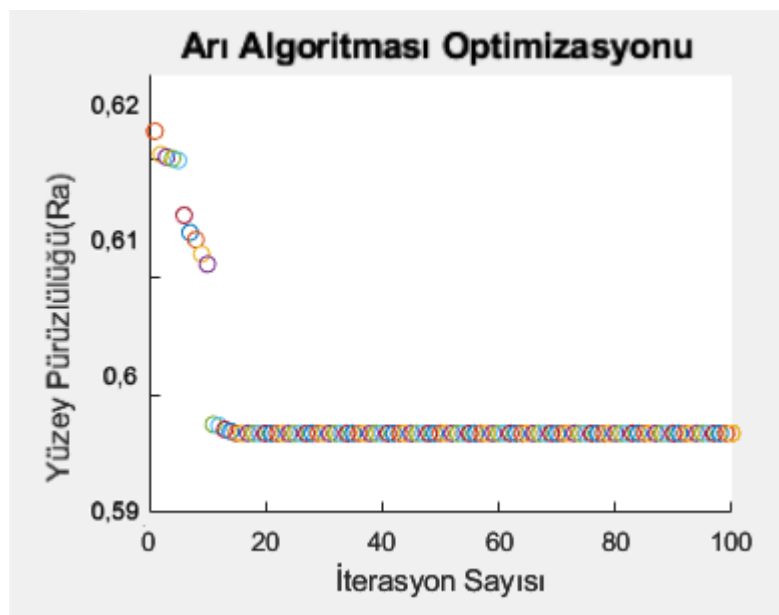
Varyans ve regresyon analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünün %85,98 uyumlulukta modellenildiği (Tablo 6), fakat yüzey sertliği analizinde bu değer için R-Sq değeri %67,59 oranında elde edilmiş olsa da, çoklu parametre ile çalışıldığı için R-Sq (Adj) değerinin dikkate alınması gerekmektedir. Sertlik değeri için elde edilen sıfır değeri ile varyans analizi sonuçları da uyumludur. Tablo 7’de verilen %95 güven aralığındaki “p” değerlerine göre, frezeleme parametrelerinin sertlik değişimi üzerinde istatistiksel ve fiziki olarak anlamlı bir değişim meydana getirmediği ( $p < 0,05$ : anlamlılık seviyesi) belirlenmiştir [39]. Sertlik değişimi belirleyen temel parametre, malzemenin işlenmesi esnasında oluşan ısınma ve ani soğuma etkisidir. Frezeleme esnasında kesme sıvısı kullanıldığı için kesme ara yüzeyinde maksimum 400 ile 650°C sıcaklık oluştuğu iddia edilebilir [40][41]. Bu değerlerin menevişleme sıcaklığı değerleri olması sebebiyle parça yüzeyinde bir miktar yumuşama etkisi olmuş ve sertlik değerlerinde ~2 HRC değerinde düşüş meydana gelmiştir. İlâveten, oluşan sıcaklık değerlerinin değişim aralığı kesme parametrelerinin değişiminden anlamlı derecede etkilenmediği için sertlik değişiminde de anlamlı bir değişim elde edilememiştir. Elde edilen bu sonuca göre Arı Algoritması ile optimizasyon için sertlik değeri dikkate alınmamıştır.

Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için elde edilen varyans analizi tablosunda ise (Tablo 6) “p” değerlerine göre, frezeleme parametrelerinin Ra değişimi üzerinde istatistiksel ve fiziki olarak anlamlı bir değişim meydana getirdiği görülmektedir. Kesme sıvısı ve kesme hızı için elde edilen “p” değerleri 0,05 değerinden küçük olarak hesaplanmıştır. Kesme sıvısı Ra değerini %14,09, kesme hızı ise %46,95 oranında etkilemiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur [42][43]. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen R-Sq (Adj) değeri %85,98 değeri ile yeterli anlamlılık seviyesindedir. İlâveten, farklı parametre değişkenleri ile yapılan deneylerin matematiksel modeli Minitab programında regresyon Analizi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu matematiksel model (Denklem 2) yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ile olan ilişkisini göstermektedir. Matematiksel model optimizasyondaki amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada Arı Algoritmasının modellenmesi için regresyon denklemi yani amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

$$Ra = -0,730 + 1,426s + 0,0717d - 0,002755v \quad (2)$$

Arı Algoritması optimizasyonu işleminde, amaç fonksiyonunun iterasyon sayısı ile değişimi Şekil 10'da görülmektedir. Arı Algoritmasında minimizasyon hedefi için modelleme yapılmıştır. Arı Algoritması Matlab programında çalıştırılmış ve optimum yüzey pürüzlülük değerinin 40. iterasyondan sonra sabit kaldığı belirlenmiştir. Optimizasyon sonucu işleme parametrelerinin en uygun değerleri; kesme sıvısında bitkisel yağ, kesme derinliğinde 0.5 mm ve kesme hızında 180 mm/dk olarak bulunmuştur. Bu değerler sonucu elde edilen tahmini yüzey pürüzlüğü değeri (Ra) 0,59  $\mu\text{m}$ 'dir. Ra minimizasyonunda en uygun kesme sıvısının bitkisel yağ olması bor yağına kıyasla sürdürülebilir çevre açısından önem arz etmektedir.

Bitkisel yağın viskozite değerinin diğer yağlara kıyasla ~%8 oranında daha az olması, bitkisel yağın takım-talaş arayüzüne daha iyi penetre olmasını sağlamış ve artan tribolojik kabiliyete bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri minimum seviyede elde edilmiştir. Artan penetrasyon kabiliyeti kesme ara yüzeyinde hem sıcaklığın azalmasını sağlamış hem de daha fazla alanda yağlama etkisi oluşturmuştur [20][44] [45].

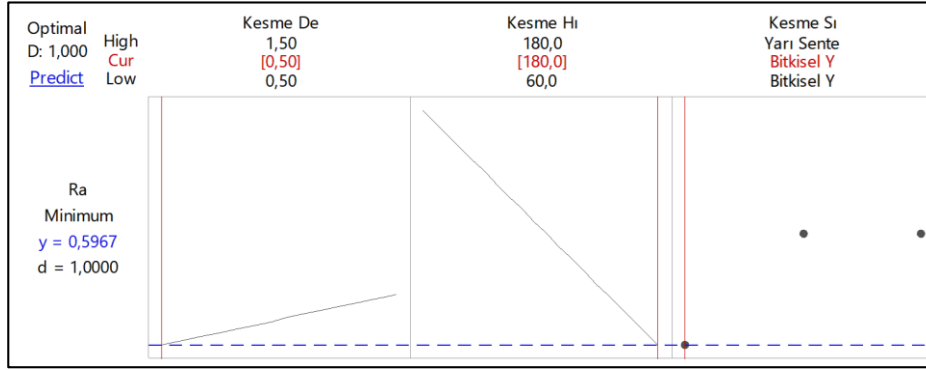


Şekil 10. Amaç fonksiyonunun Arı Algoritması optimizasyonunda yakınsama grafiği (Convergence graph in optimization of objective function with Bees Algorithm)

Elde edilen ortalama pürüzlülük değerinin 0,90  $\mu\text{m}$  değerinde elde edilmesi MMY'nin kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır. 0,90  $\mu\text{m}$  değeri, genel makine imalatında yüksek yüzey kalitesi standartlarını ifade etmektedir. MMY kullanımı ile elde edilen bu değer, MMY'nin frezeleme işlemlerinde kullanım açısından teknik yeterlilik seviyesinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca kullanılan soğutma-yaglama sıvısı miktarının minimize edilmesi çevresel sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin minimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır.

Talaşlı imalat prosesinde sezgisel optimizasyon metotların kullanılması, çevre ve sağlık açısından bitkisel yağın kullanılabilirliğinin araştırılması ve minimum miktarda yağlayıcı ile prosesin gerçekleştirilmesi ürün ve proses kalitesi açısından kazanımdır. Çalışma kapsamında kullanılan Arı Algoritmasının güvenilirliğinin araştırılması için Minitab programından elde edilen ve regresyon denkleminin bağlı çalışan optimizasyon modülü ile de en uygun Ra değeri ve parametreler araştırılmıştır. Şekil 11'de verilen optimizasyon grafiğine göre optimum parametrelerin kesme sıvısı için bitkisel yağ, kesme hızı için 180 mm/dk. ve talaş derinliği için 0,5 mm olduğu görülmektedir. Belirlenen optimum parametrelerde beklenen Ra değeri 0,59  $\mu\text{m}$ 'dir. Regresyon denkleminin bağlı optimizasyon modülü kullanılarak Minitab'dan elde edilen sonuçlar ile Arı Algoritmasının çalıştırıldığı Matlab programından elde edilen sonuçlar aynıdır. Bu duruma bağlı olarak Arı Algoritmasının talaşlı imalat işlemlerinde yüksek güvenilirlikte kullanılabileceği söylenebilir. Optimum parametreler dikkate alınarak laboratuvar ortamında yapılan doğrulama deneylerinde de ~%4'lik (ortalama 0,62  $\mu\text{m}$ ) kabul edilebilir bir sapma değeri ile optimum sonuca yaklaşılmıştır. Diğer yandan, Şekil 11'e göre kesme hızı arttıkça Ra değeri azalmış, talaş derinliği arttıkça da Ra değeri artmıştır. Elde edilen bu sonuç literatürle

uyumludur [46][47]. Ayrıca, bitkisel yağ minimum Ra değerini verirken, yarı sentetik ve bor yağı bitkisel yağa kıyasla daha yüksek fakat yakın değerlerde Ra değeri vermiştir. Bu durum viskoziteye bağlı olarak açıklanabilir. Tablo 2’de, laboratuvar ortamında elde edilen bor ve yarı sentetik yağın viskozite değerlerinin yakın seviyede olduğu, bitkisel yağın ise ~%8 daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Viskozite değeri düştükçe tribolojik performans artmıştır. Fakat bu aşamada bitkisel yağın yüksek oksitlenme eğilimi nedeniyle diğer iki yağa kıyasla daha kısa ömürlü kullanım sağlayacağı söylenebilir. Bu aşamada çevresel faktörler ve fayda-maliyet unsurları dikkate alınarak yağlayıcı seçimi yapılması gerekmektedir.



Şekil 11. Regresyon tabanlı optimizasyon grafikleri (Regression based optimization graphs)

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada östemperlenmiş küresel sfero dökme demir (GGG70) malzemenin frezelenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğünü sağlayan optimum kesme parametreleri Arı Algoritması ile araştırılmıştır. GGG70 malzemelerin yüksek mekanik özellikleri endüstriyel kullanım açısından bir avantaj oluşturmalarına rağmen işlenebilirlikleri zayıftır. Bu sebeple çalışma kapsamında temel işleme parametrelerinin yanında kesme sıvılarının ve MMY kullanımının da etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Talaşlı imalat prosesinden sonra yüzey tribolojik özelliklerinden olan yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Farklı kesme parametreleri ile yapılan deneyler sonunca yüzey pürüzlülüğü en fazla 1,51  $\mu\text{m}$  iken en düşük 0,63  $\mu\text{m}$  değerinde elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama 0,90  $\mu\text{m}$  değeri elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda minimum yüzey pürüzlülük değeri, maksimum yüzey pürüzlülük değerine kıyasla %58,27 iyileşme, ortalama yüzey pürüzlülük değerine kıyasla % 30 iyileşme ile elde edilmiştir.
- Frezeleme işleminde farklı kesme parametrelerinin yüzeydeki sertlik değişimine etkisinin anlamsız olduğu varyans analizi ile belirlenmiştir.
- Arı Algoritması optimizasyonuna göre ideal proses parametreleri; kesme sıvısı olarak bitkisel yağ, kesme hızı için 180 mm/dk ve talaş derinliği için 0,5 mm'dir. Frezeleme deneylerinde ilerleme hızı (0,05 mm/diş) sabit tutulmuştur. Optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafiğine göre Ra değeri 0,59  $\mu\text{m}$ 'dir.
- Minitab programında regresyon denkleminin optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçlar ile Matlab programında Arı Algoritması ile yapılan optimizasyondan elde edilen sonuçlar aynıdır. Netice olarak frezeleme işleminde proses parametrelerinin optimizasyonunda AA metodun kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Optimizasyon sonucu elde edilen optimum kesme parametrelerini doğrulamak için yapılan frezeleme deneyleri neticesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,62  $\mu\text{m}$  (~%4'lik sapma) bulunmuştur ve optimum sonuca yaklaşılmıştır.
- GGG-70 malzemenin frezeleme prosesinde minimum Ra değerini veren kesme sıvısı bitkisel yağdır. Bu durum viskoziteye bağlı olarak açıklanabilir. Bitkisel yağ deneylerde kullanılan diğer yağlara (bor yağı, yarı sentetik yağ) kıyasla daha düşük viskoziteye sahiptir. Takım ve talaş arasında daha iyi pülverize olmuştur. Kesme sıvıları minimum miktarda yağlayıcı (MMY) ile talaşlı imalatta kullanılmıştır.
- GGG-70 malzemesinin frezelenmesi işleminde kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu bir etkisi vardır, kesme hızı arttıkça Ra değeri azalmıştır. Talaş derinliğinin artması

yüzey kalitesini düşürmüş yani yüzey pürüzlülük değeri artmıştır.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] D. Handayani, "The machinability of austempered ductile irons (ADI), " Ph.D. dissertation, The Pennsylvania State Univ., Pennsylvania, America, 2017.
- [2] G. Gider, "Farklı oranlarda silisyum içeren küresel grafitli dökme demirlerin mikro yapılarına çift kademeli östemperlemenin etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [3] A. Sinlah, D. Handayani, R. C. Voigt, K. Hayrynen, R. M. Saoubi and C. Saldana, "Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 29, pp. 62-67, August 2015. doi:10.1179/1743133615Y.0000000026
- [4] D. Eraslan, A. Balci, B. Çetin, N. Uçak, A. Çiçek, O.D. Yılmaz, K. Davut, "Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions" *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 1443-1456, January 2021. doi:10.1016/j.jmrt.2021.01.123
- [5] A. Pınarbaşı, M. K. Külekçi, C. Boğa, U. Eşme, "Optimization of the Effect of Processing Parameters on Surface Roughness and Cutting Energy in CNC Milling of Al-7075 Material", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol 35 (2), pp. 345-355, Haziran 2020. doi:10.21605/cukurovaummfd.792420
- [6] P. Parhad, V. Dakre, A. Likhite and J. Bhatt, "The impact of cutting speed and depth of cut on cutting force during turning of austempered ductile iron" *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 663-669, July 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.750
- [7] J. Datt, U. Batra, "Influence of Composition and Austempering Temperature on Machinability of Austempered Ductile Iron", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*, vol.7 No:2, January 2013. waset.org/Publication/9996961
- [8] A. Eltaggaz, P. Zawada, H. A. Hegab, I. Deiab, H. A. Kishawy, "Coolant strategy influence on tool life and surface roughness when machining ADI", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, pp. 3875-3887, February 2018. doi:10.1007/s00170-017-1088-1
- [9] M. Arft, F. Klocke and D. Lung, "Evaluation of the machining aspects of Austempered Ductile Iron" *Int. J. Met. Cast.*, vol.1A, pp. 36-42, 2012. doi:10.1007/BF03355537
- [10] M. T. Adır, "Isıl işlem yardımıyla mekanik özellikleri iyileştirilmiş GGG70 dökme demirin işlenebilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2021.
- [11] P. Sahoo, "Fractal characterization and optimization of electroless Ni-P coatings", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, pp.9, January 2008, doi:10.1088/0022-3727/41/2/025310
- [12] A. Rodriguez, L. N. López de Lacalle, O. Pereira, A. Fernandez and I. Ayesta, "Isotropic finishing of austempered iron casting cylindrical parts by roller burnishing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, pp. 753-761, August 2020. doi:10.1007/s00170-020-05894-7
- [13] D. Manivel, R. Gandhinathan, "Optimization of surface roughness and tool wear in hard turning of austempered ductile iron (grade3) using Taguchi method", *Measurement*, vol. 93, pp. 108-116, June 2016. doi: 10.1016/j.measurement.2016.06.055
- [14] G. Uzun, "Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons", *Measurement*, vol. 142, pp. 122-130, April 2019, doi:10.1016/j.measurement.2019.04.059
- [15] P. Yan, Y. Rong and Gang Wang, "The effect of cutting fluids applied in metal cutting process", *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*, vol.230, pp.19-37, May 2015. doi:10.1177/0954405415590993
- [16] O. Aydoğan, "Takım Malzemelerinde Aşınma Hasarlarını Önleyecek İşlemler ve Yağlayıcıların Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [17] T. Prakash, A. Arun, A. Sachin, "Investigation of non-edible vegetable oil as cutting fluid in boring operation using MQL technique for CEW-1 steel", *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, pp. 1462-1466, September 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.09.346
- [18] E. A. Rahim, M. R. Ibrahim, A. A. Rahim, S. Aziz, Z. Mohid, "Experimental investigation of minimum quantity lubrication (MQL) as a sustainable cooling technique", *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Germany, 2015, pp. 351-354. <https://gcsu.edu/Malaysia/>
- [19] A. Sharma and R. Kumar, "Potential use of minimum quantity lubrication (MQL) in machining of biocompatible materials using environment friendly cutting fluids: An overview", *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5315-5319, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2021.01.904

- [20] I. S. Afonso, J. Pereira, A.E. Ribeiro, J.S. Amaral, N. Rodrigues, J. R. Gomes, R.Lima, J. Ribeiro, "Analysis of a Vegetable Oil Performance in a Milling Process by MQL Lubrication", *Micromachines (Basel)*, vol.13(8), pp. 1254, August 2022. doi:10.3390/mi13081254
- [21] A. Alshibi, A. Nasreldin, S. Pervaiz, "Sustainable Vegetable Oil-Based Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining of AZ91 Magnesium Alloy: A Grey Relational Analysis-Based Study", *Lubricants*, vol 11(2), pp 79, February 2023. doi:10.3390/lubricants11020079
- [22] D. B. Cönger, "Nano molibden disülfid katkılı bitkisel esasl kesme sıvısı kullanarak minimum miktarda yağlama ile alüminyumun frezelenmesinde işlem parametrelerinin talaş kaldırma performansına etkilerinin incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [23] K. M. Li, S.Y. Chou, " Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, No. 15, pp.2163–2170, July 2010. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.031
- [24] A. Uysal, F. Demirena, E. Altana, "Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano MoS<sub>2</sub> Reinforced Vegetable Cutting Fluid", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol.195, pp. 2742 – 2747, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.384
- [25] E. Kuram, B. T.Simsek, B.Ozcelik, E.Demirbas, S. Askin, "Optimization of the cutting fluids and parameters using Taguchi and ANOVA in milling", In Proceedings of the world congress on engineering, London, U.K (Online) , vol. II, pp. 1-5, WCE 2010. <https://www.iaeng.org/publication/WCE2010/>
- [26] B. Çelik, "Küresel grafitli ggg-70 dökme demirin minimum miktarda yağlama tekniği kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2018.
- [27] M. H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, E. Demirbas, "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 2049-2056, July 2011. doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.013
- [28] M. A. Makhesana, J. A. Baravaliya, R. J. Parmar, B. K. Mawandiya, K. M. Patel, "Machinability improvement and sustainability assessment during machining of AISI 4140 using vegetable oil-based MQL", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, pp. 1-14, July 2021. doi:10.1007/s40430-021-03256-2
- [29] J. Lu, Z. Zhang, X. Yuan, J. Ma, S. Hu, B. Xue, X. Liao, "Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression", *Measurement*, 157: 1-11, February 2020. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107578
- [30] Y.Fedai, A. Ünüvar, "Frezelemede optimum kesme parametrelerini belirlemek için yapay zeka sistemlerinden oluşan adaptif bir sanal operatörün geliştirilmesi", *5.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ekim 2014, pp. 129, Bursa, Türkiye.
- [31] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, "The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems ", *Intelligent Production Machines and Systems*, pp. 454-459. December 2006, doi:10.1016/B978-008045157-2/50081x
- [32] H. Kedia, A. Pandey, A. Kumar, A. Majumdar, J. De, N. Ghosh, "Optimization of process parameters in machining of Inconel 718 super alloy on HMT (NH<sub>22</sub>) capstan lathe using genetic algorithm subject to minimization of surface roughness", *Materials Today: Proceedings*, vol. 66, pp. 3910-3915, July 2022, doi:10.1016/j.matpr.2022.06.390
- [33] B. Choudhuri, R. Sen, "Optimization of WEDM parameters for machining inconel 800 by ann based bayesian hybrid algorithm", *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp.1098-1101, May 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.04.318
- [34] B. Wang, M. He, G. C. Barber, J. D. Schall, C. Tao, X. Sun, "Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times", *Wear*, vol. 398, pp.41-46, March 2018. doi:10.1016/j.wear.2017.11.022
- [35] Y.A. A. Ahmida, S. Korkmaz, S. K. Kilincarslan, O. C. Sirvan, M H. Cetin, "Investigation of interaction of extreme pressure additive, load and sliding speed parameters with silver nano-particles in wear environment", vol. 4, pp.4., November 2021. doi:10.1088/2051-672X/ac311f
- [36] R.Düzce , G. Samtaş, "GG25 dökme demirin frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkisi ve optimizasyonu", *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 2, pp. 20-33, November 2021, doi:10.52795/mateca.1019186
- [37] M. A. Şen, M. Kalyoncu, " Optimisation of a PID controller for an inverted pendulum using the Bees Algorithm", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 789-790, pp 1039-1044, May 2015, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.1039
- [38] D. T. Pham, E. Koç, M. Kalyoncu, M. Tınkır, "Hierarchical PID controller design for a flexible link Robot manipulator using the Bees Algorithm", *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, , pp. 757-765, October 2008, Sakarya, Turkey. [www.imss.sakarya.edu.tr](http://www.imss.sakarya.edu.tr)
- [39] E. Nas, H. Gökkaya, "Experimental and Statistical Study on Machinability of the Composite Materials with Metal Matrix Al/B<sub>4</sub>C/ Graphite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 48, pp. 5059–5067, 2017. doi:10.1007/s11661-017-4237-0



- [40] S. Pang, W. Zhao, T. Qiu, W. Liu, P. Yan, L. Jiao, X. Wang, "Effect of cutting fluid on milled Surface quality and tool life of aluminum alloy", *Materials*, vol 16(6), pp.2198, March 2023, . doi:10.3390/ma16062198
- [41] N.R. Dhar, M.W. Islama, S. Islama, M.A.H. Mithu, "The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171 pp.93-99, June 2005, doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.047
- [42] A. H. El-Sinawi, K. Reza, "Improving surface roughness in turning using optimal control of tool's radial position", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.167(1), pp. 54-61, August 2005, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.09.079
- [43] M. Hüseyinoğlu, " 7075 alüminyum alaşımının freze ile işlenmesinde minimum soğutma sıvısı kullanmanın performans karakteristiklerine etkisi, " Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [44] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, and M. Yang, "Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of hightemperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 29, no. 4, pp. 1084-1095, 2016. doi:10.1016/j.cja.2015.10.012
- [45] S. A. Lawal., I. A. Choudhury., Y. Nukman., Application of Vegetable Oil-Based Metalworking Fluids in Machining Ferrous Metals - A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 52, No. 1, pp. 1-12, 2012. doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003
- [46] M. Hamamcı, E. S. Topal, " Yüksek hızlı talaşlı işlemede yüzey kalitesinin iyileştirilmesi", *1st international symposium on innovative technologies in engineering and science ISITES'2013* ,Sakarya, Turkey. Haziran 2013, pp. 528-537. <https://isites.info/PastConferences/ISITES2013/>
- [47] V. Yılmaz, " Frezeleme uygulamalarında işleme parametrelerinin sebep olduğu titreşimlerin incelenmesi " Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.

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



GAZI

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Investigation of the Effect of Cutting Parameters and Tool Holder on Surface Roughness and Machining Precision in Al 7075-T6 Milling Operation

Mustafa Bozdemir<sup>a</sup>, Eymen Akdeniz<sup>b</sup>, Muhammet Yılmaz<sup>c</sup>, M. Kutay Gezer<sup>d</sup>

Submitted: 09.05.2023 Revised: 23.07.2023 Accepted: 27.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705085

### ABSTRACT

**Keywords:** Milling, surface roughness, , tool holder.

<sup>a</sup> Kırıkkale University,  
Department of Mechanical and Metal  
Technologies, Kırıkkale Vocational High  
School, 71400 -Kırıkkale, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-9332-2054  
e mail: mustafabozdemir@kku.edu.tr

<sup>b</sup> Sinerji AR-GE Merkezi  
Silah İhtisas OSB  
71450 - Kırıkkale, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-0169-4422

<sup>c</sup> Sinerji AR-GE Merkezi  
Silah İhtisas OSB  
71450 - Kırıkkale, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-1068-8828

<sup>d</sup> Sinerji AR-GE Merkezi  
Silah İhtisas OSB  
71450 - Kırıkkale, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2897-6198

<sup>\*</sup>Corresponding author:  
mustafabozdemir@kku.edu.tr

Aluminium alloys are widely used in various manufacturing industries due to their unique light weight performance, high strength-to-weight ratio, and high corrosion resistance, Therefore, aluminium alloys should be well studied during machining, and examined how to obtain a well-machined surface and increase processing precision. In this study, the effects of cutting parameters (cutting speed, feed rate, peripheral depth of cut, and tool holder type) on surface roughness and processing precision in CNC milling of Al 7075-T6 alloy were investigated using the Taguchi  $L_{27}$  method. In addition, variance analysis (ANOVA) was performed to find the effect ratios of cutting parameters on surface roughness and processing precision. As a result, it was observed that the largest effect ratio of the peripheral depth of cut on surface roughness and processing precision was 37.7 % and 36.1 %, respectively. The used tool holders did not have any effect on the surface roughness of the work-piece. However, a tool holder type has played a significant role in processing precision. The hydraulic tool holder has provided maximum processing precision, while the mechanical tool holder has showed a minimum precision level of the machining work-pieces.

## Al 7075-T6 Frezeleme Operasyonunda Kesme Parametrelerinin Ve Takım Tutucunun Yüzey Pürüzlülüğüne Ve İşleme Hassasiyetine Etkisinin İncelenmesi

### ÖZ

Alüminyum alaşımları, benzersiz hafiflik performansları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle çeşitli imalat endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle alüminyum alaşımları talaşlı imalat sırasında iyi araştırılmalı, iyi bir işlenmiş yüzeyinin nasıl elde edileceği ve işleme hassasiyetini nasıl artırılacağı incelenmelidir. Bu çalışmada, Al 7075-T6 alaşımının CNC frezelemesinde kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme, yan kesme derinliği ve takım tutucu türü) yüzey pürüzlülüğüne ve işleme hassasiyetine etkileri, Taguchi  $L_{27}$  yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve işleme hassasiyetine etki oranlarını bulmak için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Sonuç olarak, yan kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyeti üzerindeki etkilerine bakıldığında, en büyük etkinin sırasıyla % 37,7 ve % 36,1 olduğu görülmüştür. Kullanılan takım tutucu çeşitlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, takım tutucu çeşitleri, işleme hassasiyetinde büyük bir rol oynamıştır. Hidrolik takım tutucu, işleme hassasiyetinde maksimum performans sağlarken, mekanik takım tutucu ise işlenen parçanın minimum hassasiyet seviyesini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Frezeleme, Yüzey pürüzlülüğü, Takım tutucusu

## 1. Giriş (Introduction)

Savunma, otomotiv, uzay ve havacılık gibi imalat sektörünün öncü alanlarında alüminyum alaşımlı malzemelerin kullanımı her geçen gün hızla artmaktadır. Bu alaşımlardan birisi olan Al 7075-T6 malzemelerin özellikle savunma sanayinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmeye uygun olan bu malzemeyle, hafif, dayanıklı kısmen ucuz ürünler elde edilebilmektedir. Bu malzemenin işlenmesinde kullanılan talaşlı imalat yöntemleri içerisinde, metalleri işlemek için en popüler yöntemlerden birisi frezeleme işlemidir. Savunma sanayi ürünlerin imalatında pek çok aşamada frezeleme işlemleri bulunur. CNC frezeleme işlemi, ürünlerin daha kısa sürede, yüksek kalitede ve uygun maliyetle üretilmesini sağlayan esnekliği nedeniyle en sık kullanılan işlemlerden biridir.

Talaşlı imalat işlemlerinde üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve ihtiyaç duyulan ürün kalitesinin elde edilmesi için en iyi işleme koşullarının belirlenmesi, zaman tasarrufu ve doğruluk açısından sürekli mühendislik çalışmaları yapılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyeti, frezeleme işleminde en önemli performans göstergeleridir. Aynı zamanda elde edilen bu talaşlı imalat işleme verileri, güçlü tahmin yetenekleri nedeniyle Varyans Analizi (ANOVA) ya da yapay zekâ teknikleriyle işlenerek işleme parametrelerinin iyileştirilmesi de yapılmıştır [1-5].

Frezeleme işlemi sırasında farklı malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için birçok matematiksel modeller üzerinde de çalışılmıştır [6-7]. AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerinin yüzey pürüzlülüğündeki değişimler ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri RSM yöntemi kullanılarak incelenmiştir [8]. Rajdran ve diğ. [9], takım aşınmasını hesaplamak için frezelemenin ilerleme, kesme derinliği ve kesme hızı dahil olmak üzere bir matematiksel regresyon modeli kullanmıştır. Azln ve Safiian [10], freze işlemeyi anlamak için bir matematiksel modeli geliştirmişler. Yüzey kalitesi, frezeleme performansını ölçmek için kullanılan temel özelliklerden biridir. Khair ve diğ. [11], işleme parametrelerini kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğini optimize ederek tornalama işlemi sırasında kesme işlemi için yüzey pürüzlülüğünü azaltmaya odaklanmışlar. Bu çalışmanın sonucunda, en iyi yüzey kalitesinin minimum 140 m/dk kesme hızı, 0.01 mm/dev ilerleme hızı ve 1 mm kesme derinliği değerleri kullanılarak elde edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, ilerleme hızı ve kesme hızı, AISI D3 çeliğinin yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkileyerek, istenilen yüzey pürüzlülüğü seviyesine ulaşmada güvenilirliklerini kanıtlamıştır. Lubaid ve diğ. [12], karbür takımın boyutsal yanlışlığının frezeleme işleminde iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Cep frezeleme işleminin performans özelliklerini en üst düzeye çıkarmak için Taguchi  $L_9$  ortogonal yöntemi kullanılmış olup, daha sonra ideal kesme parametreleri belirlemek için GRA yöntemi kullanılmıştır. ANOVA sonuçlarına göre ilerleme iş parçasının boyutsal doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahipken, kesme hızı ve talaş derinliği ikinci sırada yer almıştır. Lujain H. Kashkool [13], tornalama işlemlerinin AISI 1045 çeliğin yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğini incelemek için TiN kaplı bir karbür kesici uç kullanmıştır. Sonuçlara göre, daha yüksek kesme hızları kullanılarak daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

Son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, kesici takımlarda kullanılan alaşım türlerinin işlenen malzeme yüzeyinin kalitesini iyileştirmek ve titreşimi azaltmak açısından önemini göstermiştir. Akdeniz ve Arslan, tornalama işlemlerinde takımın titreşimi azaltmak için ve dolayısıyla elde edilen iş parçaların yüzey kalitesini artırmak için iç torna katerinde NiTi alaşımı kullanmışlardır [14]. Bu çalışmanın sonucunda, yeni katerinin kullanılmasıyla yüzey kalitesi oluşumu %32'ye kadar iyileştirilmiştir.

Bu çalışmada, savunma sanayinde önemli bir kullanım yerine sahip olan Al 7075-T6 malzemenin frezeleme operasyonunda işleme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği), takım tutucu tiplerinin (mekanik, termal ve hidrolik), yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluğa olan etkisi incelenmiştir. Kullanılan talaşlı imalat parametre sayısına bağlı olarak deney sayısının azaltılabilmesi ve parametreler arasındaki bağıntıların ilişkilendirilmesi için Taguchi deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır. Frezeleme operasyonunda kesme parametreleri ve takım tutucusunun sayısı dikkate alınarak Taguchi  $L_{27}$  yöntemine göre deneysel yapı oluşturulmuştur. Taguchi  $L_{27}$  deney sonuçları olan işleme yüzey kalitesi ve işleme hassasiyeti ölçümlerini işleme parametreleriyle ilişkilendirmektedir. Bu yöntemle kontrol edilemeyen faktörlere karşı deney düzeneğinin duyarlılığı en aza indirgenerek, incelenen parametrelerin en iyi tolerans aralığının belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar varyans analizi (ANOVA) yapılarak, yüzey kalitesine ve işleme hassasiyetine etkileri belirlenerek analiz tabloları oluşturulmuştur. Böylelikle, Al 7075-T6 malzemenin frezeleme operasyonunda en uygun işleme şartı değerlerinin belirlenmesi sağlanarak,

literatürde bulunmayan kesme parametrelerine bağlı olarak takım tutucu tiplerinin, yüzey pürüzlüğü ve işleme hassasiyetine etkisi belirlenmiştir.

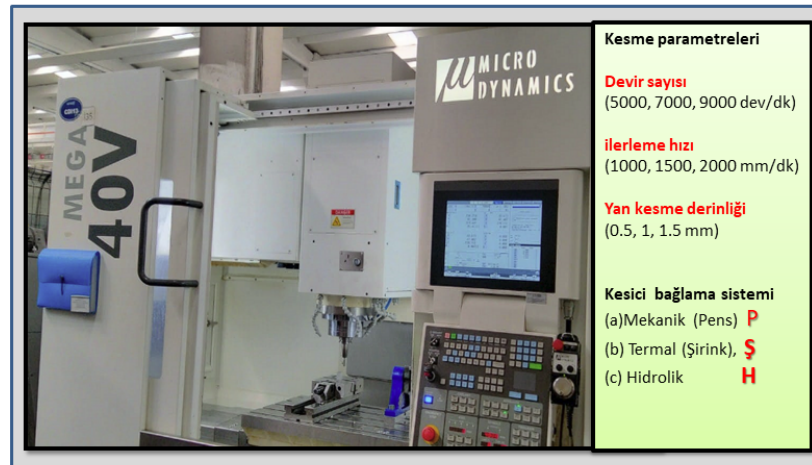
## 2. Materyal ve Metot (Materials and Method)

Talaşlı imalat yöntemleriyle bir malzeme işlenirken kullanılan parametrelerin yüzey pürüzlüğü ve boyutsal doğruluk gibi özelliklere nasıl etkiler oluşturduğunun bilinmesi önemlidir. Kullanılan kesme parametreleri sonrasında elde edilecek yüzey pürüzlüğü ve boyutsal doğruluğu tespit edebilmede en iyi yöntem, gerçekçi koşullarda yapılan deneysel çalışmalardır. Bu çalışmada da savunma, uzay ve havacılık gibi sanayilerde kullanımı her geçen gün artan Al 7075-T6 malzemesinin, CNC frezede talaşlı imalatla işlenmesi sırasında kesme parametreleri ve tutucu çeşitlerinin yüzey pürüzlüğü ve işleme hassasiyetine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Al 7075-T6 deney malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AL 7075-T6 deney malzemesinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AL 7075-T6 test material)

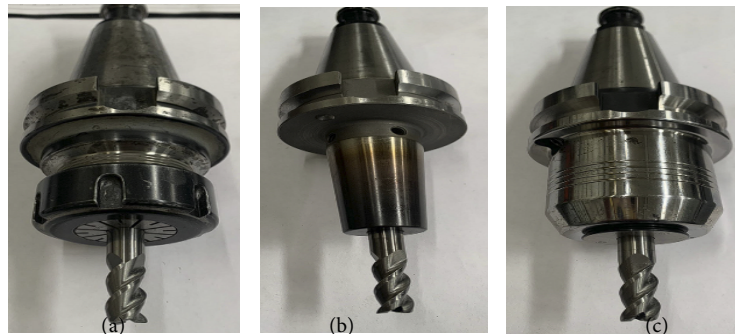
Bileşen	Al	Mg	Si	Cr	Mn
Max (%)	98.6	1.2	0.8	0.35	0.15

Deneylerde Micro Dynamics Mega 40V CNC frezeleme tezgâhı kullanılmıştır. Bu tezgâh, üç eksenli doğrusal ve dairesel enterpolasyon yapabilen, ISO formatında programlanabilir Mitsubishi kontrol ünitesine sahip bir dik işleme merkezidir. Kullanılan dik işlem merkezi ve kesme parametreleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan dik işleme merkezi ve parametreleri (Vertical machining center and its parameters used in the experiments)

Deney tasarımında 4 faktörlü ve 3 kademeli Taguchi  $L_{27}$  yöntemi kullanılmıştır. Kesme parametreleri şu şekilde uygulanmıştır: Devir sayısı (5000, 7000, 9000 dev/dk), ilerleme hızı (1000, 1500, 2000 mm/dk) ve yan kesme derinliği (0.5, 1, 1.5 mm). Bu parametre değerlerine göre hazırlanmış Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımı ise Tablo 2’de yer almaktadır.



Şekil 2. Takım tutucuları. (a) Mekanik (Pens), (b) Termal (Şirink), (c) Hidrolik (Tool holders. (a) Mechanical (Clamp), (b) Thermal (Shrink), (c) Hydraulic)

Tablo 2. Deneilerde kullanılan kesici parametreleri (Cutter parameters used in the experiments)

Deney	Devir sayısı (dev/dk)	İlerleme hızı (mm/dk)	Yan kesme derinliği (mm)	Tutucu Tipi
1	5000	1000	0,5	P
2	5000	1000	1	Ş
3	5000	1000	1,5	H
4	5000	1500	0,5	P
5	5000	1500	1	Ş
6	5000	1500	1,5	H
7	5000	2000	0,5	P
8	5000	2000	1	Ş
9	5000	2000	1,5	H
10	7000	1000	0,5	Ş
11	7000	1000	1	H
12	7000	1000	1,5	P
13	7000	1500	0,5	Ş
14	7000	1500	1	H
15	7000	1500	1,5	P
16	7000	2000	0,5	Ş
17	7000	2000	1	H
18	7000	2000	1,5	P
19	9000	1000	0,5	H
20	9000	1000	1	P
21	9000	1000	1,5	Ş
22	9000	1500	0,5	H
23	9000	1500	1	P
24	9000	1500	1,5	Ş
25	9000	2000	0,5	H
26	9000	2000	1	P
27	9000	2000	1,5	Ş

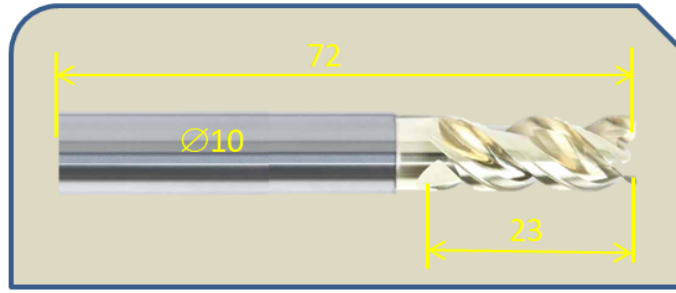
Çalışmada kullanılan takım tutucu tipleri olarak; mekanik tutucu, hidrolik tutucu ve termal tutucu seçilmiştir. Kullanılan kesici tutucularına ait resimler Şekil 2’de gösterilmiştir.

Mekanik tutucular ucuz ve kolay bağlantı sağladığından dolayı tercih edilirler. Pens içerisine yerleştirilen kesicinin, tutucuya sıkıştırılmasıyla sabitlenir. Şekil 2.a’ da mekanik takım tutucu görülmektedir.

Termal (Şirink) tutucularda metallerin ısı genleşme prensibi kullanılır. Özel takım bağlama makinesiyle ısıtılan tutucu ve kesici takım arasında güçlü bir bağlantı sağlar. Hassas imalat işlemleri için tercih edilen kesici bağlantı tipidir. Şekil 2.b’de termal (şirink) tutucu görülmektedir.

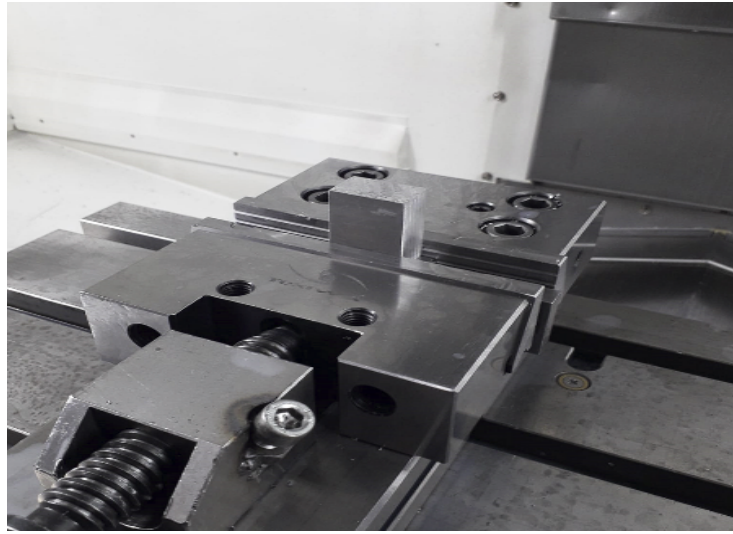
Hidrolik tutucu sistemlerinde, basınçlı yağ kullanılır. Daha az mekanik parçayla daha büyük sıkma kuvveti sağlanır. Düşük salgı özelliğinden dolayı tercih edilirler. Şekil 2.c’de hidrolik tutucu görülmektedir.

Kullanılan bu 3 farklı tip tutucu türüne, Şekil 3’ de görülen kesici takımdan birer adet yeni kullanılmamış kesici bağlanmıştır. Tutuculara bağlanan kesicinin özelliği, TiN kaplamalı karbür Ø 10 mm frezedir. Kesici takım helis boyu 23 mm, toplam boyu 72 mm, bağlama boyu 40 mm dir. Kullanılan takım Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Deneilerde kullanılan takım (The tool used during the experiment)

Deneilerin yapılması sırasında iş parçası tezgâh mengenesinde 10 mm mesafeden bağlanmıştır. Al 7075-T6 malzemenin deney numune boyutları 40x30x20 mm olarak belirlenmiştir. Kullanılan iş parçası ve bağlama yöntemi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Deneilerde kullanılan iş parçası ve bağlama yöntemi (The workpiece and clamping method used during the experiment)

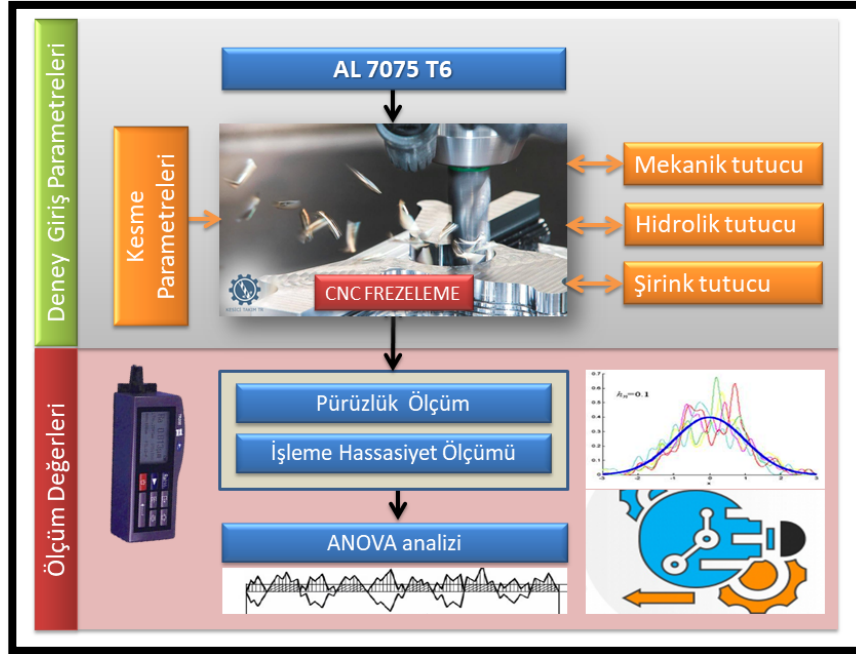
Deney numunelerinin işlenmiş yüzeyleri üzerindeki yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için "Mitutoyo" marka SJ-210 tipi masa üstü yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. (Şekil 5)



Şekil 5. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Surface roughness measuring device)

Yapılan bu deneysel işlemler ve istatistiksel analize dayalı çalışmanın, akış sırası ve kullanılan talaşlı imalat parametrelerinin gösterildiği işlem akış şeması Şekil 6' da gösterilmiştir. Belirlenen boyutta hazırlanmış deney numunesinin tezgâha bağlanmasından itibaren deney sonuçlarının yorumlandığı aşamaya kadar geçen süreç bu şemada anlatılmaktadır. Her bir kesici bağlayıcı tipi için kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği değiştirilerek deneysel sonuçlar olan yüzey pürüzlüğü ve işleme hassasiyeti ölçülmektedir.

Şekil 6. Deneysel çalışma şeması (Experimental study scheme)



### 3. Deneysel Sonuçları ve Tartışma (Experiment Results and Discussion)

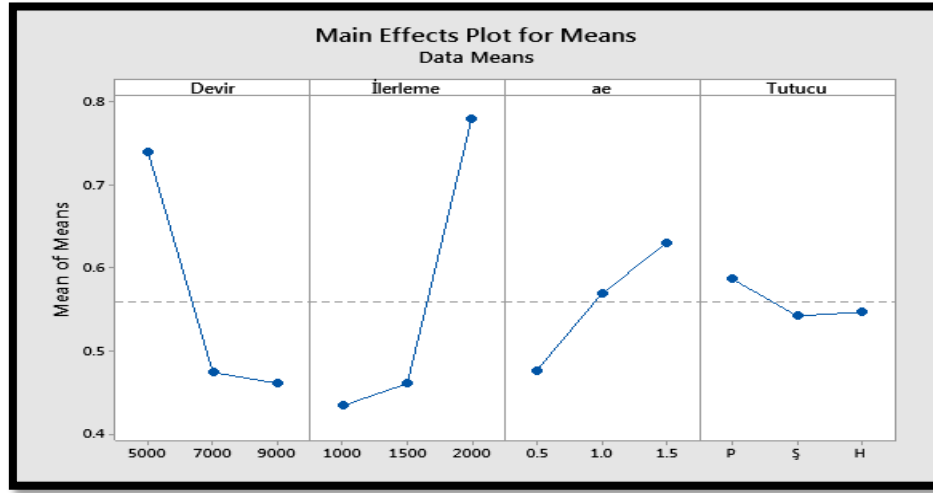
Tablo 2'de gösterilen kesme parametreleri kullanılarak Taguchi  $L_{27}$  deney düzeneğinin gerektiği 27 adet deney gerçekleştirilmiştir ve elde edilen iş parçalarının yüzey pürüzlülükleri ( $R_a$ ) ve işleme hassasiyetlerinin ölçümü yapılmıştır. İşleme hassasiyetini ölçmek için, iş parçalarının işlenmiş yüzeylerin üst ve alt kısımlarının kalınlıkları ölçülmüş ve farkları hesaplanmıştır. Ölçülen yüzey pürüzlülükleri ve işleme hassasiyeti Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyetinin değerleri (Values of surface roughness and machining accuracy)

Deneysel no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Yüzey pürüzlülüğü	0,41	0,4	0,69	0,47	0,71	0,66	1,15	0,93	1,24
İşleme hassasiyeti	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Deneysel no.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Yüzey pürüzlülüğü	0,31	0,47	0,51	0,38	0,36	0,41	0,63	0,56	0,64
İşleme hassasiyeti	0,01	0,02	0,04	0,02	0,02	0,06	0,01	0,02	0,06
Deneysel no.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Yüzey pürüzlülüğü	0,24	0,38	0,5	0,26	0,46	0,44	0,44	0,85	0,58
İşleme hassasiyeti	0,01	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01	0,06	0,04

Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve işleme hassasiyetine etkilerinin belirlenmesinde, Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi kullanılmıştır. ANOVA analizi %95 güven seviyesinde ( $\mu=0,05$ ) yapılmış olup, faktörlerin etkinliğini belirlemek için p değeri kullanılmıştır. Varyans Analizinde p değeri 0,05'ten küçükse, bu faktörün önemli olduğunu göstermektedir. ANOVA analizi hesaplamalarının yapılmasında MiniTab R16 programı kullanılmıştır.

Yapılan deney sonuçlarında ölçümü yapılan yüzey pürüzlülüğü değerleri için talaşlı imalat işleme parametrelerinin ANOVA analizi yapılmış ve Sinyal/Gürültü oranı grafikleri edilen Sinyal/Gürültü oranı grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğüne göre sinyal/gürültü oranı grafiği (Graph of signal to noise ratio according to surface roughness)

Şekil 7'den görüleceği üzere, Sinyal/Gürültü Oranı'na göre en uygun yüzey pürüzlülüğü değerleri, kesme hızı için 9000 dev/dk, ilerleme hızı için 1000 mm/dk, yan kesme derinliği için 0.5 mm ve tutucu olarak termal (şirink) tutucu olduğu görülmektedir.

Tablo 4'te verilen ANOVA sonuçlarına göre, yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip faktör %37,7 oranıyla yan kesme derinliği olduğu görülmektedir. İlerleme hızı ve kesme hızı yaklaşık %26 oranında etkiye sahipken, tutucunun etkisi %1'dir. Deneylerin güvenilirlik oranı %91,25 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları (ANOVA results for surface roughness)

Parametre	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
İlerleme hızı	2	0.227830	26.40%	0.227830	0.113915	16.11	0.020
Devir sayısı	2	0.224674	26.03%	0.224674	0.112337	15.88	0.020
Talaş derinliği (ae)	2	0.273874	37.73%	0.273874	0.136937	19.36	0.030
Tutucu tipi	2	0.009385	1.09%	0.009385	0.004693	0.66	0.527
Hata	18	0.127311	8.75%	0.127311	0.007073		
Toplam	26	0.863074	100.00%				

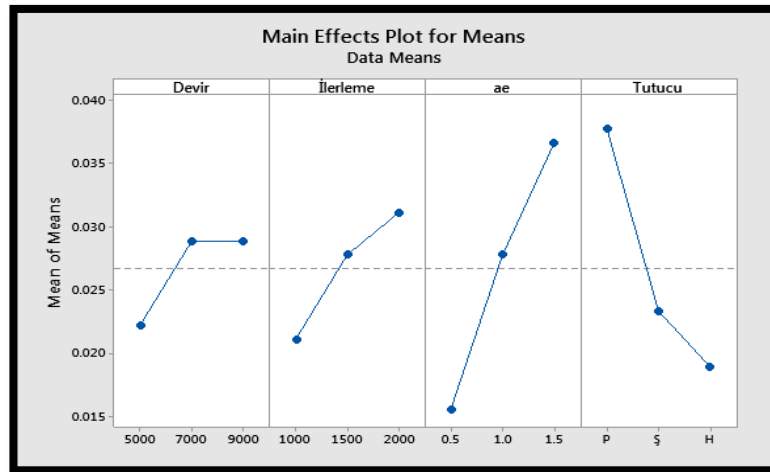
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0.0841002	91.25%	78.69%	0.28645	66.81%	-34.27	-35.06

Talaşlı imalat kesme parametreleri olan devir sayısı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve kesici tutucu tipinin, işleme hassasiyeti için elde edilen Sinyal/Gürültü oran grafiği Şekil 8'de gösterilmektedir.

Şekil 8'den görüleceği üzere, işleme hassasiyeti için Sinyal/Gürültü Oranına göre en uygun değerler, kesme hızı için 5000 dev/dak, ilerleme hızı için 1000 mm/dk, yan kesme derinliği için 0.5 mm ve bağlama sistemi olarak ta hidrolik tutucu tipi olduğu görülmektedir.

Tablo 5'te verilen ANOVA sonuçlarına göre, işleme hassasiyeti için en büyük etkiye %36,1 oranıyla yan kesme derinliğinin sahip olduğu görülmektedir. Tutucu türü yaklaşık %31,35 etki oranıyla ikinci sırada gelirken, ilerlemenin etki oranı %8,33 iken devir ise %4,76 oranıyla en az etkiye sahip faktördür. Deneylerin güvenilirlik oranı ise %90,56'dır.





Şekil 8. İşleme hassasiyetine göre sinyal/gürültü oranı grafiği (Signal-to-noise ratio graph according to processing accuracy)

Tablo 5. İşleme hassasiyeti için ANOVA sonuçları (ANOVA results for machining accuracy)

Parametre	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
İlerleme hızı	2	0.000467	8.33%	0.000467	0.000233	3.86	0.040
Devir sayısı	2	0.000267	4.76%	0.000267	0.000133	2.20	0.139
Talaş derinliği (ae)	2	0.002022	36.11%	0.002022	0.001011	16.71	0.030
Tutucu tipi	2	0.001756	31.35%	0.001756	0.000878	14.51	0.050
Hata	18	0.001089	9.44%	0.001089	0.000060		
<b>Toplam</b>	<b>26</b>	<b>0.005600</b>	<b>100.00%</b>				
	<b>S</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq(adj)</b>	<b>PRESS</b>	<b>R-sq(pred)</b>	<b>AICc</b>	<b>BIC</b>
	0.0077778	90.56%	71.91%	0.00245	56.25%	-162.83	-163.62

### 3. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada, savunma, uzay ve havacılık gibi sanayi alanlarının önemli bir malzemesi haline gelmekte olan Al 7075-T6'nın talaşlı imalat metoduyla işlenmesi sırasında takım tutucu tipinin, yüzey pürüzlülüğü oluşumu ve işleme doğruluğuna etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerin yapılması sırasında kesme parametreleri olarak, devir sayısı (5000, 7000, 9000 dev/dk), ilerleme hızı (1000, 1500, 2000 mm/dk) ve yan kesme derinliği (0.5, 1, 1.5 mm) belirlenmiştir. Kesicinin bağlantı tutucusu olarak mekanik, termal (şirink) ve hidrolik tutucu olmak üzere üç farklı tutucu tipi kullanılmıştır. Kullanılan talaşlı imalat parametre sayısına bağlı olarak deney sayısının azaltılabilmesi ve parametreler arasındaki bağıntıların ilişkilendirilmesi için Taguchi deneysel tasarım yöntemi uygulanmıştır. Frezeleme operasyonunda kesme parametreleri ve takım tutucusunun sayısı dikkate alınarak Taguchi  $L_{27}$  yöntemine göre deneysel yapı oluşturulmuştur.

Taguchi  $L_{27}$  deney parametrelerine uygun yapılan deney sonuçlarının varyans (ANOVA) analizleri yapılarak, parametreler arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ve ANOVA değerleri, Al 7075-T6 malzemenin frezeleme operasyonunda en uygun işleme şartı değerlerinin belirlenmesini sağlamıştır. ANOVA sonuçlarına göre, yan kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyetine sırasıyla % 37,7 ve % 36,1 oranlarında etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Al 7075-T6 malzemenin frezeleme operasyonunda iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde etmek için yüksek bir devir hızı ve düşük bir kesme derinliği seçilmesi önerilmektedir. Takım tutucu tiplerinin yüzey pürüzlülüğü oluşumuna düşük bir etkisi olduğu görülmektedir. Ancak, işleme hassasiyeti üzerinde yüksek etkiye sahiptirler. Deneylerde kullanılan tutucu tiplerinden, hidrolik tutucu iş parçası üzerinde daha iyi işleme hassasiyeti sağlarken, mekanik tutucu diğerlerine göre daha kötü bir işleme hassasiyetini oluşturmuştur.

Literatürde bulunmayan kesme parametrelerine bağlı olarak takım tutucu tiplerinin, yüzey pürüzlülüğü ve işleme hassasiyetine etkisi yapılan bu çalışmayla belirlenmiştir.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Yazarlar, verdiği destek ve katkılarından dolayı "Sinerji Silah ve Mühimmat A.Ş." ye teşekkür eder.

## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] D. B. Prakash, G. R. Balaji and A. G., Chand, "Optimization of machining parameters for aluminium alloy 6082 in CNC end milling," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, pp. 505-510, 2013.
- [2] M.P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, Fourth Edition, Wiley, 2002.
- [3] F. Puh, Z. Jurkovic, M. Perinic, M. Brezocnik and S. Buljan, "Optimization of machining parameters for turning operation with multiple quality characteristics using Grey relational analysis," *Teh. Vjesn.*, vol. 23, no. 2, pp. 377-382, 2016. doi:10.17559/TV-20150526131717
- [4] S. Sakthivelu, M. Meignanamoorthy, M. Ravichandran and M. Kumar, "Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in CNC end milling," *International Journal of Scientific Research and Engineering Studies*, vol. 2, no. 4, 2015.
- [5] A. Zerti, M. A. Yaltese, O. Zerti, M. Nouioua and R. Khettabi, "Prediction of machining performance using RSM and ANN models in hard turning of martensitic stainless steel AISI 420," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 233, no. 13, pp. 4439-4462, 2019. doi:10.1177/09544062188205
- [6] G. Mahesh, S. Muthu, and S. R. Devadasan, "Prediction of surface roughness of end milling operation using genetic algorithm," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 77, pp. 369-381, 2015. doi:10.1007/s00170-014-6425-z
- [7] P. Raj, A. P. Perumal and E. P. Ramu, "Prediction of surface roughness and delamination in end milling of GFRP using mathematical model and ANN," *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, vol. 19, pp. 107-120, 2012.
- [8] Y. Şahin, A. C. Kocacıbağ and S. Yalçınkaya, "Prediction of Surface Finish Model in Cutting AISI 4140 Steel with Different Approaches" in *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture, 2021, Singapore, 2021*, Singapore: Springer, 2021. pp. 303-318.
- [9] P. Palanisamy, I. Rajendran and S. Shanmugasundaram, "Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, pp. 29-41, 2008. doi:10.1007/s00170-007-0948-5
- [10] A. M. Zain, H. Haron and S. Sharif, "Application of regression and ANN techniques for modeling of the surface roughness in end milling machining process," *Third Asia International Conference on Modelling and Simulation*, 2009, pp. 188-193.
- [11] K. Khalil, A. Mohd, C. O. C. Mohamad, Y. Faizul and S. Z. Ariffin, "The Optimization of Machining Parameters on Surface Roughness for AISI D3 Steel," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1874, no. 1, pp. 12063, 2021. doi:10.1088/1742-6596/1874/1/012063
- [12] L. Nisar, B. Banday, M. Amatullah, M. Farooq, A. N. Thoker, A. Maqbool and M. A. Wahid, "An investigation on effect of process parameters on surface roughness and dimensional inaccuracy using Grey based Taguchi method," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 6564-6569, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2021.04.040
- [13] L. H. Kashkool, "Optimization of Machining Parameters of AISI 1045 Steel for Better Surface Finish and Tool Life Using TiN Coated Carbide Insert," *Tikrit J. Eng. Sci.*, vol. 29, no. 2, pp. 1-6, 2022. doi:10.25130/tjes.29.2.1
- [14] E. Akdeniz and H. Arslan, "A new design of boring bar using TiNi3 alloy to reduce vibration in turning operations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 237, no. 1-2, 2023, pp.105-121. doi:10.1177/09544054221104607

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## A novel Approach for Muscle Fatigue Disorders Detection Using EMG Based Time-Constant Neural Networks

Michael Bidollahkhani<sup>a</sup>, Ferhat Atasoy<sup>b</sup>

Submitted: 11.05.2023 Revised: 24.07.2023 Accepted: 28.10.2023 doi:10.30855/gmbd.0705086

### ABSTRACT

**Keywords:** Real-time fatigue analysis, Athlete performance monitoring, Electromyography, Liquid Neural Network.

<sup>a</sup> Karabük University,  
The Institute of Graduate Programs,  
Dept. of Computer Engineering  
78050 - Karabük, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-8122-4441

<sup>b\*</sup> Karabük University,  
Faculty of Engineering,  
Dept. of Computer Engineering  
78050 - Karabük, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-1672-0593  
e mail: ferhatatasoy@karabuk.edu.tr

In recent years, Liquid Time-Constant (LTC) Neural Networks have gained substantial interest due to their exceptional ability to accurately model complex, time-dependent data. Although their applications in various fields have been explored, the potential of utilizing LTC Neural Networks for electromyography-based muscle fatigue or disability detection has not been investigated. This research aims to showcase the effectiveness of LTC Neural Networks in addressing challenges unique to this domain and to offer new insights into its potential advantages. We employed an LTC Neural Network to analyze EMG signals obtained during patient examinations to accomplish this objective. We calculated five features from the collected signals, including Mean Absolute Value (MAV), Waveform Length (WL), Zero Crossings (ZC), Slope Sign Changes (SSC), and Center Frequency (CF). These features were used as input for the LTC Neural Network. The network's ability to predict values based on temporal data enabled it to precisely monitor signal changes indicative of nerve damage or muscle dysfunction. We compared the performance of the LTC Neural Network with traditional methods and other neural network-based techniques in detecting muscle fatigue from EMG signals. Our experimental results reveal that the LTC Neural Network achieved a high validation accuracy of % 99.72, indicating its effectiveness in identifying muscle disability. These findings suggest that LTC Neural Networks have the potential to outperform conventional approaches and provide successful results in the field of EMG-based muscle fatigue detection.

## EMG Tabanlı Zaman Sabiti Sinir Ağları Kullanarak Kas Yorgunluğu Bozukluklarının Tespiti için Yeni Bir Yaklaşım

### ÖZ

Son yıllarda, Akışkan Zaman Sabiti (AZS) sinir ağları, karmaşık, zamana bağlı verileri doğru bir şekilde modelleme konusundaki olağanüstü yetenekleri nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Çeşitli alanlardaki uygulamaları araştırılmış olsa da elektromiyografi tabanlı kas yorgunluğu veya sakatlık tespiti için AZS Sinir Ağlarının kullanılma potansiyeli araştırılmamıştır. Bu araştırmanın birincil amacı, AZS sinir ağının bu alana özgü zorlukları ele almadaki etkinliğini göstermek ve potansiyel avantajlarına dair yeni bilgiler sunmaktır. Bu hedefi gerçekleştirmek için, hasta muayeneleri sırasında elde edilen EMG sinyallerini analiz etmek için bir AZS sinir ağı kullandık. Toplanan sinyallerden, Ortalama Mutlak Değer, Dalga Biçimi Uzunluğu, Sıfır Geçişleri, Eğim İşareti Değişiklikleri ve Merkez Frekansı dahil olmak üzere beş özelliği hesapladık. Bu özellikler, AZS sinir ağı için girdi olarak kullanıldı. Ağın zamansal verilere dayalı olarak değerleri tahmin etme yeteneği, sinir hasarı veya kas işlev bozukluğunun göstergesi olan sinyal değişikliklerini hassas bir şekilde izlemesini sağladı. EMG sinyallerinden kas yorgunluğunu tespit edebilmek için AZS sinir ağının performansını geleneksel yöntemlerle ve diğer sinir ağı tabanlı tekniklerle karşılaştırdık. Deneysel sonuçlarımız, AZS sinir ağının %99,72'lik yüksek bir doğrulama başarımı elde ettiğini ve bunun kas sakatlığını belirlemedeki etkinliğini gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, AZS sinir ağlarının geleneksel yaklaşımlardan daha iyi performans gösterme potansiyeline sahip olduğunu ve EMG tabanlı kas yorgunluğu tespitinde başarılı olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Gerçek zamanlı yorgunluk analizi, Sporcu performansı izleme, Elektromiyografi, Akışkan Yapay Sinir Ağı.

## 1. Introduction

Muscle fatigue often occurs during physical activities, leading to diminished performance and an increased risk of injury [1, 2]. In the literature, there are various methods to detect fatigue using muscle signals and electromyography (EMG) is the most common method [3]. When muscle contracts, the muscle cells undergo depolarization. Similarly, when a motor neuron depolarizes, it generates an electrical signal known as the action potential (AP) that travels along the nerve fiber [4]. A motor unit (MU) comprises a single motor neuron found in the spinal cord along with all the muscle fibers it controls. When a motor unit is activated, the AP travels down the motor neuron and reaches the muscle. The point of connection between the nerve and the muscle is referred to as the neuromuscular junction or motor endplate. Once the AP is transmitted across the neuromuscular junction, it stimulates all the muscle fibers connected to that specific motor unit. The overall outcome of this electrical activity is called a motor unit action potential (MUAP), which can be measured using electromyography (EMG) [4].

When muscles tire and fatigue sets in, the MUAP's features change, and these changes can be detected via EMG. Hence, EMG is crucial for fatigue detection as it records these electrical activities (MUAPs) in real time, enabling early detection and analysis of muscle fatigue.

Conventional methods for detecting muscle fatigue, such as frequency domain analysis and amplitude-based measures, need improved accuracy and real-time detection [5]. Recently, time-constant algorithms are garnered attention for accurately modelling complex, time-varying data.

One such algorithm, the Liquid Time-Constant (LTC) Neural Network, has demonstrated promising results across various domains, including speech recognition, image processing, and financial forecasting [6] [7]. This study investigates the potential of utilizing LTC Neural Networks for muscle fatigue detection using electromyography (EMG) signals.

The novelty of our approach stems from employing LTC neural networks for real-time muscle fatigue detection, an area not extensively examined in the existing literature. While some studies have explored other time-constant algorithms like Echo State Networks [5] and Liquid State Machines for related applications such as gait analysis and motion prediction, their performance in muscle fatigue detection remains unexplored.

The primary objective of this research is to highlight the effectiveness of LTC Neural Networks in addressing challenges specific to muscle fatigue detection, such as time-varying data and noisy EMG signals. By harnessing the capabilities of LTC Neural Networks, we aim to develop a system that monitors muscle fatigue progression during various physical activities, offering early warning signs to prevent injury.

Through this study, we aspire to present novel insights into the potential advantages of using LTC Neural Networks for muscle fatigue detection and set the stage for future research in this field.

## 2. Related Works

EMG-based muscle fatigue detection has been a subject of interest for researchers for many years. Conventional approaches for detecting muscle fatigue using EMG signals are generally categorized into three main groups: frequency domain analysis, amplitude-based measures, and time domain features.

Frequency domain analysis is a widely used technique for identifying changes in the spectral content of EMG signals during muscle fatigue. The power spectral density of EMG signals is computed using methods such as Fast Fourier Transform or Welch's method. As muscle fatigue progresses, the EMG signal's median and mean frequency typically decrease while the spectral moments increase. These changes in the spectral content of the EMG signal are used to assess the level of muscle fatigue.

Amplitude-based measures focus on the EMG signal amplitude changes during muscle fatigue. As fatigue develops, the amplitude of the EMG signal usually increases due to the recruitment of more motor units and the increased synchronization of motor unit firing. Common amplitude-based measures include the root mean square (RMS), integrated EMG, and average rectified value (ARV). These metrics are used to estimate

the intensity of muscle contractions and provide information about the muscle fatigue level.

Time domain features are derived from the EMG signal's temporal characteristics and provide insights into muscle contractions' duration and intensity. Some popular time domain features include mean absolute value (MAV), waveform length (WL), and zero-crossing rate (ZCR). These features are sensitive to changes in muscle activation patterns and are used to detect the onset and progression of muscle fatigue.

While conventional approaches have been widely employed in EMG-based muscle fatigue detection [6], they have limitations. For instance, frequency domain analysis is affected by noise and requires a stationary signal for accurate results. Amplitude-based measures and time domain features are sensitive to variations in electrode placement and skin impedance, which leads to inconsistent results. Additionally, these conventional methods are not suitable for real-time detection and may require extensive computational resources, making them less ideal for practical applications.

Despite these limitations, conventional approaches have contributed significantly to understanding muscle fatigue and its effects on EMG signals. These methods serve as a foundation for developing more advanced techniques, such as neural networks and deep learning algorithms, which overcome some limitations and improve the accuracy of muscle fatigue detection using EMG signals.

Neural networks have emerged as a popular and effective tool for analyzing EMG signals and detecting muscle fatigue. Various types of neural networks have been implemented in EMG-based muscle fatigue detection, including feedforward neural networks, recurrent neural networks, and deep learning techniques [8].

Feedforward neural networks consist of multiple layers of interconnected neurons, where information flows in a single direction from the input layer to the output layer. These models have been used to classify EMG signals according to different electrode positions on the muscle nerves. Typically, time domain, frequency domain, or amplitude-based features are extracted from the EMG signals and used as inputs to the model [9]. The model is trained to recognize patterns in the features associated with various stages of muscle fatigue, enabling accurate classification [10].

Recurrent neural networks (RNNs) are a type of neural network that can process data sequences, making them suitable for analyzing time-varying signals like EMG. RNNs have been employed to predict the onset and progression of muscle fatigue based on EMG signals [11, 12]. Long short-term memory (LSTM) networks, a type of RNN, have also been used for muscle fatigue detection. LSTMs are designed to overcome the vanishing gradient problem often encountered in traditional RNNs, allowing them to capture long-range dependencies in the data effectively.

Deep learning techniques, such as convolutional neural networks (CNNs) and deep belief networks (DBNs), have gained popularity in recent years for their ability to learn complex features from raw data automatically [13, 14]. CNNs have been applied to EMG-based muscle fatigue detection by automatically extracting relevant features from the raw EMG signals [10]. The convolutional layers in a CNN learn to identify local patterns. In contrast, the pooling layers reduce the spatial dimensions of the feature maps, making the network more robust to variations in the input data.

DBNs, unsupervised deep learning algorithms, have also been employed in muscle fatigue detection using EMG signals. DBNs consist of multiple layers of restricted Boltzmann machines (RBMs) and can learn to represent the data hierarchically. These networks can automatically extract high-level features from the EMG signals, which can be used for classification or prediction tasks.

The implementations of neural networks in EMG-based muscle fatigue detection have shown promising results, with higher accuracy and robustness than traditional methods. However, challenges still need to be solved regarding computational complexity, interpretability, and the need for large amounts of labelled data for training. As research in this area progresses, it is anticipated that neural network-based methods will continue to advance and play an increasingly important role in muscle fatigue detection using EMG signals.

Time-constant neural networks, such as Echo State Networks (ESNs), Independent Component Analysis (ICA) and Liquid Time-Constant (LTC) Neural Networks, have demonstrated potential for improving the performance of EMG-based muscle fatigue detection. These networks have a unique architecture and learning

mechanism that allow them to efficiently process time-varying signals, making them well-suited for analyzing EMG data.

In EMG-based muscle fatigue detection, ESNs and ICAs have been applied to various tasks, such as predicting muscle fatigue onset and classifying the level of muscle fatigue. Studies have shown that these time-constant neural networks can outperform traditional methods and other neural network architectures in specific applications. For instance, one study compared the performance of ESNs, ICAs, and feedforward neural networks for predicting muscle fatigue onset in isometric contractions. The results indicated that ESNs and ICAs achieved higher accuracy and lower prediction errors than feedforward neural networks.

In one study, ICAs were used to predict the onset of muscle fatigue during cycling exercises. The ICA-based method was shown to be low accurate but good performance than other methods, suggesting that it could be employed for real-time monitoring of athletes during training or competition.

Despite the promising results achieved by ESNs and ICAs, the performance of LTC Neural Networks in EMG-based muscle fatigue detection has yet to be extensively investigated. However, given their superior performance in other applications, such as machine vision and financial forecasting, LTC Neural Networks are able to offer advantages in muscle fatigue detection using EMG signals.

It is important to note that the performance of time-constant neural networks in muscle fatigue detection using EMG signals is highly dependent on factors such as the specific application, data quality, and the choice of network architecture and parameters.

### 3. Methodology

#### 3.1. Data Acquisition and Preprocessing

EMG signals were acquired using an 8-channel surface EMG system with a sampling frequency of 200 Hz and 8-bit resolution. The dataset, collected and provided by Ebied et al. [15], includes 120 seconds of continuous EMG signals for each subject performing elbow flexion with a 6 kg load and elbow flexed at a 90-degree angle. A 50 Hz notch filter was applied to the signals to remove powerline interference. Table 1 provides an overview of the participant demographics, including age, mass, height, and performance in the physical test. This table offers insight into the physical fitness and baseline characteristics of the 15 healthy young male adults who participated in the study.

Table 1. Participant demographics

Participant ID	Age (years)	Mass (kg)	Height (cm)	Push-ups	Pull-ups
P01	20	71.5	180.0	80	25
P02	22	75.0	179.5	76	20
P03	23	70.0	178.0	72	18
P04	21	73.0	177.0	85	23
P05	20	74.5	176.5	80	22
P06	22	76.0	175.0	70	17
P07	21	73.5	178.5	75	24
P08	23	72.0	180.0	78	18
P09	20	74.0	179.0	80	21
P10	22	75.5	177.5	68	16
P11	21	73.0	178.0	74	20
P12	23	70.5	176.0	82	19
P13	20	74.5	180.5	75	23
P14	22	76.0	177.0	71	15
P15	21	73.0	179.0	85	24

The EMG signals were preprocessed using a bandpass filter with cutoff frequencies between 20 Hz and 500 Hz to eliminate noise and interference.

Table 2. sEMG acquisition setup and parameters

Parameter	Value
Device	Myo-aramband
Electrodes	8 medical grade stainless steel sEMG single differential
Electrode Placement	Aligned along the palm side of the wrist
Channel 4 Placement	Pronator Teres muscle
Sampling Frequency	200 Hz
Resolution	8 bit signed
Data Transmission	Bluetooth Low Energy
Notch Filter	50 Hz

Table 2 summarizes the sEMG acquisition setup and parameters used in the experiment. This includes information about the device, electrodes, placement, sampling frequency, resolution, data transmission, and the notch filter applied to the data. The table offers a clear and concise presentation of the technical aspects of the study. The signals were then segmented into 500-ms windows with a 250-ms overlap between consecutive windows. These windows served as input for the LTC neural network.



Figure 1. Electrode positioning on the forearm and channel numbers [15]

Figure 1 visually depicts the electrode positioning on the forearm and the corresponding channel numbers. This illustration is a reference for the standardized electrode placement across all participants, ensuring consistent data collection.

### 3.2. LTC Neural Network Architecture and Implementation

The Liquid Time Constant Neural Network (LTC NN) belongs to the category of time-continuous recurrent neural networks (RNNs) designed to process data in a sequential manner. These networks retain the memory of past inputs, adapt their behaviors based on new inputs, and possess the ability to handle inputs of varying lengths, thus improving the task-understanding capabilities of neural networks. LTC NNs demonstrate enhanced fluidity, robustness, expressiveness, and interpretability when compared to standard artificial neural networks. They showcase artificial neuroplasticity, meaning they can reorganize their connections and adjust their structure over time. Moreover, the dynamic architecture of LTC NNs incorporates neurons that are more expressive compared to those found in regular neural networks [16].

The main strengths of LTCNNs include their superior capability to handle complexity more effectively than standard artificial neural networks and their proficiency in processing real-time sequential data. LTCNNs excel at identifying specialized dynamical systems for input features as they arrive at each time-point [7].

The LTC Neural Network architecture comprises a reservoir layer with 500 neurons and a readout layer with a single output neuron. The network processes a 500-ms window of the preprocessed EMG signal as input and feeds it into the readout layer to predict the presence and signs of muscle fatigue.

Table 3. Fatigue evaluation approaches

Approach	Parameter	Description
Amplitude	RMS	Root Mean Square is used to analyze temporal and amplitude changes due to fatigue.
Spectral	MDF	Median Frequency is used to detect frequency shifts and spectral changes.

Table outlines the two approaches used in this study for muscle fatigue evaluation. The Amplitude approach utilized RMS as a parameter to analyze temporal and amplitude changes due to fatigue, and the Spectral approach employed MDF to detect frequency shifts and spectral changes. This table highlights the key differences between these approaches and the respective parameters used. The methodology comprises the following steps:

- Data Preprocessing
  - Load raw EMG data
  - Apply a 50 Hz notch filter to eliminate powerline interference
  - Segment data into fixed-length windows
- Feature Extraction
  - For each EMG data window, compute the following features per channel:
    - Mean absolute value (MAV)
    - Waveform length (WL)
    - Zero-crossing (ZC)
    - Slope sign changes (SSC)
    - Center Frequency (CF)
  - Combine features of all channels to form a feature vector for each window
- Data Partitioning
  - Use a leave-one-subject-out cross-validation method to divide data into training and testing sets
- LTC Neural Network Implementation
  - Design the LTC Neural Network architecture, which includes:
    - An input layer containing neurons equal to the feature vector size
    - A reservoir layer with a predetermined number of neurons (e.g., 500)
    - A readout layer with a single output neuron
  - Initialize network weights
  - Train the network on the training set by:
    - Feeding each feature data window into the network and updating the reservoir state
    - Accumulating reservoir states for all windows and using linear regression to train the readout layer
  - Assess the network's performance on the testing set by:
    - Introducing each feature data window into the network and updating the reservoir state
    - Using the trained readout layer to predict the muscle fatigue state for each window
  - Evaluate the network's performance using various metrics, such as accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC.

The LTC Neural Network was implemented using a custom library, which offers a flexible framework for implementing various types of time-constant algorithms, including ESNs, ICAs, and LTC Neural Networks.



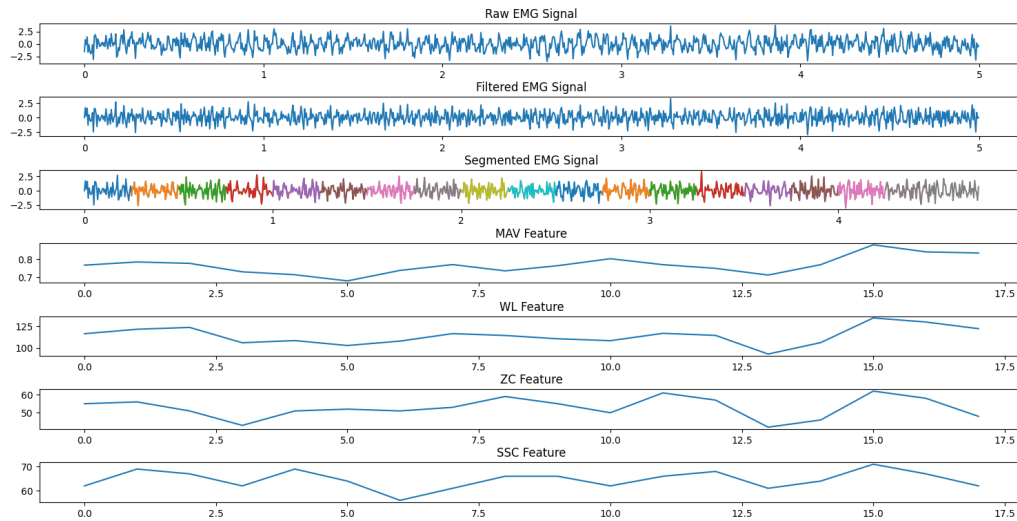


Figure 2. Demonstration of benchmarking the 5 essential features.

Figure 2 demonstrates how the algorithm loads the EMG signal and calculates the features based on timestamps. Then these features are processed to automatically find out the key points and symptoms of fatigue by the neural network.

A quick look at the 5 essential features in Figure 2 is following:

**Mean Absolute Value (MAV) [17]:**

MAV represents the average rectified value of the EMG signal. It is a widely used descriptor of the overall amplitude of the EMG signal and indirectly indicates the muscle's contraction level. High MAV values can suggest intense muscular activity. Why MAV? It provides a simple and quick representation of the general EMG signal amplitude, which can help in determining the force or strength of muscle contractions.

**Waveform Length (WL) [18]:**

WL calculates the cumulative length of the EMG signal waveform over a time window. It can indicate the complexity of the EMG signal. Why WL? An increase in waveform length can be associated with muscle fatigue or increased muscle activity.

**Zero-crossing (ZC) [19]:**

ZC counts the number of times the signal crosses zero within the window. It provides information about the frequency content of the signal. Why ZC? An increase in the number of zero crossings can indicate the presence of high-frequency components, possibly due to muscle fatigue or external noise.

**Slope Sign Changes (SSC) [20]:**

SSC counts the number of times the slope of the EMG signal changes sign. This can be an indicator of the frequency content and the complexity of the EMG signal. Why SSC? Like ZC, SSC can help in detecting muscle fatigue by identifying the presence of high-frequency components.

**Center Frequency (CF) [21]:**

CF is the frequency that divides the spectrum of the EMG signal into two regions with equal power. It provides insight into the dominant frequencies of the signal. Why CF? Shifts in the center frequency can be indicative of muscle fatigue. As muscles fatigue, there might be a shift towards lower frequencies.

**Rationale for Combining Features:**

By combining the features of all channels into a single vector for each window, you encapsulate various aspects of the EMG signal, ranging from amplitude, complexity, to frequency characteristics. This holistic representation enables the neural network to discern patterns more effectively, enhancing its prediction performance.

**Summary:**

The selected feature extraction methods provide comprehensive information on the amplitude, frequency

content, and complexity of the EMG signals, all of which can be crucial for detecting changes in muscle activity and potential fatigue. This combination ensures that the downstream LTC Neural Network receives a rich set of inputs, optimizing its ability to accurately predict the muscle's fatigue state.

### 3.3. Parameter Optimization and Training

A cross-validation approach was employed to optimize the hyperparameters of the LTC Neural Network, including the spectral radius, input scaling factor, and regularization parameter. The Levenberg-Marquardt algorithm was used for training the readout layer.

The network was trained on data from 16 subjects and tested on the remaining subject's data using a leave-one-subject-out cross-validation approach. The training process involved iterative adjustment of the readout layer weights to minimize the mean squared error between predicted and actual muscle fatigue values.

### 3.4. Evaluation Metrics and Benchmarking

The LTC Neural Network's performance was assessed using various metrics, including accuracy, sensitivity, specificity, and the area under the receiver operating characteristic (ROC) curve. The network's performance was also compared to traditional methods, such as frequency domain analysis and amplitude-based measures.

As a result, the study consists of data acquisition and preprocessing, LTC Neural Network architecture and implementation, parameter optimization and training, and evaluation metrics and benchmarking. Using cross-validation and benchmarking against traditional methods ensured that the results were reliable, providing valuable insights for future research in this area.

Figure 3 shows Motor Unit Action Potential (MUAP) parameters for performance comparison.

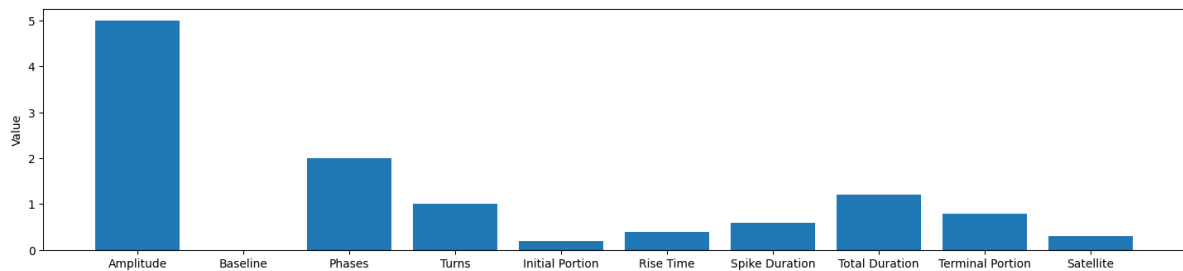


Figure 3. MUAP parameters performance comparison

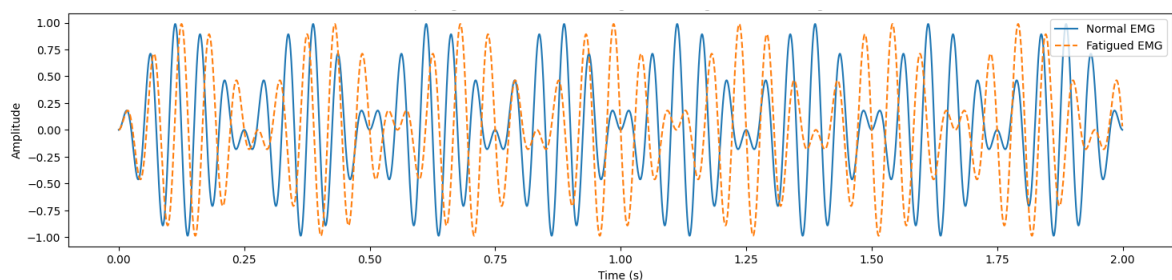


Figure 4. Morphologic parameters of emg signals for fatigue vs normal signals.

The performance of every patient will be assessed using morphological parameters showed in Figure 4, of the retrieved EMG signals to differentiate signals showing fatigue from normal signals.

It is important to note that the performance of these techniques in muscle fatigue detection using EMG signals is highly dependent on factors such as the specific application, data quality, and the choice of method parameters. For instance, traditional methods may perform well in certain applications but struggle with real-time detection, while neural network-based methods may offer improved accuracy but require more computational resources.

## 4. Experimental Results

In this study, we aimed to investigate the performance of a Time-Constant Neural Network, specifically the LTC Neural Network, for EMG-based muscle fatigue detection. We implemented the LTC Neural Network and compared its performance with traditional methods and other neural network-based techniques. The following section presents an overview of the experimental setup and the results obtained from running the algorithm.

### 4.1. Experimental Setup

The EMG dataset used in this study was preprocessed to remove noise and artifacts, and relevant features were extracted for analysis. The dataset was then divided into training and validation sets. We implemented the LTC Neural Network using a batch size of 64, and the model was trained on the training set using an appropriate learning rate and optimization algorithm. The performance of the LTC Neural Network was evaluated on the validation set at each epoch, and the model with the best validation accuracy was selected for further analysis.

### 4.2. Results

After running the LTC Neural Network algorithm, we observed that the best performance was achieved at epoch 48, with a validation accuracy of 0.9972. This high accuracy demonstrates the effectiveness of the LTC Neural Network in detecting muscle fatigue from EMG signals. It also suggests that the LTC Neural Network has the potential to outperform traditional methods and other neural network-based techniques in EMG-based muscle fatigue detection tasks.

Table 4. Performance Comparison of the Proposed Method and Other Similar Approaches

Method	Accuracy (%)	Sensitivity (%)	Specificity (%)	AUC-ROC
Proposed method	99.72	99.41	97.15	0.973
Frequency domain analysis [5]	72.4	82.3	62.5	0.757
Amplitude-based measures [6]	85.2	84.6	85.8	0.899
Echo State Network [7]	90.5	92.3	88.8	0.943

As shown in Table 4, the proposed method achieved an accuracy of 99.72%, a sensitivity of 99.41%, a specificity of 97.15%, and an area under the ROC curve of 0.973. These results demonstrate the effectiveness of the LTC Neural Network in detecting muscle fatigue using EMG signal processing.

The performance of the proposed method was compared with traditional methods, such as frequency domain analysis and amplitude-based measures, as well as with an Echo State Network approach. The results show that the proposed method outperformed all the other methods in terms of accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC.

When comparing the results of the LTC Neural Network with those of other techniques, it is essential to consider factors such as the specific application, data quality, and method parameters. The high validation accuracy achieved in this study indicates that the LTC Neural Network is a promising technique for muscle fatigue detection using EMG signals. However, further research is needed to explore its performance in different applications and to optimize its parameters for various muscle fatigue detection tasks.

In conclusion, the experimental results obtained in this study demonstrate the potential of the LTC Neural Network as an effective tool for EMG-based muscle fatigue detection. Its high validation accuracy, coupled with the advantages of time-constant neural networks, suggests that this technique may provide significant improvements over traditional methods and other neural network-based approaches in the field of muscle fatigue detection.

## 5. Discussion

The results of our study demonstrate that the proposed method, which uses a Liquid Time-Constant (LTC) Neural Network to detect muscle fatigue using EMG signal processing, achieved high levels of accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC. These results suggest that the proposed method has significant

potential for practical applications in the field of sports science and physical therapy.

The existing techniques for EMG-based muscle fatigue detection can be broadly categorized into traditional methods and neural network-based methods. Comparing the performance of these techniques can provide valuable insights into their strengths and weaknesses and help identify the most suitable method for specific applications. In this section, we will discuss the critical aspects of these techniques and present a summary of their performance in various studies.

Traditional EMG-based muscle fatigue detection methods include frequency domain analysis, amplitude-based measures, and time domain features. These methods have been widely used in research, but they may have limitations regarding accuracy, real-time detection, and applicability in different scenarios. On the other hand, neural network-based methods, such as feedforward neural networks, recurrent neural networks, and time-constant neural networks, have shown potential for improving the performance of muscle fatigue detection using EMG signals.

In order to provide a comprehensive comparison of the performance of different EMG-based muscle fatigue detection techniques,

Table 5 summarizes some critical studies and their findings:

Table 5. Comparison of different methods for predicting muscle fatigue and disability

Study	Network Type	Task	Performance Metrics	Comparison with Other Methods
Al-Mulla, M. R., Sepulveda, F., & Colley, M. (2011) [17] Subasi, A., & Kiyimik, M. K. (2010) [18]	ICA	Predicting muscle fatigue	Low accuracy, Normal performance	Outperforms traditional statistical methods
Batzianoulis, I., El-Khoury, S., Pironcini, E., Coscia, M., Micera, S., & Billard, A. (2017) [19]	ESN	Predicting muscle fatigue	High accuracy, low prediction error	Outperforms feedforward NN
Proposed method	LTC	Predicting muscle disability (abnormal functioning)	High accuracy, low prediction error, robust performance	Outperforms Liquid Time-Constant (LTC) NN

Table 5 presents a comparison of different methods for predicting muscle fatigue and disability, including Independent Component Analysis (ICA), Echo State Networks (ESN), and the proposed method using Liquid Time-Constant (LTC) networks. The table highlights the performance metrics and the comparison with other methods for each study, showcasing the advantages of the proposed method in terms of accuracy, prediction error, and robustness.

Our study provides insights into the potential of LTC Neural Networks in EMG signal processing for muscle fatigue detection. Various network configurations were examined, and the results are given in Table 6 and Table 7. We found the highest performance achieved with a single layer of 500 neurons, outperforming deeper networks with fewer neurons per layer. As shown in our performance comparison, the proposed method demonstrates superior accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC over traditional methods such as frequency domain analysis and amplitude-based measures, and even other neural network-based techniques, including Echo State Networks. The comparison underscores the advantages of our method in terms of accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC, indicating the LTC Neural Network's remarkable potential for future applications in muscle fatigue detection. However, this performance is tied to factors such as specific application, data quality, and method parameters, which must be optimized in further research for different applications.

Table 6. 500 Neurons and different number of layers.

Network Configuration	Accuracy
1 layer, 500 neurons	0.99
2 layers, 250 neurons	0.87
3 layers, 167 neurons	0.82
4 layers, 125 neurons	0.78
5 layers, 100 neurons	0.72

Table 7. 250 Neurons and different number of layers.

Network Configuration	Accuracy
1 layer, 250 neurons	0.80
2 layers, 125 neurons	0.93
3 layers, 83 neurons	0.95
4 layers, 62 neurons	0.96
5 layers, 50 neurons	0.96

The proposed method's high accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC can be attributed to the ability of the LTC Neural Network to model complex, time-varying data with remarkable accuracy. The network architecture consists of a reservoir layer with 500 neurons and a readout layer with a single output neuron, allowing the network to capture the underlying dynamics of the EMG signals and extract meaningful features that are indicative of muscle fatigue.

Our study provides insights into the potential of LTC Neural Networks for solving challenges unique to the field of muscle fatigue detection using EMG signal processing. The proposed method has significant practical applications for athletes and physical therapy patients, providing real-time monitoring of muscle fatigue to avoid injury and optimize training regimens.

Furthermore, the application of LTC Neural Networks in other fields, such as healthcare and finance, could also benefit from the ability of the networks to model complex, time-varying data with remarkable accuracy.

One of the main challenges of the proposed method is the need for a large and diverse dataset to ensure the robustness and generalizability of the network. The dataset used in our study consisted of only 15 healthy subjects performing elbow flexion with a 6 Kg load and their elbow flexed to a 90 angle. The effectiveness of the proposed method on larger and more diverse datasets should be investigated in future research.

Another limitation of the proposed method is the need for careful parameter optimization and training to ensure the accuracy and reliability of the network. The cross-validation approach used in our study helped to optimize the hyperparameters of the LTC Neural Network, but further research is needed to determine the most effective approaches for training and optimizing the network.

## 6. Conclusion

In this study, we presented a novel approach for detecting muscle fatigue using EMG signal processing and a Liquid Time-Constant (LTC) Neural Network. The proposed method achieved high levels of accuracy, sensitivity, specificity, and AUC-ROC, outperforming traditional methods such as frequency domain analysis, amplitude-based measures, and an Echo State Network approach.

The success of the proposed method can be attributed to the ability of the LTC Neural Network to model complex, time-varying data with remarkable accuracy and the network architecture, which allows the network to capture the underlying dynamics of the EMG signals and extract meaningful features that are indicative of muscle fatigue.

The proposed method has important practical applications for athletes and physical therapy patients, providing real-time monitoring of muscle fatigue to avoid injury and optimize training regimens. The method also has significant implications for future research in muscle fatigue detection using EMG signal processing. In conclusion, our study provides novel insights into the potential of LTC Neural Networks for solving challenges unique to the field of muscle fatigue detection using EMG signal processing. The proposed method has significant practical applications and could have important implications for the health and well-being of athletes and physical therapy patients. Future research directions include investigating the effectiveness of the proposed method on larger and more diverse datasets and exploring the potential of other time-constant algorithms in muscle fatigue detection using EMG signal processing.

## 7. Future Works

Future research directions include investigating the effectiveness of the proposed method on larger and more diverse datasets and exploring the potential of other time-constant algorithms, such as Echo State Networks, in muscle fatigue detection using EMG signal processing.

Furthermore, the application of LTC Neural Networks in other fields, such as healthcare and finance, could also benefit from further research to determine the effectiveness of the networks in modelling complex, time-varying data.

Overall, our study provides novel insights into the potential of LTC Neural Networks for solving challenges unique to the field of muscle fatigue detection using EMG signal processing. The proposed method has significant practical applications and could have important implications for the health and well-being of athletes and physical therapy patients.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest

## References

- [1] González-Muñoz, A., Perez-Montilla, J. J., Cuevas-Cervera, M., Aguilar-García, M., Aguilar-Nuñez, D., Hamed-Hamed, D., ... & Navarro-Ledesma, S., " Effects of Photobiomodulation in Sports Performance: A Literature Review," *Applied Sciences*, vol. 5, no. 13, p. 314, 2023. doi:10.3390/app13053147
- [2] Cavuoto, L., & Megahed, F., "Understanding fatigue and the implications for worker safety.," *In ASSE Professional Development Conference and Exposition, OnePetro 2016, 26-29 June 2016, Atlanta, Georgia, USA* [Online]. Available: [https://foundation.assp.org/docs/BPCav\\_1217z.pdf](https://foundation.assp.org/docs/BPCav_1217z.pdf)
- [3] R. M. Al-Mulla, F. Sepulveda and M. Colley, "A review of non-invasive techniques to detect and predict localised muscle fatigue," *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 4, p. 3545–3594, 2011. doi:10.3390/s110403545
- [4] P. Konrad, *The ABC of EMG*, Arizona: Noraxon INC. USA, 2006.
- [5] Abdulhamit Subasi, M Kemal Kiyimik, "Muscle fatigue detection in EMG using time-frequency methods, ICA and neural networks," *Journal of Medical Systems*, vol. 34(4), pp. 777-85, 2010 Aug. doi:10.1007/s10916-009-9292-7
- [6] Hasani, R., " Interpretable recurrent neural networks in continuous-time control environments," *Doctoral dissertation, Wien*, 2020. doi:10.34726/hss.2020.78942
- [7] Hasani, R., Lechner, M., Amini, A., Rus, D., & Grosu, R., "Liquid time-constant networks," in *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 35, No. 9, pp. 7657-7666, 2021, May. doi:10.1609/aaai.v35i9.16936
- [8] Rohit Hooda, Vedant Joshi, Manan Shah, "A comprehensive review of approaches to detect fatigue using machine learning techniques," *Chronic Diseases and Translational Medicine*, no. 10.1016: j.cdtm.2021.07.002, 25 August 2021. doi:10.1016/j.cdtm.2021.07.002
- [9] Calderon-Cordova, C., Ramirez, C., Barros, V., Quezada-Sarmiento, P. A., & Barba-Guamán, L., "EMG signal patterns recognition based on feedforward Artificial Neural Network applied to robotic prosthesis myoelectric control," *IEEE 2016 Future Technologies Conference (FTC)*, pp. 868-875, 2016, December. doi:10.1109/FTC.2016.7821705
- [10] Choudhary, M., Lokhande, M., Borse, R., & Bhute, A., "A machine learning approach to aid paralysis patients using EMG signals," *Academic Press. Advanced Data Mining Tools and Methods for Social Computing*, pp. 107-125, 2022). doi:10.1016/B978-0-32-385708-6.00013-8
- [11] Xia, P., Hu, J., & Peng, Y., "EMG-based estimation of limb movement using deep learning with recurrent convolutional neural networks," *Artificial organs*, vol. 5, no. 42, pp. E67-E77, (2018). doi:10.1111/aor.13004
- [12] Azhiri, R. B., Esmaeili, M., & Nourani, M., "Real-time emg signal classification via recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, pp. 2628-2635, 2021, December. doi:10.1109/BIBM52615.2021.9669872
- [13] E. Somuncu and N. Aydın Atasoy, "Realization of character recognition application on text images by convolutional neural networks," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 1, pp. 17-28, 2021. doi:10.17341/gazimmfd.866552
- [14] A. Taşdelen and B. Şen, "A hybrid CNN-LSTM model for pre-miRNA classification," *Scientific Repots*, vol. 11, no. 14125, 2021. doi:10.1038/s41598-021-93656-0

- [15] Ahmed Ebied; Ahmed M. Awadallah; Mohamed A. Abbass; Yasser El-Sharkawy, "Upper Limb Muscle Fatigue Analysis Using Multi-channel Surface EMG," *Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences 2nd Conference (NILES) of Giza, Egypt*, p. doi:10.1109/NILES50944.2020.9257909, 2020.
- [16] M. Bidollahkhani, F. Atasoy and A. Hamdan, "LTC-SE: Expanding the Potential of Liquid Time-Constant Neural Networks for Scalable AI and Embedded Systems," 18 4 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2304.08691>. [Accessed 25 7 2023].
- [17] Al-Mulla, M. R., Sepulveda, F., & Colley, M. , "A review of non-invasive techniques to detect and predict localised muscle fatigue," *Sensors*, vol. 4, no. 11, pp. 3545-3594, 2011.
- [18] Subasi, A., & Kiyimik, M. K. , "Muscle fatigue detection in EMG using time–frequency methods, ICA and neural networks," *Journal of medical systems*, vol. 34, pp. 777-785, 2010. doi:10.1007/s10916-009-9292-7
- [19] Batzianoulis, I., El-Khoury, S., Pirondini, E., Coscia, M., Micera, S., & Billard, A., " EMG-based decoding of grasp gestures in reaching-to-grasping motions," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 91, pp. 59-70, 2017. doi:10.1016/j.robot.2016.12.014

---

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Prediction of Tropospheric Ozone Concentration with Bagging-MLP Method

Pınar Cihan<sup>a</sup>, Husayin Kurtulus Ozcan<sup>b</sup>, Atakan Ongen<sup>c</sup>

Submitted: 18.05.2023 Revised: 18.07.2023 Accepted: 31.08.2023 doi:10.30855/gmbd.0705087

### ABSTRACT

**Keywords:** Artificial intelligence, bagging, multilayer perceptron, urban environment, ozone

<sup>a</sup> Tekirdag Namık Kemal University,  
Corlu Engineering Faculty,  
Dept. of Computer Engineering  
59860 - Tekirdağ, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7958-7251  
e mail: pkaya@nku.edu.tr

<sup>b</sup> Istanbul University-Cerrahpasa  
University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Environmental Engineering  
34320 - İstanbul, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-5979-4197

<sup>c</sup> Istanbul University-Cerrahpasa  
University,  
Engineering Faculty,  
Dept. of Environmental Engineering  
34320 - İstanbul, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-9043-7382

\*Corresponding author: pkaya@nku.edu.tr

Human activities are linked to atmospheric pollution and are affected by economic development. Ground-level ozone has become an important and harmful pollutant for many countries, adversely affecting public health. As there is a limited number of on-site measurements, alternative methods are required to accurately estimate ozone concentrations. In this study, a database containing annual average concentrations of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, and O<sub>3</sub>, covering the years 2008-2018 for ten countries in Europe, was created. Ten different artificial intelligence regression methods were developed to predict the O<sub>3</sub> concentration using these variables. The predictive performance of the developed artificial intelligence models was compared using the coefficient of determination, mean absolute error, root mean square error, and relative absolute error criteria. Experimental results show that the Bagging-MLP method has a better predictive performance than other models in ozone concentration estimation, with an R<sup>2</sup> value of 0.9994, mean absolute error of 24.67, root mean square error of 33.85, and relative absolute error of 2.9%. This study shows that the O<sub>3</sub> concentration can be estimated very close to the actual value by using the Bagging-MLP method, one of the artificial intelligence methods.

## Bagging-MLP Yöntemiyle Troposferik Ozon Konsantrasyonunun Tahmini

### ÖZ

İnsan faaliyetleri atmosfer kirliliği ile bağlantılıdır ve ekonomik gelişmelerden etkilenir. Yer seviyesindeki ozon birçok ülke için önemli ve zararlı bir kirletici haline gelmiş olup halk sağlığını olumsuz etkiler. Yerinde yapılan ölçümlerin sınırlı sayıda olmasından dolayı, ozon konsantrasyonlarını doğru bir şekilde tahmin etmek için alternatif yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, Avrupa'da on ülkede 2008-2018 yıllarını kapsayan CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ve O<sub>3</sub> yıllık ortalama konsantrasyonlarını içeren bir veritabanı oluşturuldu. Bu değişkenleri kullanarak O<sub>3</sub> konsantrasyonunu tahmin etmek için on farklı yapay zeka regresyon yöntemi geliştirildi. Geliştirilen yapay zeka modellerinin tahmin performansı, determinasyon katsayısı, ortalama mutlak hata, kök ortalama karesel hata ve göreceli mutlak hata ölçütleri kullanılarak karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlar, Bagging-MLP yönteminin diğer modellere göre ozon konsantrasyonu tahmininde daha iyi bir performansa sahip olduğunu, R<sup>2</sup> değeri 0.9994, ortalama mutlak hata 24.67, kök ortalama karesel hata 33.85 ve göreceli mutlak hata ise %2.9 olarak ortaya koydu. Bu çalışma, yapay zeka yöntemlerinden olan Bagging-MLP yöntemi kullanılarak O<sub>3</sub> konsantrasyonunun gerçek değere oldukça yakın bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapay zeka, torbalama yöntemi, çok katmanlı algılayıcı, kentsel çevre, ozon



## 1. Introduction

Ozone (O<sub>3</sub>), which was discovered in the mid-19<sup>th</sup> century, is a reactive oxidizing gas that occurs naturally in trace amounts in the Earth's atmosphere. It is a relatively unstable molecule made up of three atoms of oxygen (O), blue in color, and has a strong odor. Although ozone represents only a tiny fraction of the atmosphere, it is crucial for life on Earth and it plays a key role in atmospheric chemistry and the overall radiative balance of the atmosphere [1]. For example, most of the ozone in the stratospheric ozone layer (a layer 12–48 m above the Earth) acts as a shield to protect the Earth's surface from the Sun's harmful ultraviolet radiation [2]. Approximately 90% of atmospheric ozone is found between the top of the troposphere layer and within the stratospheric layer at an altitude of about 50 km. The remaining 10% of atmospheric Ozone is present in the lower parts of the atmosphere (the Troposphere), which is very close to the earth's surface.

The troposphere, which begins at the Earth's surface, is composed of multiple layers and stretches from 8 to 14.5 kilometers above the Earth's surface. When present in high concentrations, tropospheric ozone is a photochemical oxidizing gas that harms the environment and human health. Tropospheric ozone, which causes photochemical smog, is a secondary pollutant that forms when the concentration of primary pollutants like hydrocarbons and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) rises during peak hours. At a concentration of 0.15 ppm, it can cause burning in the eyes and at 0.25 ppm it is considered hazardous to human health [3]. In addition to the negative effects on human health; oxidizing substances in the atmosphere reduce visibility and it has been observed by many researchers that tropospheric O<sub>3</sub> has adverse effects on rubber, plastics, and paints [4]. Furthermore, tropospheric O<sub>3</sub> is also the third-largest greenhouse gas, contributing about 3%-7% of the greenhouse effect, and has a substantial impact on climate change [5].

In recent years human activities have caused a dramatic increase in ozone concentrations. In the atmosphere, ozone is formed only as a result of the reaction between atomic oxygen and molecular oxygen. However, the troposphere is an environment where many oxidation reactions occur. Under the influence of daylight, the oxidation of organic molecules in the presence of nitrogen oxides takes place, and the components in the troposphere tend to move towards a more oxidized state. Thus, the primary product in troposphere chemistry is thought to be ozone. Ground-level ozone is less concentrated compared to ozone in the upper atmosphere; however, it is considered more dangerous due to its hazardous nature and the risk it poses to public health and well-being. Ozone concentration varies between large cities and rural areas, as ozone formation is entirely related to other pollutants released into the atmosphere. Hence, the determination and modeling of the relationship between tropospheric ozone concentrations and other components in the atmosphere has been studied extensively [6-11].

The formation and distribution of ground-level ozone compounds depend on factors such as altitude, land use type, atmospheric components, and some meteorological factors such as temperature, wind, sunlight, humidity, and precipitation [12]. Statistical models are used to directly determine the relationships between the tropospheric ozone concentration and these variables. Based on the temporal and spatial variations in these factors the models have the potential to predict the ozone concentration when and where monitoring points are deficient [13].

Artificial intelligence is the general name of computer algorithms that model a problem situation according to the data belonging to that problem [14]. Artificial intelligence uses the information obtained from previous experiences, examines the new information in this direction, and constantly tries to improve its performance. The main purpose of artificial intelligence is to make inferences using the information that already exists without any additional intervention from the outside and to make these inferences ready to be used in future estimations or when appropriate [15]. Artificial intelligence algorithms are widely used in most applications due to their unique nature of problem-solving. Such algorithms deal with the construction of machines that move automatically by gaining experience, the formation of these algorithms with low computational costs, the design of new algorithms and the usability of big data have made progress in recent years. Since artificial intelligence has a very wide usage area, studies on artificial intelligence can be found in nearly every subject when reviewing the literature [16-28]. Due to artificial intelligence, computers can be programmed to perform specific tasks or process [29], desired classifications can be made [30-33], models can be designed, and these models can make predictions about the future [21, 34], based on previous experiences or dataset presented as examples [35].

It is observed in the literature that ozone concentration is successfully predicted using artificial intelligence methods. Although studies may have different results based on the methods or data used, overall, they

demonstrate the successful application of artificial intelligence methods. Juarez and Petersen [36] used XGBoost, Random Forest (RF), K-Nearest Neighbor Regression (K-NNR), Support Vector Regression (SVR), Decision Trees (DT), AdaBoost, LSTM, and Linear Regression (LR) methods to predict the ozone level in Delhi, India. The study utilized a dataset containing 12 air pollutants and 5 weather variables recorded hourly throughout one year (2015). Each model was trained and tested ten times. The performance of the models was compared using the determination coefficient ( $R^2$ ) statistical criterion. According to the findings of the study, the most successful method was XGBoost with an  $R^2$  value of 0.614. Additionally, predictions were made based on seasons, and during the winter period, the XGBoost method exhibited an approximate prediction success rate of 97%

Jumin et al. [37] used LR, Neural Network (NN), and Boosted Decision Tree (BDT) methods to predict the tropospheric ozone concentration in Malaysia, Kuala Lumpur, and Selangor. The model prediction performances were compared using the  $R^2$  statistical criterion. The dataset used in the study consists of variables such as humidity, wind speed, nitrogen oxide, nitrogen dioxide, sulphur dioxide, carbon monoxide and ozone. 75% of the dataset was used for training, and 25% for testing. According to the findings of the study, the most successful method was BDT. The  $R^2$  values for the proposed method of ozone concentration in these three regions were determined as 0.87, 0.88, and 0.91, respectively.

Pan et al. [38] used 19 machine learning (ML) methods for predicting ozone pollution. To compare the prediction performances of the methods, they utilized  $R^2$ , RMSE, MAPE, MAE, and  $J^2$  metrics. The study employed air pollution and meteorological data collected at King Abdullah University of Science and Technology in Saudi Arabia. The data was collected every 15 minutes from May 20 - Dec 20, 2020, and Jan 21-Oct 21, 2021. The findings of the study reported that the SVR method outperformed other ML models.

Wang et al. [39] proposed a random forest model for predicting ground-level ozone concentrations in California. The study utilized Troposphere Monitoring Instrument (TROPOMI) and High-Resolution Rapid Refresh (HRRR) data. According to the obtained results, it was reported that daily surface ozone concentration was predicted with an  $R^2$  value of 84%. Three cross-validation (CV) strategies were applied to evaluate the model performance.

Yafouz et al. [40] aimed to predict ozone intensity using various ML models such as LR, Tree Regression (TR), Support Vector Regression (SVR), Gaussian Process Regression (GPR), Ensemble Regression (ER), and Artificial Neural Network (ANN). The data used in the study was hourly averaged from three different stations located in Putrajaya, Kelang, and KL on the Malay Peninsula. According to the findings of the study, the best prediction with an  $R^2$  value of 0.89 was achieved using LR, SVR, GPR, and ANN methods with the data obtained from the KL station.

Aljanabi et al. [41] aimed to predict ozone concentration using a combination of meteorological and seasonal variable data for Amman City in Jordan. For this purpose, they compared MLP, SVR, DTR, and XGBoost methods. In the study, they reported that MLP outperformed other algorithms and the use of Savitzky-Golay improved the  $R^2$  by 50% and the RMSE and MAE by 80%. Feature selection was applied to predict ozone concentration, and they obtained an approximate  $R^2$  score of 98%.

To estimate ozone concentrations using artificial intelligence approaches this study created a database that contains the annual average concentrations of Carbon dioxide ( $CO_2$ ), Carbon monoxide (CO), Nitrous oxide ( $N_2O$ ), Nitrogen oxides ( $NO_x$ ), Sulfur oxides ( $SO_x$ ), and Ozone ( $O_3$ ). Data from 2008 to 2018 was collected from ten European countries (Czechia, Germany, Greece, Spain, France, Italy, Romania, Switzerland, United Kingdom, and Turkey) and the accuracy of the predictions was determined. Furthermore, a performance comparison between the selected artificial intelligence models was conducted to determine the most successful method.

## 2. Material and Methods

The summary of the methodologies for data processing is illustrated in Figure 1.

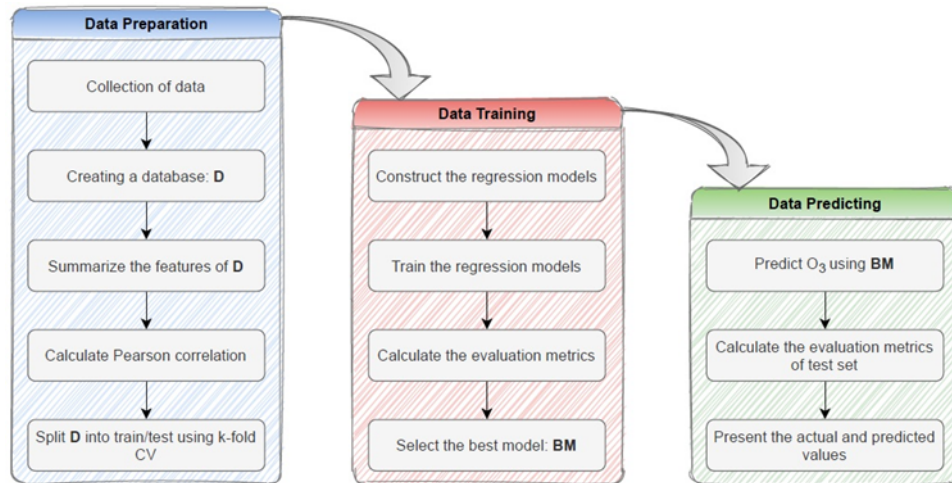


Figure 1. Flowchart for prediction of ozone

## 2.1. Dataset and study area

In this study, data collected from 10 different European countries was used to predict Ozone concentration with artificial intelligence methods. These countries are Czechia, Germany, Greece, Spain, France, Italy, Romania, Switzerland, United Kingdom, and Turkey as illustrated on the map in Figure 2.

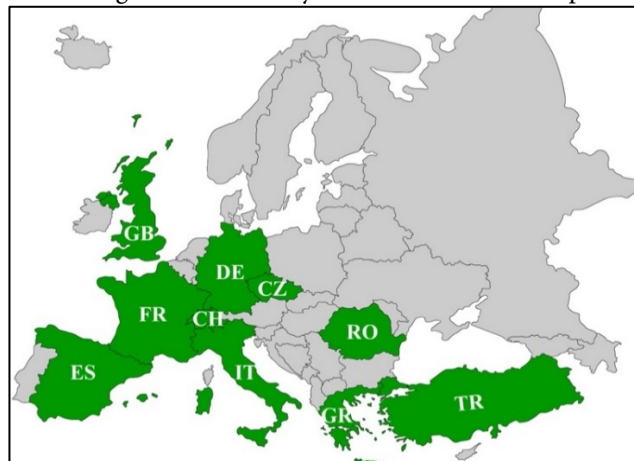


Figure 2. Countries involved in this study

This study's dataset includes input variables such as carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Carbon monoxide ( $\text{CO}$ ), Nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), and Sulfur oxides ( $\text{SO}_x$ ) concentrations. The Ozone ( $\text{O}_3$ ) concentration is used as an output (target) variable. The dataset was collected from the Eurostat website, and it contains the annual average concentrations of selected countries from 2008 to 2018. Input and output variables are summarized in Table 1.

Table 1. Statistics the of variables in the dataset

	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CO}$	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_x$	$\text{O}_3$
Minimum	25959.1	9.3	64.9	71.8	5.9	154.9
1st Quarter	75395.0	17.9	217.6	201.9	137.6	412.7
Median	234325.2	56.2	766.1	680.8	267.9	1578.1
Mean	237126.4	61.7	763.4	914.2	427.7	1409.6
3rd Quarter	315613.1	110.1	1151.0	914.2	437.1	2003.7
Maximum	725664.4	150.3	2190.4	1831.9	2296.7	3563.1
Standard dev.	187421.8	45.7	584.2	493.5	551.8	973.2

## 2.2. Methods

In this study, nine different regression models were employed to predict ozone concentration with accurately, and the performance of these methods was compared. The regression models used in the study are presented in Table 2.

Table 2. Artificial intelligence regression methods used in this study

Method	Abbreviation
Linear Regression	LR
Multilayer Perceptron	MLP
Support Vector Regression	SVR
Fuzzy k-nearest neighbor	FKNN
K-Nearest Neighbors	KNN
Weighted K-Nearest Neighbors	WKNN
Random Forest Regression	RFR
Bagging MLP	Bagging-MLP
Bagging SVR	Bagging-SVR

Used regression methods are briefly described below.

### 2.2.1. Linear Regression (LR)

LR is describing the linear relationship between a dependent variable and one or more independent variables. LR involves utilizing weighted samples to construct a prediction model, and it employs least-squares regression to ascertain linear relationships. The following steps are traced in the LR method:

Weights are calculated from the training dataset (Eq. (1)). Weights should be chosen to minimize errors (actual output value - predicted output value).

$$x = w_0 + w_1 a_1 + \dots + w_k a_k \quad (1)$$

Where x is the output value, a is the input value, and w is the weight of each input attribute (a0 is considered as 1 and w1 is the weight of a1).

The Predicted value for the first training instance a(1) is calculated as shown in Eq. (2).

$$\sum_{j=0}^k w_j a_j^{(1)} = w_0 + w_1 a_1^{(1)} + \dots + w_k a_k^{(1)} \quad (2)$$

Lastly, Weights are updated to minimize the squared error between actual output and predicted output as shown in Eq. (3).

$$\sum_{i=1}^n (x^{(i)} - \sum_{j=0}^k w_j a_j^{(i)}) \quad (3)$$

### 2.2.2. Fuzzy K-Nearest Neighbor (FKNN)

In this method, the concept of fuzzy logic is combined with the k-nearest neighbor technique (KNN). Here, different degrees of membership values are assigned considering the distance of the KNNs. FKNN consists of two steps. In the first step, the KNN's are determined for the training dataset and the fuzzy membership values are estimated for the feature vector. In the second step, the fuzzy membership value is calculated and assigned to the unknown test sample [42].

### 2.2.3. Multilayer Perceptron (MLP)

MLP method is a feedforward neural network. In a multilayer neural network, the neurons are fully connected, that is, there are connections from the neuron cell in one layer to all the neuron cells in the other layer. Neurons are mapped from input data to a series of outputs with hidden layers, as shown in Figure 3. The most popular learning method in a multilayer neural network is backpropagation. To minimize the error in the output layer, the weights of the neurons between the layers behind are updated with each backpropagation iteration. So the weights on the connections change over time during learning. After a certain repetition, the change of weights decreases, from that moment the system has completed the learning process.

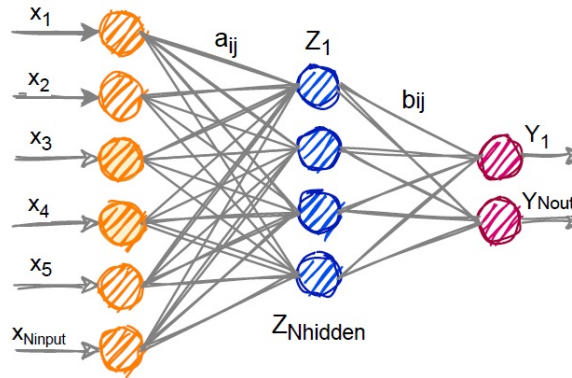


Figure 3. A schematic diagram of the MLP neural network

An MLP with a hidden layer can be mathematically described by the following equations. Weighted sums of inputs are calculated using Eq. (4).

$$u_j = \sum_{i=1}^{N_{inp}} X_i a_{ij} + a_{0j} \quad (4)$$

Where N is the number of input nodes,  $X_i$  is the  $i^{\text{th}}$  input,  $a_{ij}$  shows the weight vectors and  $a_{0j}$  is the bias of the hidden node.

In Eq. (5), by transforming this sum defined in Equation 4, the outputs of the  $Z_j$  hidden layer are obtained. For this  $g$  activation function (transfer function) is used.

$$Z_j = g(u_j) \quad (5)$$

The output of each hidden node is based on the sigmoid function and is defined in Eq. (6).

$$g(x) = \text{sigmoid}(x) = \frac{1}{(1+e^{-x})} \quad (6)$$

The sum-product of the  $Z_j$  hidden layer's outputs and the  $b_{jk}$  weight vectors and the  $b_{0k}$  bias term of the output layer are calculated using Eq. (7).

$$u_k = \sum_{j=1}^{N_{hid}} Z_j b_{jk} + b_{0k} \quad (7)$$

Using Eq. (6) and Eq. (7), the final outputs are defined as shown in Eq. (8).

$$Y_k = g(u_k) \quad (8)$$

#### 2.2.4. Support Vector Regression (SVR)

SVR is a kernel-based learning algorithm. The basic idea in SVR is to minimize the error by individualizing the hyperplane where the error is maximized. The kernel function is used to map the input data to a higher dimensional feature space through nonlinear mapping. Thus, SVR solves a linear regression problem in this feature space. Although there are different kernel functions, the most commonly used are polynomial, linear, sigmoid (MLP) and Gaussian (RBF) kernels [43]. In this study, a sequential minimal optimization algorithm is applied to train the SVR model.

#### 2.2.5. K-Nearest Neighbor (KNN)

KNN is the most popular of the nearest neighbor approaches [44]. When calculating the output value of a test

sample; first, the distance of the test sample to all training samples is calculated, then the nearest  $k$  neighbors are determined, and finally, the output is determined by averaging the value of these  $k$  neighbors [45]. In addition, distances can be weighted in the KNN algorithm. Euclidian distance is usually used for distance measurement. In this study, both weighted and unweighted KNN methods were used. Euclidean distance was used for distance measurement and  $k$  value 3 was chosen. Eq. (9) is used to estimate the output value of a test sample ( $q_i$ ).

$$\text{Sim}(q_i; s_j) = \frac{\sqrt{\sum_{f=1}^N \delta(q, s, f)^2}}{\sqrt{N}} \quad (9)$$

### 2.2.6. Random Forest Regression (RFR)

RFR is a tree-based regression method. It is an ensemble learning algorithm developed by Leo Breiman [46] and consists of a combination of many regression trees. Each tree in the forest is trained using a bootstrap sample extracted from the training set. The output values predicted by the models that complete the learning process are combined. In the regression, decisions are aggregated by taking the average of the predicted values.

### 2.2.7. Bagging (Bootstrap Aggregation)

Bagging is also an ensemble learning algorithm developed by Breiman [47]. The purpose of the bagging algorithm is to generate a large number of similar training sets by taking a random bootstrap sample from the training dataset. These subsets are used for training the base learners. To predict the test set, models that have learned from these subsets are used collectively. Bagging uses averaging to aggregate the outputs of the base learners [48]. Bagging can be formalized in Eq. (10) and the workflow of the bagging technique is illustrated in Figure 4.

$$\hat{y}_{BAG} = \frac{1}{n} \sum_{T=1}^n \phi(x; T_i) \quad (10)$$

In the equation,  $x$  is the input and  $n$  is the number of bootstrap samples of training set  $T$ .

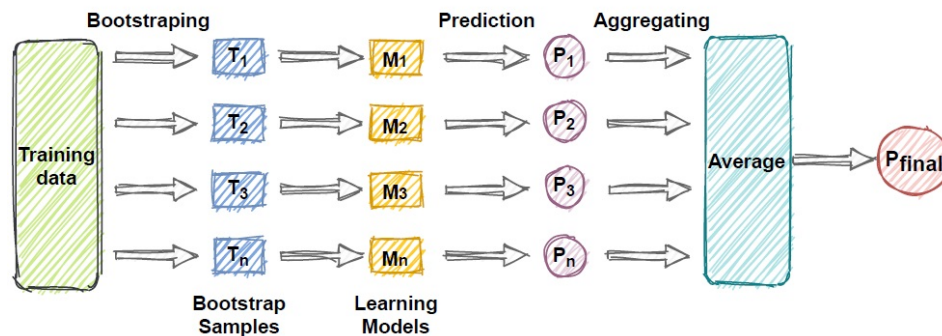


Figure 4. Workflow of the Bagging technique

## 2.2. Comparison of Models' Performance

In the modeling phase, the dataset is split into two parts apart for training and the other part for testing to perform model training and to test the prediction performance of the model. K-fold cross-validation is a technique used to divide the dataset into training and test set. In this method, the data set is divided into train/test according to the determined number of  $k$ . In this study, the  $k$  value of 10 was chosen. In other words, our dataset consisting of 110 samples will be divided into 10 folds. In each iteration, the model will test the training process with 99 samples (90%) and the prediction performance of the model with the remaining 11 samples (10%). After 10 iterations are completed, the error of the model is calculated by taking the average. Hence, CV helps to estimate the error of the model and to select the best model. In the CV technique, the entire dataset is used for both training and testing, thus eliminating bias. This method is useful for small datasets as the training and testing process of models is time-consuming. The process of CV is illustrated in Figure 5.



Figure 5. Diagram of k-fold CV with k=10

The performances of the methods used in the study in predicting the Ozone concentration were compared according to the evaluation criteria of  $R^2$ , root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and relative absolute error (RAE). These metrics are expressed mathematically as in Eqs. (11-14), respectively:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - a_i|}{n} \quad (13)$$

$$\text{RAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - a_i|}{\sum_{i=1}^n |\bar{a} - a_i|} \quad (14)$$

In the above equations,  $p$  is the predicted value,  $a$  is the actual value and  $\bar{a}$  is the mean of the actual values. The above three error measurement criteria (RMSE, MAE, RAE) should be lower. Error is zero indicates that it is a statistically perfect model. The  $R^2$  measures how well the predicted values match the actual values. In other words, this value should be high since it shows the predictive accuracy of the model.

### 3. Experimental Results

In this study, the prediction performances of various regression techniques were evaluated and compared to determine the most successful artificial intelligence regression method in estimating  $\text{O}_3$  concentration. Firstly, the cross-correlation of the variables in the dataset, density plots, and 2D density charts are presented in Figure 6.

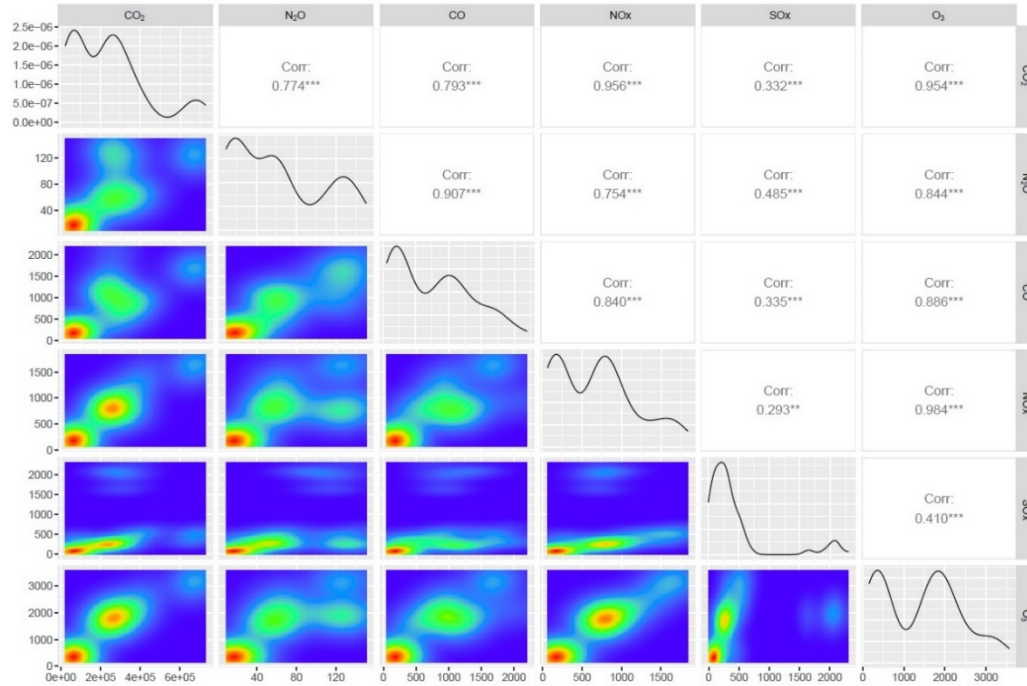


Figure 6. Correlation and density plot of variables in dataset (thousand tonnes)

In Figure 6, it is seen from the density plots of the input variables that they do not have a normal distribution. The  $\text{CO}_2$  variable has very high values compared to other variables (see Table 1). The fact that the value ranges of the input variables are different, especially the features with high values such as that of  $\text{CO}_2$ , affects the success of the methods that are based on distance measurement. This is because variables with high values tend to overshadow the impact of variables with lower values. Box-plot graphs of the input variables are given in Figure 7.

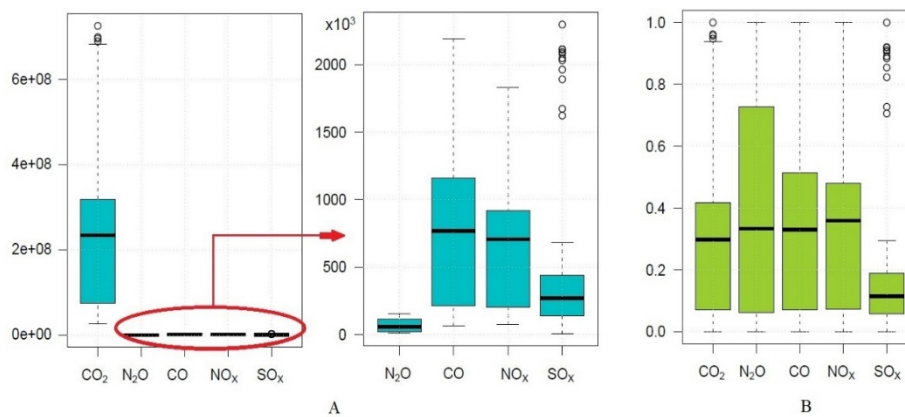


Figure 7. Boxplot of (A) original dataset and (B) normalized dataset

Below, the impacts of each input variable on the target variable are presented.

#### **Effect of Nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ):**

$\text{NO}_x$  is a powerful greenhouse gas that is produced during fossil fuel combustion and biomass burning. In the troposphere,  $\text{NO}_2$  is the main source that provides the oxygen atoms necessary for  $\text{O}_3$  formation.  $\text{NO}_2$  is broken down into  $\text{NO}$  and oxygen atoms by sunlight. Then the oxygen atom combines with the oxygen molecule to form  $\text{O}_3$ . Therefore, it is expected that there will be a strong correlation between  $\text{NO}_x$  and  $\text{O}_3$ . Figure 6 shows that  $\text{NO}_x$  exhibits a strong influence on  $\text{O}_3$ , with a correlation of 0.984. Figure 8 illustrates the scatter diagram of  $\text{NO}_x$  versus  $\text{O}_3$  and includes the fitted linear regression model. The result of the predictive model for the dataset is  $\text{O}_3 = 1.9405 * \text{NO}_x + 88.652$ . The regression function's slope indicates that a unit increase in  $\text{NO}_x$  is associated with a rise of 1.9405 thousand tonnes in  $\text{O}_3$ . It is seen that when  $\text{NO}_x$  increases,



O<sub>3</sub> concentration also increases.

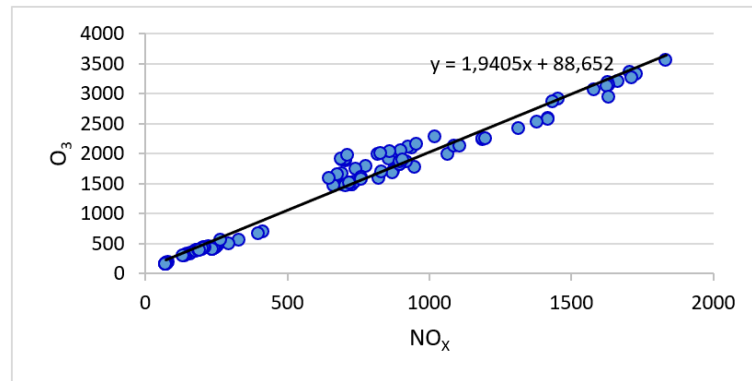


Figure 8. Scatter diagram of NO<sub>x</sub> vs. O<sub>3</sub> in thousand tones

#### **Effect of Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>):**

CO<sub>2</sub>, a major greenhouse gas, is emitted by both human activities like deforestation and burning fossil fuels, and natural processes including respiration and volcanic eruptions. The second most effective factor for the formation of O<sub>3</sub> is CO<sub>2</sub> with a correlation coefficient of 0.954 (Figure 6). Figure 9 shows the scatter diagram and the linear regression model that fits the data of CO<sub>2</sub> vs. O<sub>3</sub>. The result of the predictive model for the dataset is  $O_3 = 0.005 * CO_2 + 234.4$ . The slope of the function shows that the unit increase in CO<sub>2</sub> corresponds to an increase in O<sub>3</sub> of 0.0005 thousand tones. When all other variables are held constant, the performance is improved with the presence of CO<sub>2</sub>.

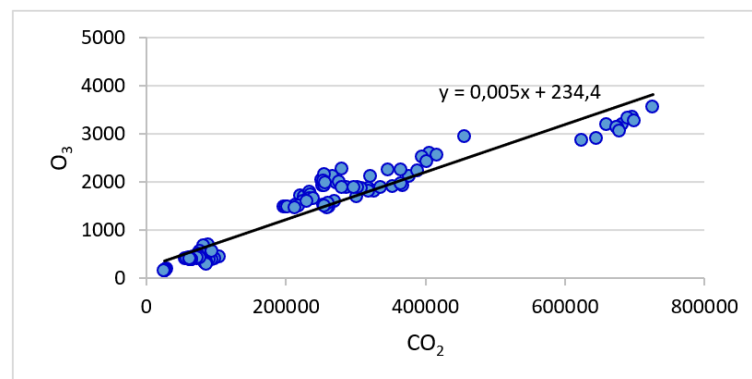
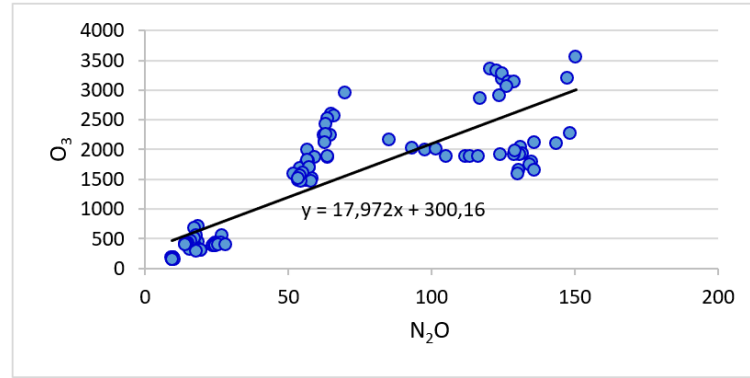


Figure 9. Scatter diagram of CO<sub>2</sub> vs. O<sub>3</sub> in thousand tones

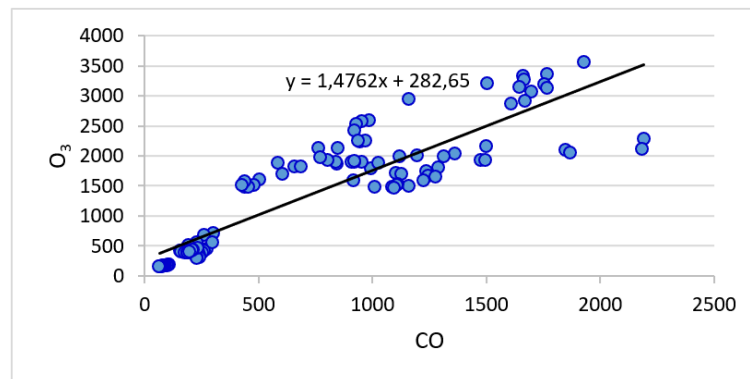
#### **Effect of Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O):**

N<sub>2</sub>O is a substantial contributor to global warming as a greenhouse gas. When considered per molecule over 100 years, nitrous oxide has approximately 265 times the heat-trapping capacity of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. However, due to its lower concentration, its overall contribution to the greenhouse effect is less than one-third that of CO<sub>2</sub>. Nitrous oxide is emitted as a by-product of burning fossil fuels, though the quantity released varies depending on the type of fuel used. The linear relationship between N<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub>, shows another high correlation of 0.844 with ozone, as seen in Figure 10. The result of the predictive model for the dataset is  $O_3 = 17.972 * N_2O + 300.16$ .

Figure 10. Scatter diagram of N<sub>2</sub>O vs. O<sub>3</sub> in thousand tones

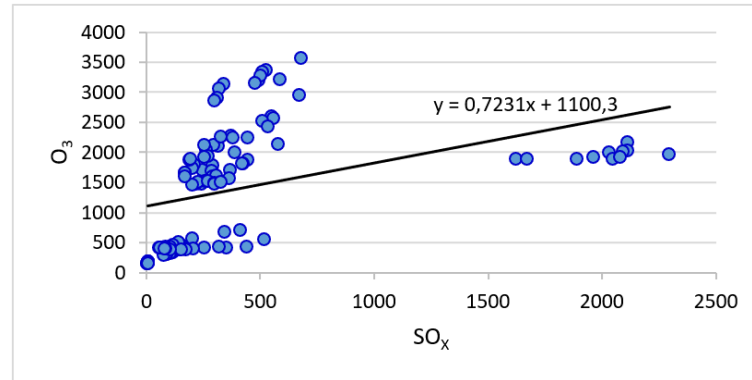
### Effect of Carbon monoxide (CO):

CO is a colorless, odorless, tasteless, flammable gas that results from the incomplete combustion of carbon. CO could play roles with potential impacts on climate change. It indirectly influences radiative forcing by increasing the concentrations of direct greenhouse gases like methane and tropospheric ozone. Natural atmospheric processes lead to the oxidation of CO to carbon dioxide and ozone [49]. This variable shows another high correlation of 0.886 with O<sub>3</sub>. The result of the predictive model for the dataset is  $O_3 = 1.4762 * CO + 282.65$ . The linear relationship between CO and O<sub>3</sub> is shown in Figure 11.

Figure 11. Scatter diagram of CO vs. O<sub>3</sub> in thousand tones

### Effect of Sulfur Oxides (SO<sub>x</sub>):

SO<sub>x</sub>, which stands for compounds composed of sulfur and oxygen molecules. The main form found in the lower atmosphere is sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>). It is a colorless gas that can be detected at concentrations ranging from 1,000 to 3,000 µg/m<sup>3</sup> due to its distinct odor and taste. The majority of sulfur dioxide is generated by burning fuels containing sulfur or by roasting metal sulfide ores, while natural sources like volcanoes also contribute to sulfur dioxide emissions, accounting for 35-65% of the total. In comparison to other variables in the dataset, SO<sub>x</sub> show the weakest correlation with O<sub>3</sub> (0.41). Figure 12 shows the scatter diagram and the linear regression model that fits the data of SO<sub>x</sub> vs. O<sub>3</sub>. The result of the predictive model for the dataset is  $O_3 = 0.7231 * SO_x + 1100.3$ . The slope of the regression function shows that the unit increase in SO<sub>x</sub> corresponds to an increase of 0.7231 thousand tones in O<sub>3</sub>. From the correlation value and as seen in Figure 12, SO<sub>x</sub> is not self-sufficient for estimation.

Figure 12. Scatter diagram of SO<sub>x</sub> vs. O<sub>3</sub> in thousand tones

Ozone concentration was estimated with different artificial intelligence regression methods and the prediction performances of these models were compared to each other in Table 3. Since the dataset does not have a normal distribution, the data were normalized with the min-max normalization technique. The original dataset and the normalized dataset estimations were made separately, and the results obtained are presented in comparison in Table 3.

Table 3. Comparison of the prediction results of the models for the original and normalized dataset

Method	Original Data				Normalized Data			
	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	RAE (%)	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	RAE (%)
LR	0.9984	42.266	54.586	4.962	0.9984	0.0124	0.0160	4.962
MLP	0.9990	34.618	44.356	4.064	0.9990	0.0102	0.0130	4.064
SVR	0.9983	42.241	56.889	4.959	0.9983	0.0124	0.0167	4.946
FKNN	0.9967	46.576	80.735	5.467	0.9967	0.0137	0.0237	5.467
KNN	0.9957	54.663	90.653	6.417	0.9957	0.0160	0.0266	6.417
WKNN	0.9962	48.906	85.676	5.741	0.9967	0.0137	0.0237	5.467
RFR	0.9972	46.620	72.764	5.473	0.9973	0.0135	0.0212	5.385
Bagging-MLP	<b>0.9994</b>	<b>24.668</b>	<b>33.846</b>	<b>2.896</b>	<b>0.9994</b>	<b>0.0072</b>	<b>0.0099</b>	<b>2.896</b>
Bagging-SVR	0.9984	43.016	55.544	5.049	0.9983	0.0125	0.0169	5.007

Table 4 presents the predicted and actual ozone values for the Bagging-MLP method, which outperforms other methods. The study employed the CV technique, and it provides separate data for actual and estimated ozone values (thousand tons) as well as errors for each iteration. When Table 4 is examined, it is seen that the Ozone values estimated by the Bagging with MLP method are quite close to the actual and therefore the estimation errors are quite low.

Table 4. Actual and predicted values for each CV iteration of Bagging-MLP

Iteration 1			Iteration 2			Iteration 3			Iteration 4			Iteration 5		
Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error
561.8	598.2	36.3	412.7	411.5	-1.3	670.9	678.0	7.0	2095.4	2105.0	9.6	2862.0	2930.0	68.1
1589.0	1614.9	25.9	2120.0	2086.5	-33.5	3563.1	3446.2	-116.9	1479.6	1439.3	-40.3	422.6	433.2	10.6
1592.6	1603.7	11.1	1699.4	1691.3	-8.2	2046.3	2014.2	-32.1	3133.6	3156.5	22.9	405.8	415.4	9.6
3359.9	3252.6	-107.2	2158.7	2149.8	-8.9	175.2	155.9	-19.3	2595.7	2597.5	1.9	2118.0	2126.0	8.0
1462.6	1396.2	-66.5	295.0	323.0	28.0	380.2	380.7	0.5	323.4	336.5	13.2	2254.9	2249.0	-5.9
2276.7	2280.2	3.5	186.5	156.6	-29.8	169.7	155.2	-14.5	1817.8	1815.6	-2.2	452.9	471.5	18.6
1989.7	1982.3	-7.4	413.7	414.5	0.8	172.9	156.7	-16.2	1915.7	1968.1	52.4	3189.1	3209.1	19.9
557.6	561.8	4.2	2028.5	2030.4	2.0	1515.5	1481.2	-34.3	177.8	152.6	-25.2	1482.6	1465.0	-17.6
394.1	394.3	0.2	163.9	143.4	-20.5	388.6	410.4	21.9	3141.0	3178.0	37.0	702.0	724.8	22.8
378.6	384.1	5.5	158.9	140.9	-18.0	334.3	357.5	23.2	503.5	525.4	21.9	2908.6	2984.2	75.5
1739.6	1755.2	15.6	1889.2	1851.0	-38.2	1884.8	1831.1	-53.8	173.9	154.2	-19.6	156.6	143.0	-13.6
Iteration 6			Iteration 7			Iteration 8			Iteration 9			Iteration 10		
Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error	Actual	Predicted	Error
1815.1	1811.3	-3.8	464.0	466.2	2.2	1508.9	1468.8	-40.2	1476.6	1484.0	7.4	1891.6	1880.2	-11.4
1471.8	1441.6	-30.1	1508.4	1454.8	-53.5	1487.7	1465.7	-22.0	1872.5	1850.7	-21.8	1796.6	1795.3	-1.3
3272.1	3261.1	-11.0	2008.4	2032.7	24.3	340.9	361.7	20.8	2240.8	2315.7	74.9	395.6	400.2	4.6
424.4	414.2	-10.2	389.2	378.2	-11.0	1651.4	1670.3	18.9	1567.1	1534.2	-32.9	1707.0	1702.9	-4.1
1659.6	1668.6	9.1	155.2	142.6	-12.6	2424.7	2468.4	43.7	393.0	391.9	-1.1	1892.0	1818.2	-73.9
1918.2	1932.3	14.2	434.0	440.7	6.7	384.1	380.9	-3.2	1521.5	1531.7	10.2	1781.0	1803.8	22.9
416.6	393.4	-23.3	1929.9	1949.8	20.0	1892.7	1798.2	-94.4	304.5	333.4	28.9	1687.5	1703.1	15.7
2521.3	2520.4	-0.8	2126.4	2164.2	37.8	2247.5	2269.1	21.5	2570.9	2627.9	57.0	1918.6	1983.7	65.1
1871.1	1802.4	-68.7	154.9	140.3	-14.6	412.6	418.3	5.7	1603.9	1553.9	-50.0	3062.8	3099.6	36.8
3204.7	3241.3	36.7	434.3	419.0	-15.3	311.6	342.6	31.0	1987.8	2039.1	51.3	431.2	426.6	-4.6
1971.8	1986.9	15.1	415.8	420.7	4.8	411.0	421.4	10.4	2949.2	2931.0	-18.2	3325.3	3272.1	-53.3

### 3. Conclusion and Discussion

In this work, the temporal variation of the most important air pollutant, O<sub>3</sub>, was examined, and the relationship of O<sub>3</sub> components with other air pollutants was investigated, to model these pollutants using various artificial intelligence methods. The findings obtained in the study are summarized below.

A strong correlation of 0.956 is observed between NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub>, which is highest correlation among the input variables. Also, the highest correlation with the target variable (O<sub>3</sub>) is observed with NO<sub>x</sub> (0.984). A high and significant correlation is also observed with CO<sub>2</sub> (0.954), N<sub>2</sub>O (0.844), and CO (0.886) with the target variable (O<sub>3</sub>). From Figure 6, it can be observed that SO<sub>x</sub> has a relatively weak correlation (0.41) with O<sub>3</sub>. However, this level of correlation is still adequate for individual estimation. The order of correlations of the data set with O<sub>3</sub> was NO<sub>x</sub> > CO<sub>2</sub> > CO > N<sub>2</sub>O > SO<sub>x</sub>.

When reviewing the literature on the subject, it becomes apparent that the application of machine learning algorithms in air pollution studies largely centers around the temporal estimation of air pollutant gas concentrations. In a study by Gao et al. [50], the R<sup>2</sup> value was found to be 0.80 in ozone estimation. Jia et al. [51], tried to predict ozone with artificial neural networks using different model structures in their work. The R<sup>2</sup> values obtained in the study vary between 0.89 and 0.92. They found the correlation coefficients in values ranging from 0.40 to 0.60. Liu et al. [13], tried to predict long-term ozone concentrations using ML algorithms in their work. The R<sup>2</sup> values of the ML model results used in the study ranged from 0.60 to 0.87. Considering these values, it is seen that the statistical results obtained in this study are compatible with the literature (Table 5).

Table 5. Summary and comparison of studies based on predicting ozone concentration

Reference	Study Area	Best Model	R <sup>2</sup>
[36]	Delhi	XGBoost	0.614
[37]	Malaysia, Kuala Lumpur, Selangor	BDT	0.87, 0.88, 0.91
[38]	Saudi Arabia	SVR	0.924
[39]	California	RF	0.84
[40]	Malaya	LR, SVR, GPR, ANN	0.89
[41]	Amman	MLP	0.98
[50]	Hebei	ANN	0.80
[51]	Lanzhou	CANN	0.89 - 0.92
[13]	Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta, Sichuan Basin, Pearl River Delta, Jiangnan Plain, Northeast Plain	XGBoost	0.60 - 0.87
Our study	Czechia, Germany, Greece, Spain, France, Italy, Romania, Switzerland, United Kingdom, Turkey	Bagging-MLP	0.9994

A review of studies in the literature reveals that ozone concentrations have been predicted using different regions, various methods, or distinct features. Consequently, while the findings from these studies may vary, there is a general consensus that artificial intelligence methods have been successful in predicting ozone concentration.

Upon examining the experimental results in this study (Table 3), it becomes evident that the Bagging-MLP method was the most successful in estimating O<sub>3</sub> levels. A comparison between the O<sub>3</sub> values predicted by the proposed Bagging-MLP method and the actual values (Table 4) demonstrates a close alignment between the two. These findings indicate that estimation systems employing the Bagging-MLP method can predict O<sub>3</sub> levels with minimal error.

Estimation performances of the normalized dataset and the original dataset were compared, the error of the SVR, FKNN, RFR, and Bagging-SVR methods for the normalized dataset decreased. However, this decrease is less than 1%. In the Bagging-MLP prediction model, there is no difference in the success of the estimations for O<sub>3</sub> concentration in the original dataset and the normalized dataset, however, the results obtained show that when compared to other regression methods it is the most successful method.

The use of a limited sample size in this study is acknowledged as a limitation. To address this constraint, we employed 10 cross-validation techniques to ensure the reliability of results and mitigate issues such as overfitting. Cross-validation is a validation method that involves dividing the dataset into smaller subsets and training and testing the model on these subsets. This helps improve the model's generalization and reduces misleading results arising from the restricted sample size.

There are many studies in the literature on the distribution of air pollutants in the atmosphere and their relations with each other. For this reason, modeling studies are important in the follow-up of the long-term relationships of air pollutants with each other. The results obtained in this study show that the relationship of ozone with other air pollutants can be successfully predicted by artificial intelligence methods.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] M. O. Andreae and P. J. Crutzen, "Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry," *Science*, vol. 276, no. 5315, pp. 1052-1058, 1997.
- [2] H. K. Ozcan, E. Bilgili, U. Sahin, O. N. Ucan, and C. Bayat, "Modeling of tropospheric ozone concentrations using genetically trained multi-level cellular neural networks," *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 24, no. 5, pp. 907-914, 2007. doi:10.1007/s00376-007-0907-y
- [3] O. P. Tripathi *et al.*, "An assessment of the surface ozone trend in Ireland relevant to air pollution and environmental protection," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 3, no. 3, pp. 341-351, 2012. doi:10.5094/APR.2012.038
- [4] Z. Feng, E. Hu, X. Wang, L. Jiang, and X. Liu, "Ground-level O<sub>3</sub> pollution and its impacts on food crops in China: a review," *Environmental Pollution*, vol. 199, pp. 42-48, 2015. doi:10.1016/j.envpol.2015.01.016

- [5] R. Tang, X. Huang, D. Zhou, H. Wang, J. Xu, and A. Ding, "Global air quality change during the COVID-19 pandemic: Regionally different ozone pollution responses COVID-19: 疫情期间全球空气质量变化: 臭氧响应的区域间差异," *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 14, no. 4, p. 100015, 2021. doi:10.1016/j.aosl.2020.100015
- [6] Y. Ma, B. Ma, H. Jiao, Y. Zhang, J. Xin, and Z. Yu, "An analysis of the effects of weather and air pollution on tropospheric ozone using a generalized additive model in Western China: Lanzhou, Gansu," *Atmospheric Environment*, vol. 224, p. 117342, 2020. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117342
- [7] X. Ren, Z. Mi, and P. G. Georgopoulos, "Comparison of Machine Learning and Land Use Regression for fine scale spatiotemporal estimation of ambient air pollution: Modeling ozone concentrations across the contiguous United States," *Environment International*, vol. 142, p. 105827, 2020. doi:10.1016/j.envint.2020.105827
- [8] X. Yang *et al.*, "Summertime ozone pollution in Sichuan Basin, China: Meteorological conditions, sources and process analysis," *Atmospheric Environment*, vol. 226, p. 117392, 2020. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117392
- [9] A. Yerramilli *et al.*, "Simulation of surface ozone pollution in the Central Gulf Coast region during summer synoptic condition using WRF/Chem air quality model," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 3, no. 1, pp. 55-71, 2012. doi:10.5094/APR.2012.005
- [10] T. Zhang *et al.*, "Modeling the joint impacts of ozone and aerosols on crop yields in China: An air pollution policy scenario analysis," *Atmospheric Environment*, vol. 247, p. 118216, 2021. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118216
- [11] M. Zunckel *et al.*, "Modelled surface ozone over southern Africa during the cross border air pollution impact assessment project," *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, no. 7, pp. 911-924, 2006. doi:10.1016/j.envsoft.2005.04.004
- [12] Y. Fu and A. Tai, "Impact of climate and land cover changes on tropospheric ozone air quality and public health in East Asia between 1980 and 2010," *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15, no. 17, pp. 10093-10106, 2015. doi:10.5194/acp-15-10093-2015
- [13] R. Liu, Z. Ma, Y. Liu, Y. Shao, W. Zhao, and J. Bi, "Spatiotemporal distributions of surface ozone levels in China from 2005 to 2017: A machine learning approach," *Environment international*, vol. 142, p. 105823, 2020. doi:10.1016/j.envint.2020.105823
- [14] S. Amini and S. Mohaghegh, "Application of machine learning and artificial intelligence in proxy modeling for fluid flow in porous media," *Fluids*, vol. 4, no. 3, p. 126, 2019. doi:10.1016/j.envint.2020.105823
- [15] M. Meroni, F. Waldner, L. Seguíni, H. Kerdiles, and F. Rembold, "Yield forecasting with machine learning and small data: what gains for grains?," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 308, 2021. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108555
- [16] B. Dietrich, J. Walther, M. Weigold, and E. Abele, "Machine learning based very short term load forecasting of machine tools," *Applied Energy*, vol. 276, p. 115440, 2020. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115440
- [17] M. Cheng, F. Fang, T. Kinouchi, I. Navon, and C. Pain, "Long lead-time daily and monthly streamflow forecasting using machine learning methods," *Journal of Hydrology*, vol. 590, p. 125376, 2020. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125376
- [18] V. Chandran *et al.*, "Wind power forecasting based on time series model using deep machine learning algorithms," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, 2021. doi:10.1016/j.matpr.2021.03.728
- [19] S. George and A. Dixit, "A machine learning approach for prioritizing groundwater testing for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS)," *Journal of Environmental Management*, vol. 295, p. 113359, 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113359
- [20] L. Nevasalmi, "Forecasting multinomial stock returns using machine learning methods," *The Journal of Finance and Data Science*, vol. 6, pp. 86-106, 2020. doi:10.1016/j.jfds.2020.09.001
- [21] P. Cihan, "Forecasting fully vaccinated people against COVID-19 and examining future vaccination rate for herd immunity in the US, Asia, Europe, Africa, South America, and the World," *Applied Soft Computing*, vol. 111, p. 107708, 2021. doi:10.1016/j.asoc.2021.107708
- [22] P. Cihan, "Fuzzy rule-based system for predicting daily case in covid-19 outbreak," in *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2020: IEEE, pp. 1-4. doi:10.1109/ISMSIT50672.2020.9254714
- [23] P. Cihan, H. Ozel, and H. K. Ozcan, "Modeling of atmospheric particulate matters via artificial intelligence methods," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 193, pp. 1-15, 2021. doi:10.1007/s10661-021-09091-1
- [24] P. Cihan, O. Kalıpsız, and E. Gökçe, "Hayvan Hastalığı Teşhisinde Normalizasyon Tekniklerinin Yapay Sinir Ağı ve Özellik Seçim Performansına Etkisi," *Electronic Turkish Studies*, vol. 12, no. 11, 2017. doi:10.7827/TurkishStudies.11902
- [25] P. Cihan and Z. B. Ozger, "A new heuristic approach for treating missing value: ABCIMP," *Elektronika ir Elektrotehnika*, vol. 25, no. 6, pp. 48-54, 2019. doi:10.5755/j01.eie.25.6.24826

- [26] P. Cihan and Z. B. Ozger, "A new approach for determining SARS-CoV-2 epitopes using machine learning-based in silico methods," *Computational Biology and Chemistry*, vol. 98, p. 107688, 2022. doi:10.1016/j.compbiolchem.2022.107688
- [27] P. Cihan, E. Gokce, and O. Kalipsiz, "A review of machine learning applications in veterinary field," *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi*, vol. 23, no. 4, 2017. doi:10.9775/kvfd.2016.17281
- [28] P. Cihan, "The machine learning approach for predicting the number of intensive care, intubated patients and death: The COVID-19 pandemic in Turkey," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 40, no. 1, pp. 85-94, 2022. doi:10.14744/sigma.2022.00007
- [29] T. F. Cova and A. A. Pais, "Deep learning for deep chemistry: optimizing the prediction of chemical patterns," *Frontiers in chemistry*, vol. 7, p. 809, 2019. doi:10.3389/fchem.2019.00809
- [30] M. Ani, G. Oluyemi, A. Petrovski, and S. Rezaei-Gomari, "Reservoir uncertainty analysis: The trends from probability to algorithms and machine learning," in *SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition*, 2016: OnePetro. doi:10.2118/181049-MS
- [31] P. Cihan and H. Coşkun, "Performance comparison of machine learning models for diabetes prediction," in *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2021: IEEE, pp. 1-4. doi:10.1109/SIU53274.2021.9477824
- [32] P. Cihan, O. Kalipsiz, and E. Gökçe, "Yenidoğan kuzularda bilgisayar destekli tanı," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 26, no. 2, pp. 385-391, 2020. doi:10.5505/pajes.2019.51447
- [33] Z. B. Ozger and P. Cihan, "A novel ensemble fuzzy classification model in SARS-CoV-2 B-cell epitope identification for development of protein-based vaccine," *Applied soft computing*, vol. 116, p. 108280, 2022. doi:10.1016/j.asoc.2021.108280
- [34] P. Cihan, "Impact of the COVID-19 lockdowns on electricity and natural gas consumption in the different industrial zones and forecasting consumption amounts: Turkey case study," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 134, p. 107369, 2022. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107369
- [35] E. E. Ozbas, D. Aksu, A. Ongen, M. A. Aydin, and H. K. Ozcan, "Hydrogen production via biomass gasification, and modeling by supervised machine learning algorithms," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 32, pp. 17260-17268, 2019. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.02.108
- [36] E. K. Juarez and M. R. Petersen, "A comparison of machine learning methods to forecast tropospheric ozone levels in Delhi," *Atmosphere*, vol. 13, no. 1, p. 46, 2021. doi:10.3390/atmos13010046
- [37] E. Jumin *et al.*, "Machine learning versus linear regression modelling approach for accurate ozone concentrations prediction," *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, vol. 14, no. 1, pp. 713-725, 2020. doi:10.1080/19942060.2020.1758792
- [38] Q. Pan, F. Harrou, and Y. Sun, "A comparison of machine learning methods for ozone pollution prediction," *Journal of Big Data*, vol. 10, no. 1, p. 63, 2023. doi:10.1186/s40537-023-00748-x
- [39] W. Wang, X. Liu, J. Bi, and Y. Liu, "A machine learning model to estimate ground-level ozone concentrations in California using TROPOMI data and high-resolution meteorology," *Environment International*, vol. 158, p. 106917, 2022. doi:10.1016/j.envint.2021.106917
- [40] A. Yafouz *et al.*, "Comprehensive comparison of various machine learning algorithms for short-term ozone concentration prediction," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4607-4622, 2022. doi:10.1016/j.aej.2021.10.021
- [41] M. Aljanabi, M. Shkoukani, and M. Hijjawi, "Ground-level ozone prediction using machine learning techniques: A case study in Amman, Jordan," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 17, pp. 667-677, 2020. doi:10.1007/s11633-020-1233-4
- [42] D. T. Bui, Q. P. Nguyen, N.-D. Hoang, and H. Klempe, "A novel fuzzy K-nearest neighbor inference model with differential evolution for spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in a tropical hilly area using GIS," *Landslides*, vol. 14, no. 1, pp. 1-17, 2017. doi:10.1007/s10346-016-0708-4
- [43] M. O. Elish, "A comparative study of fault density prediction in aspect-oriented systems using MLP, RBF, KNN, RT, DENFIS and SVR models," *Artificial Intelligence Review*, vol. 42, no. 4, pp. 695-703, 2014. doi:10.1007/s10462-012-9348-9
- [44] P. Kumar, M. Folk, M. Markus, and J. C. Alameda, *Hydroinformatics: data integrative approaches in computation, analysis, and modeling*. CRC Press, 2005.
- [45] J. Han and M. Kamber, "Data mining concepts and techniques, Morgan Kaufmann Publishers," *San Francisco, CA*, pp. 335-391, 2001.
- [46] L. Breima, "Random Forests. Machine Learning," 2010.

[47] L. Breiman, "Bagging predictors," *Machine learning*, vol. 24, no. 2, pp. 123-140, 1996.

[48] J. D'Haen, D. Van den Poel, and D. Thorleuchter, "Predicting customer profitability during acquisition: Finding the optimal combination of data source and data mining technique," *Expert systems with applications*, vol. 40, no. 6, pp. 2007-2012, 2013.

[49] J. C. W. W. Carole and N. Beale, *Global climate change linkages: acid rain, air quality, and stratospheric ozone*. Springer Science & Business Media, 1989.

[50] S. Gao *et al.*, "Simulation of surface ozone over Hebei province, China using Kolmogorov-Zurbenko and artificial neural network (KZ-ANN) combined model," *Atmospheric Environment*, vol. 261, p. 118599, 2021. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118599

[51] B. Jia, R. Dong, and J. Du, "Ozone concentrations prediction in Lanzhou, China, using chaotic artificial neural network," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 204, p. 104098, 2020. doi:10.1016/j.chemolab.2020.104098

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





# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Time Series Prediction of Temperature Using Seasonal ARIMA and LSTM Models

Hakan Koçak<sup>a</sup>

Submitted: 18.05.2023 Revised: 25.08.2023 Accepted: 29.09.2023 doi:10.30855/gmbd.0705088

#### ABSTRACT

**Keywords:** Time series prediction, monthly mean temperature, ARIMA, SARIMA, LSTM, Autocorrelation Function (ACF), Partial Autocorrelation Function (PACF)

<sup>a</sup> Meteoroloji Genel Müdürlüğü – 06120  
Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-2491-327X  
e mail: hkocak@gmail.com

\*Corresponding author:  
hkocak@gmail.com

Precise quantitative understanding and monitoring of temperature is indispensable due to its tremendous impact on almost every aspect of our lives. This work investigates prediction capabilities of two machine learning techniques, namely Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) and Long Short-Term Memory (LSTM) and compares them in predicting monthly mean temperature time series data for a weather station in Ankara, Türkiye from January 2010 to March 2023. The comparison of forecasting performance was based on mean square error (MSE), root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE). The results showed that both models can capture the variations of time series data. Both models exhibited reasonably good performance in predicting monthly mean temperature, but the ARIMA model gave the least forecast error compared to the LSTM model.

### ARIMA ve LSTM Modelleri ile Sıcaklık Zaman Serileri Tahmini

#### ÖZ

Hava sıcaklığının insan hayatının hemen her alanındaki büyük öneminden dolayı sıcaklığın nicel olarak anlaşılması ve takip edilmesi oldukça elzemdir. Bu çalışmada Ankara'da bulunan bir meteorolojik hava istasyonundan elde edilen Ocak 2010 ila Mart 2023 tarihleri arasındaki gözlem verileri kullanarak Mevsimsel Otoresif Entegre Hareketli Ortalama (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average -SARIMA) ve Uzun Kısa-Vadeli Hafıza Ağları (Long Short-Term Memory-LSTM) makine öğrenmesi metotlarıyla aylık ortalama hava sıcaklığının kestirimi yapılmış ve bu metotların sıcaklık tahmini konusundaki başarıları karşılaştırılarak irdelenmiştir. Modellerin tahmin başarıları Ortalama Karesel Hata (OKH), Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH) performans metrikleri kullanılarak yapılmıştır. Araştırma sonucunda her iki yöntemin de aylık ortalama sıcaklık kestiriminde iyi derecede performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte ARIMA modelinin LSTM modeline göre hata oranının kriter olarak ele alınan üç metrik (OKH, KOKH, OMH) için de daha düşük olduğu, dolayısıyla daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Zaman serileri tahmini, aylık ortalama sıcaklık, ARIMA, SARIMA, LSTM, Autocorrelation Function (ACF), Partial Autocorrelation Function (PACF)

## 1. Introduction

Temperature is one of the important climatological parameters as it has direct as well as indirect effect on humans, animals, and plants. Due to climate change which is a result of greenhouse gas emissions due to human activities on earth, we see long-term shifts in temperatures and weather patterns. As a result of climate change, we see more severe and frequent weather events such as storms, flash floods, as well as increased drought, warming oceans, rising sea levels, food shortages, poverty and displacement, and food shortages.

There are many areas where ambient temperature is a key factor including agriculture, energy, water resources management, solar power. Deviations in the temperatures result in more energy demand which can lead to severe stress on the power grids. There is direct effect ambient temperature on growth of crops, crop yield, and water demand for growing crops in agriculture. Temperatures not suitable for the growth of crops can lead to poor yield as well as loss in productivity. Therefore, the importance of temperature remains as an important topic for researchers to conduct studies on it.

This study aims at predicting monthly temperature values based on historical temperature data for a weather station located in the city of Ankara, Türkiye from January 2010 to March 2023 using two time series prediction methodologies, namely Seasonal Integral Moving Average (SARIMA) as well as Short Long-Term Memory (LSTM) and comparing their prediction performances. ARIMA (and its extension SARIMA, which accounts for seasonality in the data), and LSTM models have gained an increasing popularity among researchers for time series analysis in many different areas (For example, see [1, 2, 3, 4, 5]). Thus, these two methodologies were selected for this study in order to assess and compare performances of the popular time-series analysis and forecasting methodologies.

Time series forecasting methods use historical data, analyse it to find recurrent patterns existing in the data. Data that has certain periodical characteristics in it, then used to forecast future events, and occurrences. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), which are of stochastic in nature, have gained quite a popularity as a time series forecasting model. An ARIMA model can be thought of as a different type of regression analysis model which estimates the relationships between a dependent variable and independent variables. LSTM models provide another approach to time series forecasting, which are widely used in various areas. LSTM networks are a variety of recurrent neural networks (RNNs) and used in the field of deep learning. One of the major drawbacks of the RNN networks is that they have short-term memory to retain previous information in the current neuron. To fix this, LSTM models were developed in order to be able to keep information for a longer period of time [1], [4], [6], [7], [8].

Both ARIMA and LSTM methods were applied successfully in a number of studies by various re-searchers to predict meteorological parameters including daily and monthly temperature values. [9] observed mean temperature changes at regional scale in Turkey from 1950 to 1994 using time-series analysis. They found a statistically colling trend at 21 stations, a warming trend at one station and no trend at 36 stations. [10] applied ARIMA model to data of four weather stations for the period of 1990 to 2011 in Iraq. [11] analysed monthly mean temperature in Nanjing, China. They used monthly mean temperature from 1951 to 2014 as the training set and data between 2015-2017 as the testing set and developed an ARIMA model for their study.

[7] used both Recurrent Neural networks (RNN) and LSTM methodologies to predict daily temperature and classify them into five categories namely “Cold”, “Cool”, “Normal”, “Warm” and “Hot” using data from 2000 to 2019. [1] conducted a study of forecasting and modelling daily temperature for 4 European sites of different climatic zones based on data from 1980 to 2010. They used SARIMA, the autoregressive integrated moving average (ARIMA) with external regressors and showed the developed model was able to represent the data series and could be used for forecasting of future daily temperature values.

[12] employed a SARIMA model and forecasted mean temperature for the city of Gujarat, India using the past data from period of 1984 to 2015. They tried several models and selected the best model of SARIMA (1, 0, 1) (1, 1, 1) (12) for forecasting temperature values based on the Akaike Information Criterion (ACI). They tested the adequacy of their model and the model diagnostics showed that the model was reliable for forecasting monthly mean temperatures. [13] forecasted daily maximum temperature using three different methods, namely ARIMA, SARIMA and Autoregressive Fractional Integrated Moving Average (ARFIMA) for four different regions in Kerala, India based on data from January 2019 to December 2020. They then

compared the performances of three methods by using mean squared error (MSE), mean squared error (MSE), percentage accuracy (PA) performance metrics. According to the results, all the models performed well and the ARFIMA model performed better than the ARIMA and SARIMA models.

[14] developed an LSTM model for predicting the most significant weather attributes such as precipitation and temperature for a weather station in Sri Lanka. For evaluating model performance, they used Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE) metrics. As a result, they showed that both LSTM models developed for precipitation and temperature prediction performed well and could be used for making accurate predictions of precipitation and temperature.

[15] developed a SARIMA model using daily temperature time series for Memphis, Tennessee based on data from 2016 to 2019. They analysed temperature data for that period for trends and to see the transient variations over time. They used Mann-Kendall (M-K) test to detect time series analysis patterns as a non-parametric technique. Their study revealed an increase trend of 0.003 °F in temperature for almost every day. They also conducted a forecasting using SARIMA method and estimated temperature values of next 50 days. The forecast also showed an increasing trend for the location. [16] predicted monthly mean minimum and maximum temperatures for the Bhagirathi River basin in India using a seasonal ARIMA model based on data for the period between 2001 and 2020. Their results showed that forecast data fits well with the trend in the data.

[17] developed a SARIMA model for time series prediction of temperature in Pune, India using dataset from year from 2009 to 2020. They used the autocorrelation function, and the partial autocorrelation function as well as using standardized residuals in order to find the best fit for the time series for their study and came up with SARIMA (1, 1, 1) (1, 1, 1) (12) model that could best represent their time series data. They performed model diagnostics, and the model was found to be performing well in predicting temperature values. [18] developed and implemented an LSTM model on AWS machine learning platform. They observed that LSTM model gave substantial results with high accuracy among the other weather forecasting techniques.

## 2. Methods

A time-series approach was used in this study to predict monthly mean temperature values for a weather station in Ankara, Türkiye. A time series is a sequence of data instances that occur in successive order over period a period of time, such as hourly, weekly, monthly, or yearly. Time series approach makes it possible to develop an appropriate model which describes inherent structures of the series by rigorously analysing and processing data from past observations. This makes it possible to make future predictions, monitoring and control using the developed model [1].

### 2.1. The study area and Data pre-processing

The data used in this study belong to the Automatic Weather Observation Station (AWOS) which is numbered 17130 and operates as part of Observation Network of the Turkish Meteorological Service and located near the Headquarters of Turkish Meteorological Service in Ankara, Turkey. The location of the meteorological station is shown in Figure 1. It has got geographic coordinates of 39°58'21.0" North and 32°51'50.0 East and the altitude for the station is 883 m. The station is equipped with sensors that measure various meteorological parameters, such as temperature, humidity, precipitation, air pressure, etc. at certain intervals (every second, minute, or hourly, daily, etc.).

The time series data consists of monthly mean temperature readings from the weather station from January 1, 2000, to March 2023 and deemed to represent the local weather in Ankara.

Table 1. Descriptive statistics of temperature data used in the study.

Mean	Std. err.	Median	Mod	Std. Dev.	Kurtosis	Skewness	Min.	Max.
12,85	0,50	12.8	11,2	8,4	-1,22	-0,006	-4.0	28,1

The data was obtained as an Excel file in “.xlsx” format and contains a total of 279 monthly mean temperature measurements for each month between Jan. 2020 and Mar. 2023. Table 1 shows the some of the descriptive statistics for the temperature dataset used in the study. The mean minimum and maximum temperature

values for the temperature dataset are -4.0 and 28.1 respectively. The kurtosis is -1.22 and the skewness is -0.006 for the distribution of the dataset. The kurtosis value being a negative number indicates that data rather has a flat distribution. Skewness being close to zero means that the tails of the distribution are almost symmetrical and don't differ significantly.

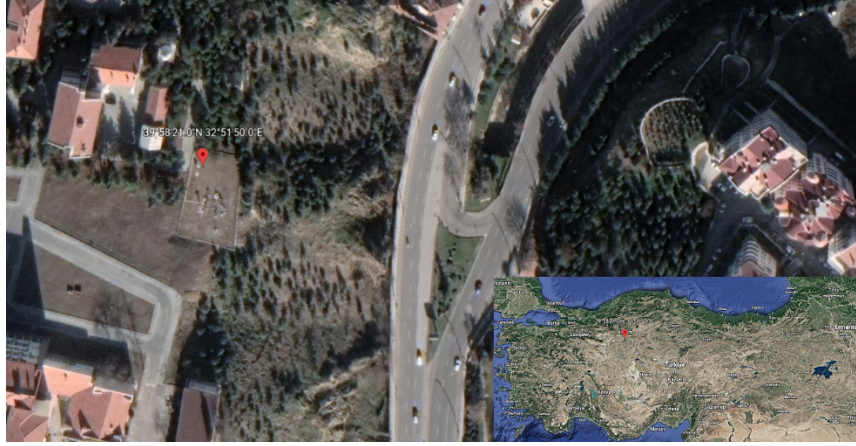


Figure 1. The location of meteorological observation station where the data were obtained from.

A normalization process was carried out before building an LSTM model by scaling all values in the dataset into the range of between 0 and 1. Scaling was not in the case of ARIMA as this is not necessary step for ARIMA models. The dataset then was split into training and testing datasets by reserving 80% of the whole dataset for training and the remaining 20% for the test dataset.

The LSTM and (S)ARIMA models proposed in this study were implemented in Python programming language. A separate Python program was written for developing each of the model. For implementing the SARIMA model, “statsmodels” module, and for implementing the LSTM model the Keras machine learning module was used in the study.

## 2.2. ARIMA

Autoregressive moving average models are used in cases where the output not only depends on the current information but also all the previous information that have arrived over a previous stretch of time. ARIMA models are only applicable to stationary time series data, therefore it is essential to make sure that the time series data is stationary before it is used in ARIMA models. ARIMA models are generally used for two major purposes: to analyse the data set to better understand it and to predict future trends. Autoregressive statistical models, such as ARIMA predict future values based on past values. A very popular use of ARIMA models is predicting future stock market prices. An ARIMA model could be used to predict prices of a stock future prices based on its past values.

ARIMA models consist of three components: AR, I and MA. The “AR” stands for autoregression, and an autoregressive model is a model with a changing variable that regresses on its own prior or lagged values. Such a model predicts future values based on past values. “I” stands for “integrated” and represents the differencing of time series values to make it stationary. If dataset is not stationary it is made stationary by simply replacing data values with difference between data values and previous values. The last component “MA” stands for Moving Average which is a representation of the error of the model as a linear combination of previous forecast errors [19].

ARIMA models require the time series to be stationary, and non-stationary data cannot be used for building an ARIMA model. Thus, the first step for building a ARIMA model is to make sure that data at hand is stationary. The stationarity of the data used in the study was checked using the Augmented Dickey and Fuller (ADF) unit root test. The ACF test is used in order to check whether or not the data has a unit root, which is stated by the null and alternative hypotheses in the test. The test statistics of the Fuller test verified the stationarity of the time series dataset with p-value smaller than 0.01. Additionally, the ACF plot shown in Figure 2 exhibits a sine wave, which is another evidence that the series is indeed stationary.

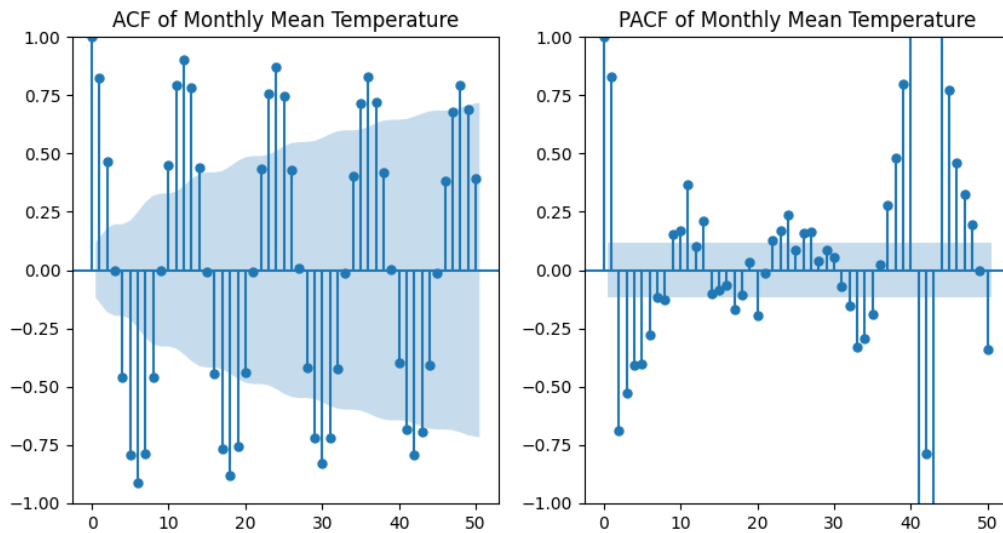


Figure 2. ACF and PACF of monthly mean temperature during Jan. 2000-Mar. 2023. The ACF and PACF graphs were plotted for 50 lags. The ACF graph shows that ACF very slowly tails off towards the end. On the other hand, PACF does not cut off event at lag=50.

As can be seen from the Figure 2, the ACF graph tails off very slowly towards lag=50 while the PACF does not cut off even after lag=50. This suggests that the model is not an AR or a MA model. Thus the “automatic arima” function in a Python module was used in order to find out the best fitting model.

### 2.3 SARIMA

SARIMA, which is short for Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (also known as Seasonal ARIMA) is basically an ARIMA model, which takes into account seasonality in addition to past values. It has three new parameters to represent seasonal terms in ARIMA for seasonal components as well as an additional parameter for the seasonality period. The new hyperparameters are the seasonal counterparts of those existing in ARIMA and specify autoregression (AR), differencing (I) and moving average (MA). The four seasonal elements that are part of a SARIMA are [12], [20]:

- P: Seasonal AR order
- D: Seasonal difference order
- Q: Seasonal MA order
- M: Seasonal period

In order to find out the best performing ARIMA model, automatic arima function, i.e., auto\_arima() in “pmdarima” Python module. The results of “auto\_arima()” function showed that the dataset has seasonality of 12 months, which was an expected result as monthly temperatures follow a similar pattern throughout the year. The best model for the dataset was found as SARIMA (1, 0, 0) × (2, 0, 1) 12 with 12-month seasonality. Since the dataset had seasonality component, this SARIMA model was used in the study for the prediction of temperature values in the test dataset. Residuals were checked for normality and correlation it was found that they exhibit a normal distribution and not correlated as can be seen from the Q-Q plot and the histogram in Figure 3. In order to assess the usability of the model for forecasting a diagnostics test was performed, which showed that the model could be used for prediction.

Table 2. Results of the diagnostics test of the SARIMA (1, 0, 0) × (2, 0, 1) 12 model

	Coef	Std err.	z	P> z	[0.025	0.975]
AR.L1	0.3198	0.062	5.147	0.000	0.198	0.442
AR.S.L12	0.7462	0.073	10.220	0.000	0.603	0.889
AR.S.L24	0.2531	0.073	3.476	0.001	0.110	0.396
MA.S.L12	-	0.060	-	0.000	-	-
	0.8610		14.414		0.978	0.744

Table 2 summarizes the results of SARIMA (1, 0, 0) × (2, 0, 1) 12 model. The 'Coef' column is the weight of

coefficients and shows degree of impact each feature on the time series. The fourth column shows the statistical significance of each feature. As can be seen from the values in that column all values are less than 0.05 and therefore statistically significant.

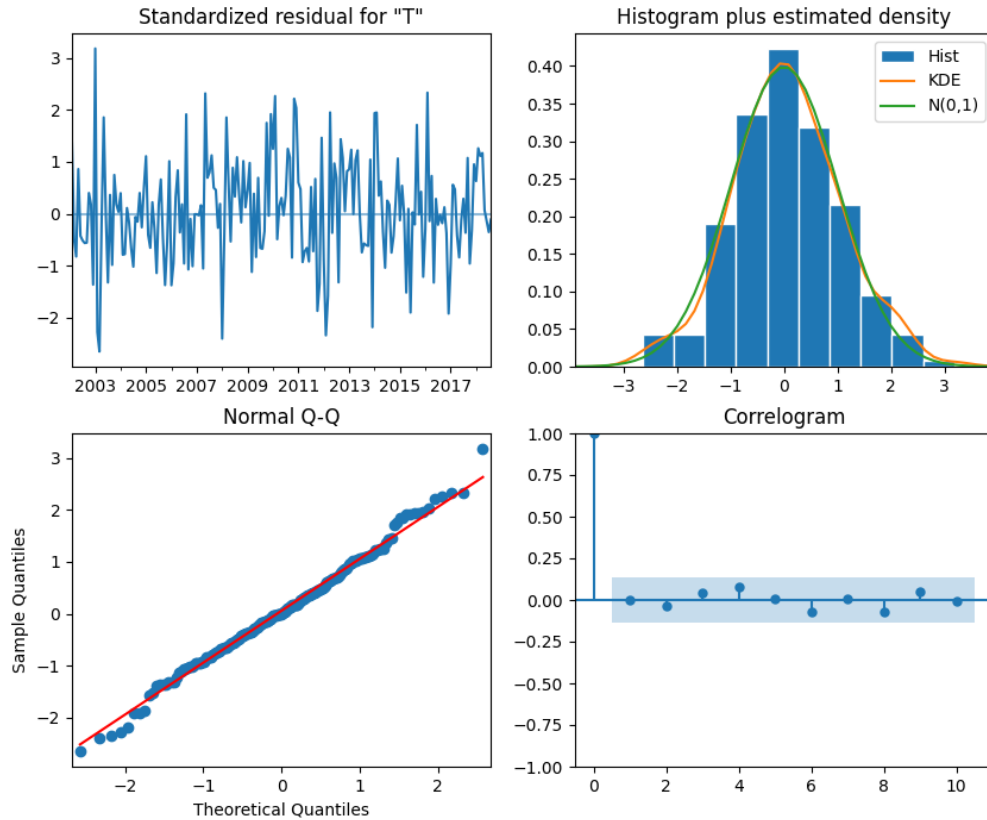


Figure 3. Plots of (a) standardized residual (b) histogram and estimated density (c) Normal Q-Q plot (d) Correlogram

Standard residuals graph shown in Figure 3a appear to be white noise and shows no obvious pattern, suggesting that the model is a good fit for the dataset. The Kernel Density Estimation (KDE) (red curve) shown in Figure 3b seems almost overlapped with the  $N(0, 1)$  (green curve), with 0 mean=0 and standard deviation=1. In the Q-Q plot shown in Figure 3c, the red line represents a normal distribution with mean=0 and standard deviation=1 and the blue dots represent residuals. The blue dots being very close to the red dots showing a normal distribution suggests that the residuals are normally distributed and follow a linear trend. The correlogram shown in Figure 3d the data have a low correlation with the lagged data. All these show that the model fits well to the time series data and can be used for prediction and forecasting.

The selected model was further validated by predicting the monthly mean temperatures in test dataset consisting of temperature values from July 2018 to March 2023 and reproducing the known seasonal patterns in its forecast. This showed that the predicted mean temperature values were the same or very close to actual data and following the same seasonal pattern.

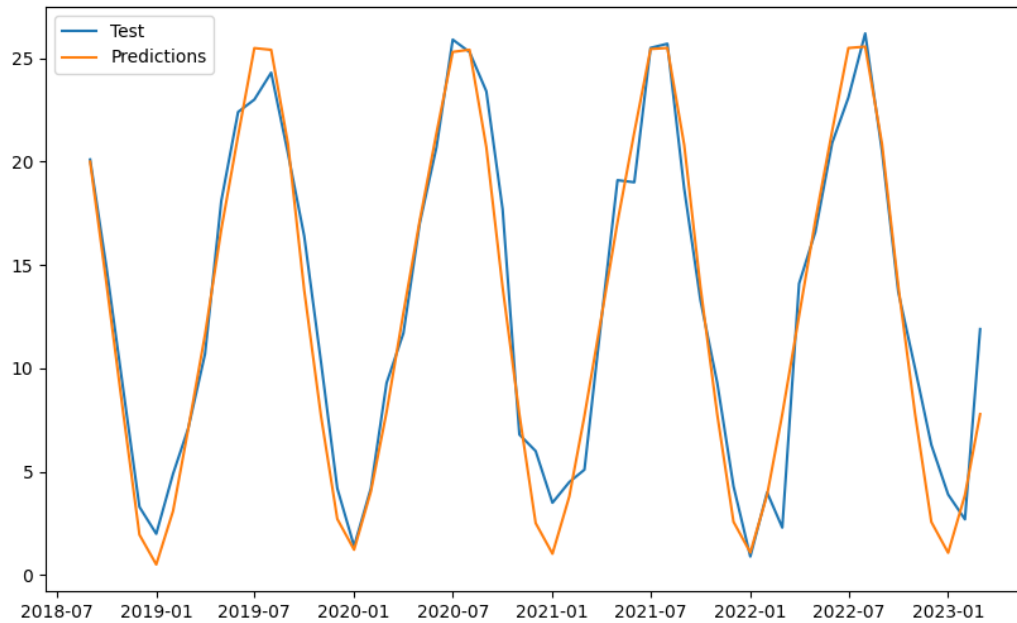


Figure 4. Plot of predicted values together with the actual temperature values using the SARIMA model.

Figure 4 shows actual and predicted temperature values using the SARIMA model in the same plot. From the plot it can clearly be seen that predicted values by the SARIMA model are very close to the actual temperature values and follow a similar pattern.

#### 2.4. Long Short-Term Memory (LSTM)

LSTM networks are a type of recurrent neural network (RNN), which are capable of remembering previous information and using them to learn long-term dependencies. They were first introduced in 1997 by Hochreiter & Schmidhuber and have become a popular methodology for predicting future values based on past data. They produce remarkable good results for a large variety of problems, and mainly used in the field of Deep Learning. The name LSTM refers to the fact that these networks have both short term and long-term memory. The connection weights and biases in the LSTM network change with each episode of training, which constitutes its long-term memory. Likewise, changes in activation patterns with every time-step constitutes its short-term memory. At any particular point in time the output of an LSTM network depends on three factors, namely current cell state, previous output (hidden state) and the current input [21].

LSTM networks have feedback connections, which makes them different from traditional neural networks. This unique feature of LSTM enables them to retain information and process not just process single data points but also process entire sequence of data, making it suitable for domains like speech recognition, machine translation, image recognition, etc. The ability of LSTM to handle lags between subsequent events make them well-suited for classification, processing and predictions problems based on time series data. A sequential model with only 1 input layer with 7 neurons and a dense output layer of 1 neuron was selected as the best performing model for this study.

A typical LSTM unit is composed of four components: a memory cell, an input gate, an output gate and a forget gate. The memory cell maintains its state over time. The cell state runs down the entire chain with only small linear interactions, enabling the information flow along it unchanged. Information can be added or removed through the gate structures, which perform element-wise multiplication by sigmoid ranges between 0 and 1. The gates open and close and store information in analog format [7], [22].

A thorough hyperparameter sensitivity study was done in order to find the best performing LSTM model for the study. A Python program was written which varied number of neurons in the LSTM layers, number of hidden layers and number of dense layers in for loops and the resulting performances of each were recorded for that purpose. And the best performing model with minimum error rate was selected based on this criterion. The resulting best performing model was a sequential model and consisted only of 1 input layer with 7 neurons and a dense output layer. The LSTM model summary for the study is shown in Figure 5. As can be seen from "Output Shape" column of the figure, the selected LSTM model consists of an input layer

with 7 neurons and a dense output layer.

Batch size for the model was set 5 and Adaptive Moment Estimation (ADAM) was used as the optimization algorithm. Mean squared error was used as the loss function of the LSTM algorithm. The number of epochs was set to 10 for training of the model as this yielded least error rate. Increasing number of epochs worsened the performance with increased error rate.

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm_2 (LSTM)	(None, 7)	252
dense_2 (Dense)	(None, 1)	8

Figure 5. The LSTM model summary

Figure 6 shows the time series plot of actual values and predicted values of the monthly temperature data using the LSTM model developed for the study. As with the ARIMA results above, seasonal variations in the dataset can be clearly seen from the figure. It can also be observed from the figure that although the LSTM model was able to capture the internal structure and follow similar pattern, it underestimates the higher temperatures and overestimates lower temperatures. When compared to the ARIMA results plot in Figure 4, the ARIMA model better approximates the dataset and exhibits closer pattern to the actual data than the LSTM model.

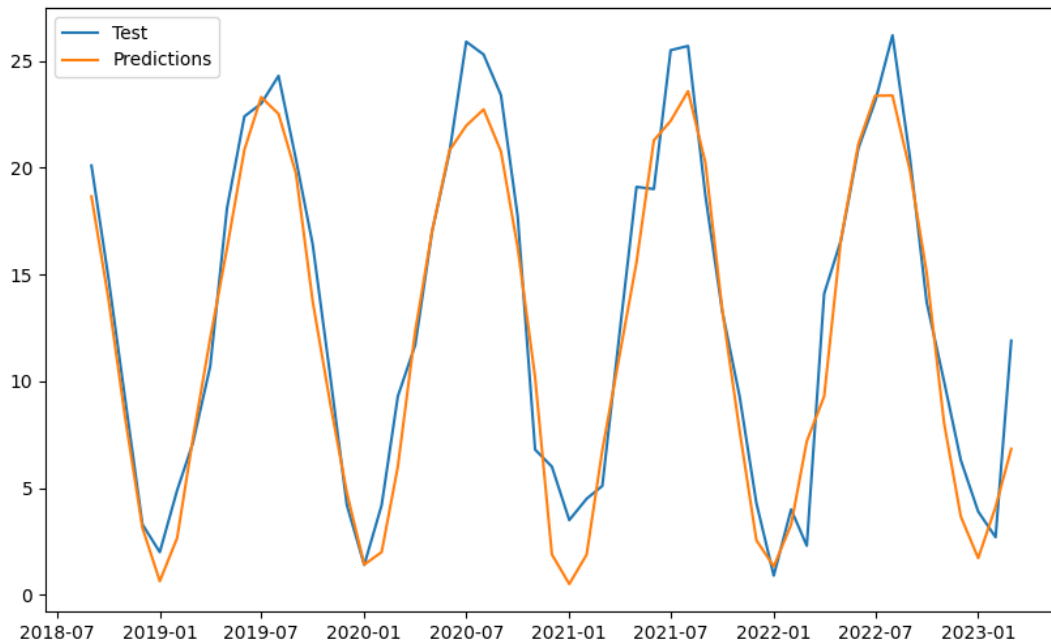


Figure 6. The plot of actual and predicted monthly mean temperature values using the LSTM model.

### 3. Results

In order to evaluate and compare performances three different performance metrics, namely Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Square Error (MSE) were used in the study.

Root Mean Square is the mean of all prediction errors and calculated using the formula below:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \quad (4)$$



RMSE is the root of the MSE, and it is calculated as:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (5)$$

Mean Absolute Error is the absolute mean of all differences between actual and predicted values and calculated using the formula:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|P_i - O_i|) \quad (6)$$

As a result of performance evaluation process, MAE of 1.43 and RMSE of 1.87 for SARIMA model and MAE of 1.69 and RMSE of 2.04 for LSTM model were obtained. The performance results were summarized in Table 3.

Table 3. Results of the performance evaluation of the models

Method	MAE	MSE	RMSE
SARIMA	1.43	3.51	1.87
LSTM	1.69	4.14	2.04

From the Table 3 which summarizes the model results it was concluded that SARIMA model yielded least error prediction of monthly temperatures compared to the LSTM model.

#### 4. Conclusion

This study aimed at predicting monthly temperature values based on historical temperature data for a weather station located in the city of Ankara, Türkiye from January 2010 to March 2023 using two different time series prediction methodologies, namely Seasonal ARIMA (SARIMA) as well as LSTM and their performance results were presented for comparison. The SARIMA and LSTM methodologies used in this study selected based on their popularity and wide use for predicting times series.

As an initial first step, the stationarity of the dataset was tested using the Augmented Dickey and Fuller (ADF) unit root test and the dataset was found to be stationary. This step was necessary as non-stationary data could not be used to build a ARIMA model. The ACF and PACF graphs did not indicate a clear AR, MA or ARIMA model, thus the “automatic arima” function in a Python module was utilized in order to come up with best fitting model. The process revealed the inherent seasonality in the dataset and yielded the model of SARIMA (1, 0, 0) × (2, 0, 1) 12 with 12-month seasonality as the best fitting model to the dataset. Normality check was performed for the normality of residuals, and they were found to be normally distributed and not correlated with each other. Further, a diagnostics test was performed to assess the usability of the model for prediction which verified the usability of the model for that purpose.

The selected model was further validated by predicting the monthly mean temperatures in test dataset consisting of temperature values from July 2018 to March 2023 and reproducing the known seasonal patterns in its forecast. This showed that the predicted mean temperature values were identical or very close to actual data and following the same seasonal pattern.

The selected model then applied to the test dataset consisting of temperature values from July 2018 to March 2023. This showed very close temperature values to the actual values in the test dataset and similar seasonal pattern as could be seen in the plots, validating that the model was able to represent the dataset and could be used as a forecasting tool for future monthly mean temperatures.

For the second method, in which an LSTM network was used, a thorough study was done in order to find the best performing LSTM model by varying number of LSTM, hidden and dense layers as well as number of

neurons in each one of them through a Python program and the best performing LSTM model was selected based on the minimum RMSE metric for predicting monthly mean temperatures. The LSTM model was then applied to the test dataset to predict temperature values from July 2010 to March 2023. As with the SARIMA model, LSTM model was also exhibited good fit to the dataset with very close values to the actual temperature values. However, as can be seen from the Figure 6, although the plots of actual and predicted values follow similar pattern, the model mostly underestimates highest values and sometimes overestimates lowest values.

Finally, performance metrics of MSE, RMSE, and MAE were calculated to make prediction performance comparison between for the models. For the SARIMA model the MSE, RMSE and MAE were 1.43, 3.51 and 1.87 and 1.69, 4.14 and 2.04 for the LSTM model respectively. According to these results it can be concluded that both methodologies yielded similar good performances in predicting monthly mean temperatures, but the performance of the SARIMA model was slightly better than that of LSTM model. This could be due to the size of the dataset used for this study as the dataset consisted of only 279 temperature measurements and only 80% (N=223) of the entire dataset was used for building the LSTM model. LSTMs are a special type of Artificial Neural Networks (ANN), thus as with any kind of ANN, training the LSTM model with larger datasets would in general lead to a better model. Therefore, experiments with larger dataset are needed in order to test the superiority of the SARIMA model over the LSTM model in predicting monthly mean temperatures.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] M. Murat, I. Malinowska, M. Gos, J. Krzyszczyk, "Forecasting daily meteorological time series using ARIMA and regression models," *International Agrophysics*, vol. 32, no. 2, pp. 253–264, 2018. doi:10.1515/intag-2017-0007
- [2] S. Siami-Namini, N. Tavakoli and A. Siami Namin, "A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series," in *Proc. of the 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 17-20 Dec. 2018, Orlando, FL, USA* [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 7 Agu. 2023]
- [3] P. Liu, "Time Series Forecasting Based on ARIMA and LSTM", in *Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2022)*, 2022, pp. 1203–1208.
- [4] A. Parasyris, G. Alexandrakis, G.V. Kozyrakis, K. Spanoudaki, N.A. Kampanis, "Predicting Meteorological Variables on Local Level with SARIMA, LSTM and Hybrid Techniques", *Atmosphere 2022*, vol. 13, no. 878, 2022. doi:10.3390/atmos13060878
- [5] K. Tadesse, O. Megersa, and M. Dinka, "The SARIMA model-based monthly rainfall forecasting for the Turksvygbult Station at the Magoebaskloof Dam in South Africa", *Journal of Water and Land Development*, vol. 53, pp. 100-107, 2022. doi:10.24425/jwld.2022.140785
- [6] C. Chatfield, *The analysis of time series: An introduction, 6th ed.* London, UK: Chapman & Hall/CRC, 2004.
- [7] I. S. Rahayu, E. C. Djamal, R. Ilyas, "Daily Temperature Prediction Using Recurrent Neural Networks and Long-Short Term Memory", in *Proceedings of the 5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, August 10 – 14, 2020, Detroit, Michigan, USA* [Online]. Available: ieomsociety.org, <http://www.ieomsociety.org>. [Accessed: 10 Apr. 2023].
- [8] J. Choi, D. C. Roberts, and E. Lee, "Forecasting oil production in North Dakota using the seasonal autoregressive integrated moving average (S-ARIMA)", *Natural Resources*, vol. 6, no. 1, pp. 16–26, 2015.
- [9] A. Can and A. T. Atımtay, "Time series analysis of mean temperature data in Turkey," *Applied Time Series*, vol. 4, no. 20, 2002.
- [10] S. Zakaria, N. Al-Ansari, S. Knutsson, and T. Al-Badrany, "ARIMA models for weekly rainfall in the semi-arid Sinjar district at Iraq," *Journal of Earth Science Geotechnical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 25-55, 2012.
- [11] P. Chen, A. Niu, D. Liu, W. Jiang, and B. Ma, "Time series forecasting of temperatures using SARIMA: An example from Nanjing," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 394, 2018. doi:10.1088/1757- 899X/394/5/052024
- [12] D. K. Dwivedi, G. R. Sharma and S. S. Wandre, "Forecasting mean temperature using SARIMA Model for Junagadh City of Gujarat," *IJASR*, vol. 7, no. 4, pp. 183–194, Jan. 2017. doi:10.24247/ijasraug201723
- [13] J. Asha, S. S. Kumar, and S. Rishidas, 'Forecasting performance comparison of daily maximum temperature using ARMA based methods', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1921, no. 1, p. 012041, May 2021. doi:10.1088/1742-6596/1921/1/012041

- [14] K. M. S. A. Hennayake, R. Dinalankara, and D. Y. Mudunkotuwa, "Machine Learning Based Weather Prediction Model for Short Term Weather Prediction in Sri Lanka," *International Journal of Multidisciplinary Studies (IJMS)*, vol. 9, no. 1, 2022. doi:10.4038/ijms.v9i1.159
- [15] K. N. Mitu, K. Hasan, "Modelling and Forecasting Daily Temperature Time Series in the Memphis, Tennessee," *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, vol. 9, no. 6, pp. 214-221, Dec. 2021. doi:10.11648/j.ijema.20210906.17
- [16] T. Dimri, S. Ahmad, and M. Sharif, "Time series analysis of climate variables using seasonal ARIMA approach," *Journal of Earth System Science volume*, vol. 129, 2020. doi:10.1007/s12040-020-01408-x
- [17] A. Gangshetty, G. Kaur, U. S. Malunje, "Time Series Prediction of Temperature in Pune using Seasonal ARIMA Model," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 10, Issue 11, November-2021.
- [18] D. T. Hoang, Pr. L. Yang, L. D. P. Cuong, P. D. Trung, N. H. Tu, L. V. Truong, T. T. Hien, V. T. Nha, "Weather prediction based on LSTM model implemented AWS Machine Learning Platform," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 8, no. V, May 2020. doi:10.22214/ijraset.2020.5046
- [19] "What Is ARIMA Modeling?," *Master's in Data Science*, edX.org, 2023. [Online]. Available: <https://www.mastersindatascience.org/learning/statistics-data-science/what-is-arima-modeling>. [Accessed: Apr. 10, 2023]
- [20] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, "Forecasting: principles and practice", 2013.
- [21] R. Dolphin. "LSTM Networks | A Detailed Explanation | A Comprehensive Introduction to LSTMs". *Towards Data Science*, medium.com, Oct 21, 2020. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/lstm-networks-a-detailed-explanation-8fae6aefc7f9>. [Accessed: May 11, 2023].
- [22] A. I. Arasu, M. Modani, and N. R. Vadlamani, "Application of Machine Learning Techniques in Temperature Forecast", in *Proc. of the 21st IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 2022, Nassau, Bahamas, pp. 513-518, doi:10.1109/ICMLA55696.2022.00083

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## The Examination of Composite Materials as Alternatives to Superalloys in Aircraft Engines

Serhat Yudar<sup>a</sup>

Submitted: 02.10.2023 Revised: 06.11.2023 Accepted: 06.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705089

### ABSTRACT

**Keywords:** Superalloys, Ceramic Composite Materials, Polymer Composite Materials, Metal Composite Materials, Aircraft Engine Materials

<sup>a</sup>\* Eskişehir Osmangazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dept. of Mechanical Engineering 26040 -Eskişehir, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-4192-8759  
e mail: serhatyudar@gmail.com

\*Corresponding author:  
serhatyudar@gmail.com

In contemporary aviation, superalloy materials are frequently preferred in areas of aircraft engines where high heat and temperature resistance are crucial. Superalloys are considered ideal for use in aircraft engines due to their high thermal resistance and strength values. However, the processing of superalloys is quite expensive, and they can be susceptible to corrosion at high temperatures. To prevent corrosion at elevated temperatures, a coating process with suitable materials is applied to superalloy materials. Research efforts aimed at reducing the weight of aircraft and enhancing their performance have focused on the use of ceramic, metal, and plastic composites with lower density in aircraft engines. Composite materials are lighter than superalloys, and they can contribute to a reduction in the total weight of aircraft by up to 10%. This study aims to create a resource by investigating composite materials that could be used instead of superalloys in aircraft engines.

## Uçak Motorlarında Süperalaşım Yeri- Kullanılabilecek Olan Kompozit Malzemelerin İncelenmesi

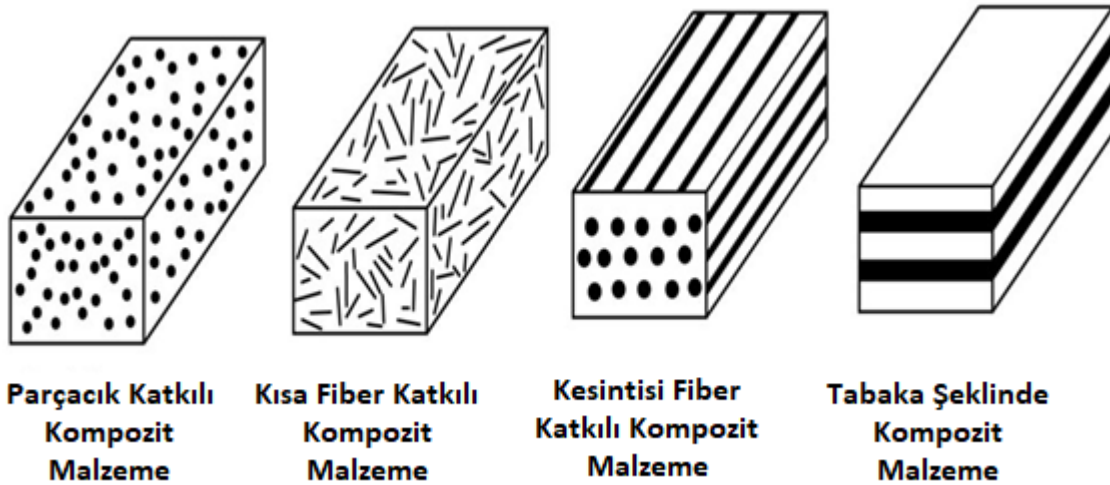
### ÖZ

Günümüzde, uçak motorlarında yüksek ısı ve sıcaklık dayanımı gerektiren bölgelerde süperalaşım malzemeler sıkça tercih edilmektedir. Süperalaşım malzemeleri, yüksek ısı dayanımı ve mukavemet değerleri sayesinde uçak motorlarında kullanılmak için idealdir. Ancak, süperalaşımın işlenmesi oldukça pahalıdır ve yüksek sıcaklıklarda korozyona uğrayarak hasar görebilmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki korozyonu önleyebilmek için süperalaşım malzemelere uygun malzemelerle kaplama işlemi uygulanmaktadır. Uçakların hafifletilmesi ve performanslarının artırılması amaçlarıyla gerçekleştirilen araştırmalarla, uçak motorlarında yoğunluğu daha düşük seramik, metal ve plastik kompozitlerin kullanımına odaklanılmaktadır. Kompozit malzemeler, süperalaşımından daha hafif olup uçakların toplam ağırlığında %10'a kadar azalma sağlanabilmektedir. Çalışmada uçak motorlarında süperalaşım yerine kullanılabilecek olan kompozit malzemeler araştırılarak kaynak oluşturulması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:**  
Süperalaşım, Seramik Kompozit Malzemeler, Polimer Kompozit Malzemeler, Metal Kompozit Malzemeler, Uçak Motor Malzemeleri

## 1. Giriş (Introduction)

Kompozit malzemeler (Şekil 1) iki veya daha fazla malzemenin kendi özelliklerini kaybetmeden birbiri içerisine katılmasıyla elde edilip birbiriyle birleşik oluşturmamaktadır. Kompozit malzeme içerisinde yer alan hacimce fazla olan yapı matris olarak adlandırılırken, içerisine ilave edilen malzemeye ise takviye denilmektedir. Takviyeler fiber, partikül veya tabaka şeklinde olmaktadır. Genellikle fiber ve partikül takviyeleri kompozit malzemeler içerisinde sıkça kullanılmaktadır. Örneğin bir kompozit malzemenin ana malzemesi polimer, takviye malzemesi cam elyaf ise polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemeler matris malzemesine göre üçe ayrılıp metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemeler şeklinde isimlendirilmektedir [1-4].



Şekil 1. Kompozit Malzemelerin Katkı Şekline Göre İsimlendirilmesi (Naming of Composite Materials According to Their Reinforcement Method)

Özellikle son yıllarda çeşitli havacılık ve-uzay projelerinde kompozit malzemelerin kullanımlarının artmasıyla kompozit malzemelere olan güven artmış ve havacılık ve-uzay projelerde birincil yapısal malzeme olarak kullanımlarının önü açılmıştır. Alüminyum ve polimer matrisli kompozit malzemeler uçak yapılarında en sık kullanılan malzemelerdir. 1990'lardan bu yana kompozitlerin sivil ve askeri hava taşıtlarında kullanımı hızla artmış ve kompozitler özellikle uçak gövdelerinde alüminyum malzemesinin yerine tercih edilen bir malzeme olmuştur [1-4].

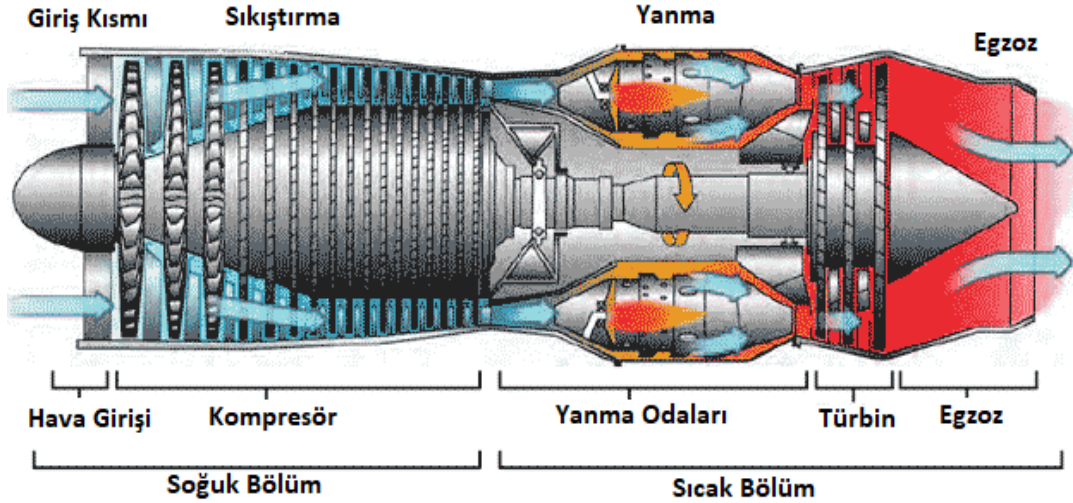
Günümüzde uçak motorlarında kullanılan süperalaşımalar yerine de kompozitlerin kullanılması için çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Kompozitlerin kullanılmasının ana nedenleri ağırlık azaltmak, belirli sertlik ve mukavemeti arttırmak, yorulma ömrünü uzatmak, termal dayanımları iyileştirmek ve korozyon problemlerini en aza indirmektir. Kompozit malzemelerde doğal yöntemlerle elde edilmiş veya kimyasal olarak yapılmış şekilde iki çeşit takviye malzemesi bulunabilmektedir. Doğal elyaf kompozitler, insan yapımı elyaf kompozitlere göre düşük maliyet, hafiflik, yüksek spesifik mekanik özellikler, tehlikesiz yapı, çevre dostu olma, yenilenebilirlik vb. gibi çeşitli avantajlar sunar ve sonuç olarak havacılık sanayi dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel sektörlerde kullanımları oldukça fazladır [1-4].

Çalışmanın amacı, uçak motorlarında süperalaşımalar yerine kullanılacak olan kompozit malzemeleri araştırarak uçak motorlarında ağırlık hafifletilmesinin önünü açmak ve süperalaşımalar dışında termal dayanımı ve mukavemet değerleri yüksek olan kompozit malzemeleri belirleyerek bir derleme oluşturulmasıdır.

## 2. Uçak Motorları (Aircraft Engines)

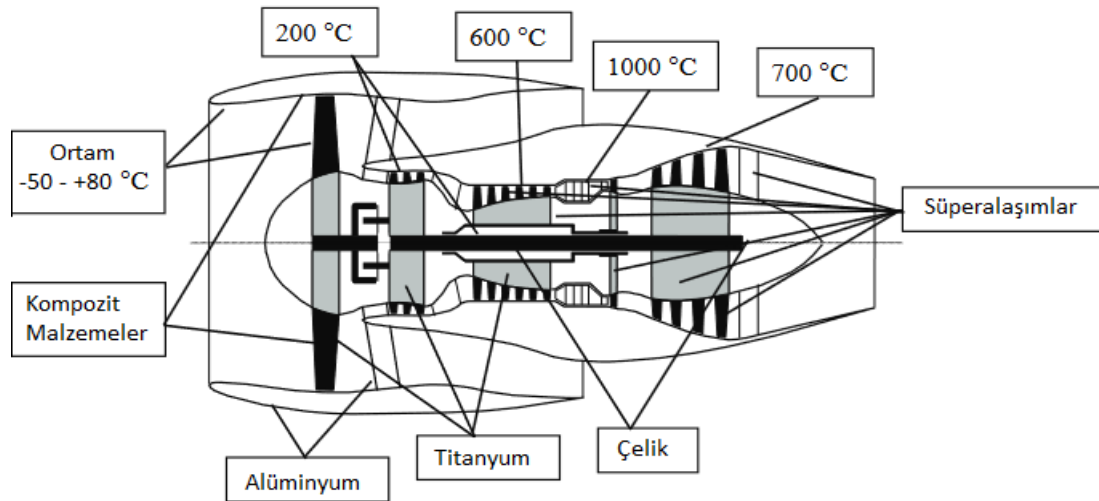
Uçak motorları fan, kompresör, yanma odası ve türbin kısımlarından (Şekil 2) oluşmaktadır. Uçak motorlarında yer alan fan, havanın motor içerisinde ilerlemesine yardımcı olup ilerleyen hava kompresör yardımıyla sıkıştırılarak belli bir basınca ulaşması sağlanmaktadır. Sıkıştırma yapılmasının nedeni hava içerisinde yer alan oksijen moleküllerinin birim hacimde daha fazla olmasını sağlayıp yanma olayının oksijenle zengin bir ortamda gerçekleşmesini mümkün kılmaktır. Sıkıştırılan hava

içerisine bir sonraki adımda yakıt enjekte edilerek özel bir karışım elde edilip karışım yanma odasında yakılarak ateşleme sağlanmaktadır. Yanma sonucunda sıcak gazlar ve yanma ürünleri türbin kısmından geçerek dışarı atılarak itme kuvveti oluşturulmaktadır. Belli bir seviyede elde edilen itme kuvveti sayesinde uçak havalanıp türbin sonrasında ise sıcak gazlar ve yanma ürünleri egzoz kısmında dışarı atılmaktadır [5, 6].



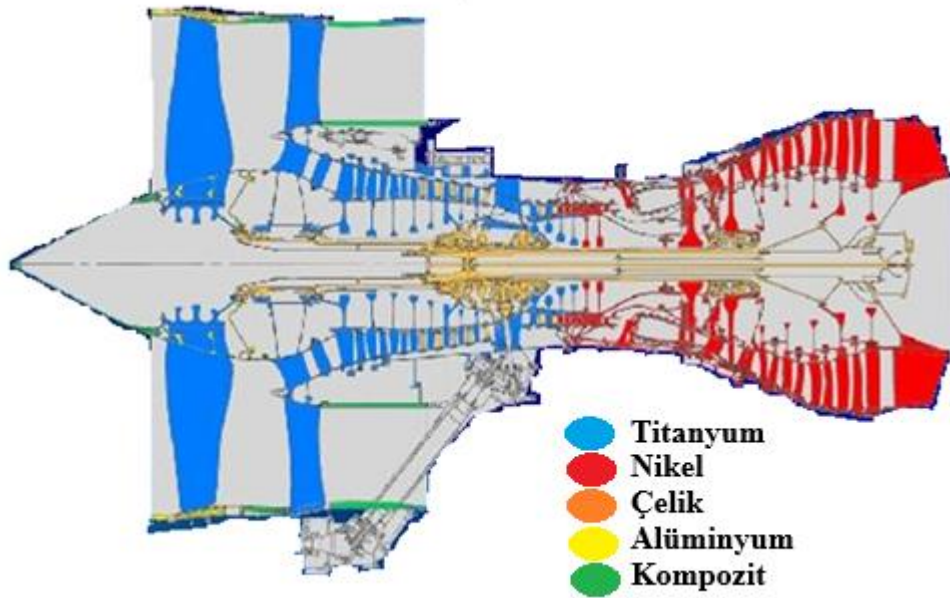
Şekil 2. Uçak Motoru İç Yapısının Şematik Gösterimi [5] (Schematic Illustration of Aircraft Engine Internal Structure)

Uçak motorlarında oluşan sıcaklıklara baktığımızda (Şekil 3) giriş kısmında  $-50^{\circ}\text{C}$  ile  $80^{\circ}\text{C}$  arasında bir hava girişi olmaktadır. Hava kompresör tarafından sıkıştırılmaya başladığında yaklaşık  $200^{\circ}\text{C}$  ve sıkıştırma sonucunda yaklaşık  $600^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklara ulaşmaktadır. Yanma odasında ise  $1000^{\circ}\text{C}$  gibi sıcaklıklara ulaşmaktadır. Türbin kısmının çıkışındaki sıcak gaz ise  $700^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerlerine düşmektedir. Sonrasında sıcak gazlar egzoz yardımıyla dışarı atılmaktadır. Belirtilen sıcaklık değerleri kullanılan motor türüne göre değişmekte olup motor türüne göre sıcaklık değerleri azalıp artabilmektedir [5-7].



Şekil 3. Uçak Motorlarında Oluşan Sıcaklık Değerleri [6] (Temperature Values in Aircraft Engines)

Uçak motorlarında ısıyla temas eden alanlar özellikle süperalaşım malzemelerden yapılmaktadır. Süperalaşım malzemeler yüksek ısı dirence sahip ve yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini koruyabildikleri için tercih edilmekte ve ısıl dayanım özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda korozyon ve oksidasyonu engelleyebilmek amacıyla malzemelere kaplama işlemi yapılmaktadır. Böylelikle ana malzeme korunarak kaplama malzemesi feda edilmektedir. Şekil 4'te örnek bir motorda kullanılan malzemeler gösterilmektedir[7-9].



Şekil 4. Örnek Olarak Uçak Motorlarında Kullanılan Malzemeler [8] (As an Example, Materials Used in Aircraft Engines)

### 3. Süperalaşım Yerine Kullanılan Kompozit Malzemeler (Composite Materials Used Instead of Superalloys)

Uçak motorlarında kullanılan Ni ve Ti alaşımlı süperalaşım malzemeleri yerine kompozit malzemelerin kullanılması yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Nikel ve Titanyum alaşımlı malzemelerin pahalı olması, işlemedeki riskler ve maliyet öne çıkan problemlerdir. Kompozit malzemelerin Titanyum ve Nikel malzemelere göre birçok avantajları bulunmaktadır. Örneğin polimer kompozitler nikel alaşımlara göre daha hafif, seramik ve metal kompozitler ise sıcaklık dayanımları süperalaşım malzemelerine göre daha iyi olduğu için uçuş performansında artış sağlamaktadır [10-15]

Uçak motorlarında kullanılması üzerinde poliimid matrisli kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Özellikle poliimid malzemesinin grafit, cam ve karbon fiber takviyeleri ile oluşturduğu kompozit malzemeler üzerinde çalışılmaktadır. Poliimid malzemesinin türevleri olan PMR-15 ve DMBZ-15 üzerinde oldukça yoğun araştırmalar bulunmaktadır. PMR15 reçine malzemesinin grafit ve karbon ile yaptığı kompozit malzeme 288°C'de uzun kullanım ömrüne sahip ve mukavemet özelliklerini koruyabilmektedir. PMR-15 malzemesi, bilinen bir kanserojen ve bir karaciğer toksini olan metilen dianilinden (MDA) yapılmaktadır. Bu nedenle Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi (OSHA), PMR-15 kompozitlerinin üretimi sırasında MDA'nın kullanılmasına ilişkin katı düzenlemeler uygulamaya koymuştur. PMR-15 bileşenlerinin üretimi ve onarımında yer alan işçilerin güvenliğine ilişkin son endişeler, çalışanların maruziyetini sınırlamak ve iş yeri güvenliğini sağlamak için maliyetli koruyucu önlemlerin uygulanmasına yol açmıştır. Bu nedenle üretim maliyeti artmış ve insan sağlığına zararlarından dolayı DMBZ15 malzemesi geliştirilmiştir. DMBZ-15 malzemesinin grafit (Celion 6000, Thornel B vb.) ve karbon fiberler ile yaptığı kompozit malzemesi ise 343°C'de uzun kullanım ömrüne sahip olup mukavemet özelliklerini koruyabilmekte ve yüksek termo-oksidatif özelliğe sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda bile oksijenle bileşen oluşturma olasılığı oldukça düşüktür. DMBZ-15 poliimidinin, uçak motoru bileşenlerinde PMR-15'e benzer hafif, yüksek sıcaklıklı kompozit uygulamalar için cam, kuvars ve karbon elyafı bir reçine matrisi olarak yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Yüksek sıcaklık kapasitesi nedeniyle, kanatçıklar, radon ve gövde bileşenleri dahil olmak üzere füze uygulamalarında kullanım için özellikle uygundur. NASA için özellikle ilgi çekici olan DMBZ-15, fırlatma ve atmosfere yeniden giriş sırasında yüksek sıcaklıklarla karşılaşan yeniden kullanılabilir fırlatma araçları için bal peteği veya termal koruma sistemleri ile yüzey levhaları olarak kullanılmaya çok uygundur. Diğer uygulamaları arasında, motor veya yağ sondajı bileşenleri için burçlar ve yataklar yapmak için kıyılmış liflerle ve yüksek sıcaklıkta kaplama ve mürekkep uygulamaları yer almaktadır. DMBZ-15 poliimid kompozitlerinin hafifliği, petrol sondaj bileşenlerinin yanı sıra havalandırma boruları, nozul kapakları ve burçlar gibi ikincil, yük taşımayan uçak motoru bileşenlerinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Hafif polimer kompozitler ayrıca, havacılık ve uzay tahriki ve otomotiv uygulamalarında ağırlık hafifletmesi sağlayarak yakıt verimliliğinde önemli artışlar elde

edilmekte ve müteakip iyileştirmeler sunmaktadır. İki malzemede NASA tarafından ses altı uçaklarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Ses üstü hızlarda oluşan sıcaklık miktarları 400°C ve üzerinde olduğu için halen Titanyum ve Nikel alaşımlarının bir alternatifi durumunda olamamaktadır. Nikel alaşımı olan In718, 750°C ve In625, 650°C'de rahatlıkla çalışabilmektedir. Ti alaşımı malzeme olan Ti64 ise 350°C'de mekanik özelliklerini koruyarak çalışabilmektedir. Poliimid matrisli kompozit malzeme nikel alaşımı malzemeler için bir alternatif olmasa bile Ti alaşımı malzemelerin yerine kullanılabilirler. Poliimid malzemesinin bağ yapıları değiştirilerek yeni türev bir polimer ile ses hızı ve üstü hızlarda çalışabilecek bir malzeme geliştirilmesi hedeflenmektedir. Poliimid, grafit, karbon elyaf, In718, In625 ve Ti64 malzemelerinin özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir [10–16].

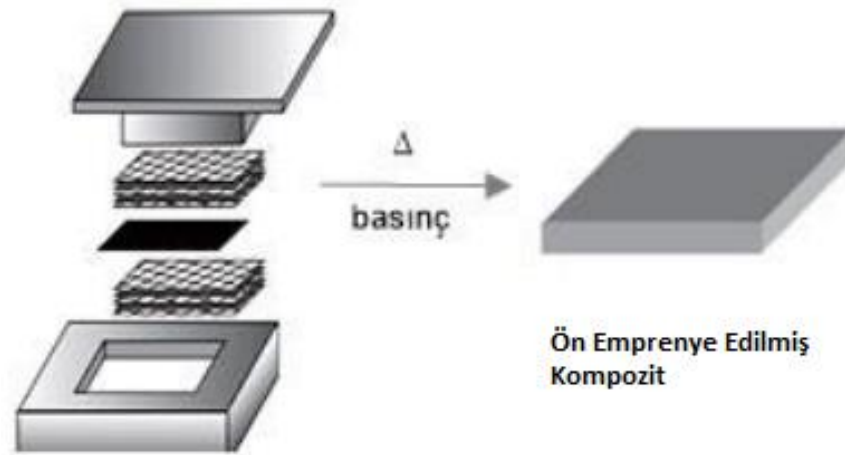
Tablo 1. Poliimid ve Takviye Malzemelerinin Ti64, In718 ve In625 ile Karşılaştırılması (Comparison of Polyimide and Reinforcements with Ti64, In718 and In625)

Malzeme Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Termal İletkenlik (W/m-K)	Ergime Noktası (°C)	Servis Sıcaklığı (°C)
Ti64	4,43	897	6,7	1604	350
In625	8,44	1100	9,8	1290	650
In718	8,26	1241	11,2	1300	750
Poliimid	1,37	345	1,73	371	260
Grafit	1,3	-	24	3338	-
Karbon Elyaf	1,81	5490	34	-	-

1960'lı yıllarda Rolls Royce firması jet motorlarında karbon fiber destekli polimer kompozit malzemeler kullanılmıştır. Kompozit malzeme kullanılan parçalarla uçak motor ağırlığında %10'luk bir hafifletilme sağlanmıştır [17, 18]. Günümüzde halen palelerde Ni ve Ti bazlı süperalaşımlar kullanılmaktadır. Fakat kompozit malzemelerin gelişmesiyle beraber Ti ve Ni bazlı süperalaşımların yerine kullanılabilir olan kompozit malzemeler üzerinde çalışma yapılmaktadır. Karbon fiber destekli polimer kompozit malzemelerin yorulma dirençleri oldukça yüksektir ve mukavemet değerleri de süperalaşımlara yakındır [17]

Süperalaşımlar yerine geçmesi düşünülen en kuvvetli kompozit malzemeler seramik matrisli kompozit malzemelerdir. Süperalaşımların yerini almadaki en büyük problemleri yüksek kırılabilirlikleri ve işleme zorluklarıdır. MoSi<sub>2</sub> matrisli Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli seramik kompozit malzeme üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. MoSi<sub>2</sub> seramik malzemesi oldukça yüksek sıcaklıklarda rahatlıkla çalışabilmekte ve 1600°C'de bile mekanik özelliklerini kaybetmemektedir. Kırılma tokluğu arttırmak amacıyla MoSi<sub>2</sub> içerisine Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviye edilmiştir. MoSi<sub>2</sub> seramik malzemesinin kırılma tokluğu 3 MPa iken Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ile oluşturduğu kompozitin kırılma tokluğu 15 MPa kadar çıkmaktadır. MoSi<sub>2</sub> matrisli Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli seramik kompozit malzemesinin süperalaşımlara göre daha hafif olmasından dolayı uçak performansında artış sağlamaktadır. Mukavemet açısından da akma dayanımlarını arttırmaya yönelik çalışmalarda devam etmektedir. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ilavesi ile akma dayanımında da %30'a varan bir iyileştirme olduğu gözlenmiştir [19, 20]. MoSi<sub>2</sub> matrisli Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli seramik kompozit malzeme 1400-1800°C arasında sıcak pres altında 2 ile 3 saat arasında preslenmesi sonucunda elde edilmektedir. Sıcak pres kalıplama yöntemi, çift yönlü kompozitlerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, dokuma formdaki fiberler bir kalıba yerleştirilir ve matris öncül toz malzemelerle sandviç formuna getirilmektedir. Kalıp, matris ve fiberler, matris malzemesi tamamen ergiyinceye kadar ısıtılır ve belirli bir noktaya gelindiğinde mekanik basınç uygulanarak ergimiş matris fiberlerin içine girer ve etkin bir impregnasyon sağlanmaktadır. Basınç uygulama sürecinde sıkışmış hava ve matris malzemesinin fazlası kalıp dışına atılmaktadır. İmpregne edilmiş malzeme soğutulur ve karbonizasyon işlemi yapılmaktadır. İstenilen yoğunluğa ulaşılan kadar infiltrasyon/karbonizasyon çevrimi tekrarlanıp bu sayede yüksek mukavemetli, hafif ve dayanıklı malzemeler üretilmektedir. İmpregnasyon işlemi, fiberlerin arasında homojen bir matris oluşmasını sağladığından, malzemenin mekanik özellikleri de önemli ölçüde artmaktadır. Ancak, yöntem oldukça zaman alıcı ve işlem süresi üretim miktarına bağlı olarak değişebilmektedir. Yöntem şematik olarak Şekil 5'te gösterilmiştir [19, 21, 22]. MoSi<sub>2</sub> esaslı kompozit malzemeler mekanik özellikleri ve üretim maliyetleri göz önüne alındığında, uçak motorlarındaki yapısal uygulamalar için süperalaşımların yerini alabilecek aday malzemelerdir. MoSi<sub>2</sub> matrisli Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli seramik kompozit malzeme Nikel ve Titanyum alaşımı malzemelere göre yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle üzerine oldukça fazla çalışma gerçekleştirilmektedir. Seramik malzemelerin kompozit yapılarla en mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sonucunda süperalaşımların yerine alacağı ön görülmektedir. Seramik kompozit malzemeler özellikle yanma odası parçaları, füze lüleleri, eriyik metal boruları, endüstriyel gaz brülörleri ve dizel motorların ateşleme bujileri kullanılması hedeflenmektedir [19, 20]. MoSi<sub>2</sub> matrisli Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> takviyeli seramik kompozit malzeme içerisinde kullanılan iki malzemenin özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.



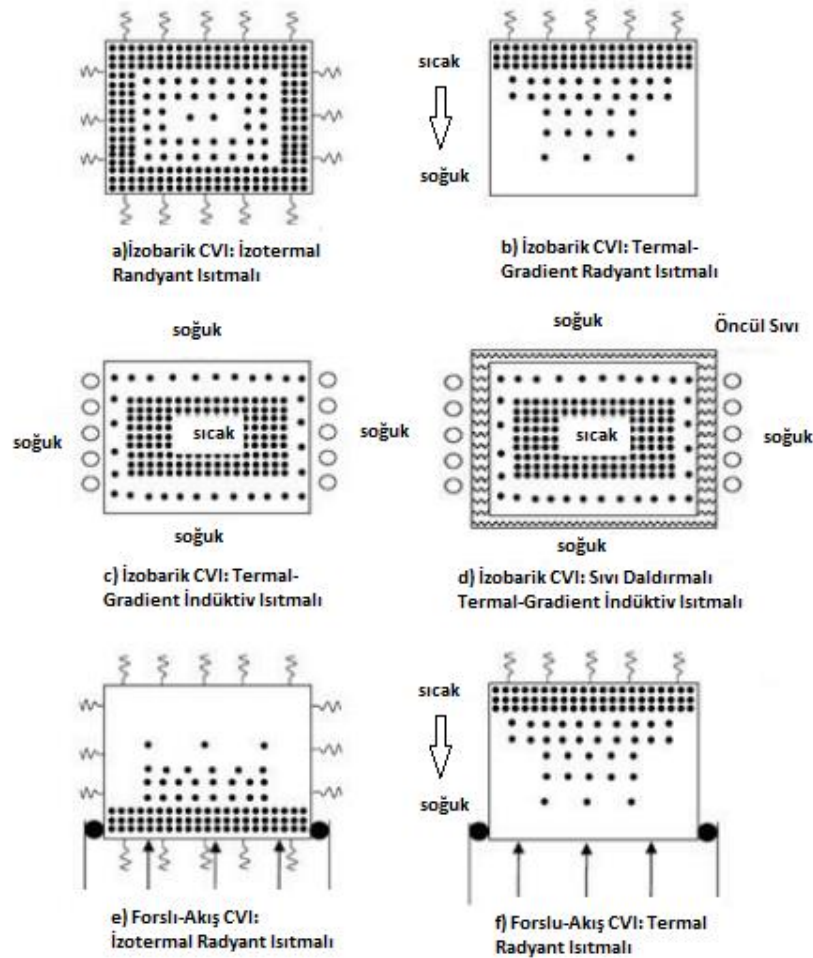


Şekil 5.Sıcak Pres Kalıplama İmpregnasyon Tekniği [10] (Hot Press Molding Impregnation Technique)

Tablo 2. MoSi<sub>2</sub> ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Malzemelerin Özellikleri (Properties of MoSi<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Materials)

Malzeme Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Kırılma Tokluğu (MPa)	Termal İletkenlik (W/m-K)	Ergime Noktası (°C)	Servis Sıcaklığı (°C)
MoSi <sub>2</sub>	6,23	185	3	66,2	2050	1600
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3,2	-	3	37	2100	1800

Günümüzde 1250°C'ye kadar termo-yapısal kapasiteye sahip SiC/SiC seramik kompozit malzemenin askeri ve ticari gaz türbini motorlarının yanma oda ve türbin bileşenlerinde kullanılmaktadır. 1100°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda çalışan süperalaşımli metalik bileşenlerle karşılaştırıldığında, SiC/SiC seramik kompozit malzeme ağırlık hafifletilmesi sağlamanın yanı sıra aynı zamanda bileşen soğutma havası gereksinimlerini de azaltmaktadır. Soğutma havasındaki azalma, itme-ağırlık oranının artması, yakıt tüketiminin azalmasına ve zararlı egzoz emisyonlarında azalma gibi ek faydalar elde edilmektedir. Bu ek faydalarda daha fazla gelişme gerçekleştirmek için, NASA bünyesinde daha da yüksek yapısal güvenilirlik ve sıcaklık kapasitesi ile SiC/SiC CMC geliştirmeyi amaçlayan araştırmalar devam etmektedir. 1300°C'lere kadar malzeme kaybı ve oksidasyon problemi yaşamadan kullanılabilen ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. SiC/SiC seramik kompozit malzemenin içerisinde kullanılan SiC fiberlerinin özelliklerinin iyileştirilmesiyle çalışma sıcaklıkları 1450°C'ye kadar arttırılmıştır. Tyranno SA3 isimli SiC fiberlerinin kullanılmasıyla ise 1600°C'lere problemsiz çalışabildiği gözlenmiştir. Ancak Tyranno SA3 malzemesinin mekanik özelliklerinin diğer SiC fiber türlerine göre daha az olduğu belirtilmektedir [20, 23–25]. SiC/SiC seramik kompozit malzemenin özellikleri Tablo 3'te belirtilmiştir. Karbon fiberlerin üretiminde birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasında kimyasal buhar infiltrasyonu, polimer emdirme ve piroliz ile eriyik sızması yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemlerin her biri farklı avantajlara sahiptir. Kimyasal buhar infiltrasyonu, karbon fiberlerin en popüler üretim yöntemidir. Bu yöntem, infiltrasyon homojenliğinin iyi olması ve matris mikroyapısının kontrol edilebilmesi nedeniyle klasik izotermal ve izobarik prosesler kullanılmaktadır. Ancak, düşük difüzyon sabiti nedeniyle infiltrasyon hızı oldukça düşüktür. Polimer emdirme yöntemi, karbon fiberlerin özelliklerini kontrol etmek için daha fazla esneklik sağlamaktadır. Bu yöntemde, karbon elyaf kumaşları önceden imal edilmiş bir polimer matrisi içinde doyurulmaktadır. Polimer emdirme yöntemi ile üretilen karbon fiberler, yüksek mukavemet özelliklerine sahip olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık konusunda daha az başarı göstermektedir. Piroliz ile eriyik sızması yöntemi ise yüksek yoğunluklu karbon fiberlerin üretimi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde, polimer karışımı yüksek sıcaklıkta pirolize edilmekte ve elde edilen karbon elyafları bir matris içine yerleştirilmektedir. Piroliz yöntemi ile üretilen karbon fiberler, yüksek yoğunluklu ve düşük gaz difüzyon katsayısına sahiptir. Temel kimyasal buhar infiltrasyon yöntemleri Şekil 6'da gösterilmiştir [23, 24, 26, 27].



Şekil 6. Kimyasal Buhar İnfiltrasyon (CVI) Metotları [13]  
(Chemical Vapor Infiltration (CVI) Methods)

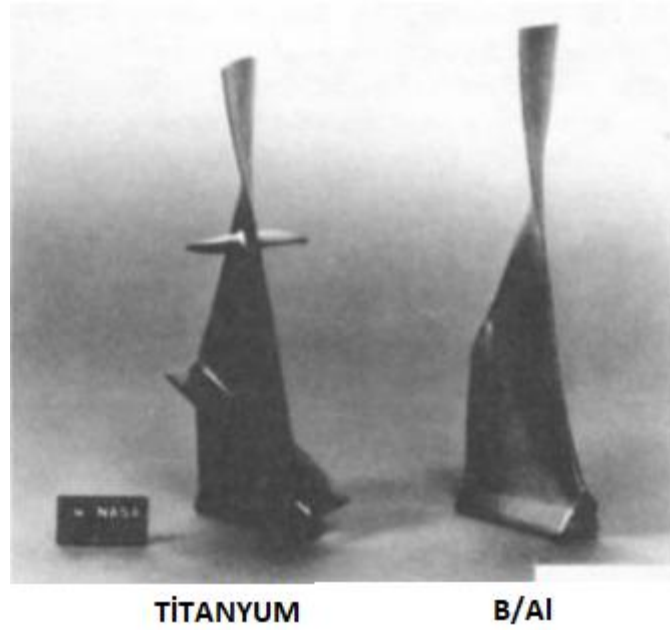
Tablo 3. SiC/SiC Seramik Kompozit Malzemenin Özellikleri (Properties of SiC/SiC Ceramic Composite Material)

Malzeme Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı (MPa)	Termal İletkenlik (W/m-K)	Ergime Noktası (°C)	Servis Sıcaklığı (°C)
SiC/SiC	3,2	380	45	2000	1400

Günümüzde C/C seramik kompozit malzemeler üzerinde de çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. C/C seramik kompozit malzemeler 1050°C'de mekanik özellikleri koruyabilmekte ve özgül çekme dayanımları 2000°C'de 160 MPa/(g/cm<sup>3</sup>) olarak belirlenirken geleneksel seramiklerin özgül çekme dayanımları 1200°C'de 40 MPa/(g/cm<sup>3</sup>) ulaşabilmektedir. C/C seramik kompozit malzemeler yerine kullanılan SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya SiC (elyaf)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> malzemelerine göre yüksek performanslıdır. Metallere göre 2,5 kat daha iyi ısı kapasite ve 2 kat daha iyi dayanıma sahiptir. C/C seramikler kimyasal buhar infiltrasyonu, sol-jel, sıvı infiltrasyonu ve sinterleme ile üretilebilmektedir. C/C seramik kompozit malzemeleri SiC bileşiği ile kaplandıktan sonra performansının daha da arttığı belirtilmektedir [20, 25].

Metal kompozit malzemelerde diğer kompozit malzemeler gibi halen üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Metal kompozit malzemeler iyileştirilmiş yüksek sıcaklık özellikleri, artırılmış tokluk ve süneklik, yüksek elektriksel/ısı iletkenlik, yüksek oksidasyon direnci ve darbe direnci gibi avantajlar sunmaktadır. Metal matris kompozit geliştirme, üç malzeme uygulama kategorisi altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar hafif metal matrisler, yüksek sıcaklık metal matrisleri ve özel metal matrisler şeklindedir. Hafif metal matrislerin üzerine gerçekleştirilen çalışmalar alüminyum malzemesi üzerine yoğunlaşmıştır [28, 29]. NASA B/Al metal kompozit malzemesini uçak fan kanatlarında kullanılması için geliştirmektedir. Fan kanatları tipik turbofanla çalışan ses altı nakliye uçağının motor ağırlığının %10'unu oluştururken, toplam uçak ağırlığının %1'ini oluşturmaktadır. B/Al malzemesinin kullanımda bulunan en büyük engel yeterli darbe direncinin ve hasar toleransının oldukça düşük olmasıdır. Bunun önüne geçmek içinde NASA fan kanatçıklarının tasarımını (Şekil 7) değiştirerek darbe direncinde 4 kat artış sağladığı belirtilmektedir. Alüminyum matrisli Boron takviyeli

metal kompozit malzemesi içerisinde yer alan Boron takviyesi yerine SiC fiberleri veya parçacıkları ekleyerek düşük maliyetli, elastik modülü artırılmış, mukavemet değerleri iyileştirilmiş olan malzeme üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır [29].



Şekil 7. Ti F404 Fan Kanadının, Deneysel Boron/Alüminyum Fan Kanat Tasarımlarının Karşılaştırılması [29] (Comparison of Ti F404 Fan Blade, Experimental Boron/Aluminum Fan Blade Designs)

Yüksek sıcaklık metal kompozit malzemeler alanındaki çalışmaların çoğu, elyaf takviyeli süperalaşımın geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu kompozitler, süperalaşım matrislerini güçlendirmek için yüksek mukavemetli, yüksek ısı dirençli lifler kullanılmaktadır. Uygun malzemeler ve üretim süreci seçimi, liflerin özelliklerini tamamlamak için sünek, oksidasyona dirençli bir matris sağlarken, liflerin yüksek ısı direnci özelliklerini korumasına izin vermektedir. Elyaf takviyeli süperalaşım, motor çalışma koşullarında rakip süperalaşımlara göre servis sıcaklığında önemli bir artış yaşanması olanak sağlamaktadır. Çalışmalarda ayrıca tungsten elyaf takviyeli süperalaşım matris kompozitleri ile niyobyum ve SiC takviyeli süperalaşım gibi diğer yüksek sıcaklık kompozitleri de incelenmektedir. Yüksek sıcaklık metal kompozit malzemeler üzerindeki çalışmalar uçak motorlarındaki türbin kanadı ve kanat uygulamaları için sürünme özelliklerini ve izin verilen çalışma sıcaklıklarını artırmak üzerine odaklanmıştır. Elyaf takviyeli süperalaşımın aşılması gereken temel teknik engel, takviye elyafının özelliklerinin bozulmasını önlemek için elyaf/matris uyumluluğudur. En kötü senaryoda fiber ve matris, yüksek sıcaklıkta üretim veya servis sırasında reaksiyona girerek kırılabilir intermetalik bileşikler oluşturmakta veya fiberler ayrılmaktadır. Ayrıca, geleneksel nikel bazlı süperalaşımın, tungsten elyaf içinde difüzyonla tetiklenen yeniden kristalleşmeye neden olarak elyafın zamanla mukavemetini ve sünekliğini kaybetmesine neden olabileceği de keşfedilmiştir. Bu bozunma reaksiyonlarını azaltmak için, modifiye edilmiş FeCr-Al-Y süperalaşımını bir matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çünkü demir bazlı alaşımlar tungsten elyafı ile çok daha iyi uyumluluğa sahip ve oksidasyona dirençli, yüksek ısı iletkenliği, için sünek bir matris elde edilmektedir [15, 24, 30, 31]

Özel matrisli kompozitler, belirli bir uygulamayı karşılamak için gereken özel bir elyaf ve matris kombinasyonuna sahiptirler. Tungsten lifleri veya grafit ipliklerle güçlendirilmiş bakır matrisli kompozitler, bu tip kompozitlere bir örnektir. W/Cu kompozitleri, tungsten liflerinin yüksek sıcaklık mukavemeti ve sertliğinden ve hem W hem de Cu'nun üstün termal ve elektrik iletkenliğinden yararlanarak, herhangi bir yüksek iletkenliğe sahip bakır alaşımından daha üstün bir yüksek sıcaklık mukavemetine sahip bir kompozit oluşturulmaktadır [15, 24, 30, 31]. W/Cu kompozit yapısında %20 Cu içermesi durumunda yapılan çalışma sonucunda 30 MPa basınç altında 1450°C'de sıcak presleme ile malzemenin yoğunluk elastisite, sertlik, eğilme mukavemeti sonuçlarının ideal olduğu belirtilmektedir [32]. W/Cu içerisinde yer alan bakır oranının kompozit içerisinde artmasıyla beraber termal iletkenlik katsayısı artmaktadır. Ancak elastik modül düşmektedir. 800°C sıcaklıklara çıkıldığında ise düşük bakır oranı içeren kompozit malzemede bükülme elastik modülü dramatik olarak düşmektedir. Oda

sıcaklığında ise en iyi bükülme elastik modülüne düşük bakır oranına sahip olan kompozit malzemeye elde edildiği anlaşılmıştır [33].

Gr/Cu kompozitler ayrıca olağanüstü bir termal iletkenliğe sahiptir ve buna ek olarak, çok çeşitli mevcut termal genleşme katsayıları ile daha düşük yoğunluklu, daha yüksek modüllü bir kompozit malzeme oluşmaktadır. Gr/Cu kompozit malzemesinin içerisine sertlik ve ısıl iletkenliklerinin arttırmak için metal oksit ( $MnO_2+Co_3O_4$ ) nano parçacıklar eklenmesiyle beraber sertlik değerinde %30'luk ve termal iletkenlik değerinde ise %10'luk bir artış sağlanmıştır. Halihazırda yüksek termal iletkenliğe sahip olan bir kompozit olan Gr/Cu bu sayede daha da yüksek bir termal iletkenliğe sahip olduğu belirtilmektedir [34, 35].

NASA roket motorları için kriyojenik olarak soğutulan itme odası gömleklerine uygulama için W/Cu kompozitleri üzerinde çalışmaktadır. Mevcut gömleklerin sınırlı bir ömrü bulunmaktadır. Çünkü hazne gömleği duvarlarındaki şiddetli termal gerilmeler, halihazırda kullanılan bakır alaşımlarının akmasına ve deforme olmasına neden olmaktadır. Sürünme testlerinde astar duvarlarının termal döngülerle çatlamasına ve bozulmasına yol açtığı gözlenmiştir. W/Cu kompozitlerinin iyileştirilmiş yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek termal iletkenliği, soğutma sıvısından daha verimli ısı transferini gerçekleştirirken itme odası duvarlarının gücünü artırarak ve daha uzun ömürlü, daha güvenilir roket motoru elde edilmesi hedeflenmektedir. Ek olarak, yüksek sıcaklıklardaki yüksek rijitlikleri ve termal iletkenlikleri nedeniyle, Gr/Cu kompozitleri, uzay güç sistemleri için ısıyı reddeden radyatörler olarak değerlendirilmektedir [15, 20, 24, 36].

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

Kompozit malzemelerin uçak motorları içerisinde kullanılması için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle bu sektörün öncülerinden olan NASA ve GE gibi merkezler süperalaşım yerini alabilecek malzemeler üzerinde çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bunların nedenleri arasında uçak performanslarını arttırmak, hafifletme sağlanması, yüksek ısıl dayanımlar elde edilmesi bulunmaktadır. Polimer kompozit malzemeler üzerinde özellikle yüksek ısıl ve sıcaklık dayanımı bulunan poliimid üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Poliimid matrisli kompozit malzemelerinin içerisine ilave edilen takviye malzemeler sayesinde  $400^{\circ}C$ 'ye yakın dayanımları sayesinde ses altı uçaklarda kullanılmaları söz konusudur. Ancak matris malzemesi olarak polimer malzeme kullanılmasından dolayı yüksek sıcaklıklara erişen yanma odalarında kullanılması olası gözükmemektedir. Ancak  $400^{\circ}C$ 'ye kadar olan sıcaklıklarda süperalaşım malzemelere alternatif olarak kullanılabilirler.

Metal kompozit malzemeler ise yüksek sıcaklıklar çalışmak için polimer kompozit malzemelere göre daha uygundur. Ancak metallerin yüksek sıcaklıklarda oksijen ile bileşik oluşturma riskleri bulunmaktadır. Bu nedenle matris malzemesi olarak kullanılan metal malzemeler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilerek bozunmaların önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzeme oldukları için mukavemet dayanımları da polimer kompozitlere oranla daha iyidir. Ancak ağırlık olarak polimer kompozit malzemelerden daha ağırdır. Fakat süperalaşımlara göre içerisinde elyaf malzemelerinin yer almasında dolayı daha hafiftir. Özellikle NASA'nın B/Al kompozit malzemesi üzerinde yaptıkları çalışmalar öne çıkmaktadır ve şu anda süperalaşım yerine kullanılacak en iyi malzeme metal kompozit malzemelerdir.

Son olarak seramik kompozit malzemelere baktığımız zaman en iyi ısıl dayanımlara sahip oldukları gözlenmektedir. Ancak en büyük dezavantajları işleme zor ve pahalı olmasının yanı sıra oldukça kırılgan malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklara dayanımları yüksek olsa dahi parçaya etki eden darbe anında kırılma yaşanması oldukça yüksektir. İşleme anında bile parçaya gelen kesme kuvvetleri sonucunda da kırılmalar yaşanmaktadır. Wu/C ve Si/C günümüzde üzerinde çalışmalar gerçekleştirilen kompozit malzemelerdir. Ancak seramik kompozitler kırılgan oldukları için kırılma toklukları arttırmaya yönelik malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Kompozit malzemeler incelendiğinde metal kompozit malzemelerin süperalaşımın yerini alabilmek için bir adım önde olduğu gözlenmiştir. Ancak polimer ve seramik kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarda göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Kompozit malzemeler günümüzde uçaklarda bazı motor parçaları yerini almıştır. Yüksek sıcaklığın olduğu yerlerde halen süperalaşım kullanılsa da birkaç yıl içerisinde yerini kompozit malzemelere bırakacağı öngörülmektedir.

## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] I. Elfaleh, F., Abbasi, M., Habibi, F., Ahmad, M., Guedri, N., Mondher, and C., Garnier, "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials," *Results in Engineering*, vol. 19, pp. 1-31, Sep. 2023, doi:10.1016/j.rineng.2023.101271.
- [2] A. K. Kaw, *Kompozit Malzeme Mekaniği*, 1st ed. Ankara: Efil Yayınevi, 2014.
- [3] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 4th ed. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2022.
- [4] P. Balakrishnan, M. J. John, L. Pothan, M. S. Sreekala, and S. Thomas, *12 - Natural fibre and polymer matrix composites and their applications in aerospace engineering*, Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering, S. Rana and R. Fanguero, Ed., Woodhead Publishing, 2016, pp. 365-383. doi:10.1016/B978-0-08-100037-3.00012-2.
- [5] J. Zhang, P. Wang, R. Yan, and R. X. Gao, "Long short-term memory for machine remaining life prediction," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 78-86, Jul. 2018, doi:10.1016/j.jmsy.2018.05.011.
- [6] G. Sjöberg, "Aircraft Engine Structure Materials," North Atlantic Treaty Organization Science and Technology Organization, pp. 1-24, January 2012, doi:10.14339/RTO-EN-AVT-207-13-pdf
- [7] N. R. Muktinatalapati, *Materials for Gas Turbines – An Overview*, Advances in Gas Turbine Technology, IntechOpen, 2011, pp. 293-314. doi:10.5772/20730.
- [8] E. Akca and A. Gürsel, "A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 1-13, Jun. 2015, doi:10.21533/pen.v3i1.43.
- [9] T. M. Pollock and S. Tin, "Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 22, no. 2, pp. 361-374, Mar. 2006, doi:10.2514/1.18239.
- [10] B. Beşergil, "Karbon-Karbon Kompozitler; Üretim Prosesler (production processes)." *bilsenbesergil.blogspot.com*. Jun. 15, 2019. [Online]. Available: [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_90.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_90.html). [Accessed: Nov. 12, 2023]
- [11] S. Kesarwani, "Polymer Composites in Aviation Sector," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 518-525, June 2017, doi:10.17577/IJERTV6IS060291.
- [12] NASA, "Polyimide Boosts High-Temperature Performance," *ntrs.nasa.gov*, September 1, 2008. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20090002513>. [Accessed: Nov. 12, 2023].
- [13] K. J. Bowles and G. Nowak, "Thermo-Oxidative Stability Studies of Celion 6000/PMR-15 Unidirectional Composites, PMR-15, and Celion 6000 Fiber," *Journal of Composite Materials*, vol. 22, no. 10, pp. 966-985, October 1988, doi:10.1177/002199838802201005.
- [14] K. Bowles, L. McCorkle, and L. Ingrahm, "Comparison of Graphite Fabric Reinforced PMR-15 and Avimid N Composites After Long Term Isothermal Aging at Various Temperatures," *Journal of Advanced Materials*, pp. 1-29, February 1998.
- [15] D. L. McDanel, T. T. Serafini, and J. A. DiCarlo, "Polymer, metal, and ceramic matrix composites for advanced aircraft engine applications," *Journal of Materials for Energy Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 80-91, June 1986, doi:10.1007/BF02833463.
- [16] D. Wilson, "PMR-15 processing, properties and problems—a review," *British Polymer Journal*, vol. 20, no. 5, pp. 405-416, November 1988, doi:10.1002/pi.4980200505.
- [17] R. D. Vannucci, "Properties of PMR Polyimide composites made with improved high strength graphite fibers," *Twelfth National SAMPE Technical Conference Seattle, January 1980*, pp. 1-19. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19800019943>. [Accessed: Nov. 12, 2023].
- [18] J. Dominy, "Structural composites in civil gas turbine aero engines," *Composites Manufacturing*, vol. 5, no. 2, pp. 69-72, June 1994, doi:10.1016/0956-7143(94)90057-4.
- [19] Y. Uzunonat, "Uçak Motoru Uygulamalarında Alternatif Çözümler: MoSi2 Esaslı Malzemelerin Yapısal Eleman Olarak Kullanımı," *Mühendis ve Makina*, vol. 57, no. 679, pp. 44-52, August 2016.
- [20] B. Parveez, M. I. Kittur, I. A. Badruddin, S. Kamangar, M. Hussien, and M. A. Umarfarooq, "Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review," *Polymers*, vol. 14, no. 22, pp. 1-32, Jan. 2022, doi:10.3390/polym14225007.
- [21] E. Nas, H. Gökkaya, and G. Sur, "Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme," *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 3, no. 2, pp. 56-65, Jun. 2013.

- [22] D. Sciti, S. Guicciardi, and A. Bellosi, "Properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – MOSi<sub>2</sub> Composites with a Nanostructured Matrix," *26th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures: B: Ceramic Engineering and Science Proceedings, January 13-18, 2002, Florida, USA*, Volume 23, H. T. Lin, M. Singh, Eds., 2002, pp. 673–679. doi:10.1002/9780470294758.ch74
- [23] J. A. DiCarlo, "Advances in SiC/SiC Composites for Aero-Propulsion," *nasa.gov*, NASA/TM-2013-217889, Jul. 2013. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140000988>. [Accessed: Nov. 12, 2023].
- [24] M. Jinsheng, S. Liwei, and H. Yongxiang, "Application of Composite Materials in Engine," *Materials Science: Advanced Composite Materials*, pp. 1–9, 2017, doi:10.18063/msacm.v1i1.499.
- [25] G. Karadimas and K. Salonitis, "Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, pp.1-42, Jan. 2023, doi:10.3390/app13053017.
- [26] T. M. Besmann, D. P. Stinton, R. A. Lowden, and W. Y. Lee, *Chemical Vapor Deposition (CVD) and Infiltration (CVI), Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing*, A. W. Weimer, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, pp. 547–577. doi:10.1007/978-94-009-0071-4\_22.
- [27] A. Lazzeri and M. B. Coltelli, *Chemical vapour infiltration of composites and their applications*, Chemical Vapour Deposition (CVD), CRC Press, 2019, pp. 1–28. doi:10.1201/9781315117904-8.
- [28] K. U. Kainer, *Basics of Metal Matrix Composites*, Metal Matrix Composites, John Wiley & Sons, Ltd, 2006, pp. 1–54. doi:10.1002/3527608117.ch1.
- [29] C. T. Salemme and G. C. Murphy, "Metal spar/superhybrid shell composite fan blades," *ntrs.nasa*, NASA-CR-159594, Aug. 1979. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790022124>. [Accessed: Nov. 12, 2023]
- [30] Z. Ali, Y. Gao, B. Tang, X. Wu, Y. Wang, M. Li, X. Hou, L. Li, N. Jiang and J. Yu, "Preparation, Properties and Mechanisms of Carbon Fiber/Polymer Composites for Thermal Management Applications," *Polymers*, vol. 13, 169, pp. 1-22, Jan. 2021, doi:10.3390/polym13010169.
- [31] D. D. L. Chung, Ed., *Composite Materials*, Springer, London, 2010, pp. 1–34, doi:10.1007/978-1-84882-831-5.
- [32] M. Roosta, H. Baharvandi, and H. Abdizade, "An experimental investigation on the fabrication of W-Cu composite through hot-press," *International Journal of Industrial Chemistry*, vol. 3, 10, pp.1-6, Jul. 2012, doi:10.1007/978-1-84882-831-5\_1
- [33] E. Tejado, A. v. Müller, J.-H. You, and J. Y. Pastor, "The thermo-mechanical behaviour of W-Cu metal matrix composites for fusion heat sink applications: The influence of the Cu content," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 498, pp. 468–475, Jan. 2018, doi:10.1016/j.jnucmat.2017.08.020.
- [34] Y. Zhang, Y. Li, Y. Li, M. Song, X. Zhang, and W. Zhang, "TMOs@Gr/Cu composites: Microstructure and properties," *Materials & Design*, vol. 182, pp. 1-7, 30, Nov. 2019, doi:10.1016/j.matdes.2019.108030.
- [35] A. R. Shelke, J. Balwada, S. Sharma, A. D. Pingale, S. U. Belgamwar, and J. S. Rathore, "Development and characterization of Cu-Gr composite coatings by electro-co-deposition technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 2090–2095, Jan. 2020, doi:10.1016/j.matpr.2020.03.244.
- [36] C. Hou, X. Song, F. Tang, Y. Li, L. Cao, J. Wang and N. Zouren, "W-Cu composites with submicron- and nanostructures: progress and challenges," *NPG Asia Materials*, vol. 11, no. 74, pp. 1-20, Dec. 2019, doi:10.1038/s41427-019-0179-x.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Machine Learning-Based DDoS Attack Detection on SDN-Based SCADA Systems

Esra Söğüt<sup>a</sup>, Adem Tekerek<sup>b</sup>, O. Ayhan Erdem<sup>c</sup>

Submitted: 03.08.2023 Revised: 13.09.2023 Accepted: 28.09.2023 doi:10.30855/gmbd.0705090

### ABSTRACT

**Keywords:** SCADA, SDN, DDoS, Machine Learning, Modbus

<sup>a\*</sup> Gazi University,  
Faculty Of Technology,  
Department of Computer Engineering,  
06560 – Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-0051-2271  
e-mail: esrasogut@gazi.edu.tr

<sup>b</sup> Gazi University,  
Faculty Of Technology,  
Department of Computer Engineering,  
06560 – Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-0880-7955  
e-mail: atekerek@gazi.edu.tr

<sup>c</sup> Gazi University,  
Faculty Of Technology,  
Department of Computer Engineering,  
06560 – Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-7761-1078  
e-mail: ayerdem@gazi.edu.tr

\*Corresponding author:  
esrasogut@gazi.edu.tr

**Anahtar Kelimeler:** SCADA, SDN, DDoS, Makine Öğrenmesi, Modbus

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems monitor and control critical infrastructure processes. SCADA systems do not have adequate detection and defense mechanisms against developing cyber attacks and contain many security vulnerabilities. Using SCADA systems in critical infrastructures of national and international importance means new targets for malicious attackers. In addition, using SCADA systems with new technologies brings new perspectives to the security world. When technologies such as SDN are integrated with SCADA systems, it brings advantages to the system regarding manageability and programmability. However, security problems also occur against attacks such as DDoS. For these reasons, it is imperative to ensure the cyber security of SCADA systems. In this study, the case of Software Defined Network (SDN)-based SCADA systems exposed to DDoS attacks are discussed. Logistic Regression, K-Nearest Neighbors, Random Forest, and Support Vector Machine (SVM) classification algorithms have been used for attack detection. A ready-made dataset has been studied, and accordingly, the model that makes the most accurate determination has been proposed in our study. The results show that the proposed SVM classifier model (97.2% accuracy rate) effectively detects DDoS attacks against SDN-based SCADA systems.

## SDN Tabanlı SCADA Sistemlerinde Makine Öğrenmesi Tabanlı DDoS Saldırı Tespiti

### ÖZ

Kritik altyapılardaki süreçleri izlemek ve denetlemek için Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sistemleri kullanılmaktadır. SCADA sistemleri gelişen siber saldırılar karşısında yeterli tespit ve savunma mekanizmalarına sahip değildir ve birçok güvenlik açıklığı barındırmaktadır. Ulusal ve uluslararası öneme sahip kritik altyapılarda SCADA sistemlerinin kullanılması kötü niyetli saldırganlar için yeni hedefler anlamına gelmektedir. Ayrıca SCADA sistemlerinin yeni teknolojilerle birlikte kullanılması güvenlik dünyasına yeni bakış açıları kazandırmaktadır. Software Defined Network (SDN) gibi teknolojiler SCADA sistemleriyle bütünleştirildiğinde, sisteme yönetilebilirlik ve programlanabilirlik konularında avantajlar kazandırmaktadır. Bunun yanı sıra DDoS gibi saldırılara karşı güvenlik sorunları da barındırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı SCADA sistemlerinin siber güvenliğinin sağlanması zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmada SDN tabanlı SCADA sistemlerinin DDoS saldırılarına maruz kalması durumu ele alınmıştır. Saldırı tespitinin yapılması için Logistic Regression, K-Nearest Neighbors, Random Forest ve Support Vector Machine (SVM) sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Hazır bir veriseti üzerinde çalışılmış ve buna göre en doğru tespiti gerçekleştiren model çalışmamızda önerilmiştir. Sonuçlar önerilen SVM sınıflandırıcı modelinin (%97.2 oranında doğruluk), SDN tabanlı SCADA sistemlerine yönelik DDoS saldırılarını etkili bir şekilde tespit ettiğini göstermiştir.

## 1. Introduction

The Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems collect real-time data from terminal units, such as input-output units and sensors, and store them in a central unit. The SCADA system evaluates the collected data according to the criteria, creates warning messages, and informs the system's operator. Control points and data flow are monitored with the interface of the SCADA system. SCADA systems serve in critical production, distribution, and utilization infrastructures like water, gas, electricity, and oil. Operations performed in strategic infrastructures are monitored and controlled using SCADA systems throughout the process. The data collected from the terminal units of the SCADA system are used to make predictions about the system's operation. In addition, the control mechanism of the SCADA system provides a fast response to the faults in the terminal units [1].

The SCADA system, a computer-based structure that allows management machines to spread over a wide area from a single center, ensures easy data control and high efficiency in enterprises or industrial facilities. SCADA provides system administrators with detailed reports on the system's operation [2]. Uninterrupted operations in critical infrastructures depend on the robust functioning of SCADA systems. Any disruption in SCADA systems will adversely affect other connected systems, beneficiaries, and institutions. Cyber attacks that develop day by day also target critical infrastructures. For example, cyber attacks targeting the electricity distribution infrastructure can cause cities to face power outages all day and remain dark.

Another known example is the Stuxnet attack. By remotely interfering with the operation of the centrifuges at the nuclear power plant, the attackers secretly disrupted the system and managed to damage the facility physically [3]. Experience shows that these problems can occur at any moment and cause severe financial losses. Therefore, taking every step necessary to ensure cyber security in SCADA systems against cyber attacks is vital.

Production and distribution infrastructures administered with SCADA systems have failed to keep up with the developing technology. Since SCADA systems' primary aim is to manage critical infrastructures efficiently, cyber security in the SCADA systems is of secondary importance. Therefore, SCADA systems are vulnerable to cyber-attacks that are steadily becoming more sophisticated. In addition to the difficulties in adding new elements to this inflexible system, replacing old ones with new ones, and providing security, their closed-system designs make these systems more vulnerable to attacks due to the widespread use of the internet. Using the remote control feature is another insecure practice in the system. Integrating new technologies such as Smart Grid, Internet of Things, 5G, cloud computing, blockchain, and Software Defined Network (SDN) with SCADA systems brings security problems along with many advantages [4], [5].

SDN technology, which offers a dynamic, flexible, and programmable architecture, can eliminate or minimize these problems experienced in the traditional structure of SCADA systems. SDN-based SCADA system obtained by combining SDN technology and SCADA system offers solutions to the complications encountered in regular networks. For example, developing information and communication technologies generated new requirements in accessibility, dynamic management, high bandwidth, and high connectivity. SDN-based SCADA system provides solutions to these manageability, complexity, and quality of service requirements [6].

Besides advantages, SDN technology has disadvantages, such as cyber-attacks specific to SDN architecture. The most threatening type of attack on SDN-based systems is Distributed Denial-of-Service (DDoS) attacks [7]. DDoS attacks that can occur in SDN-based SCADA systems with security vulnerabilities can cause devastating results. Slowdown, downtime, or dysfunction of vital infrastructure processes cause national or international problems. When a critical infrastructure using the SCADA system undergoes DDoS attacks that might affect all or some of the infrastructure, this situation might lead to dangerous consequences in cities, such as untreated drinking water, electricity cuts, or signal failures on high-speed trains. For this reason, it is imperative to maintain business continuity uninterrupted by providing cyber security in SCADA systems.

The current study proposed a model to control and detect DDoS attacks on SDN-based SCADA systems. In the study, four different machine learning algorithms were used to test the reliability of the proposed model. The evaluation was made according to the success metrics such as precision, recall, f1-score, and accuracy. According to the analysis results of the algorithms, Confusion Matrix and ROC Curve were obtained and interpreted. The evaluation results revealed that the model with the highest performance detected DDoS



attacks. Furthermore, the comparisons made with similar literature studies confirmed the success of the proposed model. It has been shown that using complex, hybrid, or advanced algorithms is unnecessary, and successful results are obtained with machine learning methods.

The second part of the study explicitly presented similar studies in the literature and their differences from the proposed model. The third chapter explained the concepts of SCADA, SDN, and DDoS. At the same time, the fourth chapter covered the materials and methods used in the study and outlined the experimental results. The fifth section is the Conclusion part.

## 2. Literature Review

In this section, studies from the literature concerning the detection of DDoS attacks targeting SCADA systems, communication protocols, and SDN-based SCADA systems have been summarized.

Alhaidari et al. developed a frame against DDoS attacks in the SCADA system using the KDDCup'99 dataset. They employed J48, Naive Bayes (NB), and Random Forest (RF) algorithms to determine the attack pattern and got the best classification success rate with the RF algorithm [8].

Skripcak and Tanuska designed and simulated a prototype for a real-time and online information generation component that can operate in SCADA systems. They utilized a Passive-Aggressive Classifier algorithm with an Online Machine Learning algorithm on the process alarm forecasting scenario, which is considered a binary classification problem [9].

Beaver et al. utilized machine learning methods to detect command and data injection attacks in critical gas pipeline infrastructures. They used a benign and malicious command traffic dataset to identify attacks and made analyses using NB, RF, OneR, J48, Nearest-Neighbor (NNge), and Support Vector Machine (SVM) learning algorithms [10].

Hink et al. used machine learning techniques to detect cyberattacks against the power system and activate the operator. Their study employed NB, RF, OneR, NNge, SVM, JRipper, and Adaboost algorithms and their suggested technique, "Adaboost+JRipper" [11].

Benisha and Ratna proposed a new method for detecting and classifying malicious data in a water storage system using a SCADA system. They utilized the Enhanced Cuckoo Search Optimization algorithm in optimum classification feature selection and the Genetic Machine Learning based Neural Network algorithm in classification [12].

Perez et al. tried to detect network attacks against SCADA systems using machine learning techniques. They used a real dataset from gas pipeline systems and employed SVM and RF methods to implement various Intrusion Detection System classifiers [13].

In their study, Söğüt and Erdem used a dataset from gas pipeline control systems focused on attack detection. This dataset contained data on Command Injection, Reconnaissance, and DoS against the Modbus protocol. They utilized Decision Stump, Hoeffding Tree, Random Tree (RT), and REP Tree algorithms in the study [1].

Wan et al. proposed the Event-Based Hidden Markov Model (HMM) as an anomaly detection approach for communication protocols in SDN-based control systems. They generated data through the simulation environment and operated the Profinet protocol in the study. Furthermore, they evaluated the proposed approach by comparing the performances of Event-Based HMM, BP Neural Network, and NB methods [14].

In their study, da Silva et al. detected cyber attacks on the electrical network components that used the OpenFlow protocol. They proposed an approach based on One-Class Classification algorithms and SDN. For this purpose, they used the One-Class SVM and Support Vector Data Description algorithms [15].

Radoglou-Grammatikis et al. presented an Intrusion Detection and Prevention System with SDN technology for SCADA systems using Distributed Network Protocol 3 (DNP3). The study processing actual data from a transformer station used Minimum Covariance Determinant, Local Outlier Factor, Principal Component Analysis, Isolation Forest, and DIDEROT Auto-encoder methods for the proposed system [16].

Choubineh et al., who detected cyber attacks against a gas pipeline, used Hoeffding Tree, NB, RT, Bayes Net, and OneR machine learning algorithms in their study. They utilized different methods to increase the proposed algorithm's performance and efficiency and compared the results [17].

Wang et al. performed attack detection for the SCADA system using datasets of gas pipeline and power transmission systems using the Modbus protocol. In their study, where they simulated attack scenarios such as Short-circuit fault, line maintenance, command injection, relay setting change, data injection, and DOS, they tested NNge, RF, NB, Adaboost, SVM, Decision Tree, oneR, J48, JRip, and AdaboostJRip, as well as their proposed model, "Stacked Deep Learning" for attack detection [18].

Basnet et al. proposed a new deep learning-based ransomware detection framework in a SCADA-controlled electric vehicle charging station. Therefore, they created ransomware-driven DDoS attacks and ransomware-driven false data injection attacks in the simulation environment. They used Deep neural networks, 1D Convolution Neural Network (CNN), and Long Short-Term Memory (LSTM) algorithms for attack detection [19].

Rajesh et al. created a real-time SCADA network traffic dataset to detect attacks against Industrial Process Control Systems. They utilized Chi-square, ANOVA, and LASSO with SVMS-MOTE metrics to organize the feature values. Then, they applied RF, SVM, K-Nearest Neighbors (KNN), and NB machine learning algorithms for attack detection [20].

Polat et al. detected DDoS attacks on SDN-based SCADA systems. They obtained the dataset by establishing the experimental environment with Modbus TCP communication. Hybrid LSTM, Gated Recurrent Units, and SVM methods were used to detect attacks [7].

Some studies in the literature use their own or ready-made datasets. These studies; used machine learning, deep learning, or hybrid approaches to detect attacks against SCADA systems. The reviewed studies frequently discussed NB, RF, SVM, and LSTM algorithms.

In addition to previous research, SDN-based SCADA systems were discussed in this study, and machine learning methods were used to detect attacks against these systems. A DDoS attack detection system model is proposed. The proposed model highlighted the use of different machine learning methods to eliminate the deficiencies of previous studies and contribute to the field. Besides, a dataset adopting a real-time SDN infrastructure—tested in similar literature studies—was used to perform attack detection. The current study proposed a valuable model for attack detection using LR, KNN, RF, and SVM methods.

### 3. SCADA, SDN, and Security Relationship

This section includes information about SCADA and SDN technologies, the services offered by these technologies, and cyber security vulnerabilities.

#### 3.1. SCADA systems

SCADA is a system that transmits the information received from the terminal units in the work environment to the central unit, sends commands from the center to the peripheral elements, manages communication, and monitors all operations. While SCADA systems serve in many areas, such as airlines, railways, space systems, power plants, and critical infrastructures of different scopes, Human Machine Interface (HMI) monitors and manages these systems. SCADA systems consist of Master Terminal Units (MTU), Remote Terminal Units (RTU), and end devices. Figure 1 shows SCADA system components.

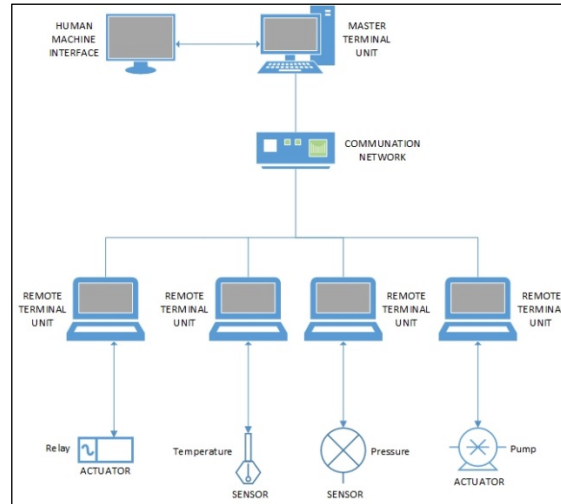


Figure 1. SCADA system components

As seen in Figure 1, end devices, such as sensors or actuators in the fields, send data to the RTU. RTU transmits the data received to MTU. After performing the controls and actions, MTU transfers the decision and the necessary command to the RTU. RTU conveys the relevant commands to terminals, and specified operations thus become complete. Besides these, SCADA systems have a database for event information records and an HMI for the user. These features make it easy to conduct retrospective case studies, data analysis, and process tracking [1].

SCADA systems are designed independently from the external network. Therefore, it works in a closed circuit, has no cyber security mechanisms planned, and has security vulnerabilities [21]. The increased number of sensors used in devices or terminal units in the SCADA system and higher data transmission between the elements raise the system's complexity. Using the Internet in SCADA has enabled the installation of many new technologies. System users can use default or weak-featured passwords, share passwords with others, and prefer remote access to the system. Security solutions such as attack detection and prevention systems or antivirus software cannot ultimately provide security for SCADA systems. Therefore, security vulnerabilities in SCADA systems allow attackers to infiltrate and damage the system. These security vulnerabilities can manipulate SCADA system components with different attack types, such as DOS, DDoS, data modifying, and packet injection [18]. Abnormalities or malfunctions of system components can stop the SCADA and even damage the functioning of other associated systems.

Insecure communication protocols also compromise system security by causing vulnerabilities. Modbus TCP/IP protocol provides no encrypted transmission, authentication check, or authorization; it has many security vulnerabilities. However, it is the most preferred communication protocol because it is an open-source and easy-to-use application [22]. Due to security holes, the Modbus TCP/IP protocol is vulnerable to attacks such as DoS, DDoS, and MITM [23]. DDoS attacks might manipulate the lack of authorization vulnerability of the Modbus TCP/IP protocol and cause the Master device to send messages to the RTUs. This process can consume the resources of the RTU and render them unusable, as in the Alabama Browns Ferry Nuclear Power Plant that was closed down because of DDoS attacks [22].

### 3.2. Software-Defined Network (SDN)

With the inability to meet the new needs in the IT world with the traditional network approach, new technologies such as SDN have emerged. SDN technology has brought a different perspective to network management by providing opportunities for innovations, such as adding new units to the network, increasing the variety of devices, and using diverse technologies simultaneously. SDN can produce easy and fast solutions to problems and facilitates network management.

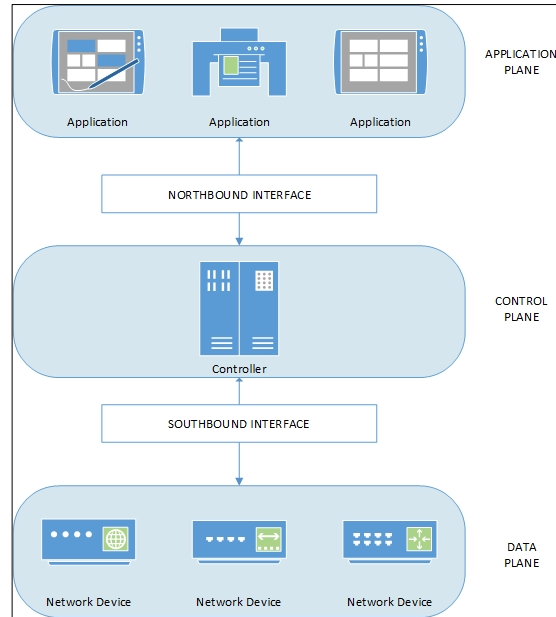


Figure 2. SDN architecture

As seen in Figure 2, there are three planes in the SDN architecture: control, data, and application. The data plane, programmed and managed by the control plane, consists of various communication devices such as routers. Devices on this plane cannot perform high-level network operations. The application plane assists the control plane in security, routing, and network configuration. Applications are programmed with the software located in this plane. In the control plane between the two planes, there are SDN controllers, which are the brains of the network. The controllers communicate with the devices in the data plane using the Southbound interface and the services and applications running on the application plane using the Northbound interface. The control plane manages communication devices [24].

### 3.3. Distributed Denial-of-Service (DDoS) attacks

DDoS attacks aim to prevent the systems from responding to their users. Network resources in the attacked systems struggle to resist the invasion that massively damages the network infrastructure and renders the services temporarily or permanently inoperable. These attacks occur in two modes: First, numerous requests are forwarded to the target system via infected zombie computers. Second, network security vulnerabilities are detected by infiltrating the target system, and the system is rendered inoperable. DDoS attacks can cause financial, reputation, time losses, and information thefts because of system malfunctions.

SCADA systems are the most exposed when it comes to DDoS attacks. These attacks cause heavy traffic by sending too many requests to the MTU or terminals in the SCADA system. Thus, the target machine cannot respond even to actual requests [25]. A SCADA system that cannot react to user requests can also affect connected systems—machines or terminals—and terminate data exchange.

## 4. Material and Method

This section includes information about the dataset, methods, and experimental results. In addition, the comparison of the results obtained with the literature is also included in this section.

### 4.1. Dataset

The current study utilized the dataset produced by Polat et al. in their DDoS attack detection experiments conducted in an SDN-based SCADA network environment [7]. The experimental studies covered four scenarios: TCP flood attack, UDP flood attack, ICMP flood attack, and normal (no attack) scenario. Table 1 shows the network packet (samples) numbers of these scenarios. The dataset had 89 attributes, benign (normal) network traffic data (1188 rows), and DDoS attacks (TCP, UDP, and ICMP flooding) traffic data (a total of 3012 rows). Since the number of samples of these four classes in the dataset is close to each other, the dataset is balanced.

Table 1. The number of packages in the scenarios

Attacks	Number of Packages
TCP flooding	
UDP flooding	3012
ICMP flooding	
Normal Request	1188
Total	4200

## 4.2. Methods

To detect attacks, the study utilized Logistic Regression, K-Nearest Neighbors, Random Forest, and Support Vector Machine-machine learning classification algorithms.

### 4.2.1. Logistic Regression (LR)

LR is a linear classifier algorithm that finds a hyperplane in the feature space. It separates the obtained observation results according to their classes and converts the output of a linear function using a logistic sigmoid function. Thus, "probability values" that can match a particular class are calculated [26].

It is a successful method of classifying categorical dependent variables using independent variables. LR is used in many areas with nonlinear classification problems, especially in market research, finance, and engineering. The dependent variable is usually coded as "1" and "0" in binary logistic regression models. If the observed result is successful or has a positive meaning, it is coded as "1". In the opposite case, it is coded as "0". Unlike traditional regression models, the error term is hidden in logistic models. In the traditional regression model, there is no  $e$ , as in  $y=b+ax+e$ , but an error value  $e_i$  plays a role in the background [27].

### 4.2.2. K-Nearest Neighbors (KNN)

The KNN algorithm, a preference for classification and prediction problems, represents an easy-to-use supervised machine learning algorithm. The algorithm determines the  $k$  nearest neighbors to an unknown taken for classification. By looking at the classes these neighbors belong to, the unknown to be classified is assigned to one or more classes at the closest distance. While determining the data class, it finds the nearest neighbors and calculates the distances [28]. This research found the  $k$  value for classification to be 10.

In order to apply the nearest neighbor algorithm method, it is necessary to determine the distance measurement method. For this, one of the "Euclidean Distance" or "Cosine Similarity" measures is usually used [29].

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (2)$$

The examples in the classes are shown with Eq.1 and the data to be classified is shown with Eq.2.

$$D(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Accordingly, the Euclidean Distance between the two vectors is calculated by Eq.3.

### 4.2.3. Random Forest (RF)

RF can be defined as a collection of tree-structured classifiers. Using the best split among all variables, RF splits the best among a randomly selected subset of predictors at a node instead of dividing all. It creates a new training dataset by modifying the original and then grows a tree using random feature selections. Users can create as many trees as they want. The RF algorithm has been used extensively in different applications [30].

Instead of one classifier, it generates multiple classifiers and then classifies the new data with the votes taken from their predictions. To start this algorithm, two parameters must be defined by the user. These parameters

are the number of variables ( $m$ ) used at each node and the number of trees to be developed ( $N$ ) to determine the best split. The number of  $m$  variables, taken equal to the square root of the total number of  $M$  variables, generally gives the closest result to the optimum result. RF generates trees using the Classification and Regression Tree (CART) algorithm. At each node, branches are created according to the criteria of the CART algorithm (e.g., GINI index) [31]. The GINI index measures class homogeneity and can be expressed by Eq.4 below.

$$\sum \sum_{j \neq i} \left( \frac{f(C_i, T)}{|T|} \right) \left( \frac{f(C_j, T)}{|T|} \right) \quad (4)$$

In Eq.4,  $T$  is the training dataset,  $C_i$  is the class of a randomly selected pixel, and  $f(C_i, T)/|T|$  shows the probability that the selected sample belongs to class  $C_i$ . As the GINI index increases, class heterogeneity increases, while class homogeneity increases in the opposite case. When all  $N$  trees are produced, the class of candidate pixel is determined based on the prediction results obtained from  $N$  trees [32].

#### 4.2.4. Support Vector Machine (SVM)

SVM is a supervised machine learning model that uses regression and classification analysis. It identifies and analyzes patterns. It separates data into two or more dimensions using a line, plane, or hyperplane. For this, it determines the appropriate decision function [33]. The dataset of the two classes can be represented by Eq.5.

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

In Eq.5,  $x$  is the input vector with properties belonging to classes of size  $N$ .  $Y$  indicates the class labels corresponding to them, equal to  $+1$  or  $-1$  [34].

### 4.3. Experimental results

The current study performed experiments using the dataset to detect DDoS attacks in SDN-based SCADA systems. In the experiments study, four different algorithms were employed. These algorithms are LR, KNN, RF, and SVM. Detailed information about the algorithms is given in the material and methods section. The comparative results obtained from the experiments are presented in this section below.

There are four different classes in the dataset. These three contain different types of DDoS attacks, and the fourth class is normal. For experiments, the dataset is divided for train and testing, 80% of the dataset is arranged for training and 20% for testing. Accordingly, 2410 rows from the attack classes and 950 from the normal class were used for the train. The remaining 602 rows of data from the attacks and 238 rows from the normal class were used for testing. In order to create a highly accurate attack detection system, it is necessary to prepare and train a suitable model [35].

Table 2 presents the experiment results for attack detections performed by the LR classifier algorithm.

	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>F1-Score</b>	<b>Support</b>
Normal	0.888	0.974	0.929	155
ICMP Flooding	1.000	0.901	0.948	212
TCP Flooding	0.976	1.000	0.988	239
UDP Flooding	1.000	1.000	1.000	238
Accuracy			0.970	844
Macro Avg	0.966	0.969	0.966	844
Weighted Avg	0.973	0.970	0.970	844

Table 2 shows the analysis results of the LR classifier algorithm by the precision, recall, f1-score, support, and accuracy evaluation metrics. According to the performance results of the model on the f1-score metric, this model obtained the following correct prediction rates: Class-1 (Normal): 0.929, Class-2 (ICMP): 0.948, Class-3 (TCP): 0.988, and Class-4 (UDP): 1.00. The accuracy value of the model was 0.970. While the model's prediction in Class-1 was weak, it was superb in Class-4.

The study utilized a confusion matrix to understand the results of the classification model created, compare the actual values and estimation results, and evaluate the errors (Figure 3). In addition, the results for the

Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve value are presented in Figure 4. The ROC Curve furnishes a means for the comprehensive evaluation of a model across the entire spectrum of score thresholds yielded by a classifier [36].

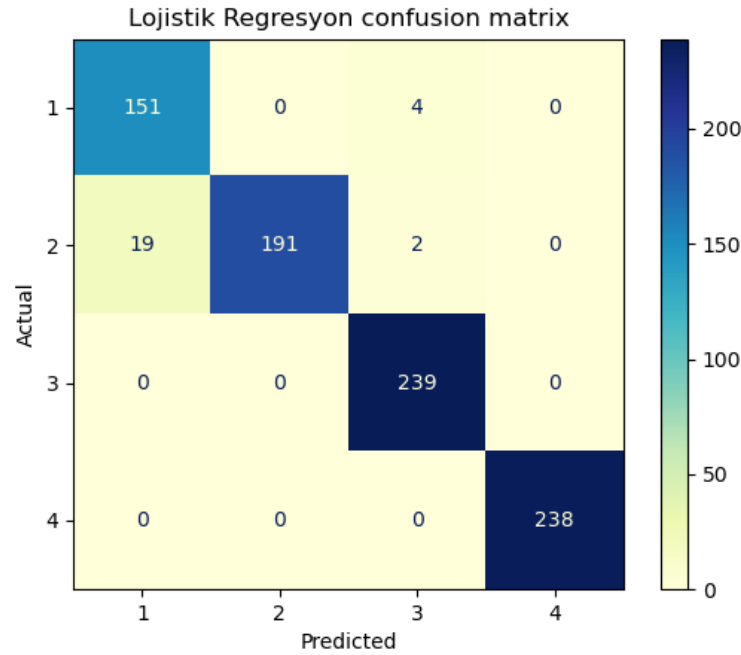


Figure 3. LR confusion matrix results

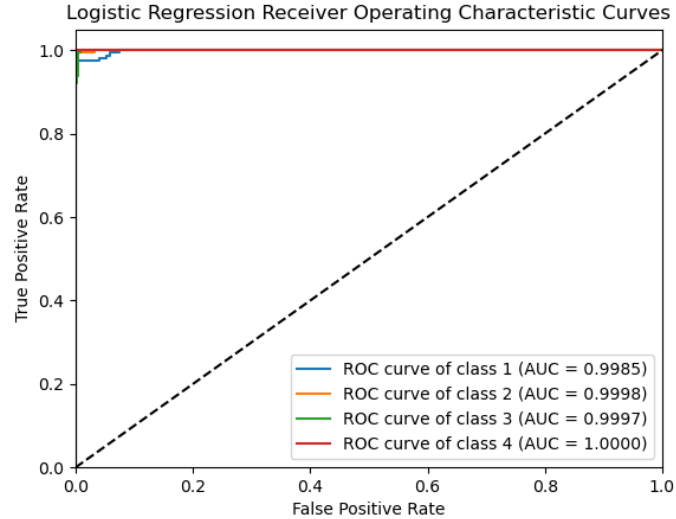


Figure 4. LR ROC Curve

According to the confusion matrix results, the LR classifier algorithm classified Class-1 with 151 true and four false predictions, Class-2 with 191 true and 21 false, Class-3 with 239 true and zero false, and Class-4 with 238 true and zero false. According to the results for ROC Curve, 99.85% for the 1st Class, 99.98% for the 2nd Class, 99.97% for the 3rd Class, and 100% for the 4th Class were obtained.

Table 3 presents the analysis results of the attack detections performed by the KNN classifier algorithm.

Table 3. KNN classification results

	Precision	Recall	F1-Score	Support
Normal	0.985	0.839	0.906	155
ICMP Flooding	0.898	1.000	0.946	212
TCP Flooding	0.987	0.983	0.985	239
UDP Flooding	1.000	1.000	1.000	238
Accuracy			0.966	844
Macro Avg	0.968	0.955	0.959	844
Weighted Avg	0.968	0.966	0.965	844

The KNN classifier algorithm's performance predictions based on the f1-score were as follows: Class-1 (Normal): 0.906, Class-2 (ICMP): 0.946, Class-3 (TCP): 0.985, and Class-4 (UDP): 1.00. The accuracy value of the model was 0.966.

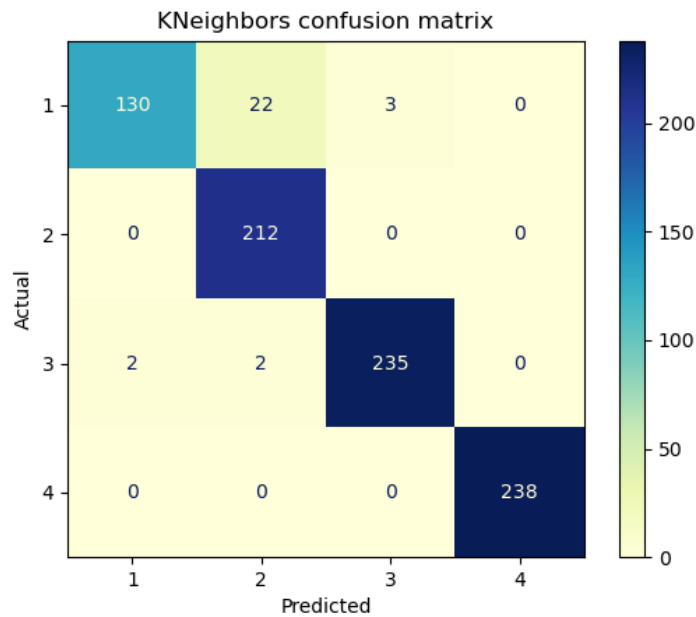


Figure 5. KNN confusion matrix results

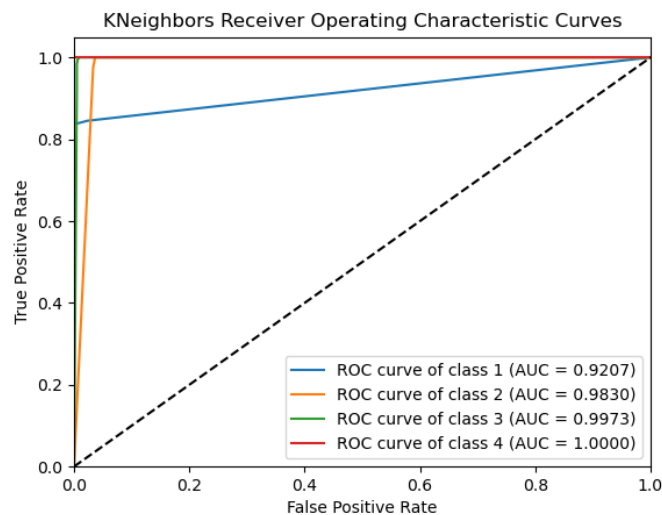


Figure 6. KNN ROC Curve

According to the confusion matrix results (Figure 5), the KNN classifier model classified Class-1 with 130 true and 25 false predictions, Class-2 with 212 true and zero false, Class-3 with 235 true and four false, and Class-4 with 238 true and zero false. According to the results obtained for ROC Curve (Figure 6), 92.07 % results were obtained for the 1st Class, 98.30% for the 2nd Class, 99.73% for the 3rd Class, and 100% for the 4th Class.



Table 4 presents the analysis results of the attack detections performed by the RF classifier algorithm.

Table 4. RF classification results

	Precision	Recall	F1-Score	Support
Normal	1.000	0.535	0.697	155
ICMP Flooding	0.691	1.000	0.817	212
TCP Flooding	0.944	0.854	0.897	239
UDP Flooding	1.000	1.000	1.000	238
Accuracy			0.873	844
Macro Avg	0.909	0.847	0.853	844
Weighted Avg	0.907	0.873	0.869	844

Table 4 shows the analysis results of the RF classifier model. According to the performance results of the model on the f1-score metric, this model obtained the following correct prediction rates: Class-1 (Normal): 0.697, Class-2 (ICMP): 0.817, Class-3 (TCP): 0.897, and Class 4 (UDP): 1.00. The accuracy value of the model was 0.873.

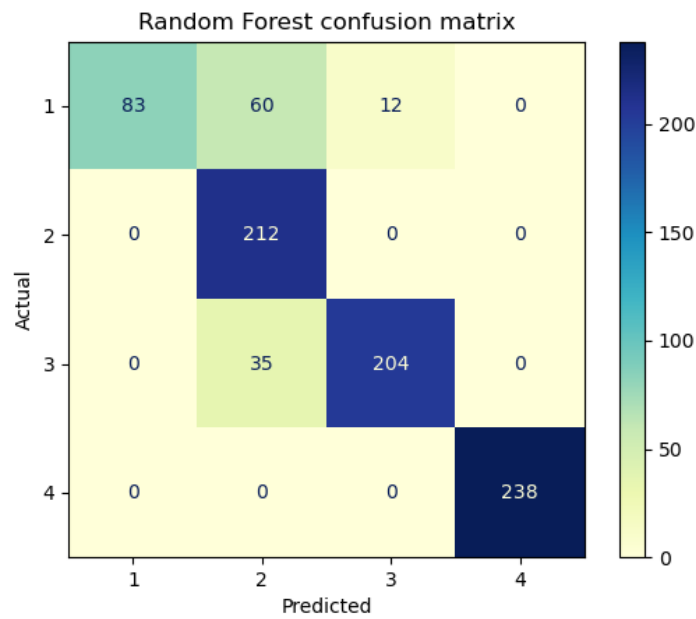


Figure 7. RF confusion matrix results

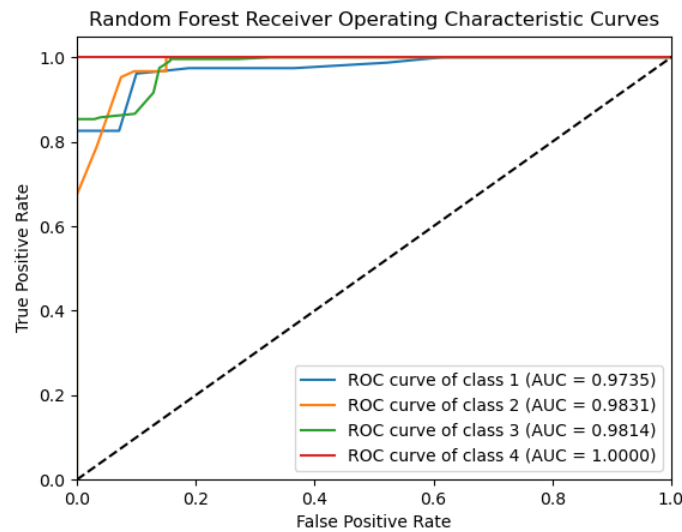


Figure 8. RF ROC Curve

According to the confusion matrix results (Figure 7), the RF classifier model classified Class-1 with 83 true

and 72 false predictions, Class-2 with 212 true and zero false, Class-3 with 204 true and 35 false, and Class-4 with 238 true and zero false. According to the results obtained for the ROC Curve (Figure 8), 97.35% for the 1st Class, 98.31% for the 2nd Class, 98.14% for the 3rd Class, and 100% for the 4th Class were obtained.

Table 5 presents the analysis results of the attack detections performed by the SVM classifier algorithm.

Table 5. SVM classification results

	Precision	Recall	F1-Score	Support
Normal	0.884	0.981	0.930	155
ICMP Flooding	1.000	0.896	0.945	212
TCP Flooding	0.980	1.000	0.990	239
UDP Flooding	1.000	1.000	1.000	238
Accuracy			0.972	844
Macro Avg	0.968	0.969	0.968	844
Weighted Avg	0.974	0.971	0.971	844

According to the performance results of the SVM algorithm on the f1-score metric, this model obtained the following correct prediction rates: Class-1 (Normal): 0.930, Class-2 (ICMP): 0.945, Class-3 (TCP): 0.990, and Class-4 (UDP): 1.00. The accuracy value of the model was 0.972. In general, the model predicted all classes successfully.

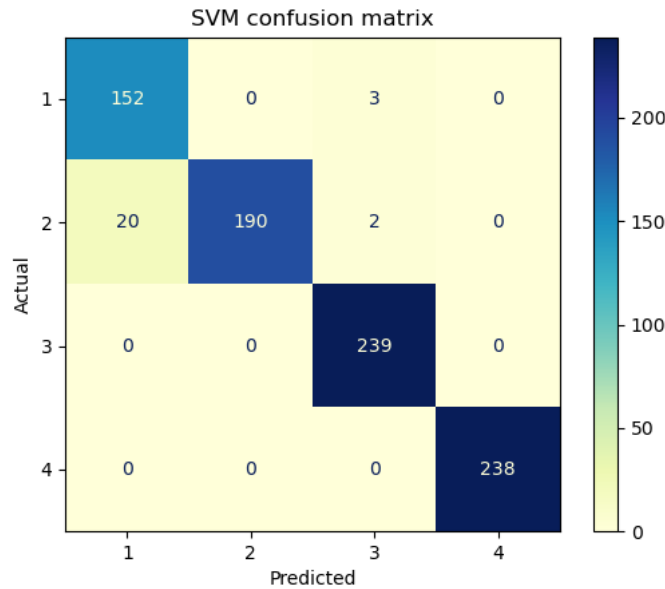


Figure 9. SVM confusion matrix results

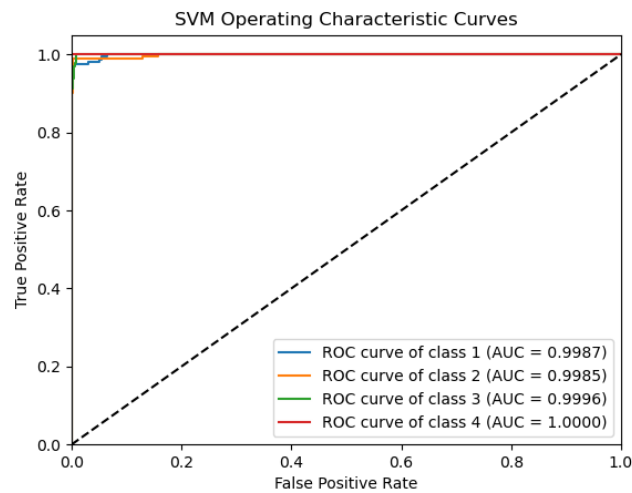


Figure 10. SVM ROC Curve

As seen in Figure 9, the SVM classifier model classified Class-1 with 152 true and 3 false predictions, Class-2 with 190 true and 22 false, Class-3 with 239 true and zero false, and Class-4 with 238 true and zero false. According to the results for the ROC Curve given in Figure 10, 99.87% for the 1st Class, 99.85% for the 2nd Class, 99.96% for the 3rd Class, and 100% for the 4th Class were obtained.

Four different classification models were evaluated, and the results were analyzed. Table 6 shows all the analysis results comparatively.

Table 6. Comparison of classification algorithms

	LR	KNN	RF	SVM
Accuracy	0.970	0.966	0.873	0.972
Precision	0.973	0.968	0.907	0.974
Recall	0.970	0.966	0.873	0.971

As seen in Table 6, the models are compared according to accuracy, precision, and recall metrics. Accuracy is a widely used metric to measure the success of a classification model. The comparison of the classification models showed that the RF model had a worse performance than other models. The LR and KNN classification models were close in performance. The results revealed that the SVM classification model showed the best performance.

The results obtained with the proposed model were compared with previous studies in the literature. Table 7 shows the comparison results. The comparisons conducted according to the sensitivity and accuracy values showed that the proposed model gave relatively better results.

Table 7. Comparison with other studies in the literature

Study	Dataset	Algorithms	Best Performance	Accuracy (%)	Precision (%)
[1]	T. H. Morris et al.	Decision Stump, Hoeffding Tree, RT, REP Tree	RT	84.00	-
[7]	Their dataset	LSTM, Gated Recurrent Units, SVM	Hibrit	97.62	-
[12]	Gamesa Wind Turbines	RF, ECSO-GML	ECSO-GML	97.60	98.10
[14]	Their dataset	Event-Based HMM, BP Neural Network, NB	Event-Based HMM	91.08	-
[16]	N. Rodofle et al.	Minimum Covariance Determinant, Local Outlier Factor, Principal Component Analysis, Isolation Forest, DIDEROT Autoencoder	DIDEROT Autoencoder	95.10	-
[18]	Mississippi State University's SCADA Lab	NNge, RF, NB, Adaboost, SVM, Decision Tree, oneR, J48, JRip, AdaboostJRip, Stacked Deep Learning method	Stacked Deep Learning	97.38	98.59
Proposed Study	The dataset of reference [7]	LR, KNN, RF, SVM	SVM	97.2	97.4

## 5. Conclusions

The safe continuation of activities in businesses, industrial facilities, or institutions, especially critical infrastructures, depends on the correct functioning of SCADA systems. For this purpose, the cyber security of the system in the structures using the SCADA system has been the primary research topic. Security issues have gained a different perspective by integrating a new technology such as SDN into the SCADA system. This study focuses on detecting three different DDoS attacks on SDN-based SCADA systems.

In addition, the normal class is also included in the dataset so that the system can detect non-attack situations. The dataset used in the study was prepared and made available by [7]. This dataset combines SCADA and SDN technologies, is obtained in a virtual environment, and produces network flow data of DDoS attacks against this system. Due to these features, it differs from the datasets in the literature. The results of the models created with four different machine learning methods on the dataset were examined in detail.

Our study reached the highest accuracy value of 97.2% with the model created with the SVM algorithm. According to other studies examined in the literature, it has been concluded that a complex model is optional to create an attack detection model that can be integrated into SCADA and SDN systems. When the studies are examined based on the accuracy value, our study produced a model with an average of 7.14% higher performance than those with lower success. Again, considering the accuracy values, there is only an average

of 0.33% loss of success compared to the complex structured studies that achieved higher success than ours. In particular, a less complex structure was presented compared to the study, in which the same dataset was used, and a slight difference of 0.42% was obtained in success.

Considering the distributions of attack types, the model we obtained in our study detects TCP and UDP attacks with 100% success. Of the attacks, only ICMP was detected as Normal at a rate of 9.43%, and TCP was detected at a rate of 0.94%. This shows that ICMP and Normal data flow are similar. In the estimation of normal network data, misclassification as TCP was performed with a low rate of 1.94%.

In systems where SCADA and SDN technologies are used together, using simple models that can be adapted efficiently and will not tire the system to provide cyber security may be advantageous. For this purpose, models have been produced for the security of the SDN-based SCADA system with fast machine learning algorithms frequently used in the literature. Fast machine learning algorithms are preferred instead of complex models such as deep learning and hybrid approaches, and the differences are discussed.

In the future, we plan to embed the model we developed into SDN-based SCADA systems. It is aimed to diversify the types of attacks that can be made on these systems and to run different algorithms for attack detection. We aim to contribute more to this field by working on the cyber security of SCADA and SDN-based SCADA systems.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] E. Söğüt and O. A. Erdem, "Endüstriyel Kontrol Sistemlerine (SCADA) Yönelik Siber Terör Saldırı Analizi", *Journal of Polytechnic*, vol. 23, no. 2, pp. 557-566, June 2020. doi:10.2339/politeknik.562570
- [2] D. Upadhyay and S. Sampalli, "SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) systems: Vulnerability assessment and security recommendations", *Computers & Security*, vol. 89, 101666, February 2020. doi:10.1016/j.cose.2019.101666
- [3] J. P. Farwell and R. Rohozinski, "Stuxnet and the Future of Cyber War", *Survival*, vol. 53, no.1, pp. 23-40, February-March 2011. doi:10.1080/00396338.2011.555586
- [4] M. A. Ferrag, M. Babaghayou and M. A. Yazici, "Cyber security for fog-based smart grid SCADA systems: Solutions and challenges", *Journal of Information Security and Applications*, vol. 52, 102500, June 2020. doi:10.1016/j.jisa.2020.102500
- [5] P. L. S. Jayalaxmi, R. Saha, G. Kumar and T. H. Kim, "Machine and deep learning amalgamation for feature extraction in Industrial Internet-of-Things", *Computers and Electrical Engineering*, vol. 97, 107610, January 2022. doi:10.1016/j.compeleceng.2021.107610
- [6] H. Polat and O. Polat, "An Intelligent Software Defined Networking Controller Component To Detect And Mitigate Denial Of Service Attacks", *Journal of Information and Communication Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 57-81, January 2021. doi:10.32890/JICT.20.1.2021.6288
- [7] H. Polat, M. Türkoğlu, O. Polat and A. Şengür, "A novel approach for accurate detection of the DDoS attacks in SDN-based SCADA systems based on deep recurrent neural networks", *Expert Systems with Applications*, vol. 197, 116748, July 2022. doi:10.1016/j.eswa.2022.116748
- [8] F. A. Alhaidari and E. M. Al-Dahasi, "New approach to determine DDoS attack patterns on SCADA system using machine learning", in *the 2019 International Conference on Computer and Information Sciences, ICCIS 2019, Sakaka, Saudi Arabia, May 2019*. pp. 1-6. doi:10.1109/ICCISCI.2019.8716432
- [9] T. Skripcak and P. Tanuska, "Utilisation of On-line Machine Learning for SCADA System Alarms Forecasting", in *the 2013 Science and Information Conference, London, UK, October 2013*. pp. 477-484.
- [10] J. M. Beaver, R. C. Borges-Hink and M. A. Buckner, "An evaluation of machine learning methods to detect malicious SCADA communications", in *the 12th International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2013, 2, Miami, FL, USA, December 2013*. pp. 54-59. doi:10.1109/ICMLA.2013.105
- [11] R. C. Borges Hink, J. M. Beaver, M. A. Buckner, T. Morris, U. Adhikari and S. Pan, "Machine learning for power system disturbance and cyber-attack discrimination", in *the 7th International Symposium on Resilient Control Systems, ISRCS 2014, Denver, CO, USA, August 2014*. pp. 1-8. doi:10.1109/ISRCS.2014.6900095
- [12] R. B. Benisha and S. Raja Ratna, "Detection of Intrusion using Enhanced Machine Learning Model in SCADA Wireless Network", *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol. 13, no. 1, pp. 85-98, 2020.

- [13] R. Lopez Perez, F. Adamsky, R. Soua and T. Engel, "Machine Learning for Reliable Network Attack Detection in SCADA Systems", in *the 17th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications and 12th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering, Trustcom/BigDataSE 2018, New York, NY, USA, September 2018*. pp. 633–638. doi:10.1109/TrustCom/BigDataSE.2018.00094
- [14] M. Wan, J. Yao, Y. Jing and X. Jin, "Event-based anomaly detection for non-public industrial communication protocols in SDN-based control systems", *Computers, Materials and Continua*, vol. 55, no. 3, pp. 447–463, 2018. doi:10.3970/cmcc.2018.02195
- [15] E. G. da Silva, A. S. da Silva, J. A. Wickboldt, P. Smith, L. Z. Granville and A. Schaeffer-Filho, "A One-Class NIDS for SDN-Based SCADA Systems", in the *International Computer Software and Applications Conference, 1, Atlanta, GA, USA, June 2016*. pp. 303–312. doi:10.1109/COMPSAC.2016.32
- [16] P. Radoglou-Grammatikis, P. Sarigiannidis, G. Efstathopoulos, P. A. Karypidis and A. Sarigiannidis, "DIDEROT: An intrusion detection and prevention system for DNP3-based SCADA systems", in the *15th International Conference on Availability, Reliability and Security, 115, New York, NY, USA, August 2020*. pp. 1-8. doi:10.1145/3407023.3409314
- [17] A. Choubineh, D. A. Wood and Z. Choubineh, "Applying separately cost-sensitive learning and Fisher's discriminant analysis to address the class imbalance problem: A case study involving a virtual gas pipeline SCADA system", *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 29, 100357, 2020. doi:10.1016/j.ijcip.2020.100357
- [18] W. Wang, F. Harrou, B. Bouyeddou, S. M. Senouci and Y. Sun, "A stacked deep learning approach to cyber-attacks detection in industrial systems: application to power system and gas pipeline systems", *Cluster Computing*, vol. 25, no. 1, pp. 561–578, 2022. doi:10.1007/s10586-021-03426-w
- [19] M. Basnet, S. Poudyal, M. H. Ali and D. Dasgupta, "Ransomware detection using deep learning in the SCADA system of electric vehicle charging station", in the *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America, Lima, Peru, September 2021*. doi:10.1109/ISGTLATINAMERICA52371.2021.9543031
- [20] L. Rajesh and P. Satyanarayana, "Evaluation of Machine Learning Algorithms for Detection of Malicious Traffic in SCADA Network", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 913–928, 2022. doi:10.1007/s42835-021-00931-1
- [21] S. East, J. Butts, M. Papa and S. Sheno, "A taxonomy of attacks on the DNP3 protocol", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 311, pp. 67–81. March 2009. doi:10.1007/978-3-642-04798-5\_5
- [22] P. Kamal, A. Abuhussein and S. Shiva, "Identifying and Scoring Vulnerability in SCADA Environments", in the *Future Technologies Conference, Vancouver, Canada, November 2017*. pp. 845-857.
- [23] B. Chen, N. Pattanaik, A. Goulart, K. L. Butler-Purry and D. Kundur, "Implementing attacks for modbus/TCP protocol in a real-time cyber physical system test bed", in the *CQR 2015: 2015 IEEE International Workshop Technical Committee on Communications Quality and Reliability, Charleston, SC, USA, May 2015*. pp. 1-6. doi:10.1109/CQR.2015.7129084
- [24] M. Kuerban, Y. Tian, Q. Yang, Y. Jia, B. Huebert and D. Poss, "FlowSec: DOS attack mitigation strategy on SDN controller", in the *2016 IEEE International Conference on Networking Architecture and Storage, Long Beach, CA, USA, August 2016*. pp. 1-2. doi:10.1109/NAS.2016.7549402
- [25] S. Shitharth, and D. P. Winston, "A Comparative Analysis between Two Countermeasure Techniques to Detect DDoS with Sniffers in a SCADA Network", *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 179–186, 2015. doi:10.1016/J.PROTCY.2015.10.086
- [26] A. Desai, Y. Guo, S. Sheng, S. Sheng, C. Phillips and L. Williams, "Prognosis of Wind Turbine Gearbox Bearing Failures using SCADA and Modeled Data", *Annual Conference of the PHM Society*, vol. 12, no. 1, pp. 1-10, 2020. doi:10.36001/phmconf.2020.v12i1.1292
- [27] W. H. Greene, *Econometric Analysis*, Statistical Papers, Springer, vol. 52, iss. 4, 2011, pp. 983-984. doi:10.1007/s00362-010-0315-8
- [28] A. Gumaiei, M. M. Hassan, S. Huda, Md. R. Hassan, D. Camacho, J. Del Ser and G. Fortino, "A robust cyberattack detection approach using optimal features of SCADA power systems in smart grids", *Applied Soft Computing*, vol. 96, 106658, 2020. doi:10.1016/j.asoc.2020.106658
- [29] G. Silahatároğlu, *Kavram ve Algoritmalarıyla Veri Madenciliği*. Papatya Yayınları, İstanbul, 2008.
- [30] J. Zhang, M. Zulkernine and A. Haque, "Random-forests-based network intrusion detection systems", *IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications And Reviews*, vol. 38, no. 5, pp. 649–659, 2008. doi:10.1109/TSMCC.2008.923876.
- [31] L. Breiman, "Random Forests", *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001. doi:10.1023/A:1010933404324
- [32] J. D. Watts, S. L. Powell, R. L. Lawrence and T. Hilker, "Improved Classification of Conservation Tillage Adoption Using High Temporal and Synthetic Satellite Imagery", *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 1, pp. 66–75, 2011. doi:10.1016/j.rse.2010.08.005
- [33] Z. Qi., Y. Tian and Y. Shi, "Robust Twin Support Vector Machine for Pattern Classification", *Pattern Recognition*, vol. 46, no. 1, pp. 305-316, 2013. doi:10.1016/j.patcog.2012.06.019
- [34] H. Adaminejad, I. Shayegani, M. Ohammadi and E. Farjah, "An Algorithm for Power Quality Events Core Vector Machine-Based Classification", *The Modares Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 50-59, 2013.

- [35] E. Duman and O. A. Erdem, "Anomaly Detection in Videos Using Optical Flow and Convolutional Autoencoder," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 183914-183923, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2960654
- [36] S. Oyucu, H. Sever, and H. Polat, "Otomatik Konuşma Tanımaya Genel Bakış, Yaklaşımlar ve Zorluklar: Türkçe Konuşma Tanımının Gelecekteki Yolu", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 834-854, 2019. doi:10.29109/gujsc.562111

---

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Screen Watermark: A Novel Approach in Detecting Digital Criminals

Ömer Faruk Kerman<sup>a</sup>, Aybike Şimşek<sup>b</sup>

Submitted: 18.09.2023 Revised: 22.11.2023 Accepted: 23.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705091

### ABSTRACT

**Keywords:** Screen Watermarking, Steganography, Data Theft, Malicious Insiders, Investigation and Attribution

<sup>a</sup>\* Kara Kuvvetleri Komutanlığı,  
Bilgi Sistem Daire Başkanlığı,  
Siber Olaylara Müdahale Şubesi  
06100 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0009-0005-2871-3867  
e mail: ofkerman@kho.msu.edu.tr

<sup>b</sup> Milli Savunma Üniversitesi,  
Kara Harp Okulu,  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
06420 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0002-1033-1597

\*Corresponding author:  
ofkerman@kho.msu.edu.tr

**Anahtar Kelimeler:** Ekran Filigranı, Steganografi, Veri Hırsızlığı, Kötü Niyetli Çalışanlar, Soruşturma ve İlişkilendirme

Organizations need to safeguard their information systems not only against external cyber attackers but also against malicious individuals within their ranks who may exploit their access to steal sensitive information for personal gain. Particularly, these malevolent insiders can covertly monitor and capture documents displayed on computer screens using digital cameras. By opting for digital cameras over more traditional communication methods like email, perpetrators can evade digital traces, making it harder to detect and establish their identity. Even if institutions were to enforce a policy banning the use of camera-equipped devices, the ubiquity of small cameras allows this threat to persist. In response to this menace, a novel technique has been proposed to counter it - embedding hidden watermarks containing confidential information onto the screen, irrespective of the application in use. These invisible watermarks, imperceptible during regular usage, can be extracted from captured images, aiding in pinpointing the location and time of data leaks.

## Ekran Filigranı: Dijital Suçluların Tespitinde Yeni Bir Yaklaşım

### ÖZ

Kuruluşların bilgi sistemlerini yalnızca harici siber saldırganlara karşı değil, aynı zamanda kişisel çıkar sağlamak amacıyla hassas bilgileri çalmak için erişimlerini istismar edebilecek kendi bünyelerindeki kötü niyetli kişilere karşı da korumaları gerekir. Özellikle içerideki bu kötü niyetli kişiler, dijital kameralar kullanarak bilgisayar ekranlarında görüntülenen belgeleri gizlice izleyebilir ve yakalayabilir. Failler, e-posta gibi daha geleneksel iletişim yöntemleri yerine dijital kameraları tercih ederek dijital izlerden kaçabilir ve böylece kimliklerinin tespit edilmesini ve belirlenmesini zorlaştırabilirler. Kurumlar kamera donanımlı cihazların kullanımını yasaklayan bir politika uygulasa bile, küçük kameraların her yerde bulunması bu tehdidin devam etmesine olanak tanır. Bu tehdide karşı, kullanılan uygulamadan bağımsız olarak ekrana gizli bilgiler içeren gizli filigranlar yerleştiren yeni bir teknik önerilmiştir. Normal kullanım sırasında fark edilemeyen bu görünmez filigranlar, yakalanan görüntülerden çıkarılabilir ve veri sızıntılarının yerini ve zamanını belirlemeye yardımcı olur.

## 1. Introduction

Organizations must safeguard their sensitive information not only from external attackers but also from internal threats, such as infiltrators or malicious insiders. To address this concern, solutions like Data Loss Prevention (DLP) systems are increasingly being employed. However, DLP software can be configured to log or block actions like internet access, sending emails, printing, taking screenshots, or accessing external media. As a result, data leaks through traditional communication channels can either be prevented or at the very least generate a digital trail of the perpetrator's actions. These digital traces can serve as evidence in forensic investigations against malicious insiders. However, solutions like DLP systems cannot prevent an insider from capturing a computer screen's image using a digital camera. Any employee with the authority to view a specific document on the computer screen can capture an image and leak the document's contents to unauthorized parties. Since DLP software cannot detect whether a photo of a document has been taken, using a camera enables the perpetrator to easily evade digital traces. This complicates the process of identifying and proving the perpetrator's identity based on a leaked image. The widespread availability of camera-equipped smartphones and the rise of new technologies like digital glasses or lenses further complicate the control of this data leakage threat.

Techniques such as screen watermarking, steganography, and cryptography offer significant solutions in the field of information security. Screen watermarking involves placing a transparent watermark on the computer screen to facilitate the identification of the source of leaked content through photographs or videos. Steganography is a data hiding technique, referring to concealed data within media files like images, audio, or videos. With this method, detecting hidden data within a document or file becomes challenging. The topic of cryptography encompasses encryption methods and plays a crucial role in data protection. Cryptography prevents unauthorized access by encrypting and transmitting data securely, thereby reducing the risk of data leakage.

## 2. Information Hiding

Individuals are constantly seeking new and effective ways of communication. Online, users often find themselves needing to send, share, or receive confidential information. As communication increasingly occurs within electronic environments, new needs, challenges, and opportunities emerge. Hence, owing to the rapid development of internet technologies, digital media can be easily transmitted over networks. However, a significant issue encountered when communicating over a network is the presence of multiple observers, including both passive and active ones. While a passive observer might simply listen, an active observer can both listen and modify a message. Consequently, the aim is to ensure that only the intended recipient can decipher the communication's content, while also preferring to keep the transmitted message confidential. To address this issue, two primary solutions have emerged: information hiding and cryptography [1].

The pursuit of a secure and confidential communication method is crucial not only for military purposes but also in terms of market objectives related to commercial strategy and copyright. Cryptography involves the transformation of plain text into encrypted text using a secret key. However, transmitting encrypted text can easily arouse suspicion among attackers, potentially leading to the interception, compromise, or decryption of the encrypted text. To overcome the limitations of cryptographic techniques, the strategy of information hiding has been adopted.

### 2.1. Information hiding techniques

Information hiding is a multidisciplinary field that enables the concealment of secret data within a digital carrier source. Imagine two parties wishing to communicate while keeping their communication unnoticed by others. The sender can utilize an image that masks the existence of the communication. This image is subsequently made available on a public channel accessible to everyone, yet only the intended recipient is aware of the hidden information and possesses the ability to extract it. Information hiding techniques, as illustrated in Figure 1, are categorized into three main types: steganography, watermarking, and fingerprinting.



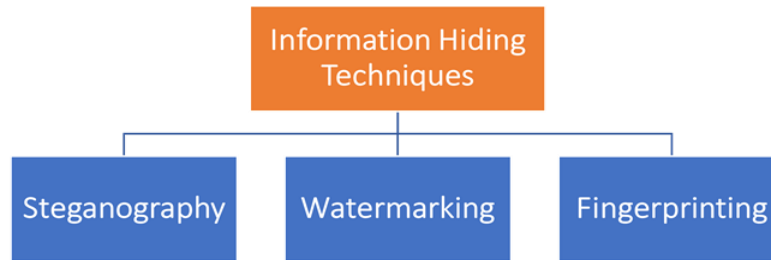


Figure 1. Information Hiding Techniques [1]

Steganography is derived from the Greek words "steganos," meaning "covered or protected," and "graphie," meaning "writing" [2]. As such, steganography is not only the art but also the science of hiding the fact that communication is taking place, along with the actual content of the communication [3]. Privacy is not the sole motivation for steganography. By embedding one data piece within another, they become a single entity, eliminating the need to maintain a connection or risk their separation. An application highlighting this advantage is embedding patient information within medical images, establishing a permanent association between the two pieces of information. The goal of steganography is to enable the transmission of secret messages without arousing suspicion. The concept of "What You See Is What You GET (WYSIWYG)" is sometimes encountered when printing images or other materials, yet it may not always hold true. Images can contain more than what the Human Visual System (HVS) perceives and possess more than a thousand words. Throughout history, people have sought to create covert communication methods.

A steganographic system encompasses two fundamental aspects: steganographic capacity and imperceptibility. However, these two features often conflict and increasing the capacity of a steganographic system while maintaining imperceptibility proves challenging. "Watermarking" refers to identity marks created during the paper-making process. The earliest watermarks emerged in 13th-century Italy and quickly spread throughout Europe, serving to identify skilled papermakers or trade guilds. Today, watermarks still function as markers of origin and for preventing counterfeiting. A watermark is a "hidden message" embedded in a "cover source." Often, extracting a watermark relies solely on knowledge of a secret key [2]. Thus, the effectiveness of any watermarking technique depends on the robustness of the watermark- that is, even if the presence of a watermark is known to exist on a specific object (visible watermarking), it should be impossible to remove the watermark from the object without altering or destroying the original (watermarked) object.

"Fingerprinting" is the process of uniquely marking data to trace the origin of a discovered illegal data copy. The fundamental purpose of fingerprinting is for every user to obtain a copy of the concerned object containing a unique mark. This mark can be used to identify the object and thus the user. For instance, copies could be distributed only to users who authenticate their identity, ensuring they are the ones receiving the copies. Another scenario involves the distribution of sensitive information (images, videos, etc.) to a few authorized individuals and efforts to trace the source of leaked information to a traitorous distributor. These marks should be imperceptible and present in every frame or image distributed. These marks must be embedded so reliably that they cannot be removed through multiple copying or editing processes [2].

## 2.2. Comparison of steganography and watermarking

Steganography and Watermarking are two distinct concealment technologies utilized for different purposes. Steganography serves the purpose of safeguarding covert communication, whereas Watermarking is employed to authenticate the ownership of documents or content. A comparison table of these two concepts is presented in Table 1.

Table 1. Comparison of Steganography and Watermarking

Features	Steganography	Watermarking
<b>Purpose</b>	To keep communication hidden	To authenticate ownership
<b>Hidden Data</b>	Carried covertly without supervision	Carried consciously or unconsciously
<b>Failure Scenario</b>	Detection of the hidden message	Removal or alteration of the watermark
<b>Output/Result</b>	Stego file containing hidden message	Embedded or invisible Watermark File
<b>Ownership</b>	Does not verify ownership	Verifies ownership
<b>Durability</b>	Plays a minor role	Requires resilience against potential attacks

As shown in Table 1, Steganography focuses on ensuring the undetectability of the hidden message. Hidden data is carried alongside a carrier without supervision, producing an output in the form of a Stego file. Through steganography, it is not possible to determine who the message is from or which organization it belongs to. Additionally, steganography is considered unsuccessful if the hidden message is detected. On the other hand, Watermarking aims to authenticate ownership by adding hidden data known as a watermark to content. The watermark can be visible or invisible and may contain ownership information such as a company logo or owner's details. Watermarking results in a watermarked file, and it is considered a failure if the watermark is removed or altered.

Watermarking is a technology that needs to be resistant against various attacks. This table and explanations showcase the distinct usage scenarios and purposes of Steganography and Watermarking. Steganography is preferred in cases requiring covert communication, while watermarking is chosen when there's a need to authenticate content ownership.

### 3. Literature Review

This literature review highlights the significance of screen watermarking methods developed through the combination of steganography, watermarking, and cryptography technologies. These techniques are widely employed to protect the confidentiality of sensitive information and authenticate data ownership. Steganographic methods ensure communication privacy by covertly embedding content within other data carriers. Watermarking verifies ownership and provides traceability by adding unique identifiers to content. Cryptography facilitates secure encryption and transmission of data. This study elucidates how these technologies are integrated within the realm of screen watermarking, showcasing their contributions to data security.

#### 3.1. The methods used in information hiding

Data concealment has gained increasing importance in today's world. With the rapid progress of the information age, protecting private and sensitive data has become a significant necessity. In this context, methods like watermarking, encryption (cryptography), and steganography emerge as crucial tools for ensuring data security and guarding against unauthorized access. These methods are highly effective and practical for safeguarding data integrity and security.

Watermarking involves embedding a recognizable image or pattern into documents to establish authenticity. For instance, watermarking is utilized on identity cards, passports, banknotes, and other security documents to prevent counterfeiting and alterations. Digital watermarking, on the other hand, is an embedded marker that aids in protecting digital rights, enabling data to be traced and detected if necessary. Encryption (cryptography) transforms data into an incomprehensible format, offering key features like privacy, integrity, authentication, and non-repudiation. Encrypted data is shielded against unauthorized access and can only be deciphered with the correct key, ensuring data security and preventing unauthorized individuals from accessing the information. Steganography involves the practice of concealing messages, files, or images within other messages, files, or images. This method offers high levels of security and capacity. Steganography hides data without altering the structure of the hidden message, creating a structure that appears like a normal image or file from the outside, but contains concealed information within. This enables data to be transmitted without being detected by unauthorized parties.

These three methods can be combined to achieve a higher level of protection [4]. For instance, messages can first be encrypted into an incomprehensible format. Then, steganography can be employed to embed the encrypted text within a cover medium. This integrated approach successfully meets the goals of security, capacity, and robustness in data concealment. These methods play a crucial role in maintaining data privacy and security. As technology continues to advance, the need for data protection also grows. Therefore, methods like watermarking, encryption, and steganography have become indispensable tools in preserving sensitive data and combating unauthorized access.

#### 3.2. Watermarking methods for screen content protection

Watermarking methods can be categorized into solutions for multimedia files and text documents. Textual watermarks displayed on screens need to be invisible and seamlessly integrated into the text's

visuals. Basic approaches for images involve placing watermarks in the least significant bits of pixel values [5]–[7], utilizing imperceptible color changes. However, concerns arise about the ability of devices such as cameras and smartphone cameras to capture these changes. An alternative method [8] encodes watermarks by altering the brightness of adjacent pixels. Unlike this method, our approach doesn't necessitate the presence of the original image for watermark retrieval. Many multimedia watermarking techniques operate in transformed domains, like the frequency spectrum of images [9]–[11], allowing subtle modifications that are hard to detect by humans. However, these watermarks can often be discernible in text documents [12]. Therefore, frequency-domain watermarking isn't well-suited for our proposed method. Similar to our approach, printer technology uses quasi-steganographic techniques, embedding printing details in output using invisible yellow dots [13]. Our method follows a similar logic by hiding information within a watermark on a computer screen.

Considering the above, current research has emphasized three methods. The first approach capitalizes on the human eye's insensitivity to slight brightness changes compared to digital cameras. This content-independent method invisibly embeds watermarks in textual content on screens, aiding forensic investigations into data breaches. The watermark is later extracted from images of the displayed documents, facilitating the determination of breach details. In the watermark embedding process, a unique bit sequence defines hidden data. This sequence is used to create a secure payload with a cryptographic checksum. The payload is encoded using a specialized convolutional encoder to generate watermark symbols embedded into the computer screen. In the extraction process, embedded symbols are decoded to retrieve the protected payload. The cryptographic authentication summary is verified, and if correct, the obfuscated data information is returned; otherwise, no result is provided [14].

The second research paper presents a real-time screen watermarking approach with an overlay layer [15]. It exploits human visual system characteristics to embed an imperceptible watermark over content, adapting to screen changes with minimal delay. This adaptable method functions without specialized hardware and suits various computer systems. The algorithm's simplicity is a key feature, ensuring not only low computational complexity but also enabling real-time processing. The nearly imperceptible delay between screen changes and the watermark algorithm's adaptation is a testament to its high adaptability dynamics. It's worth noting that the delay is proportionate to the size of the watermarked screen, indicating a scalable performance across varying display dimensions.

The third research paper introduces the SSDeN Framework, a frequency-domain watermarking technique leveraging deep neural networks [16]. This framework combats unauthorized use of screen captures without compromising image quality. This innovative framework addresses common limitations observed in traditional watermarking methods, such as detectability and potential degradation of image quality. The SSDeN Framework stands out as a high-performance solution that ensures robust protection against unauthorized screen capture while preserving image quality. It operates in four stages: dataset preprocessing, watermark embedding, separation of watermarked data, and watermark extraction. In the preprocessing stage, data is prepared, compressed, and subjected to Discrete Cosine Transform (DCT). Watermark embedding involves adding the watermark to DCT coefficients corresponding to each pixel. Separation of watermarked data extracts watermarked information using frequency domain attributes. Watermark extraction removes the watermark from watermarked data, recovering the original image. The SSDeN Framework utilizes deep neural networks and frequency domain operations to significantly enhance the security of screen captures without compromising the quality of the captured images. The synergy of these components positions the SSDeN Framework as a cutting-edge solution in the realm of screen capture protection.

### 3.3. Assessment of watermark methods

In the following examination of various watermarking methods, we delve into the key features, applications, advantages, and limitations of three distinct approaches. The insights from these methods, summarized in the Table 2 below, shed light on the efficacy and challenges associated with contemporary watermarking techniques. In the basis of these methods summarized in Table 2, detailed findings and explanations of the methods used are also presented by us.

Table 2. Comparison of Watermarking Methods for Screen Content Protection

Research Paper	Methodology	Key Features	Application	Advantages	Limitations
[14] Content-Independent Textual Watermarking	Embeds watermarks in textual content on screens, exploiting human eye insensitivity to brightness changes.	Invisibility, aids forensic investigations in data breaches; extraction from images facilitates breach details determination.	Forensic investigations, data breach analysis.	Utilizes human eye characteristics, content-independent.	Effectiveness may be impacted by variations in display technologies.
[15] Real-time Screen Watermarking with Overlay Layer	Real-time screen watermarking using an overlay layer, adapts to screen changes with minimal delay.	Real-time, adaptable without specialized hardware, suits various computer systems.	General screen watermarking applications.	Exploits human visual system characteristics, minimal delay in adapting to screen changes.	Effectiveness dependent on the complexity of screen changes.
[16] SSDeN Framework - Frequency-Domain Watermarking with Deep Neural Networks	Utilizes deep neural networks and frequency-domain operations for watermarking. Operates in four stages: dataset preprocessing, watermark embedding, separation of watermarked data, and watermark extraction.	Combats unauthorized use of screen captures without compromising image quality.	Screen capture security enhancement.	Deep neural network integration, frequency-domain operations, image quality preservation.	Effectiveness subject to real-world scenario tests; potential vulnerabilities not addressed.

The first examined method [14] concluded that all watermark data could be successfully retrieved from unchanged photographs for all tested smartphones. Despite modifications made to the images, the encoded data could still be extracted. Additionally, the method demonstrated remarkable resilience against cropping of watermarked images captured by smartphones. This underscores its efficacy in tracking and analyzing the footprint of protected data, making forensic investigation of data breaches considerably easier.

In the second examined method [15], evaluations were conducted regarding imperceptibility and robustness. When adjusting the size of the watermark region to medium or small, the watermark remained unnoticed in all usage scenarios, with visibility only occurring for larger region sizes. This highlights the balance between visibility level of the watermark and accuracy of placement within regions containing the content to be protected. Robustness assessment revealed that for all test cases with unaltered screen captures, it was possible to remove the watermark. Notably, it was observed that larger region sizes offered greater resistance against attempted attacks, but smaller watermark sizes better withstood processes like cropping.

The third examined method [16] focused on experimental studies. Experiments were conducted on the ImageNet dataset which renowned for its vast collection of labeled images spanning thousands of object categories, serves as a benchmark in computer vision research. In this context, the researchers utilized key metrics such as PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), SSIM (Structural Similarity Index), and MSE (Mean Squared Error) to meticulously assess the performance of the SSDeN Framework. ImageNet, comprising millions of high-resolution images, enables a comprehensive evaluation of the proposed framework's capabilities across diverse visual content, ensuring a robust and thorough analysis of its effectiveness. The outcomes substantiated the effectiveness of the SSDeN Framework as a robust watermarking method. Robustness tests across different scaling and JPEG compression ratios demonstrated the high durability of the SSDeN Framework. This study underscores the potential effectiveness of deep neural network-based watermarking techniques in safeguarding data.

#### 4. Materials and Methods

In the realm of digital security, detecting and preventing data breaches and unauthorized use of screen content have become paramount. While existing watermarking methods address various aspects of

this challenge, there is a need for a comprehensive approach that overcomes their limitations. In this section, we propose a novel Screen Watermarking method that not only addresses the shortcomings of the previously discussed methods but also offers an advanced level of security and flexibility in detecting digital criminals. For the implementation of our proposed Screen Watermarking method, we chose the Python programming language. Python offers a rich ecosystem of libraries and tools that facilitate image processing, machine learning, and dynamic behavior integration, all of which are crucial components of our approach. Additionally, Python's readability and ease of use align well with the complexity of the task at hand.

Our chosen methodology integrates content-adaptive watermarking and real-time dynamic overlay integration. This comprehensive approach aims to transcend the limitations of existing methods and provide a robust solution for detecting digital criminals. Content-adaptive watermarking ensures intelligent embedding by considering content characteristics, optimizing visibility while maintaining imperceptibility. The real-time dynamic overlay not only adapts to content changes but also updates based on user interactions, enhancing watermark concealment and confounding digital criminals' attempts at pattern prediction. The workflow of the proposed watermark embedding and extraction process is illustrated in Figure 2.

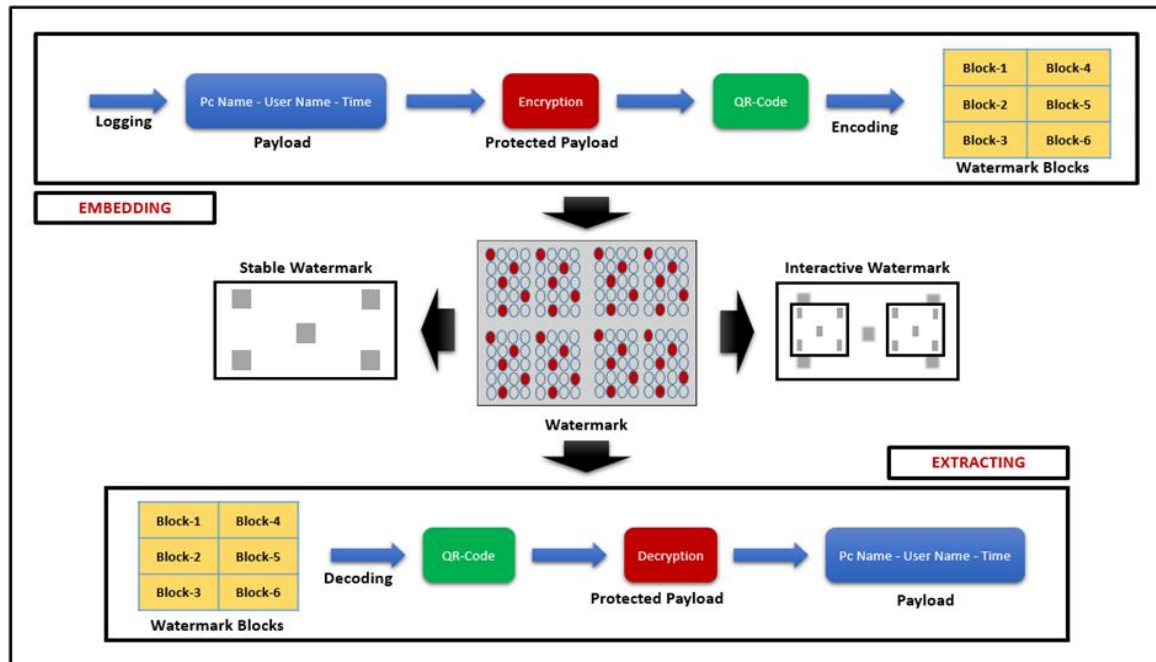


Figure 2. Work Flow of the Proposed Watermarking Process

Through our application, we introduce an innovative methodology for dynamically embedding watermarks into images and real-time inclusion of informative content. Our approach blends image processing, cryptography, steganography, and graphical user interface (GUI) techniques to craft an interactive and visually engaging watermarking solution. Our primary contributions encompass the integration of context-adaptive watermarking and real-time dynamic overlays within a Windows Form application. This enables the generation of QR codes that encapsulate encrypted metadata, subsequently ingrained as watermarks using steganographic techniques in images, complemented by real-time overlays conveying supplementary information. We offer exhaustive insights into our content-adaptive watermarking and real-time overlay methods, supported by a comprehensive step-by-step implementation. This workflow encompasses user input acquisition, encryption leveraging the Advanced Encryption Standard (AES) algorithm, QR code generation via the qrcode library, watermark embedding, and dynamic overlay application. Notably, the content-adaptive watermarking function scrutinizes image features to discern fitting watermark embedding points, while our real-time dynamic overlay function vigilantly tracks the image and applies live overlays. Converting our solution into practice involves employing Python libraries like cv2, numpy, pycryptodome, qrcode, and PyQt5. Our Windows Form application adeptly captures user data, encrypts it, produces QR codes, and subsequently applies both watermarks and real-time overlays. The amalgamation of context-adaptive watermarking with real-time overlays yields captivating and educational images. Through the

seamless integration of encryption, QR code generation, and image manipulation within a GUI environment, our proposition showcases its feasibility and potential utility. Forthcoming exploration could delve into intricate watermarking algorithms and diverse overlay contents tailored to varied applications.

## 5. Discussions

The examination of three different methods raises discussions on the limitations of watermarking techniques in terms of susceptibility to tampering, perceptibility, and robustness, and suggests that their reliability may not be fully guaranteed. These findings indicate that watermark technologies might not offer a complete solution for safeguarding digital content copyright and security.

In the first method [14], it was concluded that watermarks could be retrieved from unchanged photographs. This implies that watermarks can be rendered ineffective. This issue arises as a concern regarding the security insufficiency of watermark technology, potentially failing to fulfill its protective purpose. The study noted that despite alterations to the image, encoded data could still be extracted. This suggests that watermarks can be easily bypassed, allowing unauthorized use of content. This issue could spark a substantial debate on the credibility and efficacy of watermark technology.

In the second method [15], a study was conducted evaluating watermark visibility and robustness. The study revealed that watermarks remained unnoticed when used at specific sizes but were detectable at larger sizes. This underscores the need to strike a balance between watermark visibility and accurate placement within regions containing protected content. However, the study also showed that the watermark could be easily removed from unaltered screen captures. This raises serious concerns about the durability and effective protection capability of watermarking. The limitations and protection deficiencies of this method could be subjects of debate.

The third method [16] examined the SSDeN Framework, a watermarking method. Experimental studies demonstrated the effectiveness of this method. However, as mentioned in the review, the robustness tests were performed under various scaling and JPEG compression ratios. The results concluded that the SSDeN Framework exhibited high durability. Nonetheless, debates might arise about whether these tests fully reflect real-world scenarios. In reality, various attacks and manipulation methods could potentially bypass the watermark. Therefore, further research and discussion may be necessary to ascertain how effective and reliable this method truly is in real-world applications.

The Screen Watermarking approach we propose represents a novel and advanced method for detecting digital criminals engaged in data breaches and unauthorized use of screen content. By addressing the limitations of existing watermarking techniques and integrating innovative features, our approach provides a robust and adaptable solution to the evolving challenges of digital security. The initial prototype, developed as a demonstration within the framework of our proposed methodology, has been executed, revealing successful watermarking of photographs against basic attacks. Based on the initial evaluation results, it was observed that, even after cropping the watermark, 40% of the cropped area retained the capacity to extract the concealed information from the watermarked image. Furthermore, it was noted that the embedded information in the watermark could be recovered even after shooting from various angles and subject to basic photo manipulations, such as brightness adjustments up to 20%. The preliminary assessment indicates that the proposed watermarking method is fundamentally effective. A more comprehensive evaluation will be conducted once the prototype is finalized.

## 6. Conclusions

This research has culminated in the introduction of an imperceptible low-density watermarking technique for screen content protection. The proposed approach enables the embedding of information that can be subsequently extracted from photographs or screen captures. To further enhance this technique, a coding scheme based on convolutional codes will be developed to accommodate the specific challenges of screen watermarking, including high error rates, non-uniform error distributions, and segmented screen shapes. A series of experiments will underline the resilience of these watermarks against resizing and basic image manipulations, confirming their inconspicuous presence during regular usage.

The forthcoming phase of research will predominantly delve into steganography methods. With the primary objective of creating discreet watermarks on computer screens to counteract data theft without leaving discernible digital traces, the watermarking process will pivot toward steganography techniques. This approach will allow detection information linked to data breaches to be retroactively retrieved from leaked images containing concealed watermarks in the original content. This retrieved information can subsequently serve as compelling evidence in both forensic and administrative inquiries.

Upon the completion of research and the development of watermarking algorithms, a prototype application will be crafted. This application will seamlessly apply invisible watermarks to PC screens and encompass robust mechanisms for detecting data theft. As the final stage, rigorous testing of the developed prototype application will be conducted to evaluate the durability of the watermarking process and the efficacy of data theft detection.

In our future endeavors, we envisage an integrated approach that amalgamates Multi-Layered Watermarking, Behavioral Analysis Integration, and Machine Learning and AI techniques. This unified methodology aims to elevate the watermarking process to unprecedented levels of security and adaptability. By embedding multiple layers of information, introducing behavioral analysis to detect anomalies, and leveraging machine learning to refine watermarking strategies and enhance data theft detection, our proposed approach is poised to stand at the forefront of digital security solutions, ensuring resilient protection against a dynamic landscape of threats.

## Conflict of Interest Statement

No conflict of interest was declared by the authors.

## References

- [1] R. Article, "Available Online at [www.ijarcs.info](http://www.ijarcs.info) Information Hiding - Steganography & Watermarking : A Comparative Study," vol. 4, no. 4, pp. 165-171, 2013.
- [2] F. A. P. Petitcolas, R. J. Anderson, and M. G. Kuhn, "Information hiding-a survey," *Proc. IEEE*, vol. 87, no. 7, pp. 1062-1078, Jul. 1999, doi:10.1109/5.771065.
- [3] A. D. Orebaugh, "Steganalysis: A Steganography Intrusion Detection System," 2011, [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/0d97/93a6f1a0aef431cebce1b06f37ca4bf99447.pdf>
- [4] R. Gupta, S. Gupta, and A. Singhal, "Importance and Techniques of Information Hiding: A Review," *Int. J. Comput. Trends Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 260-265, Mar. 2014, doi:10.14445/22312803/IJCTT-V9P149.
- [5] R. G. van Schyndel, A. Z. Tirkel, and C. F. Osborne, "A digital watermark," *Proc. 1st Int. Conf. Image Process.*, vol. 2, pp. 86-90 vol.2, 1994.
- [6] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, "Techniques for data hiding," *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3.4, pp. 313-336, 1996, doi:10.1147/sj.353.0313.
- [7] N. Nikolaidis and I. Pitas, "Robust image watermarking in the spatial domain," *Signal Process.*, vol. 66, pp. 385-403, 1998.
- [8] G. Caronni, "Assuring Ownership Rights for Digital Images," 1995.
- [9] C. S. Shieh, H. C. Huang, F. H. Wang, and J. S. Pan, "Genetic watermarking based on transform-domain techniques," *Pattern Recognit.*, vol. 37, no. 3, pp. 555-565, 2004, doi:10.1016/j.patcog.2003.07.003.
- [10] T. K. M. Tsui, X.-P. Zhang, and D. Androutsos, "Color Image Watermarking Using Multidimensional Fourier Transforms," *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 3, pp. 16-28, 2008.
- [11] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, and T. Shamoon, "Secure spread spectrum watermarking for multimedia," *IEEE Trans. image Process. a Publ. IEEE Signal Process. Soc.*, vol. 6, no. 12, pp. 1673-1687, 1997, doi:10.1109/83.650120.
- [12] A. M. Alattar and O. M. Alattar, "Watermarking electronic text documents containing justified paragraphs and irregular line spacing," 2004.
- [13] M. Embar, L. F. McHugh, and W. R. Wesselman, "Printer watermark obfuscation," in *Proceedings of the 3rd annual conference on Research in information technology*, Oct. 2014, pp. 15-20. doi:10.1145/2656434.2656437.
- [14] D. Gugelmann, D. Sommer, V. Lenders, M. Happe, and L. Vanbever, "Screen watermarking for data theft investigation and attribution," *Int. Conf. Cyber Conflict, CYCON*, vol. 2018-May, pp. 391-408, 2018, doi:10.23919/CYCON.2018.8405027.

[15] M. Piec and A. Rauber, "Real-time screen watermarking using overlaying layer," *Proc. - 9th Int. Conf. Availability, Reliab. Secur. ARES 2014*, pp. 561–570, 2014, doi:10.1109/ARES.2014.83.

[16] R. Bai, L. Li, S. Zhang, J. Lu, and C. C. Chang, "SSDeN: Framework for Screen-Shooting Resilient Watermarking via Deep Networks in the Frequency Domain," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, 2022, doi:10.3390/app12199780.

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





GAZI

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Performing System Modeling Study of Knee Joint Simulator Prototype in accordance with ISO 14243/3 Standard and Simulating Gait Profile in Matlab Simulink Environment

Ozkan Hizaroglu<sup>a</sup>, Adnan Akkurt<sup>b</sup>

Submitted: 31.05.2023 Revised: 16.11.2023 Accepted: 27.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705093

### ABSTRACT

**Keywords:** Wear simulator, knee, matlab, system modelling, artroplasty

<sup>a</sup> Gazi University,  
Technology Faculty,  
Dept. of Industrial Design Engineering  
06560 - Ankara, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3062-1572  
e mail: ozkan.hizaroglu@gazi.edu.tr

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

\*Corresponding author:  
ozkan.hizaroglu@gazi.edu.tr

Knee wear simulators are used to model joint mechanics and detect wear performance, referencing ISO14243-1/3 protocols. In this study, it is aimed to create a system model for a joint knee wear simulator prototype and then obtain input and output signals with the Matlab Simulink program. As a result of the study, transfer functions for torque and position were obtained and a block diagram was created in the Matlab Simulink environment. Based on the ISO 14243-3 protocol, motion curves were modeled in the Matlab Simulink environment and converted to input reference signals. Finally, PID controlled closed loop was integrated into the DC servo motor circuit to obtain output signals, and using these signals, the walking cycle was successfully simulated in Matlab SimMechanics environment in accordance with ISO 14243-3. When the system model is evaluated, it is understood that it has advantages such as being able to work with open source microcontrollers such as Arduino, low cost, and easy adaptation of any data to the system. In this study, it is aimed to obtain a suitable system model for the knee wear simulator prototype and to serve as an example for easily accessible test simulators for use in scientific studies or R&D processes.

## Diz Eklemi Simülâtör Prototipinin ISO 14243/3 Standardına Uygun Sistem Modelleme Çalışmasının Yapılması ve Matlab Simulink Ortamında Yürüyüş Profilinin Simüle Edilmesi

### ÖZ

Diz aşınma simülâtörleri, ISO14243-1/3 protokollerini referans olarak eklem mekaniğini modellemek ve aşınma performansını tespit etmek için kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada, bir diz eklem aşınma simülâtör prototipi için sistem modelinin oluşturulması, sonrasında ise Matlab Simulink program ile girdi ve çıktı sinyallerinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Çalışma sonucunda, tork ve konum için transfer fonksiyonları elde edilmiş ve Matlab Simulink ortamında blok diyagramı oluşturulmuştur. ISO 14243-3 protokolü esas alınarak hareket eğrileri Matlab Simulink ortamında modellenmiş ve girdi referans sinyallerine dönüştürülmüştür. Son olarak, PID kontrollü kapalı döngü, DC servo motor devresine entegre edilerek çıktı sinyalleri elde edilmiş ve bu sinyaller kullanılarak Matlab SimMechanics ortamında yürüme döngüsü ISO 14243-3'e uygun olarak başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Sistem modeli değerlendirildiğinde, arduino gibi açık kaynak kodlu mikro denetleyiciler ile çalışabilme, düşük maliyet, herhangi bir veri datasını sisteme kolay adapte edebilme gibi avantajlarının olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada, diz aşınma simülâtör prototipi için uygun bir sistem modelinin elde edilmesi ayrıca bilimsel çalışmalarda veya ARGE süreçlerinde kullanılmak amacıyla kolay ulaşılabilir test simülâtörleri için örnek teşkil etmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma simülâtörü, diz, matlab, sistem modelleme, artroplasti

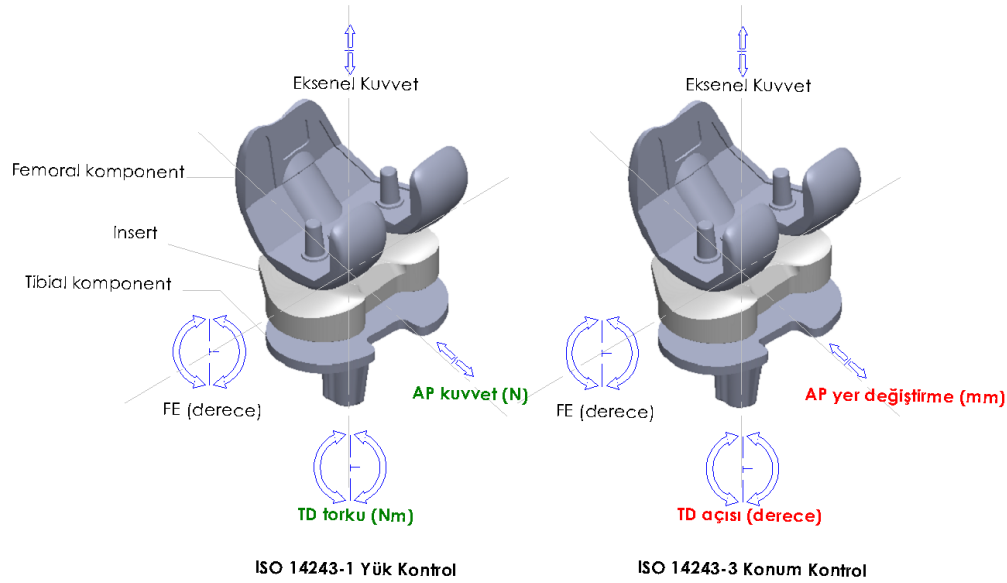
## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda, çeşitli diz aşınma simülörleri geliştirilmiş ve total diz protez (TDP) tasarımlarında aşınmayı simüle etmek için çeşitli protokoller kullanılmıştır. Aşınma simülörlerinde nihai amaç, konfigürasyon ve malzeme dahil olmak üzere çeşitli TDP tasarımlarının aşınma özelliklerini ve performanslarını gerçek duruma yakınsatarak değerlendirmektir [1]. Tablo 1’de gösterildiği üzere, ISO 14243-1 yük kontrol protokolü ve ISO 14243-3 konum kontrol protokolü olmak üzere iki farklı aşınma test protokolü mevcuttur.

Tablo 1. ISO 14243-1 ve ISO 14243-3’ protokollerine göre aşınma testi için temel alınan eklem hareket ve kuvvet çiftleri (Joint motion and force couples used as basis for wear testing according to ISO 14243-1 and ISO 14243-3 protocols)

Kontrol parametreleri	ISO 14243-1	ISO 14243-3
TD torku (Nm)	X	-
AP kuvveti (N)	X	-
EK (N)	X	X
FE (derece)	X	X
AP yer değiştirme (mm)	-	X
TD açısı (derece)	-	X

Şekil 1’de görüldüğü üzere, iki protokolde de aksel kuvvet (EK) ve fleksiyon-ekstansiyon (FE) açı ortak kontrol unsurlarıdır. ISO 14243-1 yük kontrolünde tibial dönme torku ve AP kuvveti belirleyici unsurlar olurken, tibial dönme açısı (TD) ve anterior-posterior (AP) konumu ise ISO 14243-3 konum kontrol protokolü için belirleyici unsurları oluşturmaktadır.



Şekil 1. ISO 14243-1 ve ISO 14243-3 hareket ve kuvvet değişkenleri (ISO 14243-1 and ISO 14243-3 motion and force variables)

Literatürde, diz simülörünün gelişimi incelendiğinde kas, tendon ve yumuşak doku gibi farklı anatomik yapıların dikkate alındığı ve farklı serbestlik derecelerinde tasarımların yapıldığı görülmektedir (Tablo 2)[2]. Bu çalışmanın konusu olan sistem modellemenin uygulandığı prototip diz simülörü Tablo 2’nin son satırına eklenmiştir.

Tablo 2’nin son satırında yer alan çalışmada, mekanik tasarımı tamamlanmış prototip bir diz aşınma simülörünün ISO 14243-3 konum kontrol protokolüne uygun olarak belirli bir zaman döngüsü içinde istenilen kuvvet ve konum değerlerini oluşturan bir sistem modeli tasarlanmıştır.

Tablo 2. TDP Diz aşınma simülasyon modelleri [2] (Total knee replacement knee wear simulator models)

Yazar	Yayın Yılı	FE	EK	AP	TD	VV	S/S
Wang. at all.[3]	1999	X	X		X		
Instron Biolups Diz. Sim.[4]	2008	X	X	X	X		
Walker at all.[5]	2008	X	X	X	X		
Schwenke at all[6]	2009	X	X	X	X	X	X
Callies at all[7]	2014	X	X		X		X
AMTI Diz Simülasyonu[8]	2015	X	X	X	X	X	X
Abdel-Jabel at all[9]	2015	X	X	X	X		
Liu at all[10]	2015	X	X	X	X	X	X
*Hizaroglu Ö.	2022	X	X	X	X		

Çalışmanın materyal ve metod bölümünde, ISO 14243-1 ve ISO 14243-3 protokollerinde verilen hareket, kuvvet ve tork grafiklerinin x-y koordinatları belirlenmiş, Matlab Function komutu kullanılarak x-y koordinatlarını temel alan bir eğri fonksiyonu oluşturulmuş ve denklik katsayıları elde edilmiştir. Bu yöntem ile Tablo 1’de verilen TD torku, AP kuvveti, EK, FE açısı, AP yer değiştirme, TD açısı için uygulanmış ve grafikler elde edilmiştir. Eğri fonksiyonu, Simulink Signal Builder modülü ile PID kontrollü DC servo motor devresine entegre edilmiş ve ISO 14243/3 protokolünü gerçekleştirmek amacıyla motor kontrolü için referans giriş sinyalleri üretilmiştir. Simülasyon prototipinin motor tork ve pozisyon kontrolleri için matematiksel modelleme çalışması yapılmış ve transfer fonksiyonları elde edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod (Material and Method)

### 2.1. ISO 14243-1 ve ISO 14243-3 hareket, kuvvet ve tork grafiklerinin simülasyon ortamında oluşturulması (Creating ISO 14243-1 and ISO 14243-3 motion, force and torque graphs in a simulation environment)

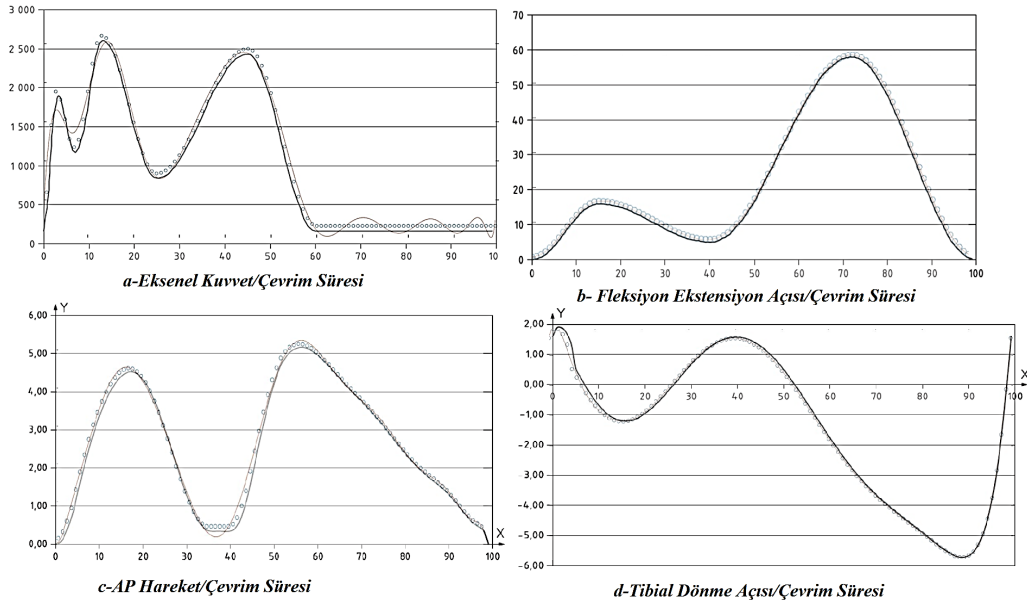
Diz aşınma simülasyon prototipinin ISO 14243’e uygun aşınma performansını sağlaması, standartta verilen kuvvet ve hareket eğrilerini başarılı bir şekilde uygulamasına bağlıdır. Bu amaçla, ilgili standarttaki eğrilerin sistem modelleme tarafından kullanılmak üzere referans sinyallere dönüştürülmesi hedeflenmektedir. ISO 14243/1-3 standardında, bir çevrim süresince meydana gelen hareket ve kuvvet çiftleri grafik eğrileri olarak verilmiştir [11]. Bu verilen eğrilerden yola çıkılarak, Matlab ortamında fonksiyon yazılmış ve her bir grafik için 100 referans nokta kullanılarak hareket ayrıca kuvvet eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 2’de görüldüğü üzere, Matlab function ile elde edilen grafik eğrileri ve ISO 14243-3’den gelen grafik eğrileri ile üst üste çakıştırılarak benzetim çalışması yapılmıştır.

Şekil 2’deki hareket ve kuvvet eğrileri incelendiğinde, noktalı eğriler ve düz eğrilerin birbiri üzerine bindirildiği görülmektedir. Referans hareket ve kuvvet eğrileri ISO14243-3’den gelen düz eğriler iken noktalı eğriler ise Matlab Simulink’te fonksiyon yardımı ile elde edilmekte olup motor kontrolü için referans sinyal olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

### 2.2. Tork ve konum için transfer fonksiyonunun elde edilmesi ve Simulink’te blok diyagramının oluşturulması (Obtaining the transfer function for torque and position and creating the block diagram in Simulink)

Artroplasti sonrasında dize implante edilen femur ve insertlerin yüzeyleri arasında yuvarlanma ve kayma hareketleri yürüme döngüsü boyunca oluşmakta ve eklem mekaniği temel anlamda modellenmektedir. Yürüyüş modelinin simüle edilebilmesi için diz aşınma simülasyon prototipi, ISO 14243 gereği, tork, kuvvet ve konum kontrollerini sağlamalıdır. Bu amaçla, simülasyonda kullanılacak elektrik motorlarının referans sinyallerle kontrolünün sağlanması için tork ve konum transfer fonksiyonlarının elde edilmesi sistem modelleme çalışması için gereklidir. Bu bölümde, voltaj ve akım parametrelerine göre konum ve tork kontrolü yapan bir sistem modellemesi üzerinde çalışılmakta, standart bir DC motorun tork ve pozisyon transfer fonksiyonları elde edilmektedir.

Sistem modelleme çalışmasında, matematiksel modelleme için gerekli semboller, tanımları ve birimler Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 2. ISO 14243-3'den alınmış kuvvet ve konum eğrileri(çizgi)- Matlab Simulink'te elde edilmiş kuvvet ve konum eğrileri(noktalı)  
(Force and position curves (line) taken from ISO 14243-3 - Force and position curves (dotted) obtained in Matlab Simulink)

Tablo 3. Sistem modelleme için birimler tablosu (Table of units for system modeling)

Sembol	Tanım	Birimler
$\alpha=(d^2 \theta)/dt^2$	Açısal ivme	Rad/s <sup>2</sup>
$E_b$	Back EMF	V
$\theta_m$	Açısal konum	radyan
$V_a$	Armatür kontrol voltajı	V
$V_b$	Back emf voltajı	V
$R_a$	Armatür direnci	ohm
$L_a$	Armatür endüktansı	H
$K_t$	Motor tork katsayısı	N/A
$K_b$	Back emf sabiti	Vs/rad
$J_a$	Eylemsizlik momenti (atalet momenti)	Kgm <sup>2</sup>
$I_a$	Armatür akımı	A
$D_a$	Damper etkisi	
$R_a * I_a$	Dirençten kaynaklanan voltaj	V
$T_m(t)$	Motor torku	Nm
$B_m$	Viskos sürtünme (sönümleme) katsayısı	Nms/rad

2.2.1. Newton'un ikinci hareket yasasına göre mekanik modelleme- voltaj /konum (Mechanical Modeling According to Newton's Second Law of Motion - Voltage / Position)

Mekanik olarak bakılırsa, Newton'un ikinci hareket yasasına göre bir sistemde oluşan kuvvetlerin toplamı o sistemin ivmesi ve kütesinin çarpımına eşittir [12].

$$\Sigma F = m \cdot a \quad (1)$$

$$m \cdot a = J \cdot \alpha \quad (2)$$

Bu yasadan yola çıkıldığında, 1 numaralı eşitlikle doğrusal hareket eden sistemler için armofolojik açıdan benzetim çalışması yapılırsa 2 numaralı eşitlikte dönme hareketi yapan sistemler için geçerli denklik elde edilmektedir. Benzetim açısından denklik 2 incelendiğinde, doğrusal hareketteki kütle, dönme hareketindeki

J ile doğrusal ivme (a) ise açısal ivme ( $\alpha$ ) ile temsil edilmektedir. Tablo 3'te,  $B_m$  viskoz sürtünme katsayısı olarak verilmekte ve doğrusal hareketli sistemlerde sürtünmeden kaynaklı eylemde ters yönde etki ettiği için sönümlenme katsayısı olarak anılmaktadır. Ayrıca,  $B_m$  viskoz açısal hız ile çarpımında elde edilen sistem için gerekli motor torkunun birleşiminden birisi olarak tanımlanmaktadır.

$$T_m(t) = K_T \cdot I_a(t) \quad (3)$$

Denklik 3'te görüldüğü üzere, tork; akım ve tork katsayısının çarpımına eşittir [13,15,16,17].

$$T_m(t) = J_a \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_m \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

Denklik 4'de görüldüğü üzere, sistemin ihtiyacı olan toplam motor torku, atalet momentinin açısal ivme ile çarpımının viskoz sürtünme katsayısının açısal hızla çarpımı toplamına eşittir [13,14,15,17,18].

$$J_a \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_m(t) - B_m \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

$$T_m(t) = K_T \cdot I_a(t) \quad (3)$$

$$J_a \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = K_T \cdot I_a(t) - B_m \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

Denklik 6'da görüldüğü üzere Newton'un ikinci hareket yasası esas alınarak bir motor denkliği elde edilmektedir [12,13,13,17].

Elektriksel modelleme için temel alınan Krichhoff yasasına göre bir devrede oluşan tüm gerilimlerin toplamı sifıra eşit yani sistem girdisi olan gerilim değeri, o sistemde meydana gelen gerilim değerleri toplamına eşittir [17,19]. Sonuç olarak, sistemin aşması için gerekli motor tork değeri, eylemsizlik momentinin açısal ivmeyle çarpımı sonucunda elde edilen tork değeri ve viskozite sürtünme katsayısının açısal hız ile çarpımı sonucunda elde edilen tork değerinin toplamına eşittir.

Bu duruma göre sistemin sağladığı armatür voltajı denklik 7'de gösterildiği gibi, dirençlerden kaynaklanan voltaj, indüktanstan kaynaklanan voltaj ve back emf den kaynaklanan voltajın toplamına eşittir [13,14,15].

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad (7)$$

Denklik 8'de görüldüğü üzere  $E_b(t)$  voltajı, açısal hız ve back emf katsayısının çarpımı ile doğru orantılıdır [12,13,14,15].

$$E_b(t) = K_B \cdot \omega_m(t) = K_B \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (8)$$

Denklik 8'de gösterilen endüktans eşitliği denklik 7'de yerine yazılırsa denklik 9'daki nihai voltaj eşitliği elde edilir [12,13,14,15].

$$L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} = V_a(t) - R_a \cdot I_a(t) - K_B \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

#### Voltaj-konum için transfer fonksiyonu

Bu aşamada, girdi voltaj (V) olarak tanımlanır ve elde edilmesi amaçlanan çıktı, konum yani birim thetadır( $\theta$ ).

Denklik 5'te diferansiyel denklikler eşitliğin bir tarafında toplanırsa denklik 10 elde edilmektedir [12,13,17,20,21].

$$J_a \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_m \cdot \frac{d\theta}{dt} = K_T \cdot I_a(t) \quad (10)$$

Denklik 10'da akımlar bir tarafta toplanırsa denklik 11 elde edilmektedir.

$$L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + R_a \cdot I_a(t) = V_a(t) - K_B \frac{d\theta}{dt} \quad (11)$$

Denklikler alt alta sıralanıp Laplace dönüşümü yapıldığında 12 ve 13'üncü denklemler elde edilmektedir [12,17,20,21].

$$J_a \cdot s^2\theta(s) + B_a \cdot s\theta(s) = K_T \cdot I_a(s) \quad (12)$$

$$L_a \cdot sI_a(s) + R_a \cdot I_a(s) = V_a(s) - K_B \cdot s\theta(s) \quad (13)$$

Yukarıdaki iki denklik düzenlenerek denklik 14 elde edilmektedir [12,17].

$$J_a \cdot s^2\theta(s) + B_a \cdot s\theta(s) = \frac{K_T \cdot V_a(s) - K_B \cdot s\theta(s)}{L_a \cdot sI_a(s)} \quad (14)$$

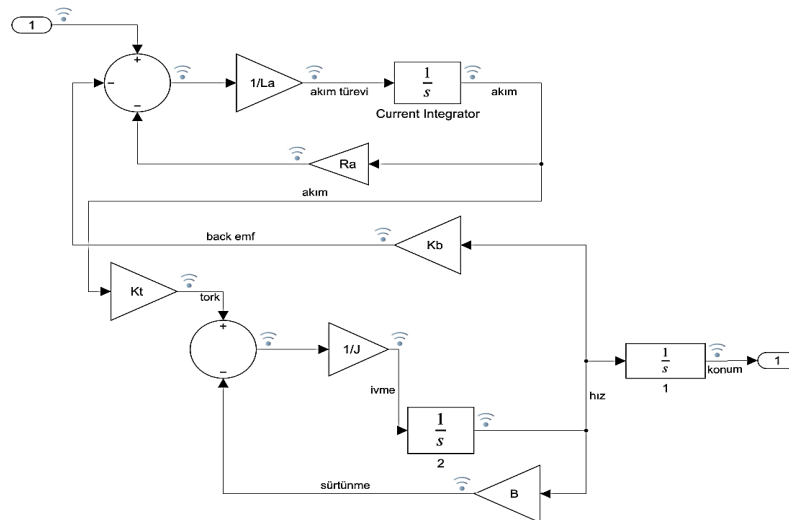
Transfer fonksiyonu için çıkış değerinin giriş değerine oranı düzenlenir ise denklik 15 elde edilmektedir [12,16,17,20,21,22].

$$G_a(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{s[(R_a + L_a s) \cdot (J_m s + B_m) + K_T \cdot K_B]} \quad (15)$$

S'ler parantez içine dağıtılp denklik yeniden düzenlenirse transfer fonksiyonunun son hali denklik 16'da elde edilmektedir [12,16,].

$$G_a(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{JLs^3 + (RJ + LB)s^2 + (RB + KT \cdot KB)s} \quad (16)$$

Denklik 16'da elde edilen transfer fonksiyonu Şekil 3'de görüldüğü üzere Matlab Simulink'te modellenmektedir.



Şekil 3. Simulink-DC motor voltaj konum blok diyagramı (Simulink-DC motor voltage location block diagram)

2.2.2. Newton'un ikinci hareket yasasına göre mekanik modelleme- voltaj /tork (Mechanical modeling according to newton's second law of motion - voltage / torque)

Denklik 17'de görüldüğü üzere motor torku, armatür akımı ve motor tork katsayısı çarpımına eşittir [13,14,15,17,18,21,23,24].

$$T_m(t) = K_t \cdot I_a(t) \quad (17)$$

Motor tork denkleğinin Laplace dönüşümü yapılırsa denklik 18 elde edilmektedir [13,14,15,16,17,21,22,24].

$$T_m(s) = K_t \cdot I_a(s) \quad (18)$$

Motor back-emf voltajı, denklik 19'de gösterildiği üzere back-emf sabiti ve açısal hızın çarpımına eşittir.

$$V_b(t) = K_b \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad (19)$$

Back-emf voltajı zamana bağlı denklikte Laplace dönüşümü gerçekleşirse denklik 20 elde edilmektedir [12,13,18].

$$V_b(s) = K_b \cdot s\theta_m(s) \quad (20)$$

Elde edilen motor torku denkleği ise denklik 21'de verilmektedir [12,13,15,17,23].

$$T_m = (J_a s^2 + D_e s)\theta_m \quad (21)$$

#### Voltaj-tork için transfer fonksiyonu

Çıkış birimleri giriş birimlerine oranlanırsa, denklik 22'de tork/açısal konum transfer fonksiyonu elde edilmektedir [12,20,21].

$$G_0 = \frac{1}{J_e s^2 + D_e s} = \frac{T_m}{\theta_m} \quad (22)$$

Sistemdeki voltaj farkı, armatür akımının, sistem direnci ve indüktans toplamının çarpımına eşit olur. Bu eşitlik, denklik 23'de görüldüğü gibi ifade edilir [12,15,17].

$$V_a - V_b = I_a * (R_a + sL_a) \quad (23)$$

Armatür akımı denklik 23'den çekilirse ve denklik 17 ile eşlenirse denklik 24'deki eşitlik sağlanır [12, 15,17].

$$I_a = \frac{V_a - V_b}{R_a + sL_a} = \frac{T_m}{K_t} = \frac{1}{(R_a + sL_a)} \cdot (V_a - V_b) \quad (24)$$

Son olarak, denklik 24 çıkış birimleri giriş birimlerine oranlanırsa denklik 25'de voltaj-tork ilişkisini gösteren transfer fonksiyonu elde edilmektedir [12,15,17,21,22].

$$G_1 = \frac{T_m}{K_t \cdot (V_a - V_b)} \quad (25)$$

Voltaj, tork, akım ve konum değerlerini içeren ilgili blok diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.

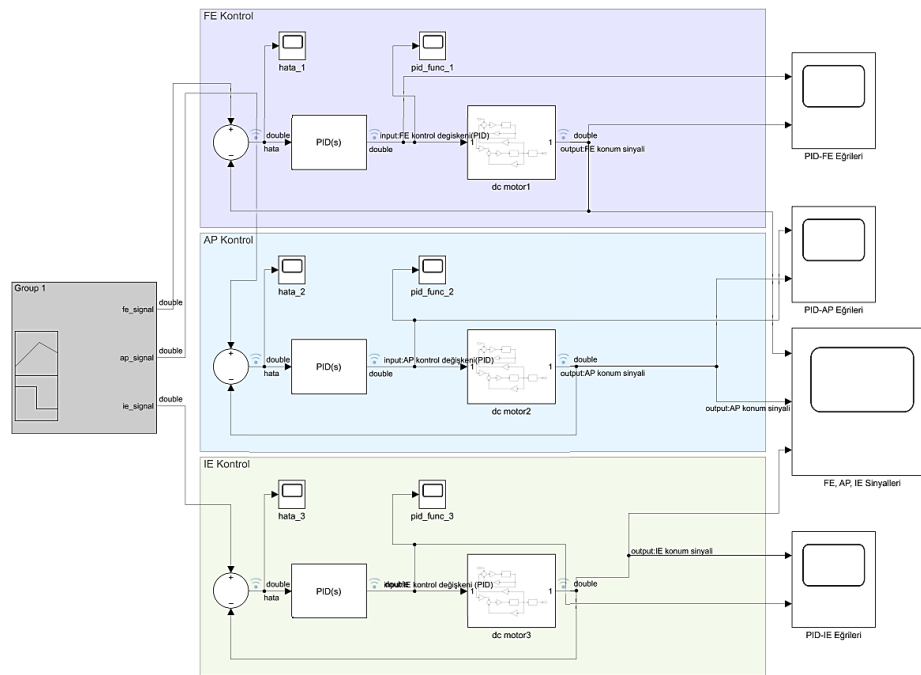
#### 2.3. Matlab Simulink ile matematiksel modelin kurulması ve simülatör CAD modelinin Matlab SimMechanics üzerinden çalıştırılması (Establishing the mathematical model with Matlab Simulink and running the simulator CAD Model via Matlab SimMechanics)

Sistem modelinin Matlab Simulink ortamında bütünleşik bir yapıya getirilmesi, girdi ve çıktı sinyallerinin düzenlenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu amaçla, Şekil 4'de verilen blok diyagramı oluşturulmuş ve sinyaller izlenebilir hale getirilmiştir. Şekil 4'de, DC motor modeli alt montaj haline getirilmiş ve sinyal girişi PID'ye bağlanmıştır. ISO 14243-1/3'te verilen konum ve kuvvet eğrileri, eğri fonksiyonunda tanımlanan koordinat verileri ile oluşturulmakta ve referans sinyal geri besleme ile PID'ye daha sonra DC motor modeline

girmektedir.

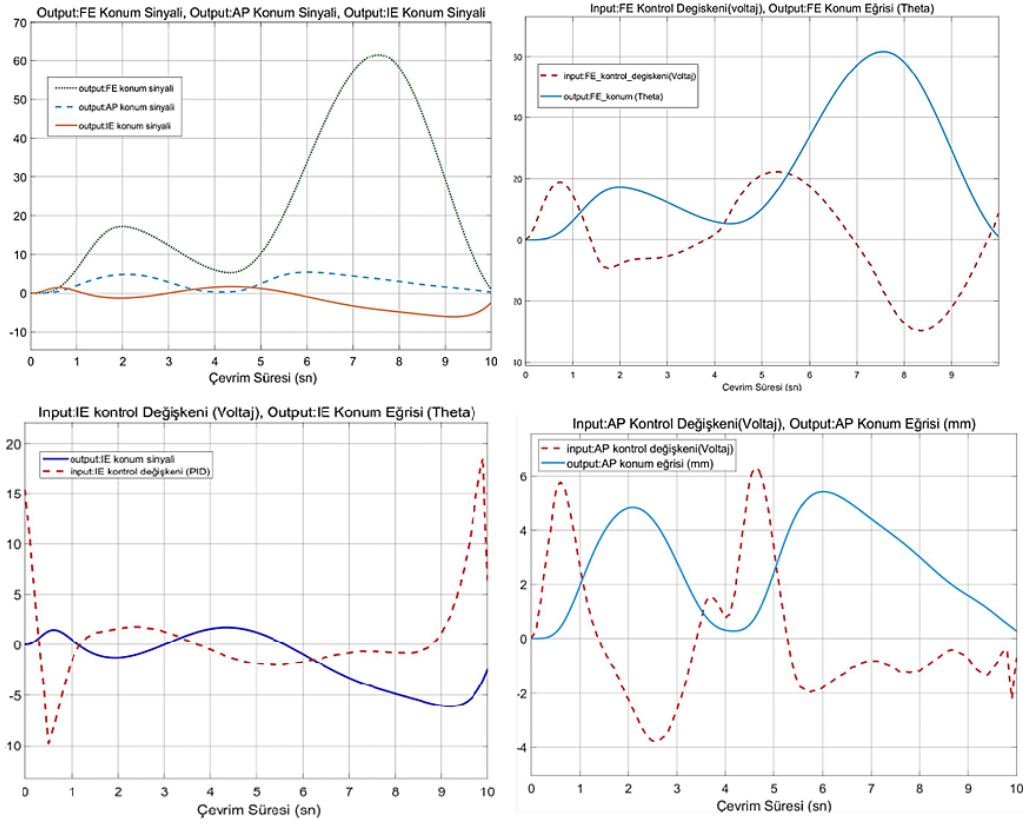
Birim çevrim boyunca, hareket, kuvvet ve tork eğrileri üzerinden 100 nokta referans alınarak Matlab ortamında koordinat dataları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu datalar kullanılarak Simulink ortamında bir sinyal üretici tarafından FE, AP ve IE hareketi olmak üzere üç temel hareket çifti için input ve output sinyalleri üretilmiştir (Şekil 5). Eksenel yükün, insert ve femur arasında temas eden yüzeylerde, döngü boyunca meydana gelen teğetsel ve normal kuvvetlerden kaynaklı olarak oluştuğu düşünülmektedir. Bu sebeple, oluşan yük, Matlab Simulink ortamında yeniden girdi oluşturulması için sisteme dahil edilmemiştir.

Üç farklı kontrol parametresi için (FE, AP, IE) için elde edilen sinyal grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. FE, AP, IE referans sinyallerinin Simulink ortamında PID kontrollü DC motor üzerinde uygulanması  
(Application of FE, AP, IE reference signals to PID controlled DC motor in Simulink environment)





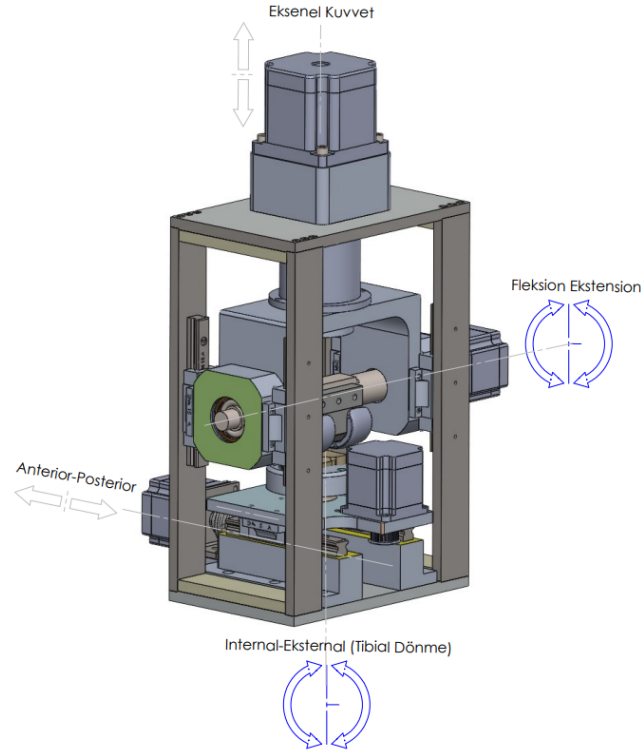
Şekil 5. FE, AP, IE için elde edilen Input ve Output sinyal eğrileri (Input and Output signal curves obtained for FE, AP, IE)

Optimum PID katsayılarının elde edilmesinde Simulink PID toolbox kullanılmış ve değerler sisteme uygun hale getirilmiştir. Tablo 4’de her bir hareket çifti için elde edilmiş PID katsayıları verilmiştir.

Tablo 4. Hareket çiftlerinin birim basamak eğrileri için Simulink PID toolbox’ta hesaplanan PID katsayıları  
(PID coefficients calculated in Simulink PID toolbox for step curves of motion pairs)

Sinyaller	P	I	D
FE	2.7737	1.0985	1.4219
AP	2.1464	0.7395	1.2641
IE	3.0051	0.8148	1.3754

Şekil 5’de görülen output eğrileri, Şekil 6’da görülen Diz Simülütör Prototipi CAD modeline Matlab SimMechanics ortamında referans sinyaller olarak girilmiştir.



Şekil 6. Diz Simülator Prototipi CAD modeli ve ISO 14243/3'e göre oluşturulan hareket çiftleri (CAD model of the Knee Simulator Prototype and movement pairs created according to ISO 14243/3)

Diz simülator prototipinin CAD modeli referans sinyalleri başarılı bir şekilde hareket çiftlerine dönüştürerek, femoral ve tibial ara yüzeylerde oluşan kuvvet seviyeleri eksenel yük ve sürtünme katsayısının bir fonksiyonudur. Ayrıca döngü boyunca oluşan kuvvet değişim oranlarının, femoral kondil ve tibial ara yüzeydeki hareketlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple, oluşan eksenel yük Matlab Simulink ortamında yeniden girdi oluşturulmaması için input olarak sisteme dahil edilmemiştir. ISO 14243-1/3'te tarif edilen yürüme döngüsü boyunca altı farklı hareket ve kuvvet grafiği incelenmiş, diz eklem simülatoründe uygulama başarısı sebebi ile ISO 14243-3 protokolü esas alınarak Matlab program üzerinden veri benzetim çalışması yapılmıştır. Bu benzetim çalışmasından eşdeğer grafikler elde edilmiş ve referans sinyal üretimi için kaynak veri olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Motor tork ve konum kontrolü için matematiksel modelleme yapılmış ve transfer fonksiyonları elde edilmiştir (Denklik 16, Denklik 22, Denklik 25). Transfer fonksiyonları temel alınarak Matlab Simulink ortamında motor blok diyagramı ve sistem blok diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 3). Matlab'da oluşturulan sinyal eğrileri, Simulink ortamında Signal Builder vasıtası ile kapalı döngü ve PID destekli bir sistem modeli içerisine referans sinyal olarak gönderilmiştir (Şekil 4). AP, IE, FE hareketleri için çıkış sinyalleri (Şekil 5) ve PID katsayıları sırasıyla  $PID_{FE}$  (2.7737-1.0985-1.4219),  $PID_{AP}$  (2.1464-0.7395-1.2641),  $PID_{IE}$  (3.0051-0.8148-1.3754) elde edilmiştir (Tablo 4). Sistem modeli Signal Builder'den gelen referans sinyallerle beslendikten sonra SimMechanics modülünde simülator CAD modeli (Şekil 6) çalıştırılmış ve FE, AP, IE konumlarının döngü boyunca ISO 14243 referans eğrilerini takip ettiği görülmüştür (Şekil 5). Bu durum neticesinde diz aşınma simülator prototipi için hazırlanan sistem modelinin ilgili standarda uygun olarak eklem mekaniğini modelleyebildiği anlaşılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

ISO 14243 standardının aşınma testi için sunduğu protokoller, yara izi ve aşınma miktarı açısından farklı sonuçlar vermektedir. Femoral kondil ve tibial ara yüzeylerde oluşan kuvvet seviyeleri eksenel yük ve sürtünme katsayısının bir fonksiyonudur. Ayrıca döngü boyunca oluşan kuvvet değişim oranlarının, femoral kondil ve tibial ara yüzeydeki hareketlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple, oluşan eksenel yük Matlab Simulink ortamında yeniden girdi oluşturulmaması için input olarak sisteme dahil edilmemiştir. ISO 14243-1/3'te tarif edilen yürüme döngüsü boyunca altı farklı hareket ve kuvvet grafiği incelenmiş, diz eklem simülatoründe uygulama başarısı sebebi ile ISO 14243-3 protokolü esas alınarak Matlab program üzerinden veri benzetim çalışması yapılmıştır. Bu benzetim çalışmasından eşdeğer grafikler elde edilmiş ve referans sinyal üretimi için kaynak veri olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Motor tork ve konum kontrolü için matematiksel modelleme yapılmış ve transfer fonksiyonları elde edilmiştir (Denklik 16, Denklik 22, Denklik 25). Transfer fonksiyonları temel alınarak Matlab Simulink ortamında motor blok diyagramı ve sistem blok diyagramı oluşturulmuştur (Şekil 3). Matlab'da oluşturulan sinyal eğrileri, Simulink ortamında Signal Builder vasıtası ile kapalı döngü ve PID destekli bir sistem modeli içerisine referans sinyal olarak gönderilmiştir (Şekil 4). AP, IE, FE hareketleri için çıkış sinyalleri (Şekil 5) ve PID katsayıları sırasıyla  $PID_{FE}$  (2.7737-1.0985-1.4219),  $PID_{AP}$  (2.1464-0.7395-1.2641),  $PID_{IE}$  (3.0051-0.8148-1.3754) elde edilmiştir (Tablo 4). Sistem modeli Signal Builder'den gelen referans sinyallerle beslendikten sonra SimMechanics modülünde simülator CAD modeli (Şekil 6) çalıştırılmış ve FE, AP, IE konumlarının döngü boyunca ISO 14243 referans eğrilerini takip ettiği görülmüştür (Şekil 5). Bu durum neticesinde diz aşınma simülator prototipi için hazırlanan sistem modelinin ilgili standarda uygun olarak eklem mekaniğini modelleyebildiği anlaşılmıştır.

### 4. Sonuçlar ve Değerlendirme (Results and Evaluation)

Bu çalışmada elde edilen referans sinyal girdileri ve çıktıları için Arduino temelli bir sürücü Matlab Simulink ortamına entegre edilecek ve motor kontrolü için kullanılacaktır. Sistem modellemenin uygulanacağı diz eklem simülatoründe hareketli yapı elemanlarının kütesinden kaynaklı atalet, seçilen aktüatöre bağlı

değişkenler, sürtünme kayıpları gibi teoride hesaplanan veya kabul edilen değerlerin yanında uygulamada farklı dinamik yükler altında meydana gelebilecek performans değişiklikleri de dikkate alınmalıdır. Eksenel yük kontrolü, sistem modelleme çalışmasında ihmal edilmekte ve bir helezon yay ile insert ve femur arasındaki baskı kuvvetinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Kurulacak simülasyon prototipi üzerinden elde edilecek kuvvet eğrileri ile ISO 14243 karşılaştırması yapılacak sonrasında ise eksenel yük sisteme dahil edilecektir. Ayrıca, bir çevrim süresinde oluşturulacak hareket ve tork değerlerinde, çevrim süresinin kısaltılması yani hız değerinin artırılması ile ISO 14243-3'te verilen grafik değerlerinde ne derece bir sapmanın oluşacağı yine kurulacak bir diz simülasyon test düzeneği ile ölçülecektir.

Gerçekleştirilen çalışmada, benzer diz simülasyon sistemlerinden farklı olarak, diz eklem hareket modeli Matlab Simulink'te oluşturulmuş ve DC motor için girdi çıktı sinyalleri elde edilmiştir. Girdi çıktı sinyalleri Matlab SimMechanics ortamında diz simülasyon prototipi CAD modelinin çalıştırılmasına ve beraberinde tasarım optimizasyonunun gerçekleştirilmesine önayak olmuştur. Sonuç olarak, mekanik tasarım ve sistem tasarım çalışmalarını birlikte yürütebilmek, optimum tasarım çıktılarını elde edebilmek için uygun zemini oluşturmaktadır. Bu çalışmada görülmektedir ki belirli formattaki veri kaynağı gerekli düzenleme yapıldıktan sonra sistem modeline dahil edilip uygulanabilmekte ayrıca sistem modelleme tasarım süreci açısından değerlendirildiğinde farklı kontrol mekanizmaları için de uygulaması kolay ve düşük maliyetli örnek bir yöntem olmaktadır.

### Teşekkür (Acknowledgment)

Deneysel çalışmalar için katkı sunan Mazaka Endüstriyel Ürünler San. Tic. ve Teknoloji A.Ş. firmasına teşekkürü borç biliriz.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] S. Affatato, "Displacement or force control knee simulators? Variations in kinematics and in wear," *Artificial Organs*, vol. 40, no. 2, pp.195-201, February 2016. doi:10.1111/aor.12508
- [2] E. Bahçe ve E. Demir, "Diz Eklem Protezi Aşınma Test Simülasyonu Tasarım ve İmalatı," *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 187-194, Aralık 2018. <https://dergipark.org.tr>
- [3] A. Wang, A. Essner, C. Stark and JH. Dumbleton, "A biaxial line-contact wear machine for the evaluation of implant bearing materials for total knee joint replacement," *Wear*, vol. 225-229, pp. 701-707, April 1999. doi:10.1016/S0043-1648(99)00025-3
- [4] M.R. Blunn Gw, "Four station knee simulator wear testing comparing titanium niobium nitride with cobalt chrome," *Journal of Bioengineering & Biomedical Science*, vol. 3, no. 3, August 2013. doi:10.4172/2155-9538.1000125
- [5] P.S. Walker, MT. Lowry, G. Yildirim and A. Kumar, "Kinematic differences in posterior stabilized total knees determined by a holistic experimental evaluation method," *Journal of Medical Devices*, vol. 7, no. 3, p.3, September 2013. doi:10.1115/1.4024506
- [6] T. Schwenke, D. Orozco, E. Schneider and MA. Wimmer, "Differences in wear between load and displacement control tested total knee replacements," *Wear*, vol. 267, no. 5-9, pp. 757-762, June 2009. doi:10.1016/j.wear.2009.01.028
- [7] T. Calliess, S. Schado, B.I. Richter, C. Becher, M. Ezechiel and S. Ostermeier, "Quadriceps force during knee extension in different replacement scenarios with a modular partial prosthesis," *Clinical Biomechanics*, vol. 29, no. 2, pp. 218-222, February 2014. doi:10.1016/j.clinbiomech.2013.11.007
- [8] C.K. Fitzpatrick, C. Maag, CW. Clary, A. Metcalfe, J. Langhorn and PJ. Rullkoetter, "Validation of a new computational 6-DOF knee simulator during dynamic activities," *Journal of Biomechanics*, vol. 49, no. 14, pp. 3177-3184, October 2016. doi:10.1016/j.jbiomech.2016.07.040
- [9] S. Abdel-Jaber, C. Belvedere, A. Leardini and S. Affatato, "Wear simulation of total knee prostheses using load and kinematics waveforms from stair climbing," *Journal of Biomechanics*, vol. 48, no. 14, pp. 3830-3836, November 2015. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.09.007
- [10] A. Liu, LM. Jennings, E. Ingham and J. Fisher, "Tribology studies of the natural knee using an animal model in a new whole joint natural knee simulator," *Journal of biomechanics*, vol. 48, no. 12, pp. 3004-3011, September 2015. doi:10.1016/j.jbiomech.2015.07.043

- [11] ISO 14243-1 Implants for Surgery – Wear of Total Knee-joint Prostheses – Part 1: Loading and Displacement Parameters for Wear-testing Machines with Load Control and Corresponding Environmental Conditions for Test, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland 14243-1, 2014.
- [12] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth edition, New Jersey:Pearson , 2010, pp.63-97.
- [13] A. Hossain and M. Rasheduzzaman, “Integrating servomotor concepts into mechatronics engineering technology curriculum emphasizing high speed packaging machinery,” *In2011 ASEE Annual Conference & Exposition*, pp. 22-915 June 2011.
- [14] C. Beykont, Ç. Çakir ve İ. Altay, “Analog Servo Motor Devresi Tasarımı ve Simulasyonu,” *in UMTS 2007- 13.Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, 7-9 Haziran 2007, Sivas, Turkey, 2007*, vol.1, pp. 539-551.
- [15] M.F. Işık ve İ. Coşkun, “Mikrodenetleyici Tabanlı Servo Sistem Denetimi,” *emo.org.tr*, Elektrik Mühendisleri Odası. [Online]. Available: [https://www.emo.org.tr/ekler/77e672678ddfb70\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/77e672678ddfb70_ek.pdf). [Accessed: Augst. 14, 2023]
- [16] D. R. Meier, “Modeling DC Servo Motors Control Systems,” *faculty-web.msoe.edu*, Tech Note©, MSOE. [Online]. Available: <https://faculty-web.msoe.edu/meier/ee3720/technotes/dcservo.pdf>. [Accessed: Augst. 14, 2023]
- [17] Y. Ütük, “Anten servo sistemi için PID, LQG ve kayan kipli kontrolcü tasarımı ve performans kıyaslaması,” Yüksek Lisans Tezi, TOBB ETÜ, Ankara, 2020.
- [18] M. Dursun ve S. Engin, “Deadbeat control of a DC servo motor at low speed,” *In 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 20-23 Ap. 2018, Auckland, New Zealand, New Zealand:IEEE, 2018*, pp. 282-286.
- [19] R. Dorf and R. Bishop, *Modern Kontrol Sistemleri*, New Jersey: Nobel, 2020.
- [20] Sem IV, “I. Algorithms” Vivekananda, 2019. [Online]. Available: <https://vcenggw.ac.in>. [Accessed: Sept. 12, 2023].
- [21] Q. Xiong and WJ. Cai, “Effective transfer function method for decentralized control system design of multi-input multi-output processes,” *Journal of Process Control*, vol. 16, no. 8, pp. 773-784, September 2006. doi:10.1016/j.jprocont.2006.04.001
- [22] F. Golnaraghi and B.C. Kuo, *Automatic Control Systems: Introduction To Stability*, Danvers: Wiley, 2017.

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



# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Investigation of the Effects of Kahramanmaraş Earthquakes on Masonry Structures

Abdülkadir Güleç<sup>a</sup>

Submitted: 10.05.2023 Revised: 04.12.2023 Accepted: 06.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705094

#### ABSTRACT

**Keywords:** Masonry structures, damage types, earthquake

<sup>a</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Kahramanmaraş  
Orcid: 0000-0002-1518-4362  
e mail: abdulcadir.gulec@hotmail.com

<sup>\*</sup>Corresponding author:  
abdulkadir.gulec@hotmail.com

On 6 February 2023, the Pazarcık and Elbistan districts of Kahramanmaraş experienced the largest earthquakes in the history of the Republic of Turkey in terms of loss of life and damage. Tens of thousands of buildings were destroyed or damaged due to earthquakes. Damage assessment studies began immediately after the earthquake to determine the extent to which the existing building stock was affected by the earthquake. Kahramanmaraş has a rich cultural heritage due to its centuries-long history. The majority of these cultural assets are masonry structures. Although the number of masonry structures is less than the number of other structures, it is of great importance to examine the damage conditions of masonry structures and to determine the measures to be taken for their repair due to their cultural value. Present study, the types and causes of earthquake damage to masonry structures in Kahramanmaraş were investigated. As a result, it was observed that structural damages in masonry structures were generally caused by factors such as large span widths, high height/thickness and length/thickness ratios of the walls, use of weak lintels at the top of the spans, weak roof-flooring connections, weak wall corner joints, overlapping of vertical joints and workmanship errors.

### Kahramanmaraş Depremlerinin Yığma Yapılar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

#### ÖZ

6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Kahramanmaraş iline bağlı Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde can kaybı ve hasar bakımından Türkiye Cumhuriyeti tarihinin en büyük depremleri meydana gelmiştir. Depremler nedeniyle on binlerce yapı yıkılmış veya hasar görmüştür. Deprem sonrası derhal hasar tespit çalışmaları başlatılmış ve mevcut yapı stokunun depremden ne ölçüde etkilendiği araştırılmıştır. Kahramanmaraş ili yüzlerce yıllık tarihi olan bir şehir olması sebebiyle kültür varlıklarına ev sahipliği yapan bir şehirdir. Bu kültür varlıklarının büyük çoğunluğunu ise yığma yapılar oluşturmaktadır. Yığma yapı sayısı diğer yapı sayısına göre az olmakla birlikte kültürel değerlerinden dolayı yığma yapıların hasar durumlarının incelenmesi ve onarım ile ilgili alınacak tedbirlerin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada depremden dolayı Kahramanmaraş ilindeki yığma yapılarda oluşan hasar tipleri ve nedenleri araştırılmıştır. Çalışma neticesinde yığma yapılardaki yapısal hasarlara genel olarak; büyük açıklık genişlikleri, duvarların yükseklik/kalınlık ve uzunluk/kalınlık oranlarının fazla olması, açıklık üstlerinde zayıf lento kullanımı, çatı-döşeme bağlantılarının zayıf olması, duvar köşe birleşimindeki zayıflıklar, düşey derzlerin üst üste gelmesi ve işçilik hataları gibi etmenlerin sebep olduğu görülmüştür.

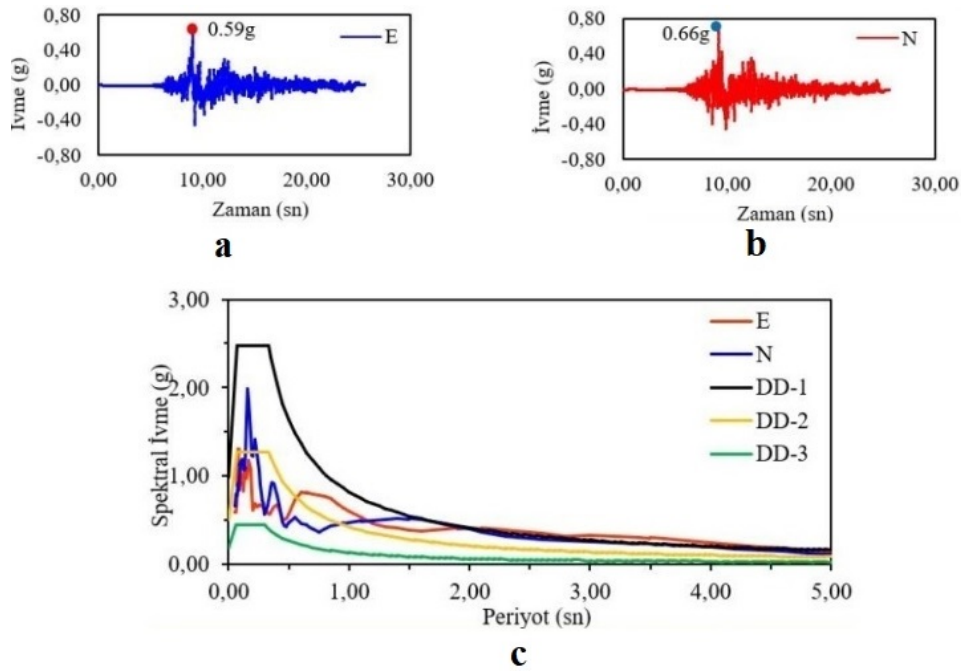
**Anahtar Kelimeler:** Yığma yapılar, hasar tipleri, deprem

## 1. Giriş (Introduction)

6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Kahramanmaraş iline bağlı Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde Mw7.7 (odak derinliği 8.6 km) ve Mw7.6 (odak derinliği 7 km) büyüklüklerinde iki büyük sığ odaklı deprem meydana gelmiştir. Yaşanan depremler can kaybı ve hasar bakımından Türkiye Cumhuriyetinde görülmüş en büyük depremlerdir. Söz konusu depremlerden 11 şehir etkilenmiştir. Merkez üssü olması nedeniyle Kahramanmaraş ilinde de büyük yıkım söz konusudur. Deprem sonrası derhal bina hasar tespit incelemeleri başlamıştır. Bina hasar tespiti yapılırken öncelikli olarak binalar taşıyıcı sistemlerine göre ayrılmıştır. Deprem bölgesindeki yapıların taşıyıcı sistemleri açısından değerlendirildiğinde yığma yapılar tüm yapı stokunun %3.5'lik oranını kapsamaktadır [1]. Bu oran diğer yapı türlerine göre oldukça düşük kalmaktadır. Ancak deprem bölgesindeki kültür varlıklarının çok büyük bir kısmını yığma yapılar oluşturmaktadır. Bu nedenle anıtsal niteliği olan ve korunması gereken yığma yapılarda deprem sonrası oluşan hasarların tespit edilmesi ve buna göre gerekli önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır.

Yığma yapılar binaya etkileyen düşey veya yatay yüklerin genel olarak duvarlar tarafından karşılandığı yapılardır. Yığma yapılarda moment çerçeveleri veya perde gibi taşıyıcı elemanları bulunmaz. Bu nedenle genel olarak taşıyıcı sistem açısından bir süreklilik arz etmezler [2]. Yığma yapılar yapım şekline veya kullanılan malzemenin cinsine göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilirler. Yığma yapılar genel anlamda donatılı ve donatısız yığma yapılar olarak sınıflandırılabilirler. Kullanılan malzeme açısından ahşap, taş, kerpiç, tuğla vb malzemelerin kullanıldığı görülebilir. Kahramanmaraş ilindeki yığma yapı stokunun büyük bir kısmını donatısız yığma yapılar oluşturur. Bu yapılarda yakın çevreden temin edilen taş, toprak ve ağaç malzeme kullanılmıştır [3]. İldeki mevcut yığma yapılar karakteristik olarak ağır ve rijit yapılardır. Bu durum yığma yapıların deformasyon yapabilme kabiliyetlerini sınırlar [4]. Bundan dolayı ildeki mevcut yığma yapı stoku sismik yapı tasarımındaki en önemli parametrelerden biri olan yükler altında sünek davranış ilkesini karşılamaktan uzaktır. Deprem ivme kayıtları incelendiğinde Kahramanmaraş ilinde bulunan istasyondan alınan ölçüm değerlerine göre kuzey-güney istikametinde maksimum yer ivmesi (PGA) 0.664g olarak ölçülmüştür. Bu değer 1.derece deprem bölgeleri için 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde öngörülen maksimum yer ivmesi değerinin oldukça üstündedir. Dolayısıyla deprem bölgesindeki binalara etkileyen deprem kuvveti de yönetmelikte ön görülen tasarım depremlerini aşmıştır (Şekil 1). Bu nedenle zaten depreme karşı dayanıklılığı az olarak bilinen yığma yapılarda da büyük hasar ve yıkım gözlemlenmiştir. Kahramanmaraş depremleri ilgili literatür araştırması yapıldığında konunun oldukça güncel olmasından dolayı konu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Öztürk ve ark. (2023) Kahramanmaraş depremlerinin betonarme yapılar üzerindeki etkilerini detaylı bir biçimde araştırmışlardır [5]. Depremin yığma yapılar üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir diğer çalışmada yığma yapılarda oluşan hasar tipleri ve hasara neden olan uygulama hataları ayrıntılı bir biçimde irdelenmiştir. Çalışma sonucunda zarar görmüş yığma yapılarda yönetmeliklerdeki sınır değerlere uyulmadığı, kullanılan malzemelerin çevre koşullarından etkilendiği ve defalarca restore edilmesine rağmen yapıların restorasyon hataları neticesinde depremde ağır hasar aldığı ifade edilmiştir [6]. Bir başka çalışmada Kahramanmaraş depremlerinin bölgedeki tarihi yığma camilere etkileri incelenmiştir. Nümerik analizlerle desteklenen çalışma sonucunda deprem sonrası tarihi camilerin minare ve kubbe gibi kritik elemanlarının hasar gördüğü bildirilmiştir. Çalışmada ülkemizde oldukça çok sayıda bulunan tarihi yığma camilerin kuvvet-deplasman kapasitelerinin belirlenerek göçme mekanizmalarının tespit edilmesinin önemine vurgu yapılmıştır [7]. Konu ile ilgili bir başka çalışmada Kahramanmaraş depremlerinin kerpiç yapılar üzerindeki etkileri irdelenmiş ve kerpiç yapılarda oluşan hasar tipleri ve nedenleri araştırılmıştır [8].

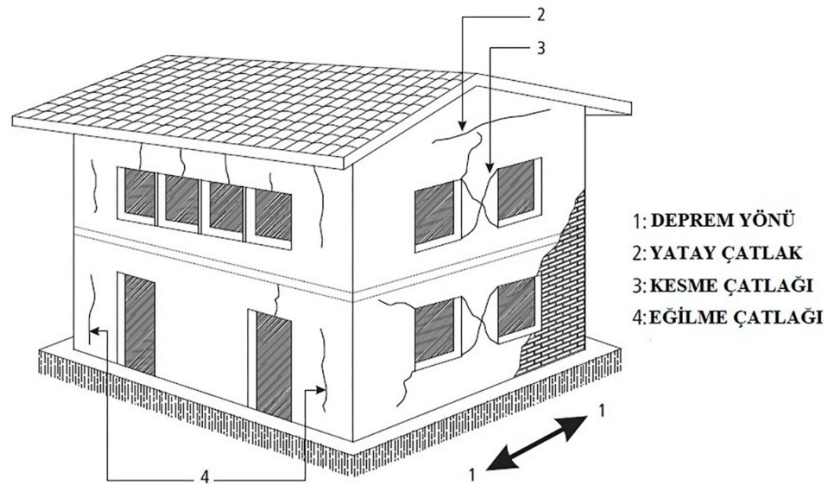
Bu çalışmada Kahramanmaraş depremleri sonrası Kahramanmaraş ilindeki yığma yapılarda oluşan hasar tipleri ve nedenleri incelenmiştir.



Şekil 1. a) Doğu- Batı Doğrultusu Yer İvmesi b) Kuzey-Güney Doğrultusu Yer İvmesi 1c)Spektral İvme kayıtları [9]  
(Ground accelerations and spectral acceleration records)

## 2.Hasar Tipleri (Damage Types)

Yığma yapılarda hasar tespiti yapılabilmesi için hangi çatlağın hangi etkiden dolayı oluştuğunun bilinmesi gerekir. Aksi takdirde hasar tespiti doğru yapılamayabilir. Özellikle donatısız yığma yapılarda deprem yönüne ve şiddetine bağlı olarak tipik çatlak oluşumları görülebilir. Bu noktada betonarme yapılarda olduğu gibi oluşan hasarın veya çatlağın yapısal olup olmadığının tespiti büyük önem arz eder. Yapısal olmayan hasarlara, bacalarının devrilmesi, balkonlardaki (cumba) küçük çatlaklar, sıva dökülmeleri, taşıyıcı olmayan kalkan duvarda meydana gelen çatlaklar örnek verilebilir. Yapısal hasarlara başlıca; kesme etkisinden dolayı açıklıkların köşelerinde veya açıklıklar arasında oluşan çapraz çatlaklar, eğilme etkisinden dolayı çekme çatlakları ve buna bağlı düzlem dışı duvar hareketleri, çatı-duvar bağlantısının zayıf olmasından oluşan duvar hasarları, simetrik olmayan yığma yapılarda burulmadan ve eğilmeden kaynaklı kesme kuvvetine bağlı köşe noktalarındaki hasarlar ve düzlem içi hareketten dolayı kemerlerde oluşan hasarlar örnek olarak verilebilir. Şekil 2'de deprem yönüne bağlı olarak tipik yapısal hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 2. Yığma yapıda deprem sonrası oluşabilecek çatlak türleri [7]  
(Types of cracks that may occur in masonry structure after earthquake)

Yığma yapılarda, hasar derecesinin belirlenebilmesi için hasar tiplerinin belirli biçimlerde kategorize edildiği

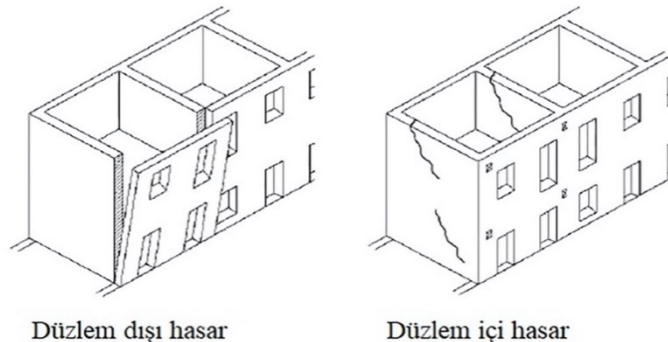
farklı hasar kriter şablonları mevcuttur. Şekil 3'te farklı hasar kriter tabloları [10-12] birlikte gösterilmiştir. Farklı şartnamelerdeki kriterler birlikte incelendiğinde küçük farklılıklar olmakla birlikte genel mantığın benzer olduğu görülebilmektedir. Ülkemizdeki yığma yapıların yapım standartları 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinin (TBDY-2018) 11. Bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yukarıda bahsedilen hasar tipleri, depremden etkilenen Kahramanmaraş ilindeki yığma yapılarda oluşan hasarlar üzerinden somutlaştırılacaktır.

Tablo 1. Hasar kriterleri (Damage criterias)

JAPONYA ULUSLARARASI DEPREM MÜHENDİSLİĞİ KURUMU [10]			AVRUPA SİSMOLOJİ KOMİSYONU [11]			TÜRKİYE CUMHURİYETİ ÇEVRE VE ŞEHİRCİLİK BAKANLIĞI [12]		
HASAR KODU	HASAR ŞEKLİ	AÇIKLAMA	HASAR KODU	HASAR SINIFI	ÖLÇÜTLER	HASAR KODU	HASAR SINIFI	ÖLÇÜTLER
0 hasar yok	Hasar yok	Herhangi bir işlem gerekmez	1.derece	Hafif hasar	Bazı duvarlarda kılcak çatlaklar	O tipi hasar	Hasarsız	Duvarda çatlak ezilme yok, sıvada çatlak veya ezilme olabilir
I Yapısal olmayan hafif hasar	Sıvada ince çatlaklar, lokal olarak sıvada dökülmeler	Binanın boşaltılmasına gerek yoktur. mimari açıdan tamirat gerekli	2.derece	Orta hasar	Birçok duvarda çatlak ve büyük sıva parçalarının dökülmesi	A tipi hasar	Hafif hasar	Kılcak çatlak ( $\leq 1$ mm)
II yapısal hafif hasar	Duvarlarda ince çatlaklar, sıvada dökülmeler, yapısal olmayan duvarlarda hasarlar	Binanın boşaltılmasına gerek yoktur. mimari açıdan tamirat gerekli	3.derece	Ağır hasar	Çoğu duvarda büyük ve geniş çatlak, taşıyıcı olmayan duvarlarda çökme	B tipi hasar	Orta hasar	Çatlak genişliği $\leq 5$ mm, harçta dökülmeler
III yapısal orta hasar	Taşıyıcı duvarlarda büyük ve derin çatlaklar, payandalarda yaygın çatlaklar	Duvarların yük taşıma kapasitesi azaldığından bina boşaltılmalı, yapısal restorasyon ve sismik güçlendirme gerekli	4.derece	Çok ağır hasar	Taşıyıcı duvarların çökmesi	C tipi hasar	Ağır hasar	Çatlak genişliği $\leq 10$ mm, bloklarda ezilme, harçta dökülmeler
IV yapısal büyük hasar	Taşıyıcı duvarlarda ayrılmalar veya çökmeler. yapıda %50 oranında çökme	Bina derhal boşaltılmalı, yapısal restorasyon mümkünse yapılmalı, aksi halde yıkılmalı	5.derece	Yıkım	Toptan yapının göçmesi	D tipi hasar	Çok ağır hasar	Taşıyıcı duvarların kısmen veya tamamen parçalanması, yıkılması ve/veya devrilmesi
V Yapının Çökmesi	Yapının büyük kısmında çökme	Bina tamamen yıkılmalı ve yeniden inşaa edilmeli						

### 2.1. Düzlem dışı etkilerden dolayı oluşan hasarlar (Damages due to out-of-plane effects)

Deprem sonrası yığma yapılarda yapılan incelemede temel olarak iki temel hasar mekanizmasına rastlanmıştır. Bunlar düzlem dışı ve düzlem içi hasarlar olmak üzere 2 ana gruba ayrılabilir. Deprem kuvvetleri yapılarda düzlem içi ve/veya düzlem dışı gerilmelere neden olabilir. Yığma yapının doğası gereği düzlem içi gerilmelere karşı dayanımı, düzlem dışı gerilmelerine karşı dayanımından çok daha yüksektir. Bunun nedeni, genel olarak yığma yapılarda kullanılan malzemelerin basınç dayanımlarının yüksek olmasıdır. Bu nedenle yığma yapılar düzlem içi gerilmelere karşı daha dayanıklıdır. Ancak deprem yönüne bağlı olarak yapıya düzlem dışı bir kuvvetin gelmesi neticesinde, yığma yapıda eğilmeye bağlı düzlem dışı ötelenme hareketleri görülebilir. Şekil 4'de düzlem içi ve düzlem dışı hasar tipleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Düzlem içi ve düzlem dışı hasar tipleri [13] (In-plane and out-of-plane damage types)



Yapılan incelemeler sonucunda, Kahramanmaraş ilindeki yığma yapılarda oluşan ağır hasarların veya çökmelerin büyük çoğunluğunun deprem sonucu yapılarda oluşan düzlem dışı gerilmelerden dolayı meydana geldiği tespit edilmiştir. Deprem yüklerine maruz kalan elemanlarda genellikle alt katlarda düzlem içi gerilmeler oluşurken üst katlarda düzlem dışı gerilmeler oluşabilir. Düzlem dışı yüklenen duvarlara etkiyen ivme düzlem içi yüklenen duvarlara göre daha yüksektir. Bu nedenle üst katlarda düzlem dışı etkilerden dolayı büyük deplasmanlar ve dolayısıyla çökmeler görülmüştür. Yığma yapılarda kat yüksekliğinin 1/250'si oranında bir deplasman oluşması durumunda duvarda hasar oluşumu başlayabilir. Hasar alan yapılarda yapılan incelemelerde bazı yapılarda çatı duvar birleşiminin iyi yapılmadığı, bazı yapılarda ise alt katın çift sıra, üst katın ise tek sıra duvar olmasından dolayı düzlem dışı etkilerden üst katların daha çok etkilendikleri görülmüştür. Şekil 5'te de görülebileceği gibi çatı- duvar bağlantısının yetersiz olmasından dolayı hasar alan yapılarda çatı elemanlarının duvarlara düzgün bağlanmadığı görülmüştür. Özellikle dikmelerin ve kirişlerin duvarlara düzgün bir biçimde oturtulmadığı veya ahşap malzemenin zaman içinde çürümesi sonucu ahşap malzeme ile duvar bağlantısının zayıfladığı tespit edilmiştir. Bu noktada üst duvarların üzerinde yeteri kadar yük olmadığından deprem esnasında üst duvarlar adeta bir konsol gibi çalışmışlar ve düzlem dışı hareket yaparak zarar görmüşlerdir. Ayrıca çatı elemanlarının kendi içerisinde bağlantısının zayıf olması da deprem esnasında yapıda düzlem dışı etkiyi arttırmıştır. Göğüsleme ve payanda elemanları olmayan çatılar, deprem esnasında aşırı deplasman yaparak üst duvarlarda hasara neden olmuşlardır. Şekil 6'da alt katı çift sıra bir üst katı tek sıra duvarı olan yapıdaki hasar görülmektedir. Alt katın üst kata göre daha rijit olmasından dolayı deprem esnasında üst kat duvarı daha büyük bir deplasman yaparak yıkılmıştır. Yapıda daha önceden oluşan bir düzlem içi hasar yapının düzlem dışı kapasitesini olumsuz etkiler [14]. Yapılan incelemelerde düzlem dışı hareket etmiş bir etkiye maruz kalmış yapı elemanlarında daha önceden olduğu düşünülen düzlem içi hasarlar gözlemlenmiştir. İnceleme sırasında dikkati çeken bir diğer konu düzlem dışı hareket eden duvar elemanlarında duvar yüksekliği/kalınlık oranının düzlem dışı hareket yapmayan duvar elemanlarına göre daha yüksek olmasıdır. Narinlik oranı olarak adlandırılan bu parametrenin de düzlem dışı davranışta etkili olduğu düşünülmektedir Şekil 7'de yüksekliğinin kalınlığına göre oldukça fazla olduğu bir bahçe duvarının devrilmek suretiyle göçtüğü görülmüştür. Düzlem dışı davranış göstererek hasar alan yapılarda gözlemlenen bir diğer eksiklik duvar-döşeme bağlantısının zayıf olmasıdır. Şekil 8'de görülebileceği gibi döşeme sırkaları ile duvarın bağlantısının zayıf olmasından dolayı deprem yükleri altında rijit diyafram davranışı sağlanamamıştır. Literatürde de bu nedenden dolayı çöken birçok yapı rapor edilmiştir [15]. Yerinde yapılan incelemelerde döşeme sırk aralıkları ve kalınlıkları yeterli olan ayrıca döşeme sırkalarının duvara düzgün bir biçimde oturtulduğu yapılarda bu tür hasarla karşılaşılmasıdır. Düzlem dışı davranışta zemin durumu da oldukça etkili olabilmektedir. Ülkemizdeki yığma yapıların kat sayısının en fazla 4 kat olduğu kabulüyle periyotlarının 0.05-0.20 saniye arasında olduğu değerlendirilebilir. Bu durum mevcut yapı stokunun rijit yapılar olduğunu göstermektedir. Bilindiği gibi kayalık sağlam zeminlerin de hakim titreşim periyotları göreceli olarak düşüktür. Bu nedenle sağlam zeminlerde yapılan az katlı rijit yığma yapılarda da deprem esnasında rezonans olayı gerçekleşebilir ve deprem yükü yapıda daha büyük bir ivmeye neden olabilir. Bu nedenle yapılan incelemede sağlam zeminler üzerine yapılan düşük katlı yığma yapılarda da düzlem dışı etkilerden dolayı hasarlara rastlanmıştır.



Şekil 5. Yetersiz Çatı- Duvar Bağlantısı (Duraklı Camii) (Weak Roof-Wall Connection (Duraklı Mosque))



Şekil 6. Duvar süreksizliği (Kayabaşı mahallesinde bir konak) (Wall discontinuity (a mansion in Kayabaşı neighborhood))



Şekil 7. Narinlik oranı yüksek duvarda çökme (Kayabaşı mahallesinde bir konak) (Wall collapse with high fragility (a mansion in Kayabaşı neighborhood))



Şekil 8. Zayıf döşeme-duvar bağlantısı (Turan mahallesindeki bir konak) (Weak floor-wall connection (a mansion in Turan neighborhood))

## 2.2. Düzlem içi etkilerden dolayı oluşan hasarlar (Damages due to in-plane effects)

Yığma yapılar deprem sonucu oluşan düzlem içi gerilmelere karşı daha dayanıklıdır. Donatısız yığma yapılar basınç gerilmelerine karşı iyi bir dayanım gösterirken bünyelerinde çekme gerilmelerini karşılayacak başka bir malzeme kullanılmadığından dolayı çekme gerilmelerine karşı oldukça zayıf bir performans gösterirler. Deprem sonrası düzlem içinde oluşacak gerilmelerin karşılanması noktasında kullanılan taşıyıcı malzeme (doğal taş, moloz taş vb), harç, yapı geometrisi ve işçilik önemli bir rol oynar. Deprem sırasında yapının ağırlığından dolayı oluşan atalet kuvvetleri ile deprem kuvvetleri birbirine zıt yönde yapıyı zorlar. Bu zorlamalar sonucu, yığma yapı elemanlarında kesme ve eğilme etkileri çoğunlukla birlikte meydana gelir. Bu etkilerden dolayı yığma yapı elemanında çatlaklar veya ayrılmalar görülebilir ve bu hasar tipleri genellikle düzlem içi hasar olarak adlandırılır. Çatlaklar özellikle gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu kapı ve pencere kenarlarında meydana gelir [16]. Özellikle açıklık genişliklerinin standartlara uymaması ve üzerinde yeterli rijitlikte lento veya hatıl olmaması bu tip hasara neden olabilir. Geleneksel Maraş evlerinde kapı ve pencere açıklıkları üzerinde genellikle ahşap malzeme kullanıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan incelemelerde özellikle yeterli kalınlıkta ve elastikiyeti yüksek ahşap malzemeden (dut ağacı gibi) imal edilmiş lentolara sahip yığma yapı elemanlarında hasar daha az gözlemlenmiştir. Bahsi geçen lentolar deprem kuvvetini sönmülemde de önemli rol oynamışlardır. Şekil 9'da da görülebileceği üzere oldukça geniş açıklığa sahip olmasına rağmen açıklık üzerinde yeterli kalınlık ve uzunluğa sahip lento bulunan yapıda herhangi bir hasara rastlanmamıştır. Ayrıca lentonun duvara bindiği kısmında yeterli uzunlukta olduğu da görülmektedir.



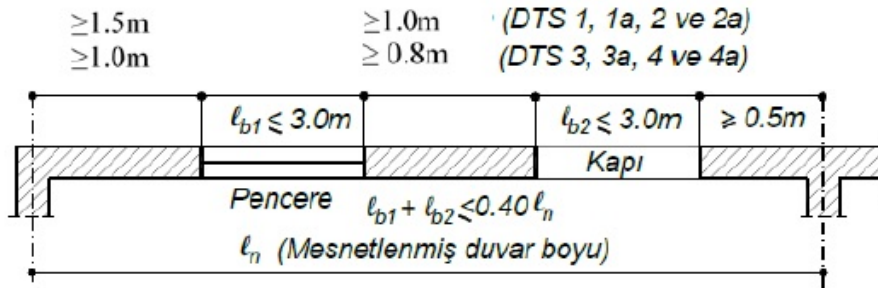
Şekil 9. Açıklık boyutu fazla olmasına rağmen hasar görmemiş bir duvar (An undamaged wall despite the large opening size)

Duvarlarda bir diğer zayıf nokta yapıda üst üste veya yan yana iki açıklık arasında bulunan bölgedir. Bu bölgenin düzlem içi etkiler altında performansı zayıftır. Bölgenin genişliği arttıkça risk artar ve çapraz (X) kesme çatlakları gözlemlenebilir. Şekil 10'da da görülebileceği gibi geniş açıklıklara sahip yığma yapıda kesme çatlağı açıkça görülmektedir. Deprem bölgesinde bu tip çatlaklar sadece yığma yapılarda değil betonarme yapılarda da görülmüştür. Açıklık olmayan duvarlarda ise duvar uzunluğu/kalınlık oranı kesme gerilmeleri açısından önemlidir. Bu oran arttıkça kesme kuvvetinden dolayı yapıda yatay çatlaklarla beraber diyagonal çatlaklar da görülebilir. Bu oranı azaltmak için keşişen duvarlar veya düşey hatıllar kullanılabilir. 2018 Deprem Yönetmeliğinde yeni yapılacak donatısız yığma yapılar için düşey hatıllar arasındaki mesafenin 4 m'yi geçmemesi öngörülmüştür. Duvar uzunluğu/kalınlık oranının da 10'nun altında olduğu duvarların deprem performansının iyi olduğu görülmüştür [16].

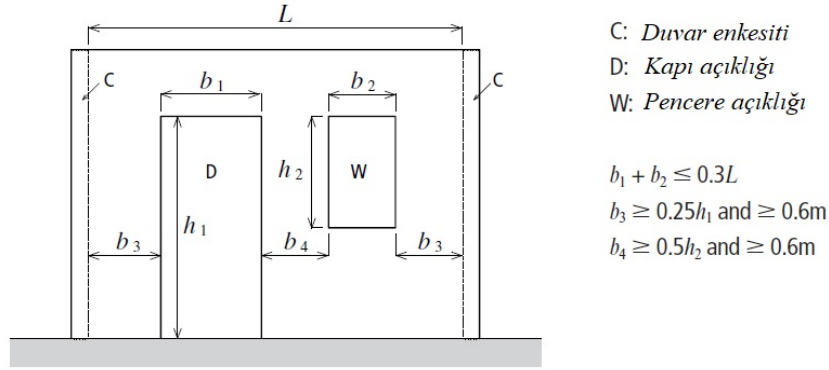


Şekil 10. Açıklıklar arası X çatlağı oluşumu (Kayabaşı mahallesinde bir konak) (X crack formation between openings (a mansion in Kayabaşı neighborhood))

Anlaşılabileceği üzere yığma yapıda düzlem içi hasarların büyük kısmı açıklıklarla (boşluklarla) ilgili problemlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle şartnameler, bu açıklıklara belirli sınırlar getirmişlerdir. 2018 deprem yönetmeliğinde bu standartlar şekilde gösterildiği gibidir [17] (Şekil 11). Bir başka şartnamede ise moloz taş duvarlarda yapılacak açıklıklar için önerilen şartlar şekildeki gibidir (Şekil 12).



Şekil 11. 2018 Deprem yönetmeliğinde belirtilen açıklık sınırları [18] (Span limits specified in 2018 Earthquake code)



Şekil 12. Moloz taş duvarlarda için açıklık sınırları [7] (Span limits for rubble masonry walls)

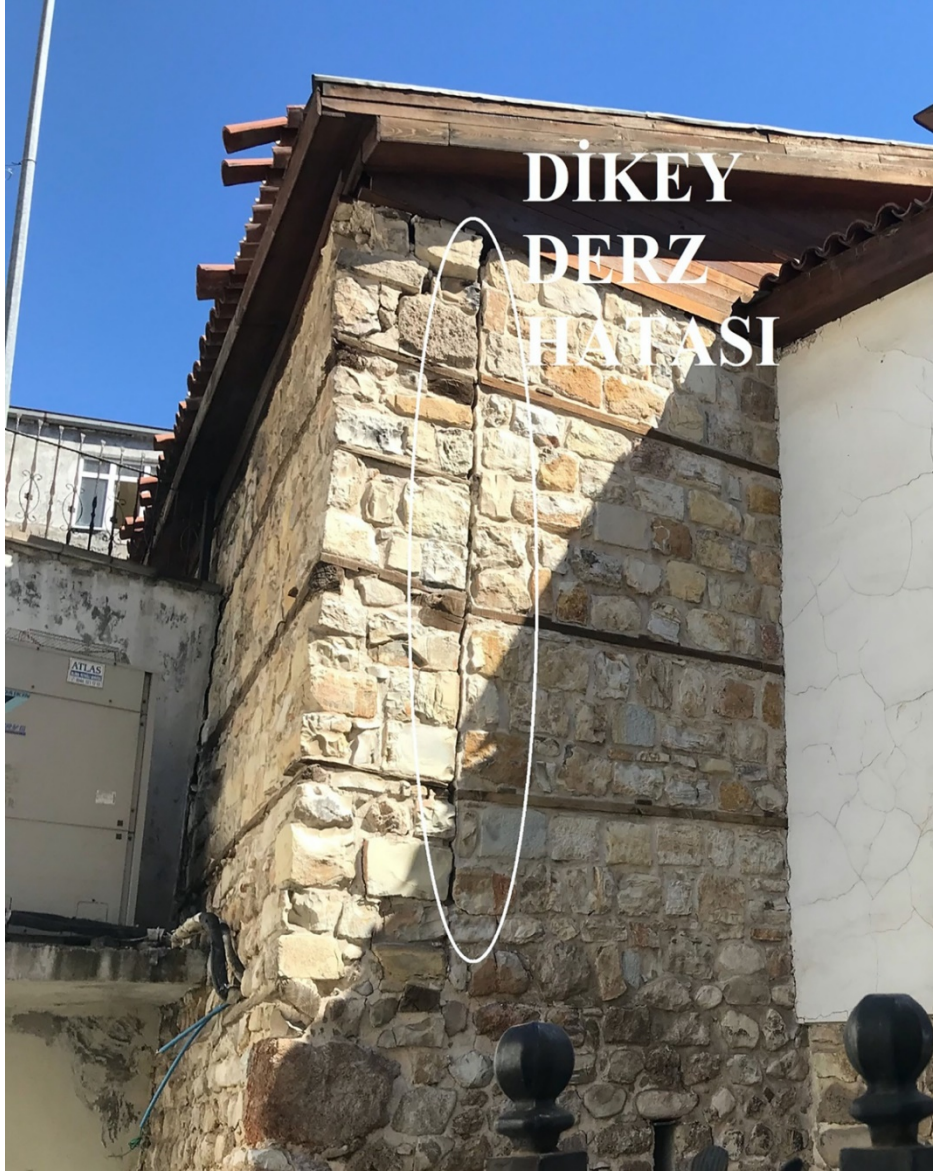
Yığma yapıların düzlem içi dayanımına etki eden faktörlerden biri de harç ve duvar malzemesinin özellikleridir. Genellikle harcın dayanımının duvar malzemesine (taş veya tuğla) göre düşük olması ve çatlamların derz yerlerinde görülmesi istenir (Şekil 13). Böylece yapı elemanında oluşabilecek çekme ve kayma gerilmelerinin harç boyunca yayılması sağlanır ve ana birimi oluşturan taş veya tuğlanın kırılması önlenir. Bu şekilde yapı rijitliği azalır ve deprem yükleri sönmülenebilir. Harç dayanımının yüksek olduğu durumlarda çatlaklar düşey yönde duvar malzemesinde görülebilir ki bu istenmeyen bir durumdur. Bu durumda duvar stabilitesi tehlikeye girebilir.



Şekil 13. Harç dökülmesi (Çukuroba Camii) (Damage to the mortar (Cukuroba Mosque))

Düzlem içi etkilerden oluşan hasarların en önemli nedenlerinden biri de dikey derz düzenidir. Bunun nedeni genellikle işçilik hatalarıdır. Dikey derzlerin düşeyde üst üste veya yakın bir biçimde olması durumunda yük altında o bölgede ayrılma kaçınılmaz olur. Deprem bölgesinde bu tür hatalar, genellikle sonradan kapatılan kapı veya pencere boşluklarında görülmüştür. Ayrıca harç ile taşın aderanslarının yeterli olmadığı durumlarda kaymaya bağlı deformasyonlar gözlenebilmektedir. Şekil 14'te görülebileceği gibi duvara

sonradan yapılan eklentinin birleştiği noktadan ayrılma gözlemlenmiştir. Özellikle yanlış yapılan restorasyon işlerinde dikey derzlerin üst üste gelmesinden dolayı bu tip hasarlarla oldukça sık karşılaşmıştır. Şekil 15'te ise yine bir restorasyon hatası olarak değerlendirilebilecek bir hata görülmektedir. Taş malzemenin birbiri üzerine yeterli bindirme boyu olmadan imal edilmesi sonucu dikey derz problemi ile karşılaşmıştır. Deprem bölgesinde yığma yapılarda gözlemlenen bir diğer hata duvarların birleşim köşe noktalarında gözlemlenmiştir. Rijit köşe bağlantısı olmayan duvarlarda ayrılmalar veya çatlaklar görülmüştür (Şekil 16).



Şekil 14. Duvarda derz ayrılması (Deli gönüllüler konağı) (Joint separation on the wall (Deli gönüllüler mansion))



Şekil 15. Yetersiz bindirmeden dolayı oluşan çatlak (Mutfak Müzesi Konağı) (Crack caused by insufficient overlap) (Kitchen Museum Mansion)



Şekil 16. Rijit Köşe bağlantısı olmayan duvarda çatlak (Şih Müslüm Camii) (Crack in wall without rigid corner connection (Şih Müslüm Mosque))

### 3. Sonuçlar (Conclusion)

6 Şubat 2023 depremleri sonrası Kahramanmaraş ilinde büyük can kaybı ve yıkım yaşanmıştır. Depremde oluşan yer ivmesinin güncel yönetmeliklerde öngörülen yer ivmesinden büyük olması depremde hasar gören veya yıkılan bina sayısının oldukça yüksek olmasına neden olmuştur. Özellikle mühendislik hizmeti almamış ve deprem performansının düşük olduğu bilinen yığma yapılarda da hasar oldukça büyük çaptadır. Yüzlerce yıllık geçmişi olan Kahramanmaraş'ta kültürel yapı varlıklarının çoğunun yığma yapı olduğu düşünüldüğünde, bu yapıların hasar tespitlerinin doğru bir biçimde yapılması ve bu yapıların tekrar ayağa kaldırılması ile ilgili yapılacak planlama büyük önem arz etmektedir. Mevcut çalışmada deprem sonrası yığma yapıların aldığı hasarlar ve nedenleri araştırılmıştır. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

-Bir bölümü veya tamamı yıkılmış yığma yapılarda yıkıma düzlem dışı hareketten dolayı duvarlarda oluşan hasarların neden olduğu tespit edilmiştir. Buna göre özellikle yükseklik/kalınlık oranının fazla olduğu, lento veya hatıl bulunmayan ve alt katı çift sıra üst katı tek sıra örülmüş duvarlara sahip yığma yapılar düzlem dışı etkiden oldukça fazla etkilenmiş ve ağır hasar almışlardır. Düzlem dışı hareketin daha çok yapının üst katındaki duvarlarda olduğu görülmektedir. Özellikle çatı-duvar bağlantısının zayıf olduğu yapılarda, üst kattaki duvarların konsol gibi çalışarak düzlem dışı hareket yaptıkları tespit edilmiştir.

-Yıkılmamış ancak ağır hasarlı veya orta hasarlı yığma yapılarda düzlem içi hasar etkileri görülmektedir. Düzlem içi hasarda en çok karşılaşılan problem taşıyıcı duvarlarda geniş kapı ve pencere boşlukları oluşturulmasıdır. Bu şekildeki yapılarda açıklıklar arasında veya üst kısımlarında kesme etkisinden dolayı çapraz çatlaklar görülmüştür. Ayrıca açıklık üzerlerine lento veya hatıl uygulaması yapılmamış duvarlarda da aynı tip hasarlar görülmüştür. Sık karşılaşılan bir diğer düzlem içi hasar tipi sonradan örüldüğü anlaşılan veya işçilik hatası nedeniyle derzlerin üst üste gelmesi veya yığma yapı elemanlarının birbirleri üzerine yetersiz bindirilmelerinden dolayı oluşan hasar türüdür. Bu şekilde olan duvar elemanlarında düşey derz çizgisi boyunca ayrılmalar görülmüştür. Hatta bazı düzlem dışı duvar hareketlerine de bu hatanın sebep olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte rijit olmayan köşe bağlantıları, harç dayanımının zayıf olması ve yapı elemanlarının çevresel etkilerden dolayı dayanımlarının zayıflaması gibi zafiyetler hasarlara neden olmuşlardır.

-Yapılan inceleme neticesinde yığma yapıların restorasyon uygulamalarında mimari ve görsel gereksinimlere verilen önem kadar statik gereksinimlere de önem verilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda tarihi dokuya zarar vermeden çekme dayanımı yüksek fiber takviyeli harç kullanımı veya çelik sistemlerle güçlendirme uygulamaları yığma yapıların deprem performansları artırılabilir. Sadece dökülmüş derzlerdeki harçların yenilenmesinden ziyade yapıların ağırlığını arttıran sonradan yapılmış eklentilerin kaldırılması, duvar yükseklik/kalınlık ve uzunluk/kalınlık oranının düşürülmesine yönelik güçlendirme önerilerinin düşünülmesi yapının yatay ve düşey yükler altındaki performansının gelişmesine daha çok katkı sağlayabilir.

### Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

### Kaynaklar (References)

- [1] T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, "2023 Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu," *sbb.gov.tr*, Mar. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.sbb.gov.tr/2023-kahramanmaras-ve-hatay-depremleri-raporu>. [Accessed: May. 10, 2023].
- [2] H. Tokgöz and Ö. Can, "Dıştan perde duvarla güçlendirmede perde-hatıl birleşim yerlerinde kullanılan blon sayısının araştırılması", *GUMMFD*, vol. 26, no. 3, pp. 649-656, 2013.
- [3] A.E. Paköz, "Geleneksel Maraş evlerinin mimari özellikleri", *Artium*, vol.1, no. 1, pp. 65-81, 2013.
- [4] Z. Celep and N. Kumbasar, *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*. İstanbul, Türkiye: Beta Dağıtım, 2019.
- [5] M. Öztürk, M. H. Arslan, and H. H. Korkmaz, "Effect on RC buildings of 6 February 2023 Turkey earthquake doublets and new doctrines for seismic design," *Engineering Failure Analysis*, vol. 153, p. 107521, Nov. 2023. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107521
- [6] Ö. Mercimek, "Seismic failure modes of masonry structures exposed to Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and 7.6) on February 6, 2023," *Engineering Failure Analysis*, vol. 151, p. 107422, Sep. 2023. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107422
- [7] İ. Kocaman, "The effect of the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on historical masonry mosques and minarets," *Engineering Failure Analysis*, vol. 149, p. 107225, Jul. 2023. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107225



- [8] E. Işık, "Structural Failures of Adobe Buildings during the February 2023 Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, p. 8937, Aug. 2023. doi: 10.3390/app13158937
- [9] K.T.Ü, "06.02.2023 Kahramanmaraş Depremleri ve Karadenizin Depremselliği," *ktu.edu.tr*, Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.ktu.edu.tr/huam/haber/06022023-kahramanmaras-depremleri-ve-karadenizin-depremselligi-bilgi-notu-yayinlandi-eOo>. [Accessed: May. 10, 2023].
- [10] A.S Arya, T. Boen, Y. Ishiyama, *Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*. Paris, France: UNESCO, 2014.
- [11] G. Grünthal, *European Macroseismic Scale*. Vol. 15. Luxembourg: European Seismological Commission, 1998.
- [12] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, "Betonarme ve Yığma Binalarda Deprem Kaynaklı Hasarlar ve Hasar Tespiti," *istanbul.csb.gov.tr*, Oct. 15-16, 2019. [Online]. <https://istanbul.csb.gov.tr/hasar-tespit-egitim-dokumanlari-i-95359>. [Accessed: May. 10, 2023].
- [13] L. D. Decanini, A. De Sortis, A. Goretti, R. Langenbach, F. Mollaioli, and A. Rasulo, "Performance of Masonry Buildings during the 2002 Molise, Italy, Earthquake," *Earthquake Spectra*, vol. 20, no. 1\_suppl, pp. 191–220, Jul. 2004. doi: 10.1193/1.1765106
- [14] P. Agnihotri, V. Singhal, and C. Durgesh, "Effect of in-plane damage on out-of-plane strength of unreinforced masonry walls," *Engineering Structures*, vol. 57, pp. 1–11, Dec. 2013. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.09.004
- [15] D. Dizhur *et al.*, "Performance of masonry buildings and churches in the 22 February 2011 Christchurch earthquake," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 279–296, Dec. 2011. doi: 10.5459/bnzsee.44.4.279-296
- [16] G.Arun, "Yığma kagir yapı davranışı," in *Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, 17 Şubat 2005, Ankara, Türkiye* [Online]. Available: <https://www.clouds.com.tr/web/uploads/dosya/273723.pdf>. [Accessed: May. 10, 2023].
- [17] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, "Türkiye Deprem Bina Yönetmeliği," *resmigazete.gov.tr*, Mar. 18, 2018. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>. [Accessed: May. 10, 2023].

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## New FinFet Transistor Implementation of Floating and Grounded Inductance Simulator Based on Active Elements

Hüseyin Demirel<sup>a\*</sup>, Arsen Ahmed Mohammed<sup>b</sup>

Submitted: 27.10.2023 Revised: 29.12.2023 Accepted: 29.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705095

### ABSTRACT

**Keywords:** Finfet transistor, floating and grounded inductance simulator, Z-copy CFTA (ZC-CFTA).

<sup>a\*</sup> Yıldırım Beyazıt University, Business School, Dept. of Management Information Systems  
06760 - Ankara, Türkiye  
Orcid: [0000-0003-2983-1425](https://orcid.org/0000-0003-2983-1425)  
e mail: husdemirel06@gmail.com

<sup>b</sup> Kirkuk University, Engineering Faculty, Dept. of Electrical Engineering  
Kirkuk, IRAK  
Orcid: [0000-0003-2239-9940](https://orcid.org/0000-0003-2239-9940)

\*Corresponding author:  
huseyindemirel@aybu.edu.tr

This research presents a new Finfet transistor that utilizes current mode active device technology to construct a floating and grounded inductance simulator. In this work, the grounded inductance circuit (GIC) uses only two Z-copy current follower transconductance amplifiers (Zc-CFTA's) and one grounded capacitor, and the floating inductance circuit (FIC) in the suggested simulator uses just three Z-copy current follower transconductance amplifiers (ZC-CFTA's) as active elements with only a single grounded capacitor as an active inductor simulation. The aim of this work is to realize an active inductance simulator with only one capacitor, which is commercially available as an active building block (ABB). In addition, the designed circuit shows low incremental active and passive hypersensitivity and non-interactive electronic control of the quality factor (Q) and natural angle frequency ( $\omega_0$ ). Through computer simulation results with a fourth-order Butterworth band-pass filter using LT-spice and a cadence virtuoso program with a 7nm process parameter, the suggested circuits' performances were assessed.

## Aktif Elemanlara Dayalı Yüzen ve Topraklanmış Endüktans Simülâtörünün Yeni FinFET Transistör Uygulaması

### ÖZ

Bu araştırma, yüzen ve topraklanmış bir endüktans simülâtörü oluşturmak için Akım mod aktif cihaz teknolojisini kullanan yeni bir Finfet transistörü sunmaktadır. Bu çalışmada, topraklanmış endüktans devresi (GIC) yalnızca iki Z-kopya akım takipçisi traniletkenlik amplifikatörü (ZC-CFTA'ler) ve bir topraklanmış kapasitör kullanır ve önerilen simülâtördeki yüzen endüktans devresi (FIC), aktif bir indüktör simülasyonu olarak yalnızca tek topraklanmış kapasitörle aktif elemanlar olarak sadece üç Z-kopya akım takipçi traniletkenlik amplifikatörü (ZC-CFTA) kullanır. Bu çalışmanın amacı, ticari olarak aktif yapı taşı (ABB) olarak temin edilebilen tek bir kapasitörle aktif endüktans simülâtörü gerçekleştirmektir. Ek olarak, tasarlanan devre düşük artımlı aktif ve pasif aşırı duyarlılık ve kalite faktörünün (Q) ve doğal açı frekansının ( $\omega_0$ ) etkileşimli olmayan elektronik kontrolünü gösterir. Dördüncü dereceden Butterworth bant geçişli filtre kullanan LT-SPIICE ve 7nm işlem parametresine sahip cadence virtüöz programı ile bilgisayar simülasyon sonuçları ile önerilen devrelerin performansları değerlendirildi.

**Anahtar Kelimeler:** Finfet transistör, yüzer ve topraklanmış endüktans simülâtörü, Z-kopya CFTA (ZC-CFTA)

## 1. Introduction

Current differential conduction amplifiers (CDTA) are a new type of current mode device that offers flexibility and full functionality. It has been widely used in analog inductor, analog filter, and sinusoidal oscillator designs. However, in most of the circuits that have been reported, 2 or more CDTA's have been used, and useless P- or N-terminals have appeared, which not only creates a success rate that's wasteful, and it can also cause noise interference. For this reason, an improved version of CDTA has appeared, and people call it a current follower transconduction amplifier (CFTA). CFTA-based general filters have been reported, but CFTA-based ground-analog inductors and floating analog inductors are not common. The author was inspired by literature [1-7] to replace CDTA in simulated inductor circuits with CFTA, which realizes a grounded analog inductor and a floating analog inductor, respectively. The circuit uses ground capacitors, has minimal active components, and has no suspended input and output terminals. It is an analog inductor circuit with minimal components. To prove the reliability of the circuit operation, based on this floating and ground analog inductor, a fourth-order Butterworth band pass filter was designed separately using component replacement methods. The main feature is that the pole frequency can be adjusted linearly by electric regulation. Computer simulation shows that the circuit designed correctly is effective.

## 2. Description Of Active Elements

It is an active device suitable for use in analog signal processing in both voltage and current modes. The CFTA is a three-pole active device. On the input side, there will be only one terminal, the f-terminal, and the output will have the same structure as CDTA, that is, it will consist of a z terminal, and the symbol x and the electrical equivalence circuit of the CFTA are represented in Figure 1. The relationship between the incoming and outgoing currents is explained as follows: The current at the z pole will be equal to the current flowing at the f pole, while the current at the x pole will be the transmission, transferred from the voltage at the z pole, so at the z pole there will be a voltage. external loads will have to be brought in. The  $\pm$  design indicates the direction of the current at the x pole; normally, the current at the x pole flows out. On the ideal side, the CFTA is designed to have a resistance value; on the input side, the f terminal has a value of zero, while the z and x terminals are designed to have an infinite resistance value based on said property. The root can be represented by a metric equation, as in equation 1 [7-9].

$$\begin{bmatrix} Vf \\ Iz \\ IzC \\ +Ix \\ -Ix \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +gm & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -gm & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vf \\ Vz \\ VzC \\ +Vx \\ -Vx \end{bmatrix} \quad (1)$$

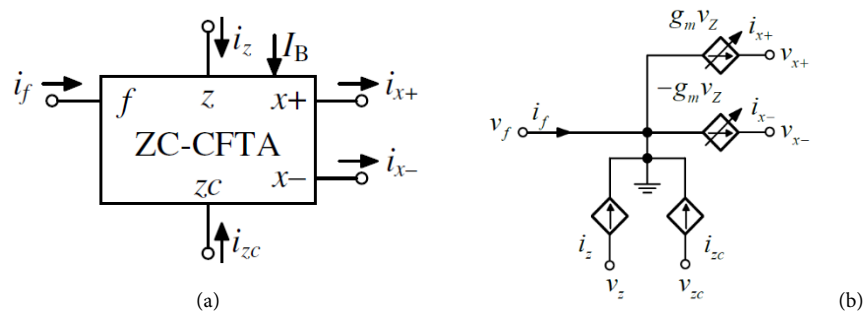


Figure 1. Zc-CFTA (a) Electrical Symbols and (b) Electrical Equivalent Circuits.

When  $gm$  is the transfer conductance value, the  $gm$  value can be controlled by adjusting the bias current ( $I_B$ ) on the input side.

The  $gm$  values of Zc-CFTAs designed with Finfet transistor technologies are shown in equations (2) and (3), respectively. The internal circuits designed for the Zc-CFTA with Finfet transistor technology are shown in Figure 2.

$$Iz = Izc = If, Vf = 0, Ix_{\pm} = \pm gm Vz \quad (2)$$

$$g_m = \frac{I_B}{2.V_T} \tag{3}$$

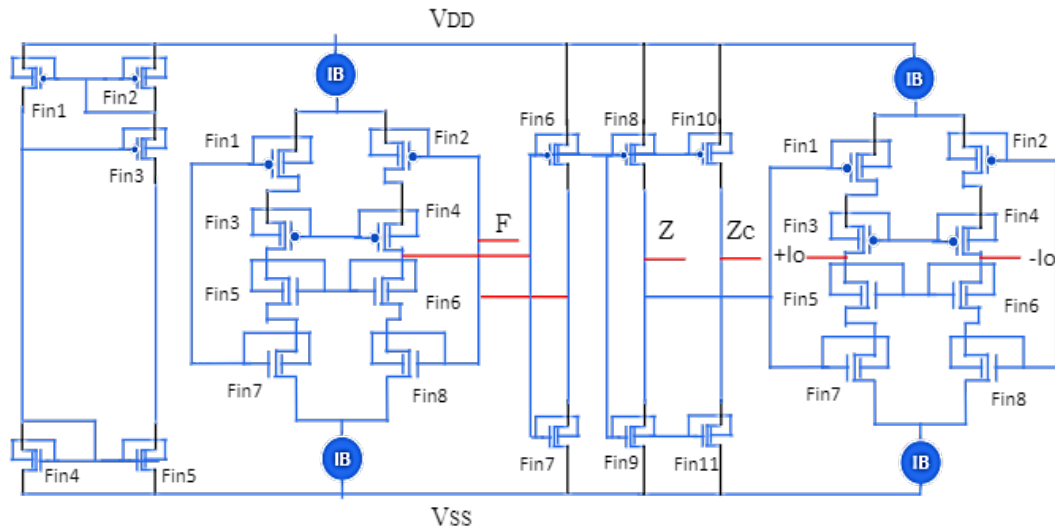


Figure 2. Finfet transistor realization of the z-copy CFTA used in simulations.

Among them,  $g_m$  is the transconductance gain of the  $Z_c$ -CFTA,  $V_T$  is the thermal voltage, and  $I_B$  is the bias current of the transconduction amplifier. It is the bias current of the transconduction amplifier, and the  $x$  can be freely taken between the  $x$ - and  $x$ -end of the transconduction amplifier [10-12]. Figure 3 shows a new active analog inductor simulator. Figure 3 (a) is a ground-analog inductor simulator based on  $Z_c$ -CFTA. It can be obtained from Figure 3 (a).

$$I_1 == -I_{z1} == -I_{x2} == \pm \frac{g_{m2}.I_{z2}}{s.C_1} = \frac{g_{m1}.g_{m2}.V_1}{s.C} \tag{4}$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{s.C}{g_{m1}.g_{m2}} \tag{5}$$

Therefore, from the above equation and formula (2), the equivalent inductance can be obtained as:

$$Lequ. = \frac{4.V_T^2.C_1}{I_B} \tag{6}$$

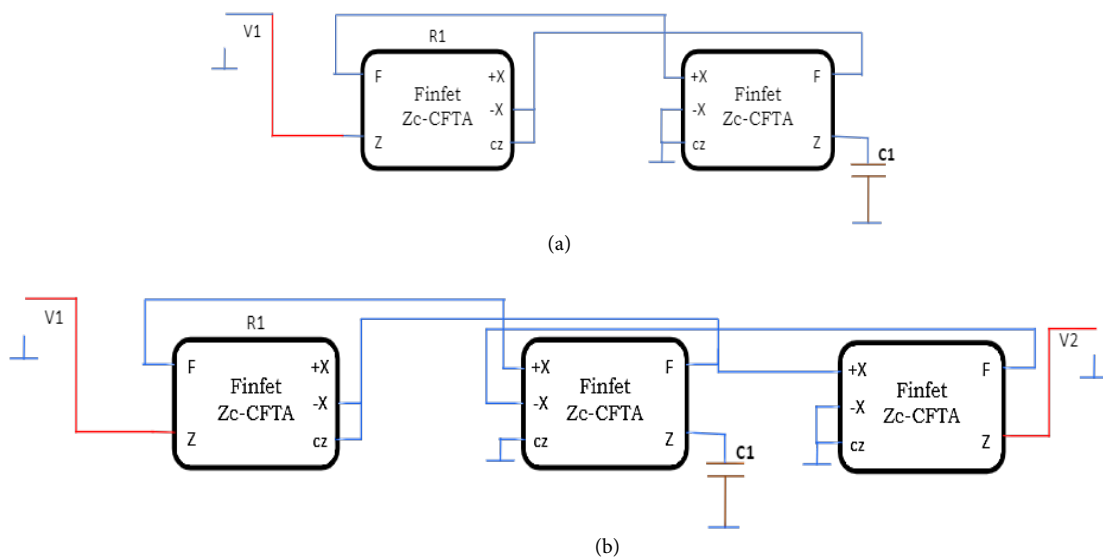


Figure 3. New active analog inductor simulation based on  $Z_c$ -CFTA: (a) Finfet  $Z_c$ -CFTA-based grounded analog inductor simulator (b) Finfet  $Z_c$ -CFTA based on floating analog inductor simulator.

Figure 3 (b) is a floating-simulated inductor simulator based on  $Z_c$ -CFTA. And select  $g_m=g_{m1}=g_{m2}$ . From

Figure 3 (b), we can get:

$$I_1 == -I_{x3} == -I_z = \frac{-g_{m3}(I_{x2}-I_{x1})}{sC} = \frac{g_{m3}g_{m2}g_{m1}(V_1-V_2)}{sC} \quad (7)$$

$$I_2 = I_1 == I_{x3} == I_{z3} == \frac{g_{m3}I_{z3}}{sC} \quad (8)$$

It can be obtained from the above equation:

$$Z_1 = \frac{(V_1-V_2)}{I_1} = \frac{sC}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3}} \quad (9)$$

Therefore, from the above equation (9), the equivalent inductance can be obtained as

$$L_{equ} = \frac{4 \cdot V_T^2 \cdot C}{I_B} \quad (10)$$

### 3. Application Of A Novel Active Analog Inductor

The suggested floating and grounded inductance simulator is implemented in a fourth-order Butterworth band-pass filter realization to demonstrate its usage. The passive circuit in Fig. 4 has a transfer function that is provided by:

$$T.F_{BPF} = \frac{s(R_2/L_{equ.})}{s^2+s(R_2/L_{equ.})+(1/L_{equ.}C)} \otimes \frac{s(R_2/L_{equ.})}{s^2+s(R_2/L_{equ.})+(1/L_{equ.}C)} \quad (11)$$

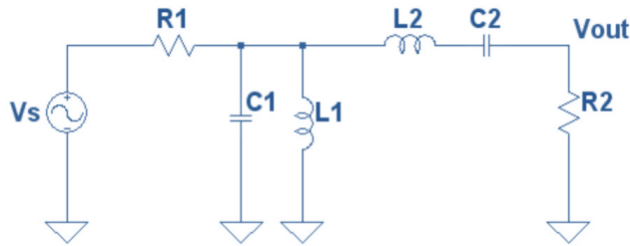


Figure 4. Passive circuit fourth order Butterworth band-pass filter

The cutoff frequency and quality factor of the bandpass filter can be calculated by:

$$F_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{equ} \cdot C}} \quad (12)$$

$$Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_{equ.}}{C}} \quad (13)$$

Figure 4 shows a classic fourth-order Butterworth band-pass filter, where  $R_1$  and  $R_2$  are the internal resistance of the signal source and the load resistance, respectively. Where the value of  $C_1=C_2=0.1\mu\text{F}$ ,  $R_1=R_2=1\Omega$  and the passive inductance values  $L_1=L_2=0.41\text{ H}$ . the cutoff frequency of the band pass filter to be designed  $F_o=1\text{kHz}$  with  $Q=1.2$ ,

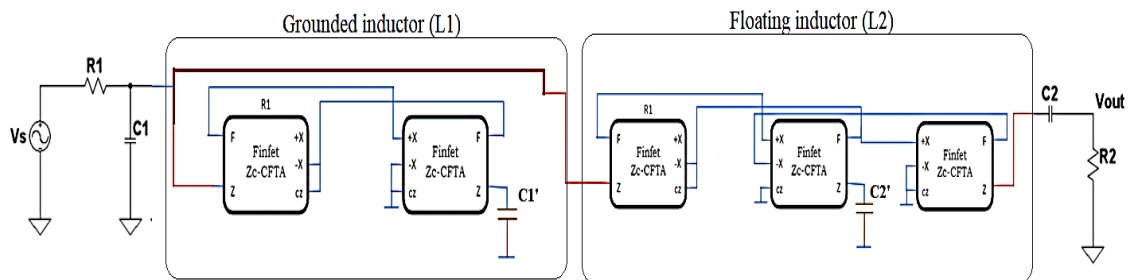


Figure 5. Fourth-order Butterworth band-pass filter based on Zc-CFTA.

By replacing L1 and L2 in the Figure 4 circuit with the floating and grounded analog inductor in Figure 3, a fourth-order Butterworth band-pass filter based on Zc-CFTA can be obtained, as shown in Figure 5. The values of C1 and C2 are equal to 1pf and the bias currents ( $I_B$ ) in the analog inductors L<sub>1</sub> and L<sub>2</sub> are 173nA. Similarly, the cutoff frequency of the fourth-order Butterworth band-pass filter also satisfies Equation 12, so its cutoff frequency can also be adjusted by linear electronic control of the bias current.

#### 4. Results of the simulation

The simulation results were obtained using the Cadence virtuoso and Lt-SPICE simulation programs, which demonstrated the performance of the suggested floating and grounded inductance simulators illustrated in Figure 3 (a and b). With supply voltages  $V_{SS}=V_{DD} = 0.1$  V, the Finfet transistor implementation presented in Figure 2 is used to emulate the active components of ZC-CFTAs. The 7nm process characteristics are used to model Finfet transistors. The active parameters and passive element values given below were used to simulate the proposed grounded and variable-inductance active circuit seen in Figure 3. (a and b):  $I_B = 173$ nA,  $R_1 = R_2 = 1$   $\Omega$ , and  $C_1 = C_2 = 0.1$  uF, which provides  $Leq. = 1$  uH. Fig. 6(a and b) illustrates the magnitude and phase responses for both grounded and floating inductance, both theoretical and simulated. Using the circuit from Fig. 5, a fourth-order band-pass filter has been constructed. The obtained Q values from the simulations equal 1.2. In Figure 7, the ideal and simulation magnitude responses of the fourth-order BPF are displayed.

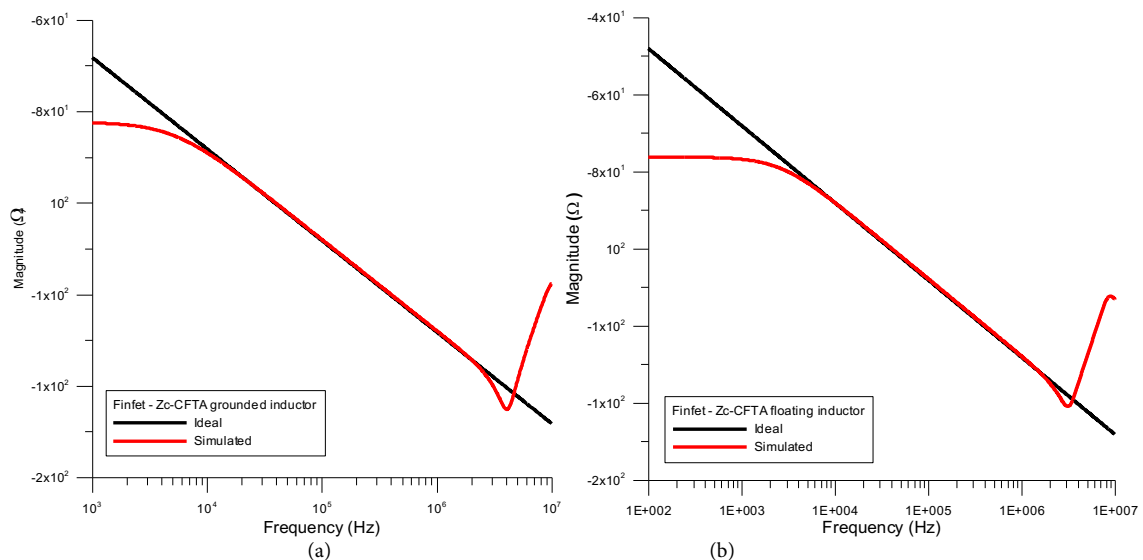


Figure 6. The ideal and simulated magnitude of a Finfet Zc-CFTA-based (a) grounded (b) floating analog inductor simulator.

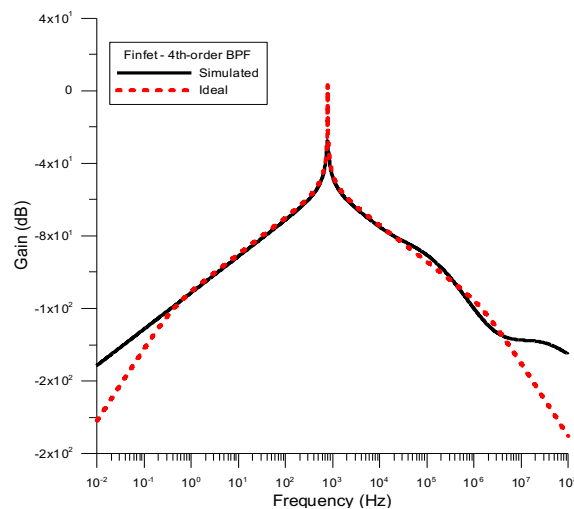


Figure 7. The fourth-order BPF filter's ideal and simulation gain outputs are illustrated in Fig. 5.

## 5. Conclusion

This article uses Finfet transistors for the internal design stage instead of CMOS, BJT, or any other type of transistor. Using Z-copy CFTAs as an active element, a grounded analog active inductor simulator and a floating analog active inductor simulator were designed and used for the design of a fourth-order Butterworth band-pass filter in the voltage mode. Compared with relevant literature, the characteristics of this analog inductor simulator are: whether it is a ground or floating analog inductor, it is non-destructive, so it is flexible to use; it uses a ground capacitor, so it is suitable for integration; there are few active components; and the number of input and output terminals is minimal. Thus, the circuit stability is high and the power consumption is low. Through used cadence virtuoso and LT-SPICE as a computer simulation of a fourth-order Butterworth band-pass filter, the analog inductor design is shown. It's correct and effective for analog filters, its shown in figure 7 that the cutoff frequency is equal to 1KHz, so it can be used in various analog signal processing circuits. In future can used other parameter like 3nm and 1nm to change the electronic revolution from microelectronics to nanoelectronics that is used in new technology.

## Conflict of Interest Statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

- [1] R. Chaujar, R. Kaur, M. Saxena, M. Gupta and R.S. Gupta, "TCAD assessment of gate electrode work function engineered recessed channel (GEWE-RC) MOSFET and its multilayered gate architecture—part I: hot-carrier-reliability evaluation," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 55, pp. 2602–2612, 2008. doi:10.1109/TED.2008.2003085
- [2] X. Chen and C. M. Tan, "Modeling and analysis of gate-all-around silicon nanowire FET," *Microelectron Reliab*, vol. 54, pp. 1103–1108, 2014. doi: 10.1016/j.microrel.2013.12.009
- [3] S. Deb, N. B. Singh, N. Islam and S.K. Sarkar, "Work function engineering with linearly graded binary metal alloy gate electrode for short channel SOI MOSFET," *IEEE Trans Nanotechnol*, vol. 11, pp. 472–478, 2012. doi:10.1109/TNANO.2011.2177669
- [4] H. Iwai, K. Natori, K. Shiraishi, J. Iwata, A. Oshiyama, K. Yamada, K. Ohmori, K. Kakushima and P. Ahmet, "Si nanowire FET and its modeling," *Sci China Inf Sci Springer*, vol. 54, pp. 1004–1011, 2011. doi:10.1007/s11432-011-4220-0.
- [5] S. Venkatesan, G.W. Neudeck and R.F. Pierret, "Dual-gate operation and volume inversion in n-channel SOIMOSFET's," *IEEE Electron Device Letter*, vol. 13, pp. 44–46, 1992. doi:10.1109/55.144946
- [6] B. Yu, C.H.J. Wann, E.D. Nowak, K Noda and C. Hu, "Short-channel effect improved by lateral channel engineering in deep-submicron meter MOSFET's," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 44, pp. 627– 634, 1997. doi:10.1109/16.563368
- [7] A. A. Mohammed, K. M. Zaidoon and H. Demirel, "Study Of Finfet Transistor: Critical And Literature Review In Finfet Transistor In The Active Filter," *3C TIC*, vol. 12, pp. 65-81, 2023. <https://doi.org/10.17993/3ctic.2023.121.65-81>
- [8] A. Ahmed and H. Demirel, "FPAA Based on Floating Current Source Analog system design," *Design Engineering*, vol. 8, pp.10953-10969, 2021. <http://thedesignengineering.com/index.php/DE/article/view/6155>
- [9] J. W. Horng, C. L. Hou, C.M. Chang, W.Y. Chung, H. I. Tang and Y. I. Wen, "Quadrature oscillator using CCII's," *International Journal of Electronics*, vol. 92, pp. 21-31, 2005. <https://doi.org/10.1080/00207210412331332899>
- [10] H. Demirel and A. Ahmed, "A Low-Power 30MHz,6th Order Bandpass Differential Gm-C Filter on Chip Utilizing Floating Current Source", *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 96–103, 2023, doi: 10.55385/kastamonujes.1395608.
- [11] H. Demirel and A. Ahmed, "Design Third Order Sinusoidal Oscillator Employing Current Differencing Cascaded Trans conductance Amplifiers," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 735-743, 2023. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1290137>
- [12] A. A. Mohammed, "Design of Voltage Mode 6th Order Elliptic Band-pass Filter Using Z-Copy Current Follower Transconductance Amplifier) ZC-CFTA," *Kirkuk University Journal-Scientific Studies*, vol. 12, no. 2, pp. 271-285, 2017.

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



GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

## Optimization of laser cutting parameters for improved surface quality in AISI 304 stainless steel

Engin Nas<sup>a,\*</sup>, Sabri Uzuner<sup>b</sup>

Submitted: 18.10.2023 Revised: 13.12.2023 Accepted: 13.12.2023 doi:10.30855/gmbd.0705096

### ABSTRACT

In this study, we performed experimental and statistical analysis on the cutting of AISI 304 stainless steel using a commonly utilized laser cutting machine. Three different gas pressures (5.1, 6.4 and 8 bar), three different cutting speeds (2048, 2560 and 3200 mm/min), fixed focal point (-4 mm), fixed frequency (5000 Hz) and fixed gas (Nitrogen) were used as cutting parameters. As a result of the study, it was observed that the surface roughness decreased as the cutting speed increased at all pressure values, and the surface roughness increased as the pressure increased at all cutting speed values. It was determined that the top and bottom kerf width decreased with increasing cutting speed and decreasing gas pressure, and the top and bottom kerf width increased with increasing gas pressure and decreasing cutting speed. When the signal/noise ratios were analyzed as a result of Taguchi analysis, the optimum cutting parameter was calculated as Level 1 (5.1 bar) for pressure and Level 3 (3200 mm/min) for cutting speed. When the variance results were analyzed, it was determined that the important parameter affecting the surface roughness from the pressure and cutting speed factors was determined as cutting speed with 70.74%.

**Keywords:** Laser, Surface Roughness, Stainless Steel, Top-Bottom Kerf Width, Taguchi, Anova

<sup>a,\*</sup> Dr. Engin PAK Cumayeri  
Vocational School of Higher  
Education, Duzce University,  
Turkey  
Orcid: 0000-0002-4828-9240  
e mail: enginnas@duzce.edu.tr

<sup>b</sup> Mechatronic Engineering, Duzce  
University, Turkey  
Orcid: 0000-0002-9099-1324

\*Corresponding author:  
enginnas@duzce.edu.tr

## AISI 304 Paslanmaz Çelikte Geliştirilmiş Yüzey Kalitesi için Lazer Kesim Parametrelerinin optimizasyonu

### ÖZ

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan bir lazer kesme makinesi kullanılarak AISI 304 paslanmaz çeliğin kesilmesi üzerine deneysel ve istatistiksel analizler gerçekleştirildi. Kesme parametreleri olarak üç farklı gaz basıncı (5,1, 6,4 ve 8 bar), üç farklı kesme hızı (2048, 2560 ve 3200 mm/dk), sabit odak noktası (-4 mm), sabit frekans (5000 Hz) ve sabit gaz (Azot) kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda bütün basınç değerlerinde kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı, bütün kesme hızı değerlerinde basınç arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür. Kesme hızının artması ve gaz basıncının azalması ile üst ve alt kerf genişliğinin azaldığı, gaz basıncının artması ve kesme hızının azalması ile üst ve alt kerf genişliğinin arttığı belirlenmiştir. Taguchi analizi sonucunda Sinyal/Gürültü oranları incelendiğinde optimum kesme parametresinin basınç için Seviye 1 (5,1 bar) ve kesme hızı için Seviye 3 (3200 mm/dk) olarak hesaplanmıştır. Varyans sonuçları incelendiğinde basınç ve kesme hızı faktörlerinden yüzey pürüzlülüğü değerine etki eden önemli parametrenin %70,74 ile kesme hızı olarak oluştuğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer, Yüzey pürüzlülüğü, Paslanmaz Çelik, Alt ve Üst Kerf genişliği, Taguchi, Anova



## 1. Introduction

Laser technology is one field that has shown significant developments in recent years with the developing technology and is widely used in the manufacturing sector. The laser cutting method is widely used in many areas of the manufacturing industry due to its ease of use, processing precision, low cost, surface quality of the produced part, high processing speed and minimal material waste [1]. This method has a wide range of applications, especially in military applications, machinery and electronics, aerospace, healthcare, and manufacturing industries [1, 2]. When the laser cutting method is analyzed in terms of engineering science, laser radiation affects an important area in welding, cutting, and drilling processes. One of the major advantages is the processing of brittle materials, non-conductive materials, and materials that are difficult to cut without contact [1]. During laser cutting, the workpiece is exposed to high temperatures. The cutting zones exposed to high temperatures show excessive thermal variations, resulting in deterioration of the surface quality of the workpiece [3]. The laser beam focused along the material's surface to be cut causes the material to melt, and a high-pressure gas is required to remove the molten material from the area. Meanwhile, a narrow kerf is formed in the cutting area [4]. The kerf width indicates the waste material removed from the workpiece and is always desired to be small. The kerf width is analyzed in two parts: top and bottom of kerf width. In addition, the lower kerf width has a smaller dimension than the upper kerf width. [5]. In laser cutting, many parameters such as focus, gas pressure, cutting speeds and frekans have a significant impact on the performance of the cutting process. Having more than one processing parameter is the goal of manufacturers in this sector to minimize productivity, part quality and production cost. These goals are achieved by correctly selecting the cutting parameters and at the most optimal values [6, 7].

In laser-cutting machines, the workpiece is cut from the sheet by moving the laser-cutting head on the sheet to the desired dimensions. A capacitive height control system ensures that the distance between the nozzle tip and the cut sheet remains constant. The distance in the Z-axis between the nozzle tip and the sheet metal is adjusted according to the material thickness. The quality of the surface cut can be influenced by raising the focal point just above or below the sheet surface [8]. In laser cutting, the power density must first be focused into a small spot for the laser light to cut the material. The focusing distance of the lens determines the size of the focal spot and the depth of focus for satisfactory cutting [9]. The focal ability of laser light was shown in Figure 1. "Z" refers to the depth of focus (Rayleigh length). Equation 1 shows the parameters that determine the focal spot size ( $df$ ).

$$df = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \cdot M^2 \quad (1)$$

Where "f" is the distance between the lens and the smallest focal spot, "D" is the unfocused raw laser beam diameter, " $\lambda$ " is the laser beam wavelength, and " $M^2$ " is the beam quality factor. The focal distance also depends on similar parameters, such as focal spot size. A small focal diameter is typically associated with a short focal distance [9].

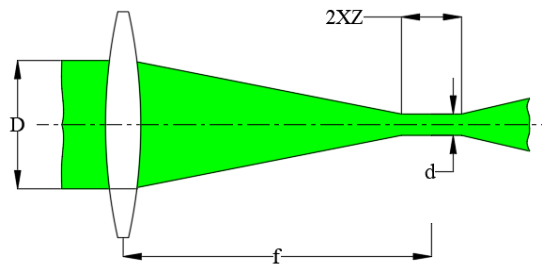


Figure 1. Focusing the laser light [9]

Extensive research has been conducted to investigate the effect of laser-cutting parameters on various output parameters to improve part quality in the laser-cutting process. Cebeci et al. focused on investigating the influence of cutting parameters on surface roughness, kerf width and burr height when laser cutting AISI 304 stainless steel sheets. Parameters such as gas pressure, cutting speed and frequency were investigated. The study revealed that higher cutting speed reduced surface roughness, kerf width, and burr height. In addition, varying the frequency affected these parameters differently, decreasing surface roughness and burr height but increasing kerf width [10]. In another study, Işık et al. conducted an experimental and statistical analysis of

the effects of cutting parameters on surface roughness (Ra) and kerf width (kW) during laser cutting of St-37 material. They used a Taguchi L32 (2×4×4) orthogonal design to determine the cutting parameters, which included frequency, gas pressure, and cutting speed. Optimal values for surface roughness and kerf width were identified through data analysis. Analysis of variance highlighted that frequency and gas pressure were the most influential parameters, accounting for 55.78% and 54.26% of the effects, respectively [1]. Mert et al. investigated the effects of cutting parameters on the cutting process of AISI 304 stainless steel sheet material using CO2 laser machines. Parameters such as power, speed, focus distance, pressure, and using nitrogen (N2) as an assist gas were considered. The study concluded that "increasing pressure, decreasing cutting power, and decreasing feed rate resulted in a decrease in surface roughness [2].

The objective of this study was to investigate and optimize laser cutting parameters for cutting AISI 304 stainless steel sheet material, with a focus on achieving improved surface finish and minimizing kerf width. The results of the study may provide the most effective combination of parameters that would result in improved part quality, higher productivity, and cost efficiency in the manufacturing industry.

## 2. Material and Method

### 2.1. Material

Stainless steels are widely available materials, are easy to shape and weld, and have high corrosion resistance [11]. In this study, AISI 304 stainless steel material measuring 210 × 297 mm and having a thickness of 4 mm was employed. The chemical structure and mechanical properties of AISI 304 stainless steel are given in Table 1.

Table 1. Chemical structure and mechanical properties of AISI 304 stainless steel.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Fe
Wt%	0.055	1.38	0.56	0.024	0.02	18.4	8.2	0.04	Balance

### 2.2. Surface roughness measurements

Mahr brand (Mahr Marsurf PS 10), a surface roughness device widely used in the industry, was used to measure the surface quality of the cut surfaces. In surface roughness measurements, three different measurements were taken from the cut surfaces, and the average value was used as the surface roughness in experimental and statistical results.

### 2.3. Machinability experiments and optical images

Laser cutting experiments were carried out on a Gweike LF-4020GA fiber laser cutting machine, and kerf widths were measured with a polarized digital microscope model AM 4113ZT from Dino-Lite.

### 2.4. Experiment parameters

The machining parameters used in the experimental study were selected based on literature research and machine catalogues. Table 2 shows the selected editing parameters and their levels.

Table 2. Cutting process parameters and levels.

Laser cutting parameters	Symbol	Levels		
		Level 1	Level 2	Level3
Gas pressure (Bar)	A	5.1	6.4	8
Cutting speed (mm/min)	B	2048	2560	3200
Focus (mm)	C		-4	
Frequency (Hz)	D		5000	
Nozzle height (mm)	E		0.4	
Gas	F		Nitrogen	

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Surface roughness and kerf width measurements

The results obtained through the preferred experimental setup were shown in Table 3. How the parameters affect the results is evaluated by comparing the results with each other.

Table 3. Results obtained from the experimental study

Experiment no	Focus (mm)	Nozzle height (mm)	Gas	Frequency (Hz)	Pressure (Bar)	Cutting speed (mm/min)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Kerf width (mm)	
								Top	Bottom
1					5.1	2048	3.118	0.567	0.357
2					5.1	2560	2.639	0.564	0.352
3					5.1	3200	2.450	0.549	0.347
4					6.4	2048	3.126	0.580	0.373
5	-4.0	0.4	Nitrogen	5000	6.4	2560	2.847	0.573	0.358
6					6.4	3200	2.748	0.559	0.355
7					8.0	2048	3.827	0.584	0.379
8					8.0	2560	3.675	0.578	0.366
9					8.0	3200	3.655	0.576	0.363

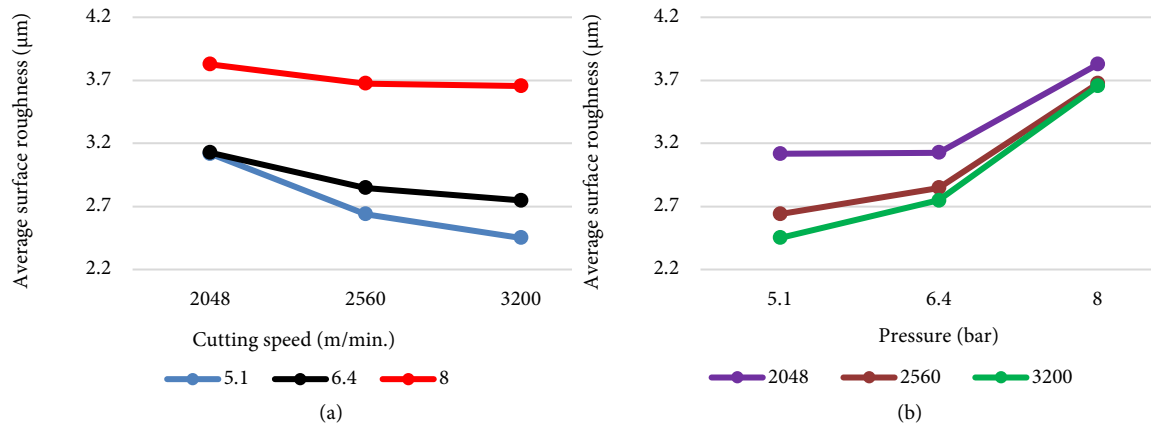


Figure 2. Graph of surface roughness depending on (a) cutting speed and (b) pressure.

Increasing the cutting speed decreased the average surface roughness (Figure 2a) while increasing the gas pressure increased the surface roughness (Figure 2b). The lowest surface roughness was measured as 2.450  $\mu\text{m}$  at 3200 m/min cutting speed and 5.1 bar pressure, and the highest surface roughness was measured as 3.827  $\mu\text{m}$  at 2048 m/min cutting speed and 8 bar pressure. The decrease in Ra with increasing cutting speed may be because the low cutting speed during the laser cutting process increases the heat generated in the cutting zone. This causes an increase in the amount of melt in the cut area. Moreover, removing residual melt using gas can increase the amount, thickness, and irregularity of the pattern formed on the surface. This, in turn, leads to heightened surface roughness [12].

Measurements were taken from the cut test material's top and bottom surfaces around the cut's entrance, middle and end using an optical microscope. The average value of these measurements was determined as the material's top and bottom kerf width. The optical image of the top of the cut test materials was shown in Figure 3.

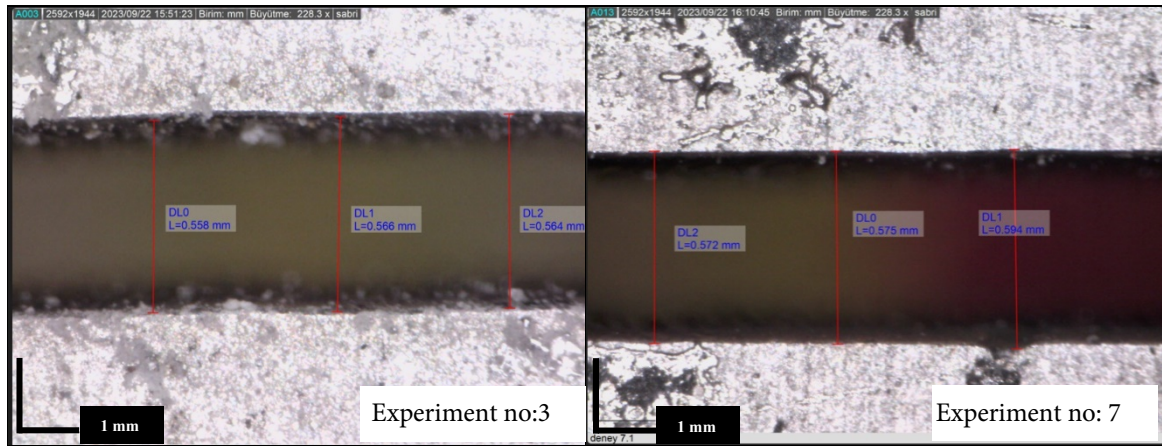


Figure 3. Optical image of the top of the cut experimental materials.

The results have been graphed and shown in Figure 4 for the convenience of the readers.

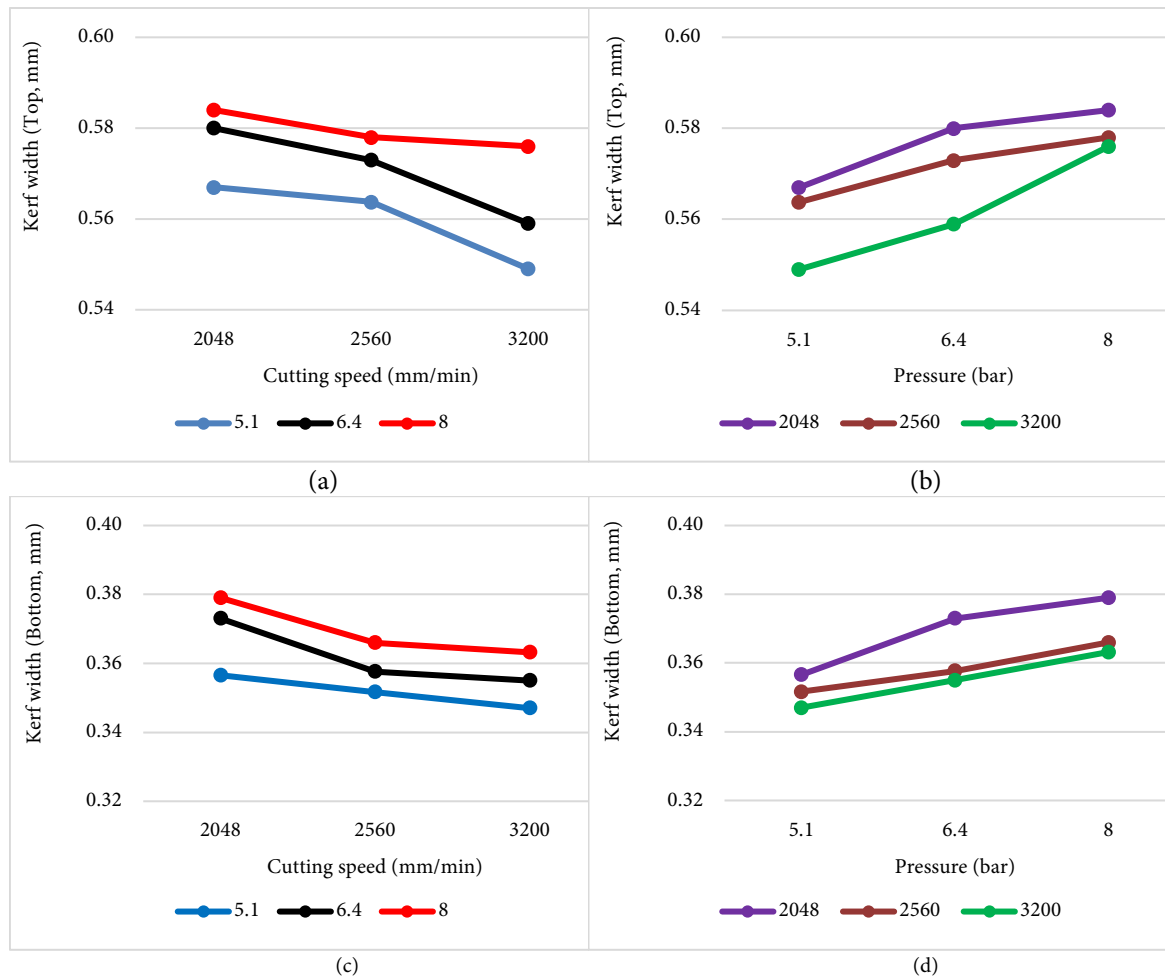


Figure 4. Kerf widths: (a) and (b) top kerf widths, (c) and (d) bottom kerf widths depending on cutting speed and pressure, respectively.

The analysis showed that as the cutting speed increased and the gas pressure decreased, both the top and bottom kerf widths decreased. Conversely, decreased cutting speed and increased gas pressure resulted in an increase in both the top and bottom kerf widths (Figure 4). The minimum upper kerf width measured was 0.549 mm, observed at a cutting speed of 3200 mm/min and a pressure of 5.1 bar. Conversely, the maximum upper kerf width recorded was 0.584 mm at a cutting speed of 2048 mm/min and a pressure of 8 bar. Additionally, the narrowest total kerf width measured was 0.347 mm at a pressure of 5.1 bar and 3200 mm/min cutting speed. Notably, the bottom kerf width remained consistently smaller than the top kerf width throughout the study. This phenomenon can be attributed to the adequate interaction time between the laser

beam and the material surface. During this interaction, the metal that melted and passed through the material thickness at the cutting zone was effectively removed without solidifying at the bottom due to the high gas pressure assistance [12, 13].

The burr formation on the bottom kerf of the test specimens at the lowest and highest surface roughness were examined, and their photographs were shown in Figure 4.

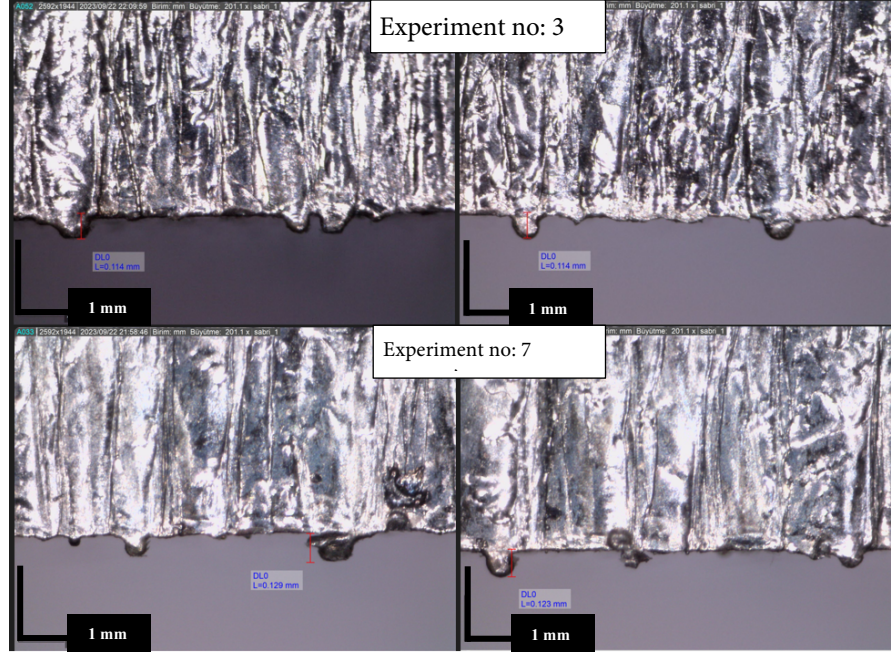


Figure 5. Burr formations in the bottom kerf width

The burr width at the bottom of the material with the lowest surface roughness was 0.114 mm in the mean, while the burr width at the highest surface roughness was approximately 0.125 mm in the mean (Figure 5). These results show that the preferred cutting parameters contribute to the burr formation.

The lower parts of the cut materials were examined, and the surface heat formations at the bottom of the part were shown in Figure 6. When the heat distribution on the material was examined, it was 0.227 mm in mean at 5.1 bar and 3200 mm/min cutting speed, while 0.258 mm was measured in the experiment performed at 8 bar pressure and 3200 mm/min cutting speed. The heat distribution width also increased when the pressure and cutting speed increased.

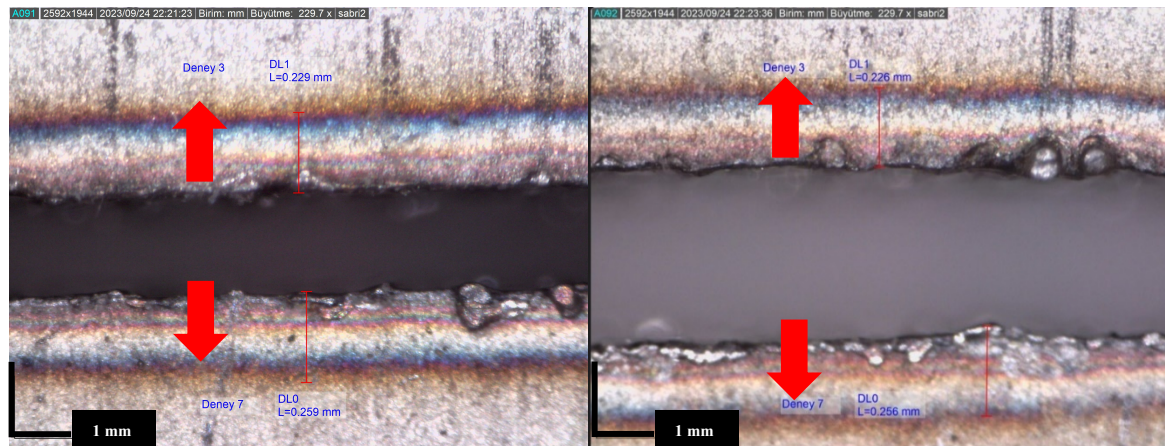


Figure 6. Heat distribution patterns at the bottom of the cut materials (HAZ: Heat Affected Zone) [14]

### 3.2. Taguchi method

The Taguchi method, widely used today, was used to determine the ideal optimum conditions by statistically analyzing the data obtained from the experiments. This method was very effective in determining the optimum cutting parameters without performing experiments on the same type of material at different

machining parameters by analyzing the existing data [15-17]. Analyses using signal/noise ratios were also considered in determining the optimal cutting parameters. To obtain the lowest surface roughness, the "Smallest is Best" approach given in Equation 1 was chosen. The signal/noise analysis of the obtained results was shown in 4.

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

Table 4. Signal/noise values of samples cut by laser cutting method.

Level	Pressure (Bar)	Cutting speed (mm/min)
1	-8.697	-10.478
2	-9.256	-9.607
3	-11.407	-9.274
Delta	2.710	1.204
Rank	1	2

The value closest to zero in the signal/noise tables indicates the ideal value for that factor [18]. The optimum value for pressure was realized at Level 1, and the optimum value for cutting speed was realized at Level 3 (Figure 6 and Table ). It was also observed that the optimum parameters were 5.1 bar for pressure and 3200 mm/min for cutting speed. These results show that the ideal cutting process is realized at these parameters. The similarity of the statistical and experimental results obtained increases the accuracy of our argument.

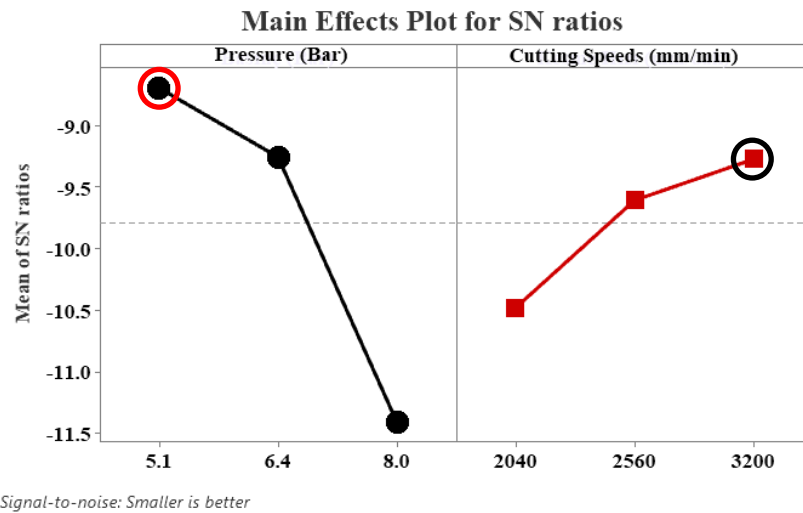


Figure 7. Signal/noise ratios for pressure and cutting speed.

### 3.3. ANOVA

ANOVA statistical method is used to determine the percentage of impact of the parameters on the results [19]. The variance analysis in the present study was performed at a 95% confidence level. The % effect values in Table indicate the degree of effect of the parameters on the results. The less than 5% P-value indicates that the parameter is significant [20]. The most effective parameter influencing the surface roughness among the pressure and cutting speed factors was the cutting speed at 70.74% (Table 5).

Table 5. ANOVA results

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pressure (Bar)	2	0.008278	12.35%	0.008278	0.004139	1.46	0.334
Cutting speed (mm/dak)	2	0.047429	70.74%	0.047429	0.023714	8.36	0.037
Error	4	0.011341	16.91%	0.011341	0.002835		
Total	8	0.067048	100.00%				
R-sq				83.09%			

### 3.4. Regression analysis

The above-mentioned experimental procedures must be repeated for each set of parameters to predict the different results that may occur at different processing parameters of the material used in the experimental

study [21]. This may result in high labour, time, energy, and material costs. Regression analysis provides an ideal mathematical model using enough available data. The ideal mathematical model obtained for this study was shown in Equation 2. In the present study, the R2 value, which expresses the mathematical model consistency, was calculated as 88.01%. Since the R2 value is above 85%, the results of different machining parameters can be predicted without performing new experiments.

$$\text{Surface Roughness } (\mu\text{m}) = 1.766 + 0.3455 \text{ Pressure} - 0.000343 \text{ Cutting speed} \quad (2)$$

#### 4. Conclusion

The cutting process of AISI 304 stainless steel material was carried out at different parameters with a laser cutting machine widely used in industry, and the significant outcomes in the present study were summarized below.

- The lowest surface roughness was 2.450  $\mu\text{m}$  at 3200 m/min cutting speed, and 5.1 bar pressure, and the highest surface roughness was 3.827  $\mu\text{m}$  at 2048 m/min cutting speed and 8 bar pressure.
- The lowest top kerf width was 0.549 mm at 3200 mm/min cutting speed and 5.1 bar pressure, and the highest top kerf width was 0.584 mm at 2048 mm/min cutting speed and 8 bar pressure.
- The lowest kerf width was realized in the lower kerf width with 0.347 mm at 5.1 pressure and 3200 mm/min cutting speed.
- When the heat diffusion on the material was examined, a mean of 0.227 mm was measured at 5.1 bar and 3200 mm/min cutting speed, while a mean of 0.258 mm was measured in the experiment performed at 8 bar pressure and 3200 mm/min cutting speed.
- When the pressure and cutting speed increased, the heat release width increased.
- When the signal/noise ratios were analyzed, it was calculated that the optimum parameter was Level 1 (5.1 bar) for pressure and Level 3 (3200 mm/min) for cutting speed.
- When the variance results were analyzed, it was determined that the most significant parameter affecting the surface roughness among the pressure and cutting speed factors was the cutting speed with 70.74%.

#### Conflict of Interest Statement

No conflict of interest was declared by the authors.

#### References

- [1] R. Işık, B. Özlü, and H. Demir, "Experimental and statistical investigation of the effect of the parameters selected in cutting process with laser St-37 material," *Firat University Journal of Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 161-171, October 2021, doi: 10.35234/fumbd.769716
- [2] F. Mert, M. Tunç, and G. Sur, "AISI 304 Çeliğinin lazer ile kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi," in 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science 29-30 September 2017 (ISITES2017 Baku-Azerbaijan), 2017, pp. 190-198. <https://isites.info/PastConferences/ISITES2017/>
- [3] A. Arif and B. S. Yilbas, "Thermal stress developed during the laser cutting process: consideration of different materials," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, pp. 698-704, June 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1020-1
- [4] K. Nyon, C. Nyeoh, M. Mokhtar, and R. Abdul-Rahman, "Finite element analysis of laser inert gas cutting on Inconel 718," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 995-1007, June 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3655-1
- [5] C. Wandera, "Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam," Ms Thesis, Lappeenranta University Of Technology, Finland 2006.
- [6] İ. Cebeci, Ö. Barış, and H. Demir, "Investigation the effect of cutting parameters on surface roughness, kerf width and dross height in laser processing of AISI 304 stainless sheet material," *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, vol. 11, no. 2, pp. 410-415, April 2022, doi: 10.28948/ngmuh.764983
- [7] M. Madic and M. Radovanovic, "Investigation into the effect of the cutting parameters on the burr height in CO2 laser nitrogen cutting of AISI 304 stainless steel," *Metalurgia International*, vol. 17, no. 7, p. 74, 2012.
- [8] R. Yılmaz, "Optimum design of laser head carrier bridge system used in laser cutting machinery," Ms Thesis, Necmettin Erbakan University, Türkiye 2019.

- [9] M. Ürgüplü and S. Köksal, "The Effect of laser cutting process parameters on the quality of metallic componenets," in 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 2015, pp. 865-874. <https://conferencealerts.com/show-event?id=144184>
- [10] İ. Cebeci, Ö. Barış, and H. Demir, "Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Cutting Quality in Laser Cutting of AISI 310 Quality Austenitic Stainless Steel Sheet Material " *Journal of the Institute of Science Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 2791-2799, December 2020, doi: 10.21597/jist.764067
- [11] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O. Özbek, "Evaluation of machinability of AISI 304 and AISI 316 austenitic stainless steels," *Journal of Polytechnic*, vol. 20, no. 1, pp. 43-49, May 2017, doi: 10.2339/2017.20.1 43-49
- [12] A. Mustafa and F. Yücelişli, "Investigation of the effect on cutting quality of process parameters in fiber laser cutting of Ti-6Al-4V Alloy " *Science and Eng. J of Fırat Univ.*, vol. 30, no. 2, pp. 215-223, September 2018.
- [13] J. Powell, S. Al-Mashikhi, A. Kaplan, and K. Voisey, "Fibre laser cutting of thin section mild steel: An explanation of the 'striation free' effect," *Optics Lasers in Engineering*, vol. 49, no. 8, pp. 1069-1075, August 2011, doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.03.011
- [14] O. Özbek, "Effects of deep cryogenic treatment with different holding times on the mechanical properties of Al 7050-T7451 alloy friction stir welding," *Materials Testing*, vol. 65, no. 3, pp. 364-377, March 2023, doi: 10.1515/mt-2022-0277
- [15] İ. Çiftçi and H. Gökçe, " Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, no. 1, pp. 201-214, March 2019, doi: 10.17341/gazimmfd.416482
- [16] H. Gökçe and M. Biberçi, "Investigation of thrust force, drill bit temperature and burr height in the drilling of aluminum alloy used in ammunition wing drive systems," *Experimental Techniques*, vol. 46, no. 4, pp. 691-705, August 2022, doi: 10.1007/s40799-021-00501-0
- [17] B. Özlü, "Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Slepner cold work tool steel," *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, vol. 36, no. 3, pp. 1241-1251, January 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.668169
- [18] N. A. Özbek, M. İ. Karadağ, and O. Özbek, "Optimization of flank wear and surface roughness during turning of AISI 304 stainless steel using the Taguchi method," *Materials Testing*, vol. 62, no. 9, pp. 957-961, February 2020, doi: 10.3139/120.111571
- [19] O. Tuncel and H. Aydın, "Optimization of Nd: YAG laser welding factors of cold rolled strenx 700 CR steel by taguchi method," *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 85-92, March 2023, doi: 10.21605/cukurovaumfd.1273719
- [20] Y. Harun and R. Atıkan, "Optimization of machining parameters in drilling of nickel based superalloys with gray relational analysis and taguchi," *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, vol. 26, no. 2, pp. 363-378, May 2023, doi: 10.17780/ksujes.1167745
- [21] B. Özlü, "Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy," *Surface Review Letters*, vol. 28, no. 10, p. 2150093, September 2021, doi: 10.1142/S0218625X21500931

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

