

ISSN: 2757-9255



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ

CUKUROVA UNIVERSITY
JOURNAL OF THE FACULTY OF
ENGINEERING

HAZİRAN
JUNE
2026

Cilt/Volume 41

Sayı/Issue 2



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ DERGİSİ
Cukurova University,
Journal of the Faculty of Engineering



Sahibi (Owner)

Ali KESKİN
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

Editör (Editor)

Serin MEZARCIÖZ

EDİTÖR KURULU (Editorial Board)

Ali KESKİN (Çukurova Üniversitesi)
Umut ORHAN (Çukurova Üniversitesi)
Mutlu AVCI (Çukurova Üniversitesi)
Mustafa GÖK (Çukurova Üniversitesi)
Mahmut ALTINER (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin AKILLI (Çukurova Üniversitesi)
Ulus ÇEVİK (Çukurova Üniversitesi)
Ali KOKANGÜL (Çukurova Üniversitesi)
Mesut BAŞIBÜYÜK (Çukurova Üniversitesi)
Hacı Murat ARSLAN (Çukurova Üniversitesi)
Oğuz DEMİRYÜREK (Erciyes Üniversitesi)
Hüsamettin BULUT (Harran Üniversitesi)
Metin GÜRÜ (Gazi Üniversitesi)
Mehmet Emin AYDIN (University of the
West of England, İngiltere)
Azra BİLGİN (University of Colorado Boulder,
ABD)

Serin MEZARCIÖZ (Çukurova Üniversitesi)
Hasan ÇETİN (Çukurova Üniversitesi)
Özen KILIÇ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin ERTEN (Çukurova Üniversitesi)
Behzat BALCI (Çukurova Üniversitesi)
M. Atakan AKAR (Çukurova Üniversitesi)
R. Tuğrul OĞULATA (Çukurova Üniversitesi)
Özlem ŞENYİĞİT (Çukurova Üniversitesi)
Yusuf KUVVETLİ (Çukurova Üniversitesi)
Hüseyin R. YERLİ (Çukurova Üniversitesi)
Ergun ERÇELEBİ (Gaziantep Üniversitesi)
Nihan ÇETİN DEMİREL (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Serter ATABAY (American University of Sharjah,
United Arab Emirates)
Muammer KOÇ (Hamad Bin Khalifa University,
Qatar)
Tamio ENDO (Mie University-Japonya)

Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

Derginin eski adı: Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi
(ISSN: 1019-1011)

YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT

Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA
Tel : (322) 338 63 57 – (322) 338 70 50 E-posta: cu.mmfdergi@gmail.com



Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi

Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering



ISSN: 2757-9255

CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 2

HAZİRAN/JUNE 2026

AMAÇ ve KAPSAM

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Mühendislik alanındaki gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda Türkçe bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe/İngilizcedir. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan makaleler kabul edilmektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. “**Araştırma ve uygulama içeren makaleleri**” yayınlamaktadır.

AIM and SCOPE

Journal of the Engineering Faculty of Cukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal is published to follow the developments in the field of engineering, to contribute to the national and international development of professional organizations and individuals, and to create a Turkish resource in these areas. The language of the journal is Turkish/ English. All original and up to date scientific research and applications articles that have not been published elsewhere are accepted. Theoretical/experimental and practical studies related to all engineering fields are in the scope of the Journal. Translation and compilation articles are not accepted. The journal publishes “**articles of research and practice**”.



İÇİNDEKİLER

Numerical Investigation of Channel Configuration on Thermal Behavior of Liquid-Cooled Plates in Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules.....	271
<i>Silindirik Lityum-İyon Pil Modüllerindeki Sıvı Soğutmalı Plakaların Termal Davranışında Kanal Yapılandırmasının Sayısal İncelenmesi</i>	
Sinan KEYİNCİ	
Development of an Artificial Intelligence-Based Prediction Engine for the Cryptocurrency Markets.....	285
<i>Kripto Para Piyasaları için Yapay Zeka Tabanlı Tahmin Motorunun Geliştirilmesi</i>	
Onur AYGÜN, Ceren ULUS, Mehmet Fatih AKAY	
100Cr6 Malzemenin Sert Tornalama İşleminde Pt Cinsinden Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi.....	299
<i>Investigation of Factors Affecting Pt Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Material</i>	
Ayhan ETYEMEZ, Kaan Can BAŞ	
Design and Performance Analysis of Tulip-Shaped Microstrip Antenna on Flexible Substrates with Chemical Modifications.....	309
<i>Kimyasal Modifikasyonlu Esnek Altlıklar Üzerinde Lale Şekilli Mikroşerit Antenin Tasarımı ve Performans Analizi</i>	
Mustafa Berkan BİÇER, Emine AVŞAR AYDIN, Mehmet Erman MERT, Başak DOĞRU MERT	
Heat Transfer Performance of Aluminum as a Conductor Material with Mixtures.....	321
<i>İletken Bir Malzeme Olarak Alüminyumun Karışımlarla Birlikte Isı İletim Performansı</i>	
Esra GÜNERİ, Selin BAŞ	
Implementation of FMEA for Process Improvement in Machine Woven Carpet Production.....	331
<i>Dokuma Makine Halısı Üretiminde Proses İyileştirme için HTEA Uygulanması</i>	
Veysel CAN, Hatice Kübra KAYNAK, Süleyman METE	
Belirsizlik Ortamında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Tam Sayılı Programlama ile Risk Analizi.....	341
<i>Multi-Criteria Decision Making Techniques Under Uncertainty and Risk Analysis with Integer Programming</i>	
Özge Doğa ASİLSOY, Nurhayat ÇALU, Ayça ALKIŞ, Ertuğrul GÜNTAY, Büşra YILMAZ, Murat OTURAKÇI	
Dynamic Modeling of Scotch Yoke Mechanism with Spring and Mass.....	359
<i>Bir Yay ve Kütle İçeren Scotch Yoke Mekanizmasının Dinamik Modellemesi</i>	
Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ, İbrahim Deniz AKÇALI	

Yeni Nesil Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Entegrasyonu: Sanal Gerçeklik Simülasyonlarının MACBETH Yöntemi ile Analizi	371
<i>Integration of Next-Generation Technologies into Occupational Health and Safety: Evaluation of Virtual Reality Simulations through the MACBETH Method</i>	
Cihat ÖZTÜRK, Cansu DÖNER, Nurullah GÜLEÇ	
Experimental Investigation of the Effects of Diesel–10 Number Oil Blends on Engine Performance and Emission Characteristics	389
<i>Dizel–10 Numara Yağ Karışımlarının Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi</i>	
Gözde EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN, Gökhan TÜCCAR	
A Novel Energy-Efficient Optimization Framework for AVR Controllers in Modern Power Systems	399
<i>Modern Güç Sistemlerinde AVR Kontrolörleri için Yeni Bir Enerji Verimli Optimizasyon Çerçevesi</i>	
Ömer TÜRKSOY	
Scalable Hybrid ML–DL Framework for Real-Time DDoS Detection in SDN.....	417
<i>SDN’de Gerçek Zamanlı DDoS Tespiti için Ölçeklenebilir Hibrit ML–DL Yaklaşımı</i>	
Bashar ALHAJAHMAD	
Endüstriyel IoT Yaklaşımıyla RFID Etiketlerin Otomatik Testi: Lastik Üretiminde Kalite Kontrol Uygulaması.....	433
<i>Automated Testing of RFID Tags through an Industrial IoT Approach: A Quality Control Application in Tire Manufacturing</i>	
Hamdi ERDOĞAN, Alperen ÜNLÜ, Kerem KÜÇÜK, Mehmet Zeki KONYAR	
Karbon/Kenevir/Polipropilen Hibrit Kompozitlerde Katman Diziliminin Mekanik ve Hasar Davranışına Etkisi.....	445
<i>Effect of Stacking Sequence on the Mechanical and Damage Behavior of Carbon/Hemp/Polypropylene Hybrid Composites</i>	
Burak ÖZTAŞ, Gaye KAYA, Banu YILMAZ AKYÜREK, Tuğrul AKSOY	
Sürdürülebilir Filament İplik Üretimi: Kullanılan Yağın Geri Dönüşüm Yoluyla Yeniden Değerlendirilmesi	457
<i>Sustainable Filament Yarn Production: Recycling and Reuse of Process Oil</i>	
Berfin GÜL, Hüseyin NASIRCI, Kübra YILMAZ	
Tornalamada Ayna ve Punta Basıncının Titreşim ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisinin YSA Yöntemi Kullanılarak Tahmini	467
<i>Prediction of the Effect of Chuck and Tailstock Pressure on Vibration and Surface Roughness in Turning Using ANN Method</i>	
Hüseyin GÜRBÜZ, Şehmus BADAY, Mehmet Emin DEMİR	
A New Insight at Wind Speed Prediction; Analysis of Prophet Model and LSTM Models	479
<i>Rüzgar Hızı Tahminine Yeni Bir Bakış; Prophet Modeli ve LSTM Modellerinin Analizi</i>	
Başak ÖZTÜRK, Gülbahar BİLGİÇ TÜZEMEN	

Farklı Eğirme Sistemlerinin Lyocell (Ecocell™) Örme Kumaş Özelliklerine Etkisi	491
<i>The Effect of Different Spinning Systems on the Properties of Lyocell (Ecocell™) Knitted Fabric</i>	
Pınar DURU BAYKAL, Mehmet TEKİNALP	
Enerji Tüketimine Dayalı Sera Gazı Emisyonlarının Sektörel Analizi: Osmaniye İli Örneği.....	509
<i>Sectoral Analysis of Greenhouse Gas Emissions Based on Energy Consumption: The Case of Osmaniye Province</i>	
Ali Burak YAVUZ, Osman KARA, Bülent YANIKTEPE	
Göksu Nehrinin Arazi Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Soğutma Etkilerinin Belirlenmesi	521
<i>Determination of the Cooling Effects of the Göksu River on Land Surface Temperature</i>	
Emine KAHRAMAN	

Numerical Investigation of Channel Configuration on Thermal Behavior of Liquid-Cooled Plates in Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules

Sinan KEYİNCİ^{1,a}

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Automotive Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-2948-3846

Article Info

Received : 07.11.2025

Accepted : 06.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1819609

Corresponding Author

Sinan KEYİNCİ

skeiyinci@cu.edu.tr

Keywords

Liquid cooling plate

Electric vehicles

Lithium-ion battery

Battery thermal management

Computational fluid dynamics

How to cite: KEYİNCİ, S., (2026). Numerical Investigation of Channel Configuration on Thermal Behavior of Liquid-Cooled Plates in Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 271-283.

ABSTRACT

This study numerically investigates liquid cooling plates (LCPs) for cylindrical 18650 lithium-ion battery packs under varying channel geometries and inlet velocities. Three-dimensional transient CFD simulations were conducted to analyze the coupled thermal and fluid behavior. Two coolants, water and a 50:50 (v:v) water-ethylene glycol mixture, were tested at inlet velocities of 0.1, 0.25, and 0.5 m/s. Results show that the configuration with fewer, wider channels achieved the lowest maximum temperature ($T_{\max} \approx 305$ K) and the most uniform temperature field ($\Delta T < 3$ K). Increasing the number of channels reduced channel height and local convection, leading to higher gradients and non-uniform flow near the outlet. Increasing velocity from 0.1 to 0.25 m/s improved cooling performance by about 40%, while a further increase had an insignificant effect (< 1 K). As a result of this study, a moderate flow rate combined with an optimized channel geometry provided the best balance between heat dissipation and flow uniformity for compact electric vehicle battery modules.

Silindirik Lityum-İyon Pil Modüllerindeki Sıvı Soğutmalı Plakaların Termal Davranışında Kanal Yapılandırmasının Sayısal İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 07.11.2025

Kabul : 06.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1819609

Sorumlu Yazar

Sinan KEYİNCİ

skeiyinci@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sıvı soğutma plakası

Elektrikli araçlar

Lityum-iyon batarya

Batarya termal yönetimi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Atıf şekli: KEYİNCİ, S., (2026). Silindirik Lityum-İyon Pil Modüllerindeki Sıvı Soğutmalı Plakaların Termal Davranışında Kanal Yapılandırmasının Sayısal İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 271-283.

ÖZ

Bu çalışma, silindirik 18650 tipi lityum-iyon batarya paketleri için farklı kanal geometrileri ve giriş hızları altında sıvı soğutma plakalarını sayısal olarak incelemektedir. Üç boyutlu zamana bağlı CFD simülasyonları kullanılarak ısı ve akışkan davranışının etkileşimi analiz edilmiştir. Soğutucu akışkan olarak saf su ve hacimce 50:50 oranında karıştırılmış su-etilen glikol karışımı kullanılmış; giriş hızları 0.1, 0.25 ve 0.5 m/s olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, daha az sayıda ve daha geniş kanallara sahip konfigürasyonun en düşük maksimum sıcaklığı ($T_{\max} \approx 305$ K) ve en homojen sıcaklık dağılımını ($\Delta T < 3$ K) sağladığını göstermektedir. Kanal sayısının artırılması, kanal yüksekliğini ve yerel taşınımı azaltarak çıkış bölgesinde daha yüksek sıcaklık gradyanlarına ve akış düzensizliklerine yol açmıştır. Akış hızının 0,1 m/s'den 0,25 m/s'ye çıkarılmasıyla soğutma performansı yaklaşık %40 oranında artmış, ancak daha yüksek hızlarda bu artış ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır (< 1 K). Çalışma sonucunda, orta düzeyde bir akış hızı ile optimize edilmiş kanal geometrisinin, kompakt elektrikli araç batarya modülleri için ısı dağılımı ve akış homojenliği arasında en uygun dengeyi sağlamıştır.

1. INTRODUCTION

The transportation industry has been undergoing a profound transformation toward electrification, driven by the urgent need to reduce greenhouse gas emissions and mitigate dependence on fossil fuels [1-3]. According to the latest climate assessments, road transportation is responsible for approximately 15% of global CO₂ emissions, highlighting the critical role of widespread electric vehicle (EV) adoption in achieving climate goals [4]. EV production has accelerated significantly, supported by government incentives and rapid developments in energy storage technologies.

Among the available energy storage solutions for EVs, lithium-ion batteries (LiBs) have emerged as the preferred choice due to their high energy density, low self-discharge rate, and long cycle life [5,6]. Nevertheless, the thermal sensitivity of LiBs remains a major limitation affecting both performance and safety. Elevated operating temperatures accelerate side reactions and active material degradation, while subzero conditions impede ion transport and increase internal resistance, leading to reduced capacity and power losses [7]. For optimal operation, the temperature of each cell should be maintained within approximately 15-35 °C, and the temperature deviation between cells (ΔT) should not exceed 5 °C to ensure uniform aging and safe operation [8-10]. To achieve these conditions, an efficient battery thermal management system (BTMS) is indispensable.

Existing BTMS approaches can be broadly classified into air-cooled, liquid-cooled, phase change material-based, and heat pipe-assisted systems [11]. Among existing approaches, liquid cooling has become the dominant choice for high-power-density battery modules due to its superior heat dissipation, space efficiency, and accommodating complex module geometries [12]. Within this category, liquid cooling plates (LCPs), featuring internal channels that circulate coolant beneath or between the cells, have become the preferred solution in modern EV packs. The effectiveness of an LCP depends strongly on the geometry of its cooling channels, such as the number, height, and layout pattern [13]. Non-uniform flow distribution can lead to hot spots and accelerated degradation, whereas overly large channels increase system mass and pumping losses.

Extensive efforts have been made to enhance the cooling efficiency and temperature uniformity of LCPs through channel geometry optimization. For instance, Li et al. [14] explored Tesla-type mini-channel structures and applied genetic algorithms to optimize key geometric parameters. Their results showed that specific combinations of channel width and spacing significantly reduced thermal resistance while maintaining low pressure drop. These findings highlight the strong link between geometric scale and flow smoothness, demonstrating that small size adjustments can provide significant thermal benefits. Similarly, Lai et al. [15] developed an LCP incorporating grooves and secondary microchannels, enhancing surface contact and coolant mixing. Their simulation results confirmed better heat extraction and reduced hotspot formation compared to conventional flat channel designs. Akbarzadeh et al. [16] compared air-cooled and U-shaped LCP systems, finding that the U-type LCP design significantly improved thermal uniformity in high-energy battery modules. Dubey et al. [17] evaluated serpentine and U-shaped microtextured cooling channels for LiB modules and demonstrated that serpentine paths not only offered lower thermal resistance but also achieved enhanced temperature uniformity due to extended surface area and longer coolant residence time. Their simulations and experimental results indicated that the micro-texturing of channel walls further intensified convective heat transfer, particularly in the serpentine configuration, by promoting turbulent flow and improving local Nusselt numbers. It can be inferred that both the macro-scale arrangement of flow channels and the micro-scale surface features contribute synergistically to improving overall heat-transfer performance. Finally, Monika et al. [18] performed a multi-objective optimization of a hexagonal mini-channel LCP for LiB modules, focusing on minimizing maximum cell temperature, reducing pressure drop, and enhancing heat transfer. The best design achieved a 62.3% reduction in pressure drop and 64.4% improvement in heat transfer coefficient without significant thermal penalty, demonstrating that nonconventional geometries, such as hexagonal layouts, can offer a well-balanced thermal performance for compact EV applications.

While these studies have considerably advanced the understanding of liquid-cooled battery systems, most investigations have primarily focused on optimizing planar or serpentine flow patterns, micro-textured surfaces, or inlet-outlet configurations. However, the combined influence of channel number and channel height on thermal uniformity and flow distribution has not been comprehensively explored. Variations in channel height can substantially modify the local Reynolds number, pressure field, and heat transfer

behavior, directly influencing coolant velocity and temperature gradients within the plate. Despite their clear importance, such geometric parameters are often simplified or assumed constant in existing models, leaving a gap in understanding how vertical channel geometry affects overall cooling performance.

Unlike most previous LCP studies, which compare different in-plane layouts at a fixed channel height, this study presents four plates that share the same footprint but differ only in the number of straight channels and their vertical height (2, 3, 4, and 5). This systematic variation allows us to isolate the role of vertical channel geometry in the trade-off between temperature uniformity and pressure drop in a realistic 60-cell cylindrical module. To address this research gap, the present study performs a comprehensive numerical analysis of multi-channel LCP configurations with different channel heights in a cylindrical LiB module. Four geometric layouts were designed under identical dimensional constraints to ensure a fair basis for comparison. Transient computational fluid dynamics simulations were carried out to examine the influence of channel geometry on coolant flow distribution, maximum temperature ($T_{\max}$), and ΔT at three inlet velocities (0.1, 0.25, and 0.5 m/s). Both water and water-ethylene glycol (WEG) mixtures were used as working fluids to evaluate the effect of coolant type on thermal behavior. The novelty of this study lies in systematically quantifying how simultaneous variations in channel number and channel height affect both thermal uniformity and hydraulic behavior, which has not been addressed in previous LCP research.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Geometry

LiBs are manufactured in various structural formats, including pouch, prismatic, and cylindrical types, each of which influences how heat is generated and dissipated during charge and discharge processes. Cylindrical cells are widely adopted in EV battery packs due to their mechanical robustness, uniform current distribution, and predictable radial heat conduction characteristics. In the present study, a cylindrical-cell battery module was modeled to analyze the impact of multi-channel LCP geometry on temperature uniformity and coolant flow distribution. The module consists of 60 individual cells arranged in a 6×10 grid (two parallel layers of 30 cells each), representing a typical mid-scale EV module configuration. Each cell has a diameter of 18 mm, a height of 65 mm, a nominal voltage of 3.6 V, and a capacity of 3.45 Ah. The thermophysical and electrochemical parameters used in the model are summarized in Table 1.

Table 1. Thermophysical and electrochemical properties of the cylindrical Li-ion battery cell used in the simulations

Property	Value
Positive (cathode) material	LiFePO ₄
Negative (anode) material	Graphite
Battery diameter $\times$ height (mm)	18 x 65
Density (kg/m ³)	2782
Specific heat (J/kg·K)	1087
Radial thermal conductivity (W/m·K)	1.2743
Axial thermal conductivity (W/m·K)	27.584
Heat generation rate at 4C (W/m ³)	219,717.13
Nominal capacity (mAh)	3450
Nominal voltage (V)	3.6
Charge cut-off voltage (V)	4.2
Discharge cut-off voltage (V)	2
Maximum discharge current (A)	10

Each cell was modeled as a homogeneous, heat-generating solid with uniform volumetric heat generation corresponding to a 4C discharge rate. The 4C discharge rate was selected because it represents a realistic thermal load observed in electric vehicle battery modules during high-speed operation, peak power demand, rapid acceleration, and regenerative braking events. In order to suppress temperature escalation during operation and maintain uniform thermal conditions, multi-channel aluminum LCPs were integrated between the two layers of cylindrical cells to establish effective thermal coupling with the cell surfaces. Four geometric configurations were designed to systematically assess the influence of channel number and

channel height on cooling performance. All designs maintain identical external dimensions for fair comparison, with channel height adjusted based on the number of channels, as follows:

- (a) two-channel design (25 mm)
- (b) three-channel design (15 mm)
- (c) four-channel design (10 mm)
- (d) five-channel design (8.5 mm)

A schematic representation of these LCP configurations is shown in Figure 1. Each plate is equipped with inlet and outlet manifolds to ensure uniform coolant distribution across the parallel channels, allowing consistent assessment of flow and temperature uniformity among the four designs.

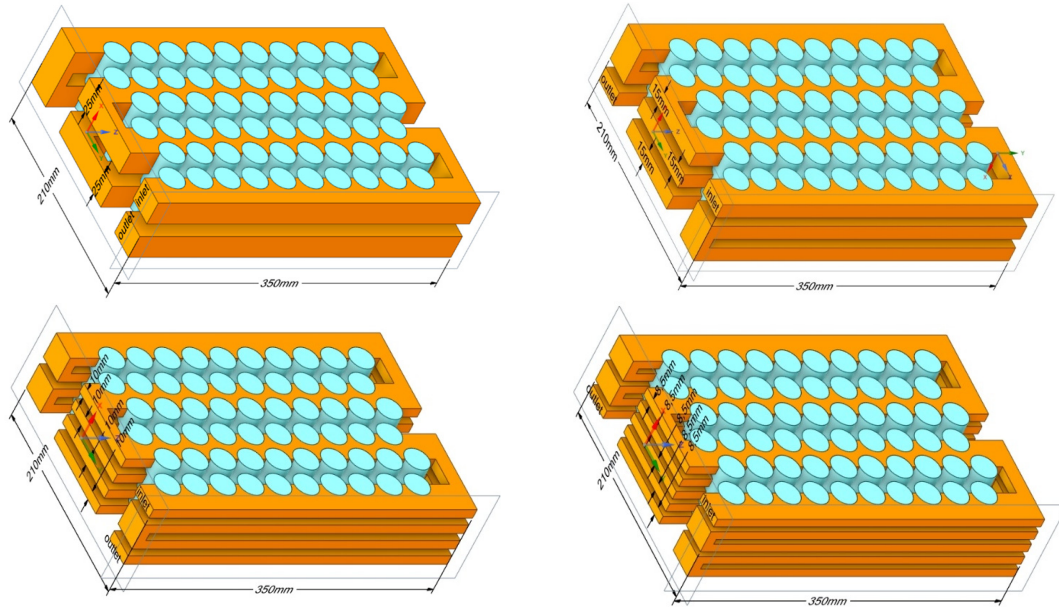


Figure 1. Schematic representation of the multi-channel LCP configurations used in this study: (a) two-channel (b) three-channel (c) four-channel, and (d) five-channel

The inlet and outlet manifolds are positioned on the same side of the plate to facilitate compact integration within the module assembly. During operation, the coolant enters through the inlet manifold, passes through the internal channels, and exits from the opposite outlet, forming a continuous flow path that enhances temperature uniformity across the module. The cooling plate material is aluminum, selected for its high thermal conductivity, low mass, and structural rigidity, which has made it a common choice in EV battery modules. The coolant domain was modeled using two working fluids: pure water and a 50:50 (v/v) mixture of water and ethylene glycol (WEG), both commonly used in electric vehicle applications due to their favorable heat-transfer characteristics and freeze protection capability. The thermophysical properties of the solid materials and coolant fluids at 298.15 K are summarized in Table 2. An inlet temperature of 298 K was selected because it corresponds to typical coolant supply temperatures in automotive battery thermal management systems and represents a realistic thermal boundary condition for EV operation.

Table 2. Thermophysical properties of materials and coolants used in this study

Material	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)
Water (liquid)	998.2	4182	0.600
WEG	1040	3400	0.370
Aluminum block	2719	871	202.4

2.2. Governing Equations

Battery simulation approaches span multiple scales and levels of fidelity, ranging from simplified thermal networks to fully coupled electrochemical-thermal frameworks. At the module level, the multi-scale multi-

domain (MSMD) concept provides a continuum description of charge and heat transport, resolving spatial variations of current density, potential, and temperature inside each cell [19].

Within this hierarchy, the Newman-Tiedemann-Gu-Kim (NTGK) model offers a semi-empirical representation of electrochemical heat generation by combining irreversible Joule losses with reversible entropic terms derived from experimental voltage-current characteristics [20]. The equivalent-circuit model (ECM) family, on the other hand, replaces detailed electrochemical kinetics with lumped R-C (resistor-capacitor) networks, coupling electrical and thermal behavior while maintaining low computational cost. Practically, real LiB cells exhibit anisotropic conductivity because of layered electrodes, separators, and the winding structure of jelly-roll assemblies. The through-plane conductivity is typically an order of magnitude lower than that in the in-plane direction, leading to directional heat spreading and possible hot-spot formation. Although such anisotropy can be explicitly modeled within MSMD or NTGK frameworks, its impact at the module scale is often dominated by boundary convection effects and coolant distribution.

To focus on the thermal performance of the LCP and to ensure computational tractability, the electrochemical domain was simplified. Each battery cell was represented as a homogeneous solid with uniform volumetric heat generation corresponding to the combined reversible and irreversible heat of a 4C discharge rate. This pragmatic approach, widely adopted in battery thermal management studies, preserves the overall heat-transfer characteristics while allowing systematic variation of geometric and flow parameters. All solid regions were assumed isotropic with effective thermal conductivity values, and radiation and contact resistances were neglected due to their minor contribution under forced-convection conditions. Temperature-dependent fluid properties were used for the coolant, while other materials were assumed constant at the reference temperature.

The flow field and heat transfer were described by the three-dimensional, transient, incompressible Navier-Stokes equations coupled with the energy equation. Conservation of mass, momentum, and energy can be expressed as follows [21-23] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} E) = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \Phi \quad (3)$$

Depending on the inlet velocity, the Reynolds number within the channels ranged from laminar to transitional and fully turbulent regimes. For Reynolds numbers above approximately 2300, the flow was treated as turbulent using the standard k - ϵ model, which solves additional transport equations for the turbulence kinetic energy (k) and its dissipation rate (ϵ) [24]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon} \epsilon \quad (5)$$

Radiative heat transfer and interfacial thermal contact resistances were neglected, as their contribution was found to be negligible compared with conduction and forced convection. Heat transfer within the solid domains follows Fourier's law, whereas convective heat exchange between the battery surface and the coolant flow conforms to Newton's law of cooling. Accordingly, the transient heat conduction equation can be expressed as:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q^m \quad (6)$$

where ρ denotes density (kg/m^3), C_p the specific heat capacity ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T the temperature (K), $\mathbf{u}$ the velocity vector (m s^{-1}), k the thermal conductivity ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). The term q^m represents the volumetric heat generation rate in the battery cell due to electrochemical reactions and internal resistance during discharge.

2.3. Numerical Implementation and Grid Verification

The computational domain was discretized using an unstructured hybrid mesh to accurately resolve the coupled fluid and solid regions of the battery module. The mesh was predominantly composed of hexahedral elements in the main flow passages and tetrahedral elements in regions of geometric curvature. Local grid refinement was applied along the channel walls and at the cell-plate contact interfaces to ensure precise resolution of boundary layer development and conjugate heat-transfer behavior. This meshing strategy provided a balanced compromise between numerical accuracy and computational efficiency, enabling stable and physically consistent solutions throughout the simulation domain.

The simulations were conducted in transient mode, allowing the temperature and velocity fields to evolve dynamically until reaching a quasi-steady state. A time-step independence test was performed using $\Delta t = 0.1\text{ s}$, 0.5 s , 1 s , and 2 s under identical boundary conditions corresponding to a 4C discharge rate and a coolant inlet velocity of 0.25 m/s . The variation in T_{max} between the 1 s and 0.1 s time steps was below 0.4% , confirming temporal convergence. Accordingly, a time-step size of 1 s was adopted for all subsequent simulations as an optimal balance between computational cost and numerical accuracy. The final computational domain and mesh structure are illustrated in Figure 2, where the dense refinement around the cylindrical cell surfaces and coolant channels indicates the regions of dominant thermal gradients and conjugate heat transfer.

A mesh independence study was carried out using grids of approximately 0.5×10^6 , 1×10^6 , 2×10^6 , 3×10^6 , and 4×10^6 cells. The differences in T_{max} , ΔT , and pressure drop between the 1×10^6 -cell mesh and the finer grids were below 1% , showing that further refinement did not improve the results. Therefore, a grid of about 1×10^6 cells was used for all simulations. Near-wall inflation ensured adequate boundary-layer resolution, giving an overall y^+ range of 20-60, which is suitable for the standard $k-\epsilon$ turbulence model.

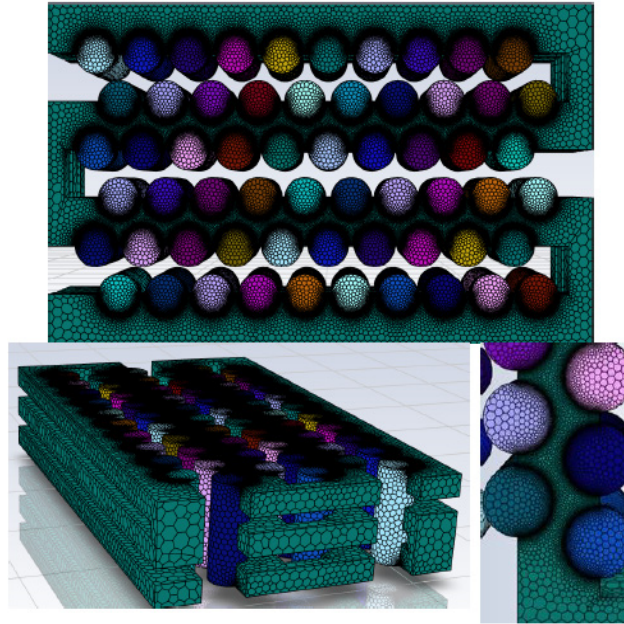


Figure 2. Computational domain

2.4. Numerical Simulation and Validation

The thermal behavior of LiBs originates from several coupled electrochemical processes, including irreversible Joule heating, entropic heat during lithium intercalation and deintercalation, and additional side reactions at the electrode-electrolyte interface. The net heat generation depends on the state of charge, discharge rate, and internal resistance, all of which influence the local temperature distribution inside the cell. To maintain computational efficiency and focus on thermal management performance, these combined effects were represented by an equivalent volumetric heat generation rate corresponding to a 4C discharge condition, incorporating both reversible and irreversible contributions under high-power operation.

For the present study, each cell was modeled as a uniform heat-generating solid in the battery module, and the surrounding fluid domain represented the LCP structure. Transient simulations were conducted over 700s, allowing the $T_{\max}$ to evolve until thermal equilibrium was reached. The initial temperature of all domains and the coolant inlet were set to 298.15 K. In the validation stage, the same heat-generation model was applied under no-cooling conditions (adiabatic surroundings) to replicate the reference case reported by Zhang et al. [25].

The comparison between the reference study and the present numerical model is presented in Figure 3. Both curves exhibit a nearly linear rise in $T_{\max}$ with time, confirming that the implemented thermal source term accurately reproduces the expected heat generation behavior during high-rate discharge. The maximum deviation between the predicted and reference temperatures remained within 1.2% throughout the 700s period, validating the numerical accuracy of the simplified model. This validation confirms that the present simulation framework can reliably predict transient thermal responses of cylindrical lithium-ion cells under intensive discharge conditions. The verified model was subsequently used to assess the thermal performance of the multi-channel LCP configurations introduced in Section 2.1.

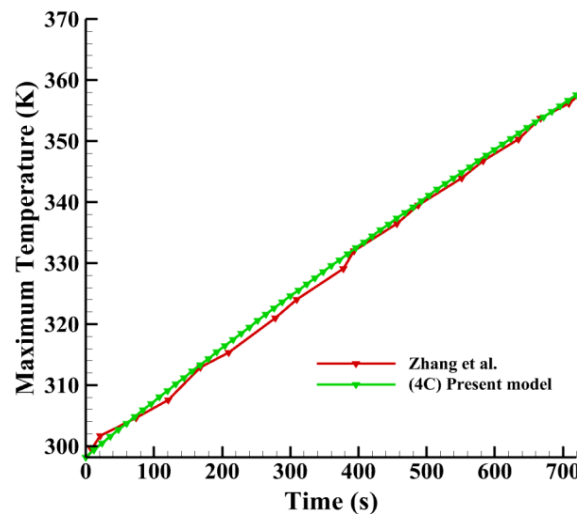


Figure 3. Validation of the simulated model [25]

After model validation, the simulation matrix presented in Figure 4 was designed to explore the influence of geometric and operational parameters on the thermal behavior of the module. The analysis considered four LCP configurations, two coolant formulations, and three inlet velocities (0.1, 0.25, and 0.5 m/s) under a constant 4C discharge rate. These combinations provided a systematic framework for evaluating both temperature uniformity and overall cooling effectiveness across all cases.

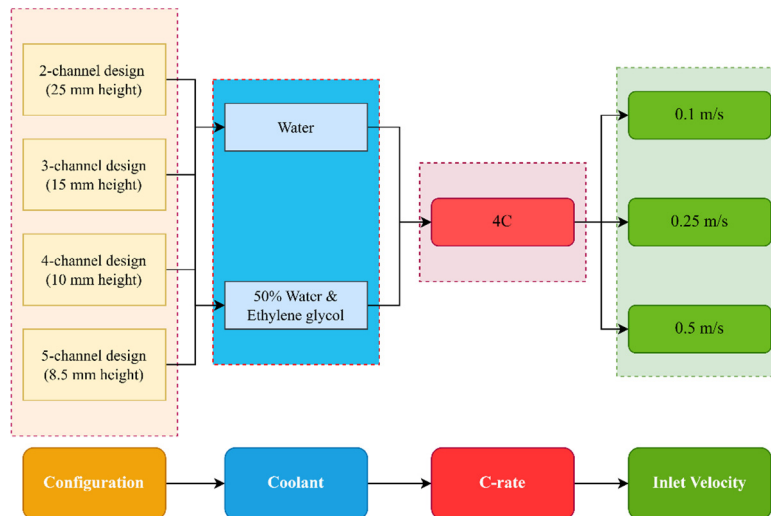


Figure 4. Roadmap of the study

3. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 5 shows the steady-state temperature contours for the four LCP configurations at a coolant velocity of 0.1 m/s, using either water or WEG as the working fluid. The two-channel plate demonstrates superior temperature uniformity and the lowest cell temperatures under cooling with water. Decreasing the channel height in the designs with three, four, and five channels weakens local convection and reduces flow mixing between adjacent passages.

In the case of the WEG (Figure 5b), the temperature increases by approximately 1 to 2 K under the same operating conditions. This rise results from the mixture's lower thermal conductivity and higher viscosity, which weaken heat transfer and slow the renewal of the boundary layer along the cell surfaces. The temperature field appears slightly more layered, especially in the configurations with four and five channels, where higher flow resistance leads to reduced circulation. At this low inlet velocity, the two-channel design achieves the best cooling performance by maintaining both a low $T_{\max}$ and a uniform temperature distribution. Increasing the number of channels extends the flow coverage but also causes higher pressure losses and lower convective efficiency because of the smaller flow area and limited coolant mixing.

The differences observed between channel designs are closely linked to how the coolant distributes and moves within the plate. In the two-channel configuration, the greater channel height reduces hydraulic resistance and promotes a more uniform velocity field, allowing the coolant to sweep the cell surfaces efficiently and maintain strong convective heat transfer. When additional channels are added, the reduced channel height restricts the available flow area and forces the coolant into narrower paths, increasing resistance and reducing through-flow. This leads to lower velocities and small recirculation regions, particularly near the manifold connections and side walls, where heat removal becomes less effective. These flow characteristics become more pronounced in the four- and five-channel configurations, resulting in higher $T_{\max}$ and reduced temperature uniformity.

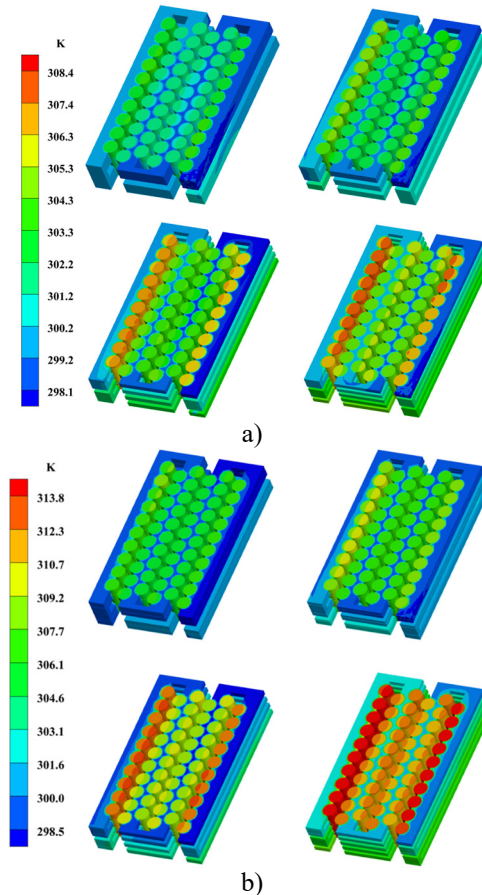


Figure 5. Temperature contours of the battery module at 0.1 m/s coolant velocity for different working fluids: (a) water and (b) WEG

As shown in Figures 6a-c, the temperature evolution of the battery module follows a clear transition from transient to steady state. During the initial 100 s, the temperature increases rapidly as internal heat generation dominates, and then gradually approaches a steady state once heat removal by the coolant becomes sufficient. At the lowest inlet velocity of 0.1 m/s, limited convection emphasizes the geometric differences among the four LCP configurations. The two-channel design maintains the lowest temperature, around 305 K, whereas the five-channel configuration reaches nearly 308 K, primarily because reduced flow mixing and the smaller channel height restrict local heat transfer.

The convective heat transfer improves for all configurations at an inlet velocity of 0.25 m/s, leading to a temperature drop of around 3 K. The two-channel plate continues to demonstrate the most effective thermal performance by providing a stable and uniform temperature field. Only a slight additional cooling of less than 0.5 K is observed as the velocity is further increased to 0.5 m/s (Figure 6c), which suggests that the flow has entered an efficient convective regime where higher velocities bring little additional benefit. These results indicate that the most significant increase in heat dissipation occurs in the low-to-medium coolant speed range. Beyond this range, the decrease in $T_{\max}$ becomes insignificant. This observation is consistent with previous numerical and experimental studies on liquid-cooled battery systems, which have reported that most convective enhancement occurs before the flow is fully developed. In addition, the thermal trends also correspond to the relative pressure drop of the channel designs, as configurations with higher hydraulic resistance require greater pumping power while still providing weaker temperature reduction.

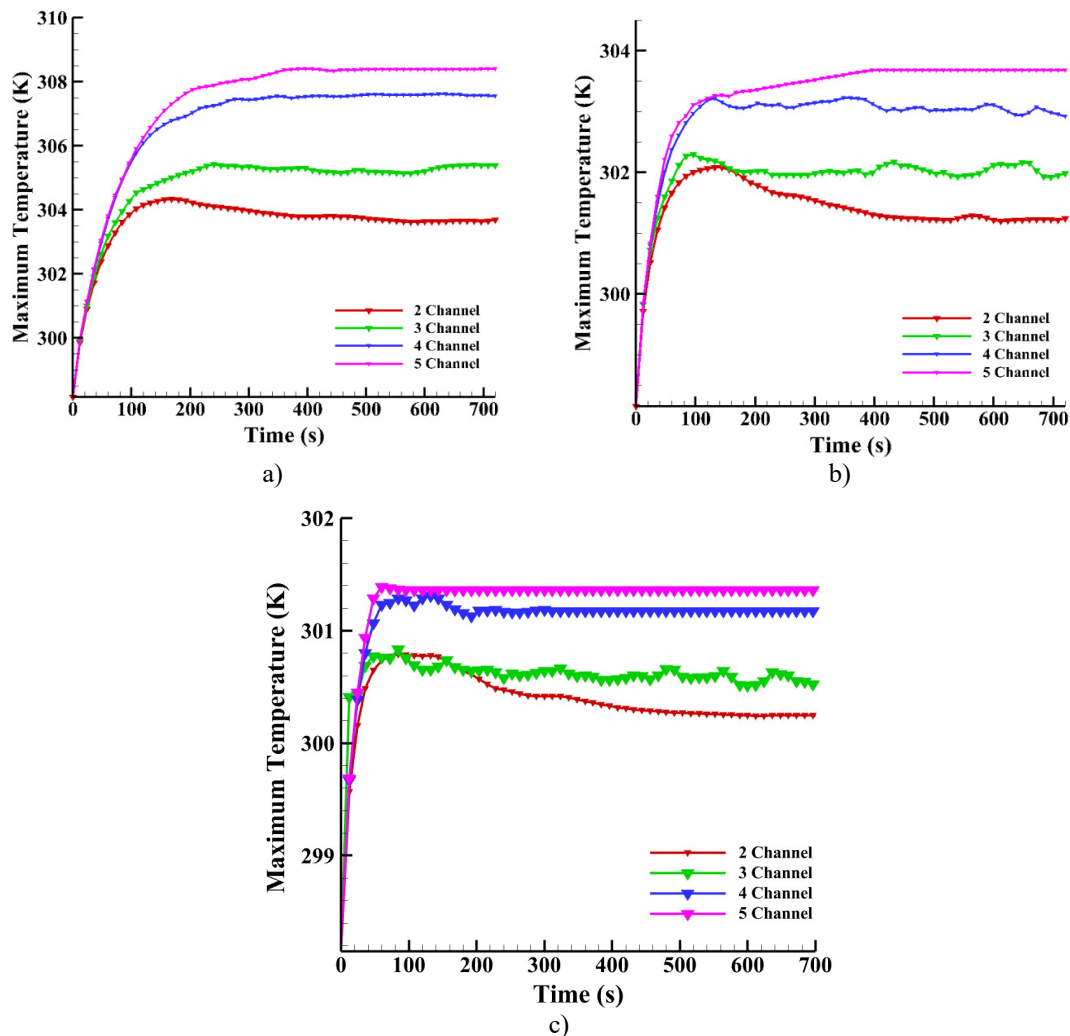


Figure 6. Evolution of the $T_{\max}$ for the four LCP configurations at different coolant velocities using water as the working fluid: (a) 0.1 m/s, (b) 0.25 m/s, and (c) 0.5 m/s

The overall temperature field exhibited a similar pattern to that of pure water after the coolant was replaced with the WEG, as shown in Figures 7a-c. The temperature levels increased up to 2 K in all tested velocities, mainly due to the lower thermal conductivity and higher viscosity of the mixture, which reduce the Reynolds number and weaken convective heat transfer. Despite this temperature rise, the relative thermal ranking of the LCP geometries remained unchanged. The two-channel configuration achieved the lowest $T_{\max}$, whereas the four- and five-channel plates exhibited higher steady-state values because their smaller hydraulic diameters restricted coolant mixing and increased hydraulic resistance. These results confirm that decreasing channel height limits both heat removal and temperature uniformity, whereas the two-channel plate provides the most effective balance between cooling capacity and flow resistance, keeping $T_{\max}$ below 306 K and ΔT within 3 K under nominal operating conditions.

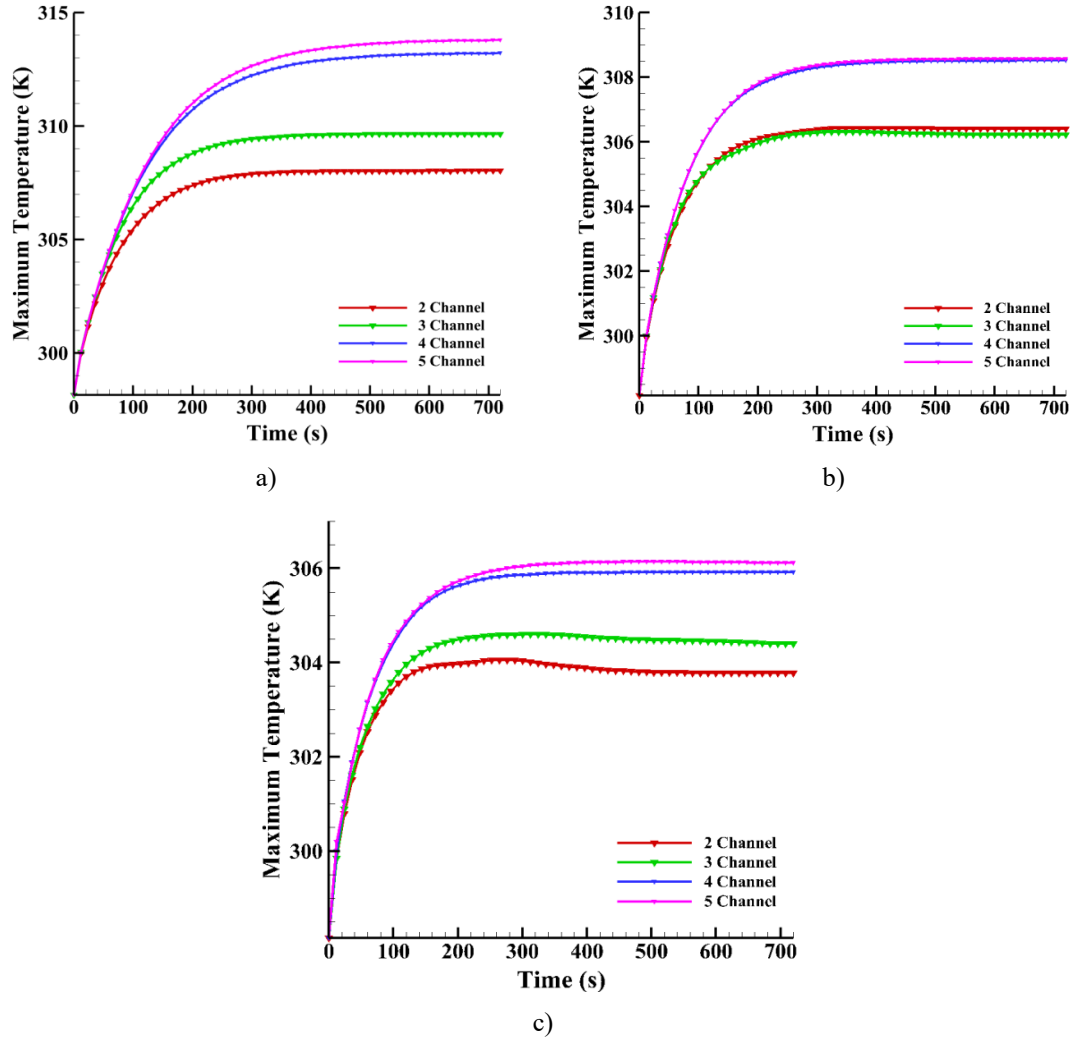


Figure 7. Evolution of the $T_{\max}$ for the four LCP configurations at different coolant velocities using the WEG as the working fluid: (a) 0.1 m/s, (b) 0.25 m/s, and (c) 0.5 m/s

Figure 8 illustrates the maximum ΔT among the battery cells for different channel configurations and coolant velocities. In both coolant types, ΔT decreases markedly with increasing inlet velocity, confirming that stronger convection enhances temperature uniformity. For the water-cooled cases, ΔT ranges from about 4 to 5 K at 0.1 m/s to below 3 K at 0.5 m/s, while the WEG exhibits slightly higher temperature variations due to its reduced thermal conductivity. At all velocities, the two-channel configuration achieves the smallest ΔT , maintaining uniform temperature distribution along the coolant path. In contrast, four- and five-channel designs show larger temperature gradients, especially at low flow rates, attributed to weaker cross-channel mixing and increased thermal resistance. These results emphasize that channel height and flow rate jointly control thermal uniformity: decreasing the channel height to fit more channels offers

broader surface coverage but limits the convective balance, leading to localized hot zones. Consequently, the two-channel plate again emerges as the most thermally uniform configuration under all tested conditions.

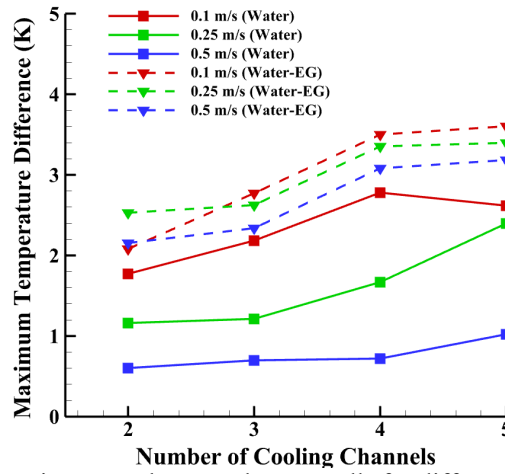


Figure 8. Variation of maximum ΔT between battery cells for different channel configurations and coolant velocities using water and the WEG

The combined temperature and ΔT analyses offer a comprehensive understanding of how geometry and coolant type influence the overall heat dissipation process. While the thermal contours highlight the temperature distribution on the battery surfaces, it is equally important to examine the internal coolant flow behavior within the LCP. Understanding the internal flow structure helps explain the observed differences in temperature uniformity and local hot-spot formation.

Figure 9 illustrates the velocity contours inside the LCPs, which demonstrate how the number of channels affects flow distribution and mixing. In the two-channel design, the coolant flows uniformly through each channel, maintaining a nearly symmetric velocity field with minimal recirculation zones. This promotes effective contact with the cell surfaces and directly contributes to its enhanced thermal performance. The three-channel configuration maintains a balanced flow field but begins to show mild velocity decay near the middle section as the flow divides into smaller branches. In contrast, the four- and five-channel plates exhibit noticeable velocity stratification and localized low-speed regions, particularly near the outlet manifold. As the channel height decreases, the hydraulic diameter and Reynolds number are reduced, leading to weaker convection and more pronounced boundary-layer overlap along the inner walls. Small stagnation pockets appear in corner regions where coolant recirculation occurs, reducing overall heat-transfer effectiveness.

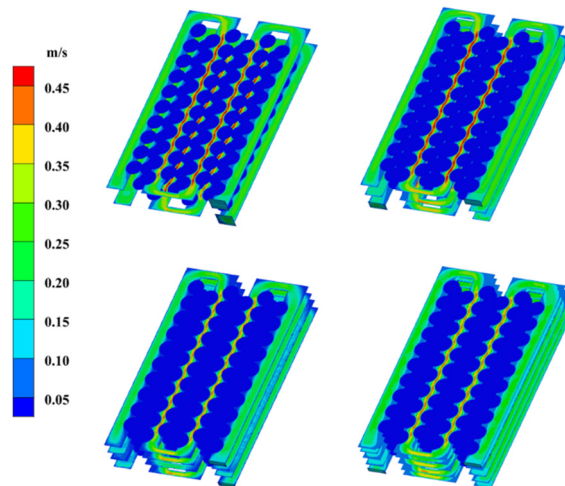


Figure 9. Velocity contours of coolant flow for different channel configurations at an inlet velocity of 0.25 m/s (water)

4. CONCLUSIONS

This study numerically investigated the thermal behavior of multi-channel LCPs for cylindrical LiB modules under various geometric and operating conditions. The results demonstrated that both channel height and flow rate play key roles in controlling heat removal, temperature uniformity, and coolant distribution. Among the analyzed configurations, the two-channel LCP consistently provided the lowest $T_{\max}$ and the most uniform thermal field for all coolant types and velocities. Its larger hydraulic diameter and simpler flow path led to higher convective efficiency and minimal pressure loss. In contrast, increasing the number of channels led to thinner flow passages and stronger viscous effects, causing localized hot spots and non-uniform velocity profiles, particularly near the outlet manifold.

The coolant velocity strongly affected heat transfer at low flow rates but showed diminishing returns at higher velocities. Increasing the flow rate from 0.1 to 0.25 m/s significantly improved heat transfer and reduced ΔT by up to 40%, whereas a further increase to 0.5 m/s yielded only marginal thermal benefit (<1 K) while noticeably raising pumping power. The WEG resulted in slightly higher temperatures (by about 1 to 2 K) than pure water, due to its lower thermal conductivity and higher viscosity, though the overall performance trends remained similar. Velocity contour analysis confirmed that the main cause of temperature non-uniformity in narrow channels is the disturbance in flow distribution. The two-channel plate maintained a stable flow field without major recirculation, aligning with its superior thermal results.

In practical terms, these findings highlight that a moderate coolant velocity (≈ 0.25 m/s) combined with a two-channel LCP design offers the optimal balance between thermal performance, flow uniformity, and energy efficiency. The results contribute to the design of lightweight and scalable cooling systems suitable for compact EV battery modules. Future work will focus on extending this approach to curved and multi-inlet channel designs, as well as incorporating conjugate electrochemical-thermal coupling to further enhance model accuracy.

5. REFERENCES

1. Tosun, E., Keyinci, S., Yakaryılmaz, A.C., Yıldızhan, Ş. & Özcanlı, M. (2024). Evaluation of lithium-ion batteries in electric vehicles. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 8(3), 332-340.
2. Zaino, R., Ahmed, V., Alhammadi, A.M. & Alghoush, M. (2024). Electric vehicle adoption: A comprehensive systematic review of technological, environmental, organizational and policy impacts. *World Electric Vehicle Journal*, 15(8), 1-47.
3. Erdoğan, B., Tan, A. & Tümay, M. (2024). Genetic algorithm enhanced resonant converter design for battery charging applications in electric vehicles. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 39(4), 1129-1142.
4. International Energy Agency (IEA), (2023). *Global EV Outlook 2023*.
5. Uzun, M. (2025). Thermal and electrical analysis of 26650 li-ion batteries in series connection using the NTGK model and virtual simulations. *European Mechanical Science*, 9(1), 46-58.
6. Tosun, E., Keyinci, S., Yakaryılmaz, A.C. & Ozcanli, M., (2025). A study on the removal of heat generated by a lithium-ion battery module: A fan-assisted battery cooling approach. *Processes*, 13(3), 848.
7. Marri, G.K., Ee, Y.J., He, Z. & Ho, J.Y. (2026). Recent advancements in internal and external thermoregulation strategies for lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 225, 116127.
8. Keyinci, S., Ilinčić, P., Tosun, E., Uzun, M., Yakaryılmaz, A.C. & Ozcanli, M. (2025). Design and performance analysis of a curved channel liquid cooling system for battery thermal management. *Thermal Science and Engineering Progress*, 63, 1-19.
9. Yakaryılmaz, A.C., Bicak, M.I., Tosun, E., Keyinci, S. & Ozcanli, M. (2025). Experimental assessment of battery thermal management in a lithium-ion battery module under varying ambient temperatures and fan-assisted air-cooling strategies. *Thermal Science and Engineering Progress*, 65, 103900.
10. Akkuş, F. & Işık, M.Z. (2025). Investigation of thermal performance of pipe-supported air-cooled systems in lithium-ion battery packs. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 40(4), 855866.
11. Singh Rawat, S. & Kumar, R. (2025). Battery thermal management systems for electric vehicles: current trends and strategies for sustainable transportation. *Engineering Research Express*, 7(3), 1-22.

12. Luo, J., Xia, W., Wang, S., Li, D. L. & Kang, X. (2025). Comprehensive application of phase change materials in lithium-ion battery thermal management: From single cooling to coupled systems. *Energy Technology*, 13, 2401930.
13. Li, P., Zhao, J., Zhou, S., Duan, J., Li, X., Zhang, H. & Yuani J. (2023). Design and optimization of a liquid cooling thermal management system with flow distributors and spiral channel cooling plates for lithium-ion batteries. *Energies*, 16(5), 2196.
14. Li, L., Mao, Z., Cai, T., Hu, X. & Xu, J. (2025). Thermal-hydraulic performance optimization of Tesla-type minichannel structures for AUV battery thermal management using genetic algorithms. *Thermal Science and Engineering Progress*, 67, 104130.
15. Lai, Y., Ding, J. & Liu, L. (2025). Numerical investigation on the cooling performance of lithium-ion battery using liquid cooled-plate with integrated grooves and secondary microchannel structures. *International Journal of Thermal Sciences*, 217, 110094.
16. Akbarzadeh, M., Kalogiannis, T., Jaguemont, J., Jin, L., Behi, H., Karimi, D., Beheshti, S.H., Mierlo, J.V. & Berecibar, M. (2021). A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for a high-energy lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 198, 117503.
17. Dubey, D., Mishra, A., Shriyan, H.C., Pratap, T. & Pandey, R. (2024). Improved thermal management of lithium-ion battery module through microtexturing of serpentine cooling channels. *Energy Technology*, 12(5), 2301253.
18. Monika, K., Punnoose, E.M. & Datta, S.P. (2024). Multi-objective optimization of cooling plate with hexagonal channel design for thermal management of Li-ion battery module. *Applied Energy*, 368, 123423.
19. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T. & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
20. Zhu, H., Ma, Y., E, J. & Wei, S. (2024). Channel structure design and optimization for immersion cooling system of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 77, 109930.
21. Fan, L., Li, J., Chen, Y., Zhou, D., Jiang, Z. & Sun, J. (2024). Study on the cooling performance of a new secondary flow serpentine liquid cooling plate used for lithium battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 218, 124711.
22. He, P., Lu, H., Fan, Y., Ruan, H., Wang, C. & Zhu, Y. (2023). Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management system utilizing a double-layered I-shaped channel liquid cooling plate exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 187, 108200.
23. Qian, Z., Li, Y. & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126, 622-631.
24. Bao, Y. & Wang, H. (2022). Numerical study on flow and heat transfer characteristics of a novel Tesla valve with improved evaluation method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 187, 122540.
25. Zhang, B., Zeng, Z., Yuan, N. & Shi, H. (2025). Numerical investigation of lithium-ion battery thermal management system performance influenced by physical properties of PCM. *Journal of Energy Storage*, 117, 116141.

Development of an Artificial Intelligence-Based Prediction Engine for the Cryptocurrency Markets

Onur AYGÜN^{1,a}, Ceren ULUS^{2,b}, Mehmet Fatih AKAY^{3,c}

¹Innovance Information Technologies, Department of Software Development, Istanbul, Türkiye

²EFA Innovation Consultancy and Technology, Department of R&D, Adana, Türkiye

³Cukurova University, Department of Computer Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0009-0008-4534-3783; ^bORCID: 0000-0003-2086-6381; ^cORCID: 0000-0003-0780-0679

Article Info

Received : 16.12.2025

Accepted : 23.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1843158

Corresponding Author

Ceren ULUS

f.cerenulus@gmail.com

Keywords

Cryptocurrency markets

Bitcoin closing price prediction

Machine learning

Transformer architecture

Risk management and portfolio optimization

How to cite: AYGÜN, O., ULUS, C., AKAY, M.A., (2026). Development of an Artificial Intelligence-Based Prediction Engine for the Cryptocurrency Markets. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 285-298.

ABSTRACT

This study aims to present an innovative solution that will help analyze market trends and price dynamics, identify risk factors, and provide investors with predictions using big data analytics and advanced artificial intelligence algorithms. Bitcoin closing price prediction models for short-term, medium-term, and long-term have been developed using Long-Short-Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU), and transformer architecture based models and Monte Carlo scenarios have been generated for short-term Bitcoin closing price predictions; and tail-risk metrics such as Value at Risk (VaR) and Conditional Value at Risk (CVaR) have been calculated. A dataset for BTC/USDT symbol has been prepared using Binance API. The performance of developed models was evaluated using Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The results showed that most successful results have been obtained with prediction models developed for short term. Prediction models developed with GRU achieved superior performance.

Kripto Para Piyasaları için Yapay Zeka Tabanlı Tahmin Motorunun Geliştirilmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 16.12.2025

Kabul : 23.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1843158

Sorumlu Yazar

Ceren ULUS

f.cerenulus@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Kripto para piyasaları

Bitcoin kapanış fiyatı tahmini

Makine öğrenimi

Transformer mimarisi

Risk yönetimi ve portföy optimizasyonu

Atıf şekli: AYGÜN, O., ULUS, C., AKAY, M.A., (2026). Kripto Para Piyasaları için Yapay Zeka Tabanlı Tahmin Motorunun Geliştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 285-298.

ÖZ

Bu çalışma, büyük veri analitiği ve gelişmiş yapay zeka algoritmaları kullanarak piyasa trendlerini ve fiyat dinamiklerini analiz etmeye, risk faktörlerini belirlemeye ve yatırımcılara tahminler sunmaya yardımcı olacak yenilikçi bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır. Kısa, orta ve uzun vadeli Bitcoin kapanış fiyatı tahmin modelleri, Uzun-Kısa Vadeli Bellek (LSTM), Kapılı Tekrarlayan Birim (GRU) ve transformatör mimarisine dayalı modeller kullanılarak geliştirilmiş ve kısa vadeli Bitcoin kapanış fiyatı tahminleri için Monte Carlo senaryoları oluşturulmuştur; ayrıca Değer Riski (VaR) ve Koşullu Değer Riski (CVaR) gibi kuyruk riski metrikleri hesaplanmıştır. Binance API kullanılarak BTC/USDT sembolü için bir veri seti hazırlanmıştır. Geliştirilen modellerin performansı, Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, en başarılı sonuçların kısa vadeli tahmin modelleriyle elde edildiğini göstermiştir. GRU ile geliştirilen tahmin modelleri üstün performans göstermiştir.

1. INTRODUCTION

Cryptocurrency markets, a new financial space where investors and institutions transact digital assets, tokens, and smart contracts, are based on blockchain technology like Bitcoin and Ethereum, and represent a significant area for the current economy. The buying and selling of digital assets take place within this ecosystem. These markets are not governed by a single authority; transactions are secured with cryptographic verification and distributed ledger technologies, ensuring high reliability [1].

Despite their high volatility, cryptocurrencies have become increasingly popular due to features such as faster money transfers and lower transaction costs. According to available information, the total market capitalization of the cryptocurrency market exceeded \$2.5 trillion USD as of June 2024. Bitcoin, introduced in 2008, is the first open-source digital currency, managed by an open-source software algorithm operating over a global internet network. Currently, over 2,000 different cryptocurrencies are traded on the market. Despite the large number of cryptocurrencies, Bitcoin still accounts for approximately half of the total market capitalization. Bitcoin's price movements can generally be explained by supply and demand dynamics. This, however, is quite significant in determining the overall direction of the cryptocurrency market [2].

While the market is more mature than in previous years due to increased liquidity, cryptocurrencies still exhibit high price volatility. Macroeconomic developments such as interest rates, inflation, and regulation strongly influence prices. However, this high volatility and dynamic nature of cryptocurrency markets make it difficult for investors to make informed decisions. In this context, investors can be vulnerable to instantaneous changes. The dramatic price fluctuations in a short period, driven by market sentiment, social media influences, and macroeconomic factors, make it challenging for investors to take precautions against such fluctuations. The unpredictable nature of the market leads investors to focus more on risk management strategies.

Risk management strategies also primarily focus on price analysis. Analyzing data sources such as price movements, trading volume, and market sentiment is a strategic approach that allows for a more accurate, holistic, and predictable assessment of the rapidly changing nature of cryptocurrency markets. However, accurate analysis is crucial. Manual methods cannot fully capture the sensitivity of this analysis. Consequently, these methods do not achieve high success rates. Investors need to be able to accurately analyze market trends and price dynamics. Therefore, providing reliable and real-time predictions is essential for investors to make informed and strategic decisions in the cryptocurrency market. In this context, price prediction for the cryptocurrency market is a crucial strategic action for managing the risks of these highly volatile assets, optimizing investment strategies, and making more informed trading decisions to minimize potential losses and maximize returns. With price prediction in cryptocurrency markets, risks can be managed more effectively [3]. It becomes possible to make buy-sell decisions at the right time, maximize profits, and limit losses. Furthermore, it becomes possible to shape portfolio strategies more rationally and to identify market trends and turning points in advance.

This study aims to present an innovative solution that will help analyze market trends and price dynamics, identify risk factors, and provide investors with predictions using big data analytics and advanced machine learning algorithms. To this end, an AI-based prediction engine has been developed. The goal is to predict future market movements, and Bitcoin closing price prediction models have been developed using prediction algorithms powered by advanced machine learning techniques such as LSTM, GRU, and Transformer-based models.

The study also included the generation of Monte Carlo scenarios for short-term price forecasts and the calculation of tail-risk measures such as VaR and CVaR. Position sizes were dynamically adjusted using threshold and budget rules, and automatic warning mechanisms have been activated against sudden price changes.

The most significant difference between this study and the existing literature is that it simultaneously evaluates short-term (1 min), medium-term (5 min), and long-term (30 min) crypto closing prices. The methodological approach, which includes transformer-based architecture rarely seen in literature, is quite diverse, incorporating time-series-based methods such as LSTM and GRU and the performance of developed models was evaluated using RMSE, MAE, and MAPE. Walk-forward cross-validation has been

used in the data preparation and evaluation process. By retraining each fold and maintaining time-series dependency, reproducibility and realistic performance have been ensured. Most studies in academic literature are far from risk optimizations. The literature review does not include any studies that conduct risk analysis. This constitutes an important innovative feature of the study. In this study, Monte Carlo scenarios have been generated; VaR and CVaR tail-risk measures have been calculated. By dynamically adjusting position sizes with threshold and budget rules, automatic warning mechanisms against sudden regime changes have been activated. This has made it possible to make investment decisions more sustainable by basing them not only on expected returns, but also on expected loss and excessive risk measures.

This study is organized as follows: Section 2 includes relevant literature. Dataset generation is presented in Section 3. Methodology is presented in Section 4. Development of models is presented in Section 5. The procedures and analyses related to Risk Management and Portfolio Optimization are presented in Section 6. Results and discussion are given in Section 7. Section 8 concludes the paper.

2. LITERATURE REVIEW

Alnami et al. [4] using datasets of Bitcoin, Ethereum, Binance Coin, and Litecoin cryptocurrencies, they employed machine learning and deep learning to predict closing prices for these cryptocurrencies. A Random Forest (RF) community learning algorithm, a Gradient Boosting model, and a feedforward neural network have been used. A Z-score-based anomaly detection strategy has been adopted to classify closing prices as normal or abnormal and to help identify significant market events. The performance of the models has been analyzed using Mean Squared Error (MSE), RMSE, MAE) and and Determination of Coefficient (R^2) metrics. Experimental results showed that the RF and Gradient Boosting models have been successful.

Asmat and Maiyama [5] emphasized using the Neural Basis Extension Analysis Time Series (N-BEATS) deep learning architecture, which has high performance in modeling complex patterns in time series data to predict Bitcoin prices. 729 days of hourly Bitcoin price data collected from Yahoo Finance have been used. The model has been evaluated by comparing it to Linear Regression and LSTM. In the experimental results, the model has been analyzed using MAE and R^2 . N-BEATS provided an R^2 score of 0.00240 and an MAE score of 0.9998.

Kaur et al. [6] Ethereum (ETH), Bitcoin (BTC), and Litecoin (LTC) have been studied for exchange rate prediction. Two categories of Recurrent Neural Networks (RNNs) have been used: LSTM and GRU. The GRU model has been optimized with Adam with a 20% dropout rate to prevent overfitting and implemented as a two-layer deep learning network. Historical price datasets have been obtained from the CryptoDataDownload source and normalized. The dataset has been split into training and testing segments of 80%–20%. Prediction performance has been evaluated using MSE, MAE, MAPE, and RMSE. Experimental results showed that the GRU model performed better than the LSTM. The GRU provided MAPE values of 0.03540, 0.08703, and 0.04415 for BTC, LTC, and ETH, respectively.

Makri et al. [7] aimed to predict Ethereum prices for short-term and limited prediction scenarios, using Large Language Models (LLMs) for this purpose. A new approach has been proposed that adapts pre-trained LLMs to the specifics of the Ethereum price time series problem. This approach has been analyzed for performance across several metrics, including MSE, MAE, and RMSE. The results show that the proposed approach provides the most advanced performance in this area.

Mazinani et al. [8] aimed to predict the prices of Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH), and Ripple (XRP) and analyzed the performance of deep learning algorithms in both short-term and long-term prediction. Models have been evaluated using RMSE, MAE, MAPE, and R^2 metrics. Experimental results showed that Transformer has been generally more effective for short-term predictions and also performed well for long-term predictions. Convolutional Neural Network-Iterative Neural Network (CNN-RNN) achieved the lowest complexity in terms of the number of Multiplication and Addition (MAC) operations. The SimpleRNN method has been observed to have the fewest parameters and the smallest FLASH memory requirement. Overall, CNN Gate Iterative Unit (CNN-GRU) provided the best common accuracy-complexity for predicting BTC and ETH prices, while CNN-RNN yielded superior results for XRP price prediction.

Pandey and Sharma [9] aimed to create a deep learning architecture using RNN, CNN, and LSTM to predict Bitcoin and Ethereum prices. CNNs have been used to extract features from historical price data. A dataset containing major cryptocurrencies has been used as the dataset. Experimental results showed that the proposed model predicted cryptocurrency prices with high accuracy. Consequently, the bidirectional model outperformed traditional time series forecasting methods and one-way models, revealing the potential to improve price prediction in the cryptocurrency market.

Kang et al. [10] aimed to integrate deep learning-based price prediction with technical indicators. Twelve deep learning models have been developed. The success of the developed models and their performance in generating trading signals have been analyzed across various cryptocurrencies and prediction periods. Backtesting has been conducted to determine the most suitable strategy, evaluated using the Sharpe ratio. In the experimental results, it has been observed that SegRNN performed better than other models in price prediction, while a strategy combining TimesNet and Bollinger Bands (BB) provided the highest trading performance in the ETH market with a return of 3.19, a maximum decline of -7.46, and a Sharpe ratio of 3.56. With the integration of models and technical indicators, significant improvements have been shown in the mid-range 4-hour timeframe, while no performance improvement has been achieved in shorter timeframes such as 30 minutes.

Saeed et al. [11] presented a systematic review of existing commodity price forecasting models for housing prices in the real estate market. Different commodity price forecasting models used in academic and commercial settings have been identified and analyzed. The study included forecasting of housing prices, stock prices, and natural gas prices. In each category, ensemble methods, neural networks, support vector machines, time series analysis, and regression analysis have been used. The study also presented an analysis of the strengths and weaknesses of the existing models and the key variables affecting their performance.

Chandra et al. [12] aimed to examine approaches to leverage time series methodology using Prophet for cryptocurrency price prediction and incorporating sentiment analysis from social media, and proposed a CNN-LSTM layer. The approach is trained on real-time financial data streams, and performance is evaluated using accuracy score, MAPE, and R^2 . In the experimental results, it has been observed that integrating sentiment analysis with CNN-LSTM provided high performance with an accuracy of 0.94 in the training data and 0.91 in the test data compared to the Prophet algorithm on Bitcoin closing prices.

Golnari et al. [13] focused on BTC and aimed to predict digital currency prices. They used Probabilistic Gated Recurrent Units (P-GRU). For evaluation, a year's worth of BTC price history, sampled at five-minute intervals, has been used. A pre-trained model on BTC data has been used to predict the prices of six major cryptocurrencies: Ethereum, Litecoin, Tron, Polkadot, Cardano, and Stellar. GRU, LSTM, time-distributed, bidirectional, and simple models have been analyzed. A separate model has been created for each cryptocurrency. A recall mechanism has been used for model optimization. The transfer learning paradigm has been adopted in the study.

Kamboj et al. [14] explained the evolution of cryptocurrencies and their global impact. Their aim has been to improve decision-making processes by identifying patterns and indicators in the crypto sector. Using Scikit-Learn and Pandas, they created an adaptive environment.

Kavithra et al. [15] performed cryptocurrency price prediction using deep learning techniques. Focusing on 20 cryptocurrencies, they utilized LSTM, GRU, Bi-Directional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM), and Hybrid LSTM-GRU methods, achieving high accuracy in price prediction. Additionally, the study offered strategies to guide users on whether to buy, sell, or hold cryptocurrencies daily. Data preprocessing has been performed using a Min-Max scaler.

Kawli et al. [16] aimed to examine the performance of iterative neural networks, deep learning neural networks, Bayesian regression, k-nearest neighbor, support vector machine, and other algorithms in predicting the prices of cryptocurrencies such as Bitcoin, Ethereum, Dogecoin, and Litecoin. Literature studies on price prediction using machine learning have been utilized, including studies on Non-Fungible Token (NFT) sales predictability, NFT sales price fluctuation prediction, gold price prediction, and silver price prediction. The study focused on comparing machine learning algorithms with high-dimensional features, time series analysis, and different statistical models. Market liquidity and stock market dynamics have been also analyzed in relation to prediction models.

Rajaei and Mahmoud [17] presented an RF model to predict short-term price jumps in the cryptocurrency market. Binance historical daily data from January 1, 2018, to December 31, 2021, has been used for model training, and the test set date range has been selected as January 2022 to October 2023. An oversampled training data set has been also used. Experimental results showed that using a 1% growth rate on the LSK/USDT test datasets for the periods October 1-31, 2023, July 1, 2023- September 30, 2023, and January 1, 2022-October 31, 2023, profits of 18%, 30%, and 68% have been obtained, respectively.

3. DATASET GENERATION

A dataset for the BTC/USDT symbol has been prepared using the Binance API. BTC is Bitcoin that is traded. USDT is a stable cryptocurrency related to the US dollar. BTC/USDT is a value that shows how much USDT (approximately how many US dollars) 1 Bitcoin is worth. BTC/USDT offers a long and continuous time series, which allows for more stable convergence in prediction models. The dataset contains 45.000 data points. BTCUSDT - 1-minute candlestick data has been retrieved sequentially from the Binance Klines API to reach a total target observation count 45.000. Data has been retrieved with a batch size of 1000 and the endtime has been shifted backward to create causal cumulative data. Derivative price features `close`, `open`, `high`, `low`, and `return_1` have been added. Gaps that might occur due to shift targets and technical indicators to be used in subsequent steps have been cleaned using `dropna()`. Additionally, technical features have been added.

Sentiment scores have been calculated using feedparser from Really Simple Syndication (RSS) feed sources including Google News (bitcoin/crypto search), CryptoPanic, CoinDesk, Cointelegraph, CryptoSlate, and Finbold. Titles and publication times have been retrieved from each source. `Published_at` times have been converted to UTC. News articles have been filtered to the time interval intersecting the price data's time window ($\text{min_time} \leq \text{published_at} \leq \text{max_time}$). News publication times have been rounded to the nearest minute using `floor('T')`. If multiple news articles were available in the same minute, the average compound has been used. A left join has been performed with the price data via `open_time`. For sentiment analysis, a Valence Aware Dictionary and sEntiment Reasoner (VADER) model has been used to generate a sentiment score for each news headline. VADER, which works at the sentence level using a dictionary-based approach, considers emotionally charged words, negative structures, and intensifiers, especially in short and concise expressions, to produce a `polarity_scores(title)['compound']` value. This value provides a single normalized score between -1 and +1. The average of the compound scores of the news headlines has been calculated for each minute, and the `sentiment_score` has been considered 0 for minutes without any news. To increase the numerical stability of the model, ensure faster convergence, and maintain scale fit between features, all input variables have been scaled to the 0–1 range using `MinMaxScaler`. Furthermore, since the distributions of the 1, 5, and 30-minute targets differed, each target has been normalized separately using its own min–max values; thus, the model has been able to learn each target in a balanced manner, and the predictions were able to be accurately returned to the actual scale.

The main reason for choosing short-term forecasting horizons of 1, 5, and 30 minutes in this study is that the proposed structure is designed not for long-term price forecasting, but for monitoring high-frequency market behaviors and supporting early warning mechanisms based on model errors.

Cryptocurrency markets, due to their 24/7 availability, high volatility, and frequent exposure to sudden regime changes, cause the loss of significant microstructural information on hourly or daily timescales. Longer time horizons can temporally mask short-term but critical price movements and sudden deteriorations in model performance.

Furthermore, the residual return-based risk and anomaly metrics (percentile-based bounds, VaR, and approximate threshold values) used in this study require a higher observation density to produce statistically significant results. In hourly or daily forecasting horizons, both the decrease in the number of observations and the increase in error accumulation limit the operational effectiveness of these metrics.

In this context, 1, 5, and 30-minute forecasting horizons;

- preserving the effects of the market microstructure,
- enabling local temporal monitoring of model errors, and
- generating early warning and risk signals without delay.

The attributes and descriptions of the dataset are given in Table 1.

Table 1. The attributes and descriptions

Attribute	Description
Open	The opening price of the relevant minute
High	The highest price recorded during that minute
Low	The lowest price recorded during that minute
Close	The closing price of the relevant minute
Volume	The trading volume (amount of BTC) in that minute
Close open	The difference between the opening and closing prices.
High low	The difference between the highest and lowest prices recorded.
SMA-15 (Simple moving average)	The arithmetic means the closing prices of the last 15 minutes.
EMA-15 (Exponential moving average)	The exponential moving average of the last 15 closing prices.
RSI-14 (Relative strength index)	14-period Relative Strength Index (0–100).
Volatility	Standard deviation of the last 15 closing prices.
Return 1	A measure of short-term momentum.
Sentiment score	Average of VADER compound sentiment scores of headings, aligned to open_time (UTC) minutes.
Target close 1	Closing price after 1 minute.
Target close 5	Closing price after 5 minutes.
Target close 30	Closing price after 30 minutes.

4. METHODOLOGY

The literature review revealed that LSTM and GRU methods are frequently used in time series problems for cryptocurrency forecasting [5,6,9,13,15]. Therefore, LSTM and GRU have been chosen as forecasting methods.

4.1. Long Short-Term Memory

LSTM, a type of recurrent deep learning algorithm, is quite significant. Its control flow is similar to that of a Recurrent Network Network (RNN) [18]. It can successfully manage information and data processing processes that propagate forward. An important feature is that, unlike traditional recurrent networks, the feedback loop in an LSTM network makes it possible to process individual data points and entire sequences. In this context, LSTM networks can be used in time series data processing and regression problems [19].

4.2. Gated Recurrent Unit

GRU is an RNN variant that combines entry and forget gates into a single update gate [20]. The update gate is responsible for determining which information should be kept, discarded, or updated with new data. The reset gate controls how much of the past information should be forgotten [21].

4.3. Transformer Architecture

The Transformer model is currently of significant importance as a revolutionary architecture in deep learning. Transformers have achieved remarkable success in various fields and have demonstrated their performance in Natural Language Processing (NLP), including language translation, sentiment analysis, and text summarization. Extending their applicability to image processing, transformers are used in areas such as image classification and object detection and are adapted for visual tasks. They are capable of capturing long-range dependencies and are frequently used in tasks such as predicting stock prices or weather patterns. The model architecture incorporates self-attention mechanisms, parallelism, and multi-heading attention. With self-attention mechanisms, the model weighs the importance of different parts of the input sequence when making predictions. The Transformer architecture is capable of highly parallelized

computation, making it more efficient than sequential models. It has faster training time. The model includes an encoder and a decoder. The encoder processes the input sequence by capturing contextual information. The decoder produces an output sequence. The self-attention mechanism is extended with multiple heads, allowing the model to focus on different aspects of the input sequence simultaneously. This enhances the ability to capture complex relationships. Transformers do not naturally understand the order of the input sequence. To address this problem, positional encodings are added to the input embedded vectors, and these encodings provide position information of the tokens in the sequence [22].

5. DEVELOPMENT OF THE MODELS

The last 20% of the data has been allocated as the test set, and the first 80% as the training set. The time order has been preserved. Model input sets have been created using the sliding window approach. The last 60 minutes of price, technical indicator, and sentiment information have been used for each prediction. Sequential sequences have been generated by sliding each window by 1 minute. With this structure, models have been trained to predict closing prices 1, 5, and 30 minutes later, based on a historical 60-minute context. The basic hyperparameter values of the developed prediction models are given in Table 2.

Table 2. Hyperparameter values

Method	Values
LSTM	“Epoch”: [64] “Batch Size”: [64]
GRU	“Earlystopping_Patience”: [3] “ReduceLronplateau_Factor”: [0.5] “ReduceLronplateau_Patience”: [2] “Learning Rate”: [0,0000078125 - 0.001]
Transformer Architecture	“T”: [60] “F”: [13] “D_Model”: [128] “Dropout”: [0.2] “Layernorm”: [128 – 256] “Learning_Rate”: [0.01] “Epoch”: [20] “Batch Size”: [64]

5.1. LSTM based Bitcoin Closing Price Prediction Models

During the model development phase, separate models have been trained for each prediction (after 1 minute, 5 minutes, and 30 minutes) using the same LSTM architecture. Instead of a single multi-output, three separate models have been used for the 1-minute, 5-minute, and 30-minute targets. This allowed each target to be optimized according to its own dynamics. This architecture has been designed with a 64-cell LSTM with time information transfer (return_sequences = True) in the first layer, a 32-cell LSTM in the second layer, 20% dropout between layers to prevent overfitting, and regression estimation with a single-neuron Dense layer at the output. The models have been trained with the Adam optimization algorithm and the MSE loss function and 10% validation split have been used in the training. In addition, with the Early Stopping mechanism, training has been stopped if the validation loss did not improve for three consecutive epochs, and the best weights have been preserved. The reason we initially used a 64-cell LSTM and then a 32-cell LSTM was to first capture high-level time series patterns and then compress them with smaller cells to learn more abstract representations. Outputs have been normalized using a separate MinMaxScaler for each target, and training has been completed. The predictions generated during the testing phase were subsequently subjected to an inverse transformation to recover their corresponding original price values. This allowed for direct comparison of 1-minute, 5-minute, and 30-minute Bitcoin closing price predictions with actual prices.

5.2. GRU based Bitcoin Closing Price Prediction Models

Without making any changes to the data side, the model has been developed using the same pipeline as in LSTM, but this time with GRU, a lightweight and computationally efficient modeling method.

Since the models developed with GRU provided the most successful prediction performance, various model development attempts have been made based on it. To improve model performance, instead of a fixed 80%–20% train–test split, a progressively expanding Walk-Forward Cross-Validation (WF-CV) has been implemented to maintain temporal dependence. The WF process has been started from the first 60% of the dataset, creating a total of 4 folds. In each fold, approximately 70% of the relevant time interval has been used for training and 30% for validation. For each fold, the model has been retrained only in its own training block and tested on the validation block. If the val_loss value did not improve for two consecutive epochs, the learning rate has been halved.

In model training, the EarlyStopping mechanism has been used, and if the val_loss value did not improve for three consecutive epochs, training has been terminated and the best weights have been restored. The Huber loss function has been preferred to reduce the effect of sudden jumps. It is assumed that news sensitivity is reflected in prices gradually over time, rather than instantly. The sentiment_score variable has been smoothed using an exponentially weighted moving average, and news from the last 10 minutes has been given higher weight with a SENTIMENT_EMA_SPAN of 10. Furthermore, based on the assumption that news is reflected in prices with a delay of a few minutes, the Exponential Moving Average (EMA) output has been shifted by 5 minutes (sentiment_decay_lag), allowing the model to learn about the relationship between news and delayed price effects. The sentiment_decay and sentiment_decay_lag columns have been included in the feature set.

5.3. Transformer based Bitcoin Closing Price Prediction Models

Transformer architecture has been chosen for development because it better models long-range dependencies (self-attention) and cross-feature interactions. However, the additional data-side adjustments adversely affected the error metrics; therefore, these modifications have been reversed, and the original dataset for the GRU/LSTM structures has been retained as the baseline model. Learnable positional embedding has been employed, and 60-length position vectors have been added to the model to integrate time information into the attention mechanism. The Transformer architecture used consists of a doubly repeating encoder block, each containing a LayerNorm, sub-layers, and residual linkage structure. Each encoder block has two sub-layers: Multi-Head Self-Attention (MHA) and position-wise feed-forward network (FFN). Since the number of heads is 4, attention calculations are performed in four parallel heads, and then these outputs are concated and reprojected with W_O (batch, T, 128) to preserve the original dimension. The output of this layer is added to the input via a residual link and passed to the next stage of the encoder. The attention score formula is given in (1).

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (1)$$

The Position-wise Feed-Forward Network (FFN) consists of a two-layer MLP applied independently at each time step. In the first stage, the input is passed through a Dense layer with 256 neurons and ReLU activation and then transformed into a higher-dimensional representation via a nonlinear transformation. A 20% dropout is then applied to prevent overlearning and increase the model's generalization capacity. In the final stage, a second Dense layer with 128 neurons is used to project the output back to the model dimension of 128. Thus, the FFN, operating independently at each time step, performs a structural transformation that increases the learning capacity of the Transformer encoder block by projecting the input into a 256-dimensional intermediate space and then back to its final 128-dimensional representation, while preserving the output dimension (batch, T, 128). In the encoder block, LayerNorm is applied to both sub-layers, and then the FFN output is summed using residual coupling to ensure stable and rapid convergence of the model along the depth. To transfer the encoder output to the regression head, a batch 128-dimensional representation is obtained by applying GlobalAveragePooling1D on the time domain, and in the final stage, a one-dimensional output predicting the price level is produced with the Dense layer. The Transformer architecture used is built on a backbone structure consisting of two encoder blocks; each block consists of LayerNorm, four-head Multi-Head Self-Attention, residual link, ReLU activated, and 0 position-wise FFN layers respectively. The training configuration includes the MSE loss function, Adam optimization, ReduceLROnPlateau which halves the learning rate when val_loss does not improve for two epochs, and the EarlyStopping mechanism which restores the best weights after three epochs of no improvement.

6. RISK MANAGEMENT

Monte Carlo scenarios have been generated for short-term price predictions; tail-risk metrics such as VaR and CVaR have been calculated. Position sizes have been dynamically adjusted using threshold and budget rules, and automatic warning mechanisms have been activated against sudden regime changes. Thus, investment decisions were made more sustainable by basing them not only on expected return but also on expected loss and tail-risk metrics. The Monte Carlo simulation has been run in the return space; prediction errors have been converted from price to residual return, and residual return values during the training period have been bootstrapped from two separate pools by regime separation (high volatility / normal volatility); in the testing phase, the pool corresponding to the volatility regime of the relevant minute has been used. Edge gating has been applied to increase cost awareness in trading decisions; positions have been not opened, or existing positions have been not maintained in cases where the round-trip transaction cost and additional safety margin have not been met. Position sizing has been done based on CVaR, and a risk budget and maximum position limit have been also defined. The integrity of the risk management process has been strengthened by generating log-based alerts for situations such as high volatility, VaR violations, and approaching the maximum position limit. With the implementation of the risk layer, the gross number of trades has been reduced, and expected loss per trade has been controlled. Edge gating eliminates unnecessary micro-trades, and tail risk is kept under control through CVaR-based sizing.

7. RESULTS AND DISCUSSION

The performance of the developed prediction models has been evaluated using RMSE, MAE and MAPE metrics. Since the problem is a regression problem, MAE, MAPE, and RMSE error metrics have been chosen as evaluation metrics. The formulas for the MAE (2) and MAPE (3) RMSE (4) metrics are given below.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y^{\wedge}_i| \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y^{\wedge}_i}{y_i} \right| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y^{\wedge}_i)^2} \quad (4)$$

7.1. Results of Models Developed Using the LSTM

The most successful results are presented in Table 3. The graph of the models is given in Figure 1.

Table 3. RMSE, MAE and MAPE values of the developed models with LSTM

Prediction horizon (min)	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	156.23	99.46	0.03
5	198.76	130.03	0.11
30	356.09	223.5	0.2

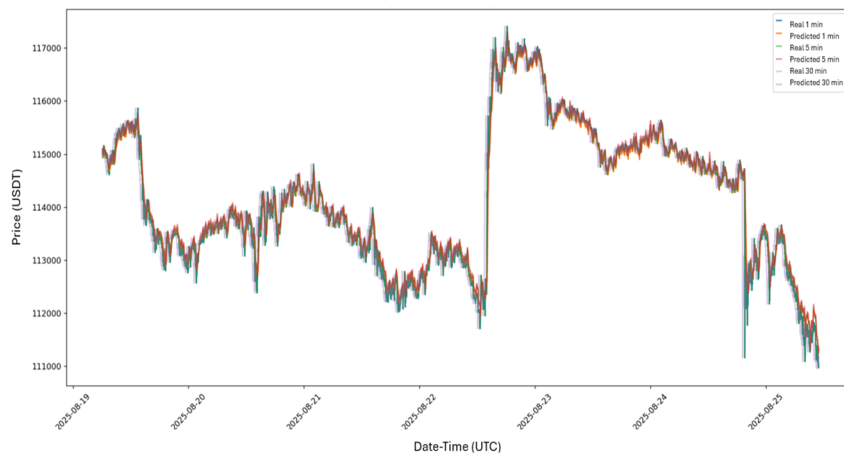


Figure 1. The real and forecast values of BTC/USDT price prediction model developed using LSTM

- It is clearly seen that the error rates decrease as the prediction horizon shortens.
- In 1-minute predictions, a high prediction performance has been achieved with RMSE (156.23), MAE (99.46), and MAPE (0.09%).
- Although the error rates increased slightly in 5-minute predictions, it can be said that the model exhibited strong performance in capturing the trend.
- In 30-minute predictions, the error values increased due to the natural volatility of the market but still remained at reasonable levels.

7.2. Results of Models Developed Using the GRU

Since the models developed with GRU provided the most successful prediction performance, various model development experiments have been carried out based on it. It has been observed that these experiments did not improve performance; on the contrary, they worsened it.

At a 1-minute prediction horizon, it has been observed that the RMSE metric produced approximately 20.4% higher error metric values, the MAE metric 33.0% higher error metric values, and the MAPE metric 28.6% higher error metric values. At a 5-minute prediction horizon, the differences decreased, with RMSE metric showing a 4.6% decrease and MAE metric a 6.0% decrease, while no change has been observed in the MAPE value. At a 30-minute prediction horizon, the differences in prediction performance between the experiments increased again. Results have been obtained that were approximately 9.1% higher in RMSE, 12.6% higher in MAE, and 15.8% higher in MAPE. In light of all this, the experiments conducted performed weaker than the basic model in terms of performance. The most successful results are presented in Table 4. The graph of the models is given in Figure 2.

Table 4. RMSE, MAE and MAPE values of the developed models with GRU

Prediction horizon (min)	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	125.15	76.68	0.07
5	178.22	110.13	0.1
30	348.71	219.2	0.19

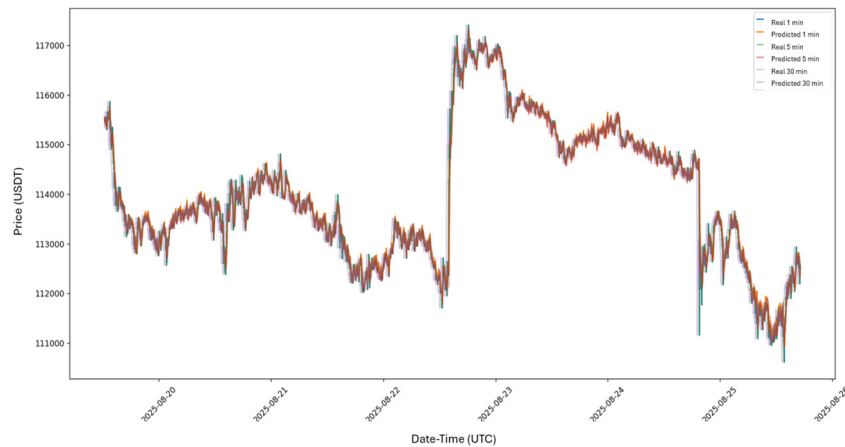


Figure 2. The real and forecast values of BTC/USDT price prediction model developed using GRU – Leakage Fixed

- The superior performance of the developed models has been achieved in the 1-minute predictions.
- The MAPE values of the models were lower than those of LSTM, indicating that model performance improved in GRU.
- These results show that GRU architecture provides significant gains in short and medium-term predictions, but only marginal improvement in the long term.
- It has been observed that these experiments did not improve performance; on the contrary, they worsened it. This increase in error metrics can be explained by several factors: the weakening of the signal's time-matching and amplitude due to the 5-minute delay of the sentiment score using EMA; and the decrease in the signal-to-noise ratio as a result of the model's capacity/regularization remaining the same despite the addition of two new features.

- The learning rate with ReduceLROnPlateau has been halved from the 3rd epoch onwards; in some periods, it dropped to very low levels with successive halvings.
- This situation led to insufficient learning, especially in the 5–30-minute horizons.

7.3. Results of Models Developed Using Transformer Architecture

The results of the developed models are presented in Table 5. The graph of the models is presented in Figure 3.

Table 5. RMSE, MAE and MAPE values of the developed models with transformer architecture

Prediction horizon (min)	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	195.63	112.39	0.1
5	336.69	226.45	0.2
30	591.96	409.83	0.37

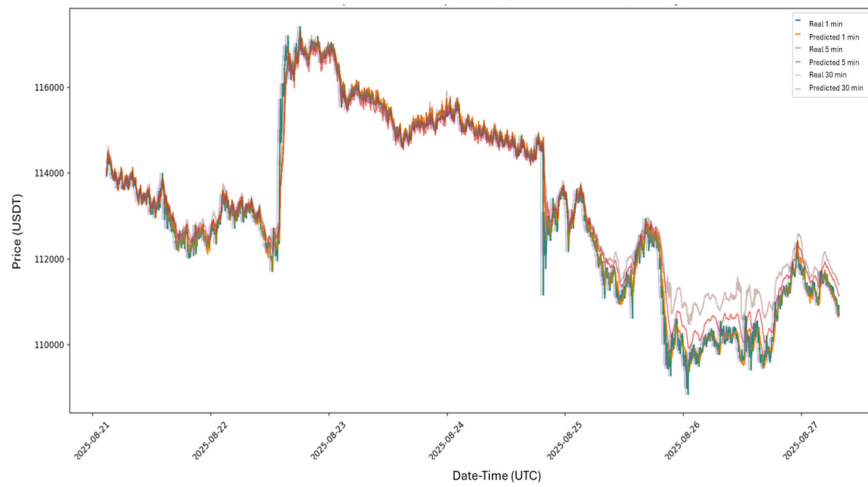


Figure 3. The real and forecast values of BTC/USDT price prediction model developed using Transformer Architecture – Leakage Fixed

- Prediction models developed using the Transformer architecture yielded poor prediction performance compared to GRU and LSTM models.
- The reasons for the Transformer model's failure are explained by readout dilution (GlobalAveragePooling1D), the absence of causal constraints (no look-ahead mask), and the lack of an optimization regimen.

7.4. Risk Management

A sample risk test has been conducted using GRU-based models, and the results obtained, along with performance and risk indicators values, are presented in Table 6. The values for Risk and Distribution Descriptors, used to evaluate risk signals, are presented in Table 7.

Table 6. Performance and risk indicators values

Performance and risk indicators	Description	Values
Cumulative PnL	Total profit or loss obtained	−0.77
Sharpe (annual)	A measure of an investment's risk-reward balance by dividing a portfolio's return by its risk	−76.09
Max Drawdown	The percentage of the maximum loss an investment experiences from a peak value before reaching a new high.	−0.77
Win-Rate	The ratio of profitable trades to total trades	%0.4
Median (edge)	The median value of returns per trade	0.052 bp
Number of trades (position change)	Number of position changes	1

Table 7. The values for risk and distribution descriptors

Risk and distribution descriptors	Description	Values
Residual return pool (n)	A fixed-length observation set consisting of the prediction errors generated by the model and covering the last n time steps.	35,903
Mean	Arithmetic means of values	0.000219 ($\approx$ 2.19 bp)
p1 / p99 (queues)	These represent the 1% and 99% percentiles, respectively, of the residual return distribution.	-0.2037% / +0.2256%
VaR95 range (sample alerts)	A risk measure calculated from the residual return distribution represents the maximum expected margin of error at a 95% confidence level.	71.66 – 287.20
RiskBudget (minutes)	Approximate minimum return level required for the strategy to be considered to have a significant advantage (edge)	50
Edge threshold (approx.)	An approximate threshold value derived from the residual return distribution and used to identify statistically significant deviations.	$\approx$ 30 bp (RT ~10bp + marj ~20bp)

In this round, since the dominant conditions were the edge remaining below the transaction cost and VaR95 exceeding the risk budget, the system chose to limit tail-risk by avoiding opening trades; thus, losses have been kept to a minimum while risk discipline has been maintained at a high level.

Overall, the predicted value results are in the range of [111,000–117,000], and since these are large six-digit numbers, MAPE decreases and MAE increases as the number gets larger. The most successful results have been obtained with short-term forecasting models. GRU achieved the best performance in RMSE and MAE values. LSTM, on the other hand, showed a high success rate with a MAPE value of 0.03. Transformer Architecture had a weaker forecasting performance compared to LSTM and GRU.

With the developed system,

- Investors are enabled to analyze market trends more accurately, protect themselves against sudden market changes, and increase their financial gains by making more informed investment decisions.
- A user-friendly interface has been provided with an easily accessible platform for individual and institutional investors.
- A model has been presented that can analyze large, multi-dimensional datasets such as historical price data, trading volume, market sentiment, and on-chain activity in cryptocurrency markets, and predict market movements and trends with high accuracy.

8. CONCLUSIONS

In today's economic world, cryptocurrency markets, which have emerged alongside developing technology, are experiencing very high trading volumes. However, these markets are dynamic because they depend on many different factors. This dynamism necessitates that investors take action by anticipating certain strategies. In this context, this study presents an innovative solution that will help analyze market trends and price dynamics, identify risk factors, and provide investors with predictions using big data analytics and advanced artificial intelligence algorithms. Short-term, medium-term, and long-term Bitcoin closing price prediction models have been developed using LSTM, GRU, and transformer architecture. Furthermore, Monte Carlo scenarios have been generated for short-term price forecasts; tail-risk measures such as VaR and CVaR have been calculated. Overall, the most successful results have been obtained with short-term forecasting models. GRU achieved the best performance in RMSE and MAE values. Future studies could expand this work in various ways to improve prediction performance. Firstly, different machine learning and statistics-based methods could maximize the accuracy of the study. Similarly, the use of different datasets is another important factor that could affect the applicability of the study. Additionally,

exploring ensemble modeling approaches is a significant action that could be implemented in the future. Finally, risk analysis studies could be expanded to include more variables. All of these are important elements that could be covered in future studies.

9. REFERENCES

1. Almeida, J. & Gonçalves, T.C. (2023). A systematic literature review of investor behavior in the cryptocurrency markets. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, 37, 100785.
2. Atree, M.K. & Tripathy, N. (2025). Cryptocurrency research: Bibliometric review and content analysis. *International Review of Economics & Finance*, 98, 103940.
3. John, D.L., Binnewies, S. & Stantic, B. (2024). Cryptocurrency price prediction algorithms: A survey and future directions. *Forecasting*, 6(3), 637-671.
4. Alnami, H., Mohzary, M., Assiri, B. & Zangoti, H. (2025). An integrated framework for cryptocurrency price forecasting and anomaly detection using machine learning. *Applied Sciences*, 15(4), 1864.
5. Asmat, G. & Maiyama, K.M. (2025). Bitcoin price prediction using N-BEATs ML technique. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 12(2), 1-8.
6. Kaur, R., Uppal, M., Gupta, D., Juneja, S., Arafat, S.Y., Rashid, J. & Alroobaea, R. (2025). Development of a cryptocurrency price prediction model: leveraging GRU and LSTM for Bitcoin, Litecoin and Ethereum. *PeerJ Computer Science*, 11, e2675.
7. Makri, E., Palaokrassas, G., Bouraga, S., Polychroniadou, A. & Tassioulas, L. (2025). Ethereum price prediction employing large language models for short-term and few-shot forecasting. *arXiv preprint arXiv:2503.23190*.
8. Mazinani, A., Davoli, L. & Ferrari, G. (2025). Deep learning algorithms for cryptocurrency price prediction: A comparative analysis. *Distributed Ledger Technologies: Research and Practice*, 4(1), 1-38.
9. Pandey, P. & Sharma, G. (2025). Effective price prediction of cryptocurrencies using CNN-based dual directional model. *Science & Technology Asia*, 201-219.
10. Kang, M., Hong, J. & Kim, S. (2025). Harnessing technical indicators with deep learning based price forecasting for cryptocurrency trading. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 660, 130359.
11. Saeed, N., Shafi, I., Pervez, S., Thompson, E.B., Castilla, A.K., Samad, M.A. & Ashraf, I. (2025). Intelligent decision making for commodities price prediction: Opportunities, challenges and future avenues. *Computational Economics*, 1-59.
12. Chandra, D., Tyagi, P., Gupta, R.S., Saxena, A.M. & Kharaliya, S. (2024). Cryptocurrency price prediction using machine learning. In *2024 2nd International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT)*, IEEE, 258-264.
13. Golnari, A., Komeili, M.H. & Azizi, Z. (2024). Probabilistic deep learning and transfer learning for robust cryptocurrency price prediction. *Expert Systems with Applications*, 255, 124404.
14. Kamboj, R., Jindal, A., Dubey, K. & Luthra, M. (2024). Cryptocurrency price prediction using machine learning. In *2024 4th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*, IEEE, 1-5.
15. Kavithra, S., Girishankar, V.P., Iniyan, G. & Logesh, B. (2024). Cryptocurrency price prediction through integrated forecasting techniques. In *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things (AIIoT)*, IEEE, 1-6.
16. Kawli, D.P., Chaudhari, A.S., Ingale, P.D., Telange, G.A. & Banik, A. (2024). Cryptocurrency price prediction using machine learning. *Asian Journal For Convergence in Technology (AJCT)*, 10(1), 19-23.
17. Rajaei, M. & Mahmoud, Q.H. (2024). A prediction model for short price jump in cryptocurrency market. In *2024 IEEE 14th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, IEEE, 0144-0150.
18. Özbek, A. (2022). Daily sea water temperature forecasting using machine learning approaches. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 307-318.
19. Chen, X. & Long, Z. (2023). E-commerce enterprises financial risk prediction based on FA-PSO-LSTM neural network deep learning model. *Sustainability*, 15(7), 5882.
20. Uluocak, İ. (2025). Comparative study of emission prediction using deep learning models. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 40(2), 337-346.

21. Basavarajaiah, S. & Garudachar, R. (2024). Prediction of global ionospheric TEC using attention based bidirectional long short-term memory and gated recurrent unit. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(4), 2797-2808.
22. Mozaffari, L. & Zhang, J. (2024). Predictive modeling of stock prices using transformer model. In *Proceedings of the 2024 9th International Conference on Machine Learning Technologies*, 41-48.

100Cr6 Malzemenin Sert Tornalama İşleminde Pt Cinsinden Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi

Ayhan ETYEMEZ^{1,a}, Kaan Can BAŞ^{1,b}

¹Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-8188-2743; ^bORCID: 0000-0002-8063-2897

Makale Bilgileri

Geliş : 24.08.2025

Kabul : 23.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1771047

Sorumlu Yazar

Kaan Can BAŞ

kaancanbas@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Sert tornalama

Yüzey pürüzlülüğü

Pt

Alın tornalama

Atf şekli: ETYEMEZ, A., BAŞ, K.C., (2026). 100Cr6 Malzemenin Sert Tornalama İşleminde Pt Cinsinden Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 299-308.

ÖZ

Bu çalışmada sertleştirilmiş çeliklerin talaşlı imalatında taşlama işlemine bir alternatif olarak sert tornalama işleminin uygulanabilirliğine katkı sağlamak amaçlanmıştır. Tam faktöriyel deney dizaynı ile 55 HRC sertlikte 100Cr6 çelikten numuneler üzerinde sert tornalama işlemi yapılarak Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörler incelenmiştir. Optimum faktör seviyelerinin belirlenmesinde sinyal-gürültü oranı (S/N) yöntemi kullanılmıştır. Faktörlerin etki seviyeleri ise varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir. İncelenen etki faktörleri sırasıyla kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe yarıçapı (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönüdür.

Dış çap tornalama işleminde faktörlerinin optimum seviyeleri aynı sıra ile 93°, 0,4 mm, 0,05 mm ve -Z yönü (aynaya doğru) dur. Faktörlerin etki düzeyleri aynı sıra ile %46,39, %3,17, %0,97 ve %0,04'tür.

Alın tornalama işleminde ise faktörlerin optimum seviyeleri aynı sıra ile 100°, 0,8 mm, 0,05 mm ve +X yönüdür (dönme eksenine doğru). Faktörlerin etki düzeyleri aynı sıra ile %20,99, %24,16, %2,81 ve %1,31'dir.

Investigation of Factors Affecting Pt Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Material

Article Info

Received : 24.08.2025

Accepted : 23.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1771047

Corresponding Author

Kaan Can BAŞ

kaancanbas@gmail.com

Keywords

Hard turning

Surface roughness

Pt

Face turning

How to cite: ETYEMEZ, A., BAŞ, K.C., (2026). Investigation of Factors Affecting Pt Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Material. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 299-308.

ABSTRACT

This study aims to contribute to the applicability of hard turning as an alternative to grinding in the machining of hardened steels. Using a full factorial experimental design, hard turning was performed on samples of 100Cr6 steel with a hardness of 55 HRC, and the factors affecting surface roughness in terms of Pt were investigated. The signal-to-noise ratio (S/N) method was used to determine the optimal factor levels. The effect levels of the factors were identified using analysis of variance (ANOVA). The investigated effect factors are, in order, the cutting edge angle (KAPR), the cutting edge radius (RE), the cutting depth (Ap), and the feed direction.

In the external diameter turning process, the optimum levels of the factors are, in the same order, 93°, 0,4 mm, 0,05 mm, and -Z direction (towards the mirror). The effect levels of the factors are, in the same order, 46,39%, 3,17%, 0,97%, and 0.04%.

In face turning, the optimal levels of the factors are 100°, 0,8 mm, 0,05 mm, and +X direction (toward the rotation axis), respectively. The effect levels of the factors are 20,99%, 24,16%, 2,81%, and 1,31%, respectively.

1. GİRİŞ

Otomotiv, havacılık, robotik sistemler ve medikal teknolojiler başta olmak üzere, insan yaşamını kolaylaştıran modern makinelerin neredeyse tamamında sertleştirilmiş çelik malzemelerden üretilmiş kritik iş parçaları bulunmaktadır. Bu bileşenler, kol saati mekanizmalarında kullanılan mikro elemanlardan, gemi krank milleri, güç aktarma şaftları veya rulmanlar gibi tonlarca ağırlıktaki makine elemanlarına kadar geniş bir yelpazede çeşitlilik göstermektedir. Söz konusu parçalar, makine üzerindeki fonksiyonlarına bağlı olarak yüksek statik ve dinamik yüklere maruz kalmakta ve özellikle aşınmaya karşı üstün direnç göstermek zorundadır [1-4]; bu gereklilikler nedeniyle belirli sertlik değerlerine sahip çeliklerin kullanımı mühendislik uygulamalarında zorunlu hale gelmektedir. Talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilen bu makine parçalarının üretim rotasında, sertleştirme işleminin uygulanacağı aşama, imalat maliyeti ve parça kalitesi açısından belirleyici bir faktördür. İmalat sürecinin planlanmasında; işlenebilirlik, operasyonel maliyetler, ısıl işlemin parça boyutlarında ve geometrisinde yaratacağı olası distorsiyonlar ile malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerindeki değişimler bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Ayrıca parça geometrisinin tezgaha bağlanabilirliği ile eş merkezlilik, salgı, diklik ve yüzey pürüzlülüğü gibi hassas geometrik toleransların sağlanabilmesi gerekliliği, sertleştirme öncesi ve sonrası uygulanacak yöntemlerin seçiminde etkin rol oynamaktadır [5-8]. Günümüzde uygun kesme şartlarının sağlanması durumunda tornalama, frezeleme ve delik delme gibi talaşlı imalat yöntemlerinin tamamı sertleştirilmiş çeliklere uygulanabilmektedir.

Hassas ölçülere sahip silindirik parçaların imalatında sertleştirme işlemi sonrası sert tornalama işlemi ve taşlama işlemi en yaygın uygulanan işlemlerdir. Sert tornalama işlemi ve taşlama işleminin birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Parçanın imal adedi, boyutları, boyutsal ve geometrik toleransları, sertlik miktarı ve malzeme özellikleri, müşteri özel istekleri, gerek duyulan torna veya taşlama tezgahının amortisman ve işletme maliyetleri, imalat hızı gibi faktörler değerlendirilerek parçanın imalat operasyonlarına karar verilir. Endüstriyel talaşlı imalatla, müşterinin istediği kaliteyi, en hızlı şekilde ve en az maliyet ile imal etmek hedeflenir [9]. Taşlama işlemi, tezgahların yüksek amortisman maliyeti, ayar süresinin uzun olması, işletme maliyeti ve sarf giderlerinin yüksek maliyeti karşısında ancak sipariş hacminin yüksek olduğu durumlarda elverişli olacaktır. Bu gibi durumlarda sert tornalama işlemi çok daha ekonomik ve hızlı bir çözüm olabilmektedir [10].

Galoppi ve arkadaşları [11] hazırladıkları çalışmalarında kaplamalı ve kaplamasız kübik bor nitrür (CBN) uçların 100Cr6 malzemenin sert torna işlemindeki performanslarını incelemişlerdir. Sonuçlara göre kaplamalı uçlarda aşınma gecikerek kesici takım ömrü daha uzundur. Kaplama tamamen aşındıktan sonra krater oluşumu başlamaktadır. Kesici takım ömrüne kesme hızının, ilerleme hızından daha önemli bir etken olduğunu ortaya koymuşlardır.

Benga ve Abrao [12] hazırladıkları çalışmalarında 100Cr6 malzemenin sert torna işleminde seramik ve polikristalin kübik boron nitrit (PCBN) kesici uçların takım ömürlerini ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini karşılaştırmıştır. Sonuçlara göre PCBN uçlar seramik uçlardan daha iyi bir takım ömrü sağlar. Yüzey pürüzlülüğüne ise hem seramik uçlarda hem de PCBN uçlarda en büyük etmen ilerleme hızıdır.

Chou ve Song [13] çalışmalarında kesici takım köşe radyusunun sert tornalama işlemindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre daha büyük uç radyuslu kesici takımlar ile daha iyi yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Artan kesici takım köşe radyusu ile birlikte teğetsel kesme kuvveti de bir miktar artmaktadır. Aşınmamış yeni takımlarda beyaz tabaka oluşumu yalnızca 0,3 milimetre/devir (mm/dev) gibi yüksek ilerleme değerinde oluşmuştur. Aşınmış takımlarda ise 0,05 mm/dev gibi düşük ilerlemelerde bile beyaz tabaka oluşumu meydana gelmektedir.

Samardžiova ve Neslušan [14] 100Cr6 çeliğinin sert tornalanması üzerine yaptıkları çalışmada, silici (wiper) geometrilili ve konvansiyonel radyuslu kesici uçların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonuçları, silici geometriye sahip uçların, konvansiyonel uçlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sunduğunu ortaya koymuştur.

Kesici takım yanalma açısının kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelenen bir çalışmada 93° yanalma açısı ile 107,5° yanalma açısına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Ancak küçük yanalma açısı ile kesme kuvvetleri daha yüksektir [15].

Chinchani ve arkadaşları [16] çalışmalarında sert tornalama işleminde kuru kesme, su bazlı kesme sıvısı ve kokonat yağlı bir kesme sıvısı ile testler gerçekleştirip yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre düşük kesme hızlarında kuru kesme ile daha iyi yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında ise kokonat

bazlı kesme sıvısı kuru kesme ve su bazlı kesme sıvısına göre daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır. Soğutma yöntemi her ne olursa olsun, yüzey pürüzlülüğü artan kesme hızı ile birlikte hızla düşerken, kesme hızı 150-160 metre/dakika (m/dak) kesme hızını aştığında yüzey pürüzlülüğü tekrar yükselmektedir. Kuru kesme durumunda daha belirgin olmak üzere yüzey pürüzlülüğünü en çok ilerleme hızı, daha sonra talaş derinliği ve son olarak kesme hızı etkilemektedir.

Rulman çeliklerinin birçok çeşidi olmasına rağmen 100Cr6 çeliği, yüksek sertlik, aşınma direnci ve yorulma mukavemeti özellikleri ile en sık tercih edilenidir. Rulmanlardaki kullanımının dışında özellikle otomotiv ve makine imalatında olmak üzere kritik parçaların imalatında vazgeçilmez niteliktedir. Literatürde 100Cr6 malzemenin sert tornalama işlemi ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Ancak alın tornalama işlemi, ilerleme yönü ve toplam profil yüksekliği (Pt) cinsinden yüzey kalitesi daha önce sert tornalama işleminin çalışılmamış yönleridir. Endüstride talaşlı imalat ile üretilen parçalarda Pt yüzey kalitesi kriterine sıkça rastlanmaktadır. Alın tornalama ise talaşlı imalatla hemen her tornalama işleminin olmazsa olmaz işlemi iken literatürde incelenmemiş bir sert tornalama işlemidir.

Bu çalışmada yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde, literatürde yaygın olarak kullanılan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) yerine, Toplam Profil Yüksekliği (Pt) parametresinin tercih edilmesinin temelinde, sertleştirilmiş çeliklerin çalışma koşulları ve hasar mekanizmaları yatmaktadır. Fiziksel açıdan değerlendirildiğinde Ra parametresi, yüzeydeki sapmaların aritmetik ortalamasını aldığından, yüzey bütünlüğünü tehdit eden anlık derin vadileri veya sivri tepeleri maskeleye eğilimindedir. Oysa 100Cr6 gibi dinamik ve çevrimsel yüklere maruz kalan rulman çeliklerinde, yüzeydeki en derin vadi (maksimum çukur derinliği), bir gerilme yığılması (stress concentration) noktası gibi davranarak yorulma çatlaklarının başlangıcına zemin hazırlamaktadır [17-19]. Benzer şekilde, yüzeydeki en yüksek tepe noktaları da montaj hassasiyetini bozmakta ve temas halindeki yüzeylerde abrasif aşınmayı hızlandırmaktadır. Bu nedenle, profilin en tepe ve en dip noktası arasındaki mutlak mesafeyi ifade eden Pt parametresi; parçanın yorulma ömrü, sızdırmazlık kabiliyeti ve tribolojik performansı hakkında Ra parametresine kıyasla fiziksel gerçekliğe çok daha yakın bir gösterge sunmaktadır [20].

Bu çalışma, bu özgün yönleri ile literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Çalışmanın bir hedefi de alın yüzeyinde 5 mm'lik bir ölçüm mesafesinde toplam profil yüksekliği (Pt) 2µm'den daha az olan yüzeyler elde edilmesidir. Bu seviyede bir yüzey kalitesinin taşlama işlemine alternatif olarak sert torna ile elde edilmesi endüstri için katma değerli olacaktır. Çünkü taşlama işleminde beyaz tabaka oluşumu sert torna işleminden daha fazla olması sebebiyle komponentin yorulma ömrünün kısaldığı bilinmektedir. Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğü önemli bir kriter olsa da komponentin karmaşık formu ve talep edilen geometrik toleranslar taşlama işleminin uygulanabilirliğini zorlaştırmakta, çoklu operasyonlar gerektirmekte veya maliyet artırmaktadır [20,21]. Bu şartlarda sert tornalama avantajlı bir alternatif olabilmektedir. Bu makale 100Cr6 çeliğin sert tornalama işleminde Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü kriterine etki eden faktörlerin optimum seviyelerini, faktörlerin etki düzeylerini ve sert torna işlemi ile elde edilebilecek yüzey kalitesi seviyesini sunmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, sert tornalama deneyleri için 100Cr6 çelik kullanılmıştır. Deney numuneleri 37 mm çapında ve 70 mm boyunda silindir geometride hazırlanıp ısıtma işlemi ile 55 HRC sertlik değerine sertleştirilmiştir. 100Cr6 çeliğin ISO 683-17 standardına göre kimyasal içeriği Çizelge 1'de farklı uluslararası standartlardaki tanımlanması ise Çizelge 2'de sunulmuştur [21].

Çizelge 1. ISO 681-17 standardına göre 100Cr6 malzemenin kimyasal içeriği

	Karbon (%)	Silisyum (%)	Mangan (%)	Fosfor (%)	Kükürt (%)	Krom (%)	Molibden (%)	Alüminyum (%)	Bakır (%)	Oksijen (%)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	O
Minimum	0,93	0,15	0,25	-	-	1,35	-	-	-	-
Maksimum	1,05	0,35	0,45	0,025	0,015	1,60	0,10	0,050	0,30	0,0015

Çizelge 2. 100Cr6 malzemenin uluslararası standartlardaki tanımlanması

Avrupa EN	Almanya DIN	W.n.	Fransa AFNOR	İspanya UNE	B.K. B.S.	ABD AISI/SEA
100Cr6	100Cr6	1.3505	100Cr6	F1310	535A99	52100

Sert tornalama deneyleri Hwacheon Cutex 160A MC CNC torna tezgahında kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 100 m/dak sabit kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı sabit parametre olarak uygulanmıştır. Deneylerde kesici takım olarak yalnızca uç radyus ölçüleri (0,4mm ve 0,8mm) birbirinden farklı olan özdeş CBN kesici uçlar (DCMW 11T308 AF-2 HPCBN ve DCMW 11T304 AF-2 HPCBN) kullanılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı ile 36 deney dış çap tornalama işlemi için 36 deney de alın tornalama işlemi için gerçekleştirilmiştir. Alın tornalama deneylerinde uygulanan kesme şartları ve seviyeler Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Alın ve dış çap tornalama deneylerinde uygulanan kesme şartları ve seviyeler

Seviye	Kater kesme kenarı açısı (KAPR)	Kesici uç köşe radyusu (RE)	Kesme derinliği (Ap)	İlerleme yönü
1	93°	0,4 mm	0,05 mm	-X, -Z
2	100°	0,8 mm	0,10 mm	+X, +Z
3	107,5°	-	0,15 mm	-, -

Deneylerde kullanılan kesici uçların boyutsal ve geometrik özellikleri Çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Deneysel çalışmada kullanılan kesici uçların özellikleri

DCGW 11T304

DCGW 11T308

Köşe radyusu (RE)	0,4 mm	0,8 mm
Kesme kenarı boyu (L)	11,6 mm	11,6 mm
Etkin kesme kenar boyu (LE)	2,5 mm	2,1 mm
İç teğet daire çapı (IC)	9,52 mm	9,52 mm
Kesici uç kalınlığı (S)	3,97 mm	3,97 mm
Boşluk açısı	7°	7°

Deneylerde kullanılan katerlerin boyutsal ve geometrik özellikleri Çizelge 5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. Deneysel çalışmada kullanılan katerlerin özellikleri

SDJCR 2525M 11

SDXCR 2525M 11

SDHCR 2525M 11

Takım kesme kenarı açısı KAPR)

93°

100°

107,5°

Maksimum bağlama boyu (OHX)

24,4 mm

24,4 mm

24,4 mm

Takım tam boyu (LF)

150 mm

150 mm

150 mm

Fonksiyonel genişlik (WF)

32 mm

32 mm

32 mm

Fonksiyonel yükseklik (HF)

25 mm

25 mm

25 mm

Takım shaft genişliği (B)

25 mm

25 mm

25 mm

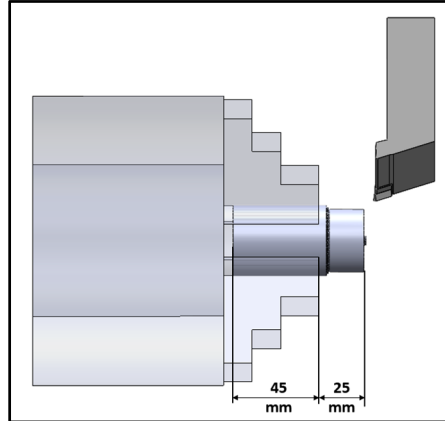
Takım shaft yüksekliği (H)

25 mm

25 mm

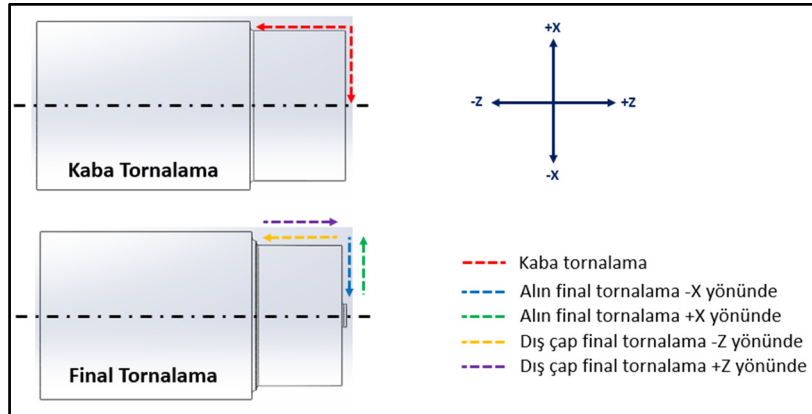
25 mm

Numune parçalar Şekil 1’de gösterildiği gibi 25 mm’lik kısmı dışarda kalacak şekilde 45 mm mesafeden 3 ayaklı ayna ile sıkılarak rijit bir bağlama sağlanmıştır.



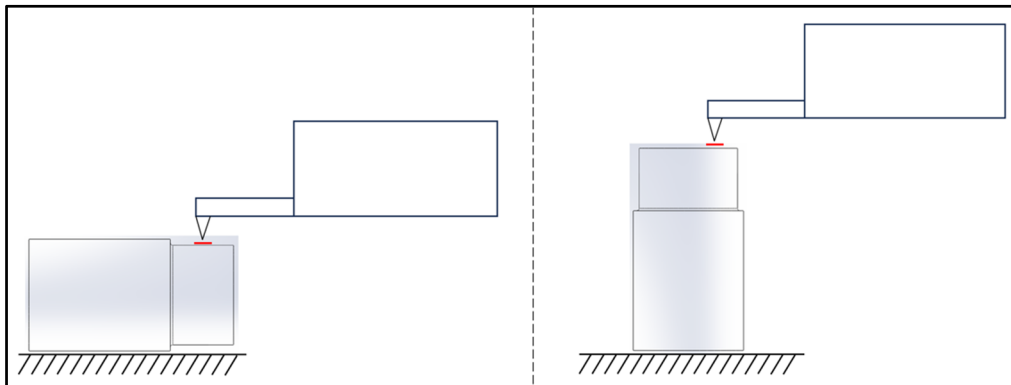
Şekil 1. Numune bağlama şematik gösterimi

Deney sonuçlarının malzemenin yüzeye yakın bölgelerindeki olası inklüzyonlardan ve geometrik kusurlardan etkilenmemesi için Şekil 2’de gösterildiği gibi önce kaba tornalama sonra final tornalama yapılmıştır. Yine Şekil 2’de deneylerde uygulanan farklı ilerleme yönleri renkli oklar ile tarif edilmiştir. Alın tornalama işlemi için kesme hızını sabit tutmak amacıyla G96 NC kodu ile programlama yapılmıştır.



Şekil 2. Tornalama işlemlerinin şematik gösterimi

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü Taylor Hobson Intra Touch yüzey pürüzlülük ve profil ölçme cihazı ile yapılmıştır. Dış çap yüzeyi pürüzlülük ölçümü sert tornalama yapılan yüzeyin orta bölgesinden 5 mm’lik değerlendirme boyu ile yapılmıştır. Alın yüzeyi pürüzlülük ölçümü ise Ø15 ile Ø25 arasında 5 mm’lik değerlendirme boyu ile yapılmıştır. Şekil 3’te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Yüzey pürüzlülük ölçüm bölgeleri şematik gösterimi

3. BULGULAR

3.1. Alın Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Alın tornalama deney numuneleri üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Pt yüzey pürüzlülük değerleri 0,91 - 4,38 μm arasındadır.

Çizelge 6. Alın tornalama deneyleri yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Deney no	Pt (μm)	Deney no	Pt (μm)
1	2,85	19	1,05
2	4,38	20	1,48
3	4,32	21	1,30
4	4,17	22	1,13
5	4,09	23	1,20
6	2,77	24	1,15
7	1,52	25	1,70
8	0,91	26	2,44
9	1,87	27	2,83
10	0,96	28	1,29
11	1,11	29	1,17
12	1,10	30	2,42
13	1,74	31	1,97
14	1,62	32	1,88
15	1,44	33	2,13
16	1,60	34	1,14
17	1,53	35	2,01
18	1,69	36	2,89

3.2. Dış Çap Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Dış çap tornalama deney numuneleri üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Çizelge 7'de sunulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Pt yüzey pürüzlülük değerleri 1,23 - 3,14 μm arasındadır.

Çizelge 7. Dış çap tornalama deneyleri yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Deney no	Pt (μm)	Deney no	Pt (μm)
1	1,48	19	1,67
2	1,43	20	2,33
3	1,53	21	2,16
4	1,34	22	2,35
5	1,46	23	2,30
6	1,37	24	2,55
7	1,32	25	1,41
8	1,59	26	1,51
9	1,82	27	1,62
10	1,89	28	1,26
11	1,75	29	1,96
12	1,74	30	1,47
13	3,14	31	1,77
14	1,23	32	2,02
15	2,12	33	1,97
16	2,00	34	1,30
17	2,28	35	1,58
18	2,29	36	1,52

3.3. Sinyal Gürültü Oranları ve En İyi Seviyeler

Tam faktöriyel deney tasarımı ile elde edilen sonuçlar Taguchi'nin sinyal-gürültü oranı (S/N) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın hedefi en iyi yüzey kalitesini elde etmek olduğundan S/N oranının hesaplanması için “en küçük en iyi” formülü uygulanmıştır [22].

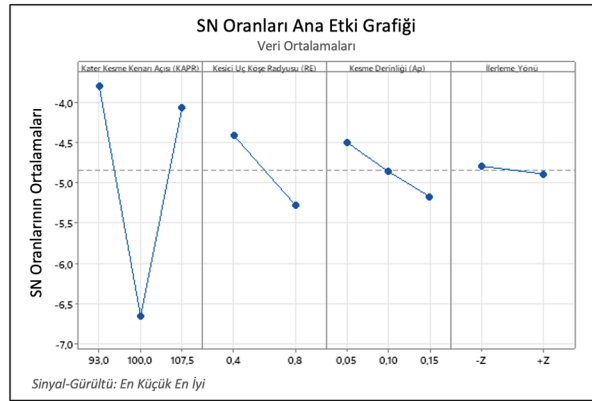
$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

y_i : deney sonucu ölçülen değer
 n : deneyin tekrar sayısı

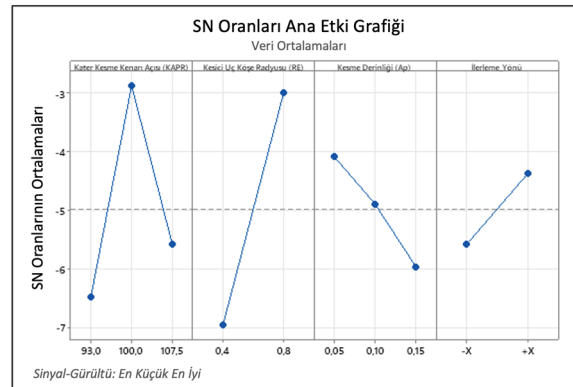
S/N oranları 4 etki parametresinin her seviyesi için analiz edilmiştir. En yüksek S/N oranını veren seviyeler hem düşük ortalama yanıtı hem de düşük değişkenliği gösterir. Bu şu anlama gelir;

- Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ne kadar düşükse, S/N oranı o kadar yüksektir.
- Tekrarlanan deneyler arasındaki yüzey pürüzlülük değişkenliği ne kadar düşükse S/N oranı o kadar yüksektir.

Dolayısıyla yüksek S/N oranı iyidir ve tutarlı şekilde düşük ölçümler yapıldığını gösterir. Dış çap tornalama deneylerinin yüzey pürüzlülüğü için S/N oranı grafikleri Şekil 4'te alın tornalama deneylerinin yüzey pürüzlülüğü için S/N oranı grafikleri ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulan Sinyal-Gürültü (S/N) analizleri incelendiğinde, 100Cr6 malzemenin sert tornalama işleminde hedeflenen minimum Pt yüzey pürüzlülüğüne ulaşmak için dış çap ve alın tornalama operasyonlarının birbirinden farklı kesme dinamiklerine sahip olduğu görülmektedir. Dış çap tornalamada yüzey kalitesini belirleyen en baskın faktör kater kesme kenar açısı olup optimum koşullar 93° açı ve 0,4 mm uç radyusu ile sağlanırken; alın tornalama işleminde süreç daha çok kesici uç radyusunun etkisi altındadır ve optimum koşullar 100° açı ve 0,8 mm uç radyusu seviyelerinde gerçekleşmiştir. Her iki operasyonda da kesme derinliğinin minimum seviyede (0,05 mm) tutulması ortak optimum koşul olsa da çalışma bulguları Pt <2 µm hedefine kararlı bir şekilde ulaşılabilmesi için kesici uç geometrisinin ve yavaşma açısının operasyon türüne özgü olarak ayrı ayrı optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.



Şekil 4. Dış çap tornalama deneyleri Pt yüzey pürüzlülüğü SN oranı



Şekil 5. Alın tornalama deneyleri Pt yüzey pürüzlülüğü SN oranı

Dış çap tornalama işleminde Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler Çizelge 8’de, alın tornalama işleminde Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler ise Çizelge 9’da gösterilmiştir. Dış çap tornalama işleminde kater kesme kenar açısı (KAPR) için optimum seviye 93° iken alın tornalama işleminde 100°’dir. Dış çap tornalama işleminde kesici uç köşe radyusu (RE) için optimum seviye 0,4 mm iken alın tornalama işleminde 0,8 mm’dir. Her iki tornalama işleminde de kesme derinliği (Ap) için optimum seviye 0,05 mm’dir. Dış çap tornalama işleminde ilerleme yönü için optimum seviye -Z yönü iken alın tornalama işleminde +X yönüdür.

Çizelge 8. Dış çap tornalama optimum seviyeleri

Faktörler	Pt
Kater kesme kenar açısı (KAPR)	93°
Kesici uç köşe radyusu (RE)	0,4
Kesme derinliği (Ap)	0,05
İlerleme yönü	-Z

Çizelge 9. Alın tornalama optimum seviyeleri

Faktörler	Pt
Kater kesme kenar açısı (KAPR)	100°
Kesici uç köşe radyusu (RE)	0,8
Kesme derinliği (Ap)	0,05
İlerleme yönü	+X

3.4. Varyans Analizi (Analyses of Variance – ANOVA)

Faktörlerin etki seviyelerinin belirlenebilmesi için varyans analizi Minitab 22 istatistik yazılımında gerçekleştirilmiştir [23]. Varyans analizi sonucundaki P değeri 0,05’ten (%95 önem seviyesinden) küçük ise faktörün yanıt üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi var demektir. Dış çap tornalama işlemi için varyans analizi sonuçları Şekil 6’da sunulmuştur. Dış çap tornalama işleminde yüksek etkiye sahip faktör kater kesme kenarı açısıdır ($P < 0,05$). Kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Pt yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %46,39, %3,17, %0,97 ve %0,04’tür.

Varyans Analizi							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	3,03222	46,39%	3,03222	1,51611	13,61	0,000
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	0,20703	3,17%	0,20703	0,20703	1,86	0,183
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,06365	0,97%	0,06365	0,03182	0,29	0,754
İlerleme_Yönü	1	0,00234	0,04%	0,00234	0,00234	0,02	0,886
Hata	29	3,23165	49,44%	3,23165	0,11144		
Toplam	35	6,53687	100,00%				

DF: Serbestlik derecesi, Seq SS: Ardışık Kareler Toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş Ortalama Kareleri, F-Değeri: İstatistik Değeri, P-Değeri: Olasılık Değeri

Şekil 6. Dış çap tornalama varyans analizi sonuçları

Alın tornalama işlemi için varyans analizleri ise Şekil 7’de sunulmuştur. Alın tornalama işleminde ise yüksek etkiye sahip faktörler kesici uç köşe radyusu (RE) ve kater kesme kenarı açısı (KAPR) dır. ($P < 0,05$). Kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Pt yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %20,99, %24,16, %2,81 ve %1,31’dir.

Varyans Analizi							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	7,1803	20,99%	7,1803	3,5901	6,00	0,007
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	8,2656	24,16%	8,2656	8,2656	13,81	0,001
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,9612	2,81%	0,9612	0,4806	0,80	0,458
İlerleme_Yönü	1	0,4467	1,31%	0,4467	0,4467	0,75	0,395
Hata	29	17,3586	50,74%	17,3586	0,5986		
Toplam	35	34,2124	100,00%				

DF: Serbestlik derecesi, Seq SS: Ardışık Kareler Toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş Ortalama Kareleri, F-Değeri: İstatistik Değeri, P-Değeri: Olasılık Değeri

Şekil 7. Alın tornalama varyans analizi sonuçları

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

- Dış çap tornalama ve alın tornalama işleminde Pt cinsinden en iyi yüzey kalitesi için optimum koşulların aynı olmadığı ortaya koyulmuştur.
- Dış çap tornalama işleminde optimum seviyeler kater kesme kenar açısı (KAPR) için 93°, kesici uç köşe radyusu için 0,4 mm ve kesme derinliği için 0,05 mm ve ilerleme yönü için -Z yönü olarak tespit edilmiştir.
- Alın tornalamada işleminde optimum seviyeler kater kesme kenar açısı (KAPR) için 100°, kesici uç köşe radyusu için 0,8 mm ve kesme derinliği için 0,05 mm ve ilerleme yönü için +X yönü olarak tespit edilmiştir.
- Dış çap tornalama işleminde Pt yüzey pürüzlülüğüne yüksek etkiye sahip faktör kater kesme kenarı açısı (KAPR)'dır ($P<0,05$). Kater kesme kenarı açısının (KAPR) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %46,39'dur.
- Alın tornalama işleminde Pt yüzey pürüzlülüğüne yüksek etkiye sahip faktörler kesici uç köşe radyusu (RE) ve kater kesme kenarı açısı (KAPR)'dır. ($P<0,05$) Kesici uç köşe radyusunun (RE) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %24,16'dır. Kater kesme kenarı açısının (KAPR) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %20,99'dur.
- Çalışmanın hedefi olan birincil profil yüksekliği $Pt\leq 2 \mu m$ yüzey kalitesi sert tornalama işlemi ile elde edilmiştir.
- Sert tornalama, uygun parametrelerle taşlama işlemine ekonomik bir alternatif olabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Ambhore, N., Naranje, V. & Shelke, S. (2025). Machining performance evaluation in turning of hardened steel using machine learning. *Materials and Manufacturing Processes*, 40(14), 1935-1942.
2. Mallick, R., Kumar, R., Panda, A. & Sahoo, A.K. (2023). Current status of hard turning in manufacturing: Aspects of Cooling Strategy and Sustainability. *Lubricants*, 11(3), 108.
3. Demirdöğen, M.F., Kılıç, S. ve Öztürk, F. (2022). Yüzey pürüzlülüğünün tahmininde farklı yöntemlerin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 531-542.
4. Basmacı, G., Kirbaş, İ., Ay, M. & Peker, M. (2018). Optimization and influence of cutting parameters on surface roughness during turning of ASTM B574 (Hastelloy C-22) using a hybrid of Taguchi and RSM methods. *Sakarya University Journal of Science*, 22(2), 761-771.
5. Kamer, M.S. & Uzay, Ç. (2024). Investigation of the effect of CNC milling cutting process on the tensile test of PLA samples produced using two different 3D printers with the FDM method. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(3), 599-608.
6. Ulutan, D. (2020). True variable-depth milling of nickel-based alloy IN-718. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 583-592.
7. Ay, M. & Basmacı, G. (2016). Investigation of the effects of conventional and wiper coated carbide tools with dry cutting on cutting forces, surface roughness, and material hardness in turning 17-4 PH stainless steel. *The Online Journal of Science and Technology*, 6(1), 33-39.
8. Özerkan, H.B. (2018). Tornalamada oluşan yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisinin teorik değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 189-198.
9. Aouici, H., Yallese, M.A., Chaoui, K., Mabrouki, T. & Rigal, J.-F. (2012). Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement*, 45(3), 344-353.
10. Girisanekar, S., Senthil Murugan, S. & Shankar, E. (2024). A review of insights and research progress on hard turning. *Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology*, 35, 119-132.
11. Galoppi, G.D.S., Filho, M.S. & Batalha, G.F. (2006). Hard turning of tempered DIN 100Cr6 steel with coated and no coated CBN inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1-3), 146-153.
12. Benga, G.C. & Abrao, A.M. (2003). Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144(1), 237-241.
13. Chou, Y.K. & Song, H. (2004). Tool nose radius effects on finish hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), 259-268.
14. Samardžiova, M. & Neslušan, M. (2013). Development of surface roughness in hard turning of 100Cr6 using mixed ceramic cutting tool with wiper geometry and conventional geometry. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 21, 193-198.
15. Boy, M., Günay, M., Demir, H. & Çiftçi, İ. (2014). Effects of the approach angle on cutting force and surface roughness in hard turning of AISI 52100. *Proceedings of 19th International Conference. Mechanika*, 58-63.

16. Chinchani, S., Salve, A.V., Netake, P., More, A., Kendre, S. & Kumar, R. (2014). Comparative evaluations of surface roughness during hard turning under dry and with water-based and vegetable oil-based cutting fluids. *Procedia Materials Science*, 5, 1966-1975.
17. Yıldırım, Ç.V. (2020). Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL. *Tribology International*, 144, 106127.
18. Zawada-Tomkiewicz, A. & Zeuschner, E. (2025). Surface roughness in hard turning of EN 100Cr6 with coated PCBN cutting tools at micro cutting depths. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 139(11-12), 5545-5561.
19. Ambhore, N., Kamble, D. & Chinchani, S. (2020). Analysis of tool vibration and surface roughness with tool wear progression in hard turning: An experimental and statistical approach. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6461-6472.
20. International Organization for Standardization, (1997). *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters* (ISO Standard No. 4287:1997).
21. International Organization for Standardization, (1999). *Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels - Part 17: Ball and roller bearing steels* (ISO Standard No. 683-17:1999).
22. Kumsal, K.H. (1994). Taguchi metodu. *Yüksek lisans tezi*. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 134.
23. Aydın, E. (2023). Taguchi optimizasyon metodunun imalat mühendisliği alanında kullanımı: Minitab örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 28 (3).

Design and Performance Analysis of Tulip-Shaped Microstrip Antenna on Flexible Substrates with Chemical Modifications

Mustafa Berkan BİÇER^{1,a}, Emine AVŞAR AYDIN^{2,b}, Mehmet Erman MERT^{3,c}, Başak DOĞRU MERT^{4,d}

¹Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, Mersin, Türkiye

²Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Computer and Informatics, Department of Information Systems and Technologies, Adana, Türkiye

³Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Advanced Technology Research and Application Center, Adana, Türkiye

⁴Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-3278-6071; ^bORCID: 0000-0002-5068-2957; ^cORCID: 0000-0002-0114-8707; ^dORCID: 0000-0002-2270-9032

Article Info

Received : 31.12.2025

Accepted : 25.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1852865

Corresponding Author

Emine AVŞAR AYDIN

eaydin@atu.edu.tr

Keywords

Tulip-shaped

Microstrip antenna

Reflection coefficient

Chemical process

How to cite: BİÇER, M.B., AVŞAR AYDIN, E., MERT, M.E., DOĞRU MERT, B., (2026). Design and Performance Analysis of Tulip-Shaped Microstrip Antenna on Flexible Substrates with Chemical Modifications. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 309-319.

ABSTRACT

This study introduces a novel tulip-shaped microstrip antenna (TSMA), fabricated on a chemically analyzed substrate with versatile applications. The antenna design is implemented using Computer Simulation Tool (CST) software, considering various substrate materials. Performance analyses, including reflection coefficients and voltage standing wave ratio graphs, are presented for each material. The antennas exhibit diverse characteristics, with some featuring wide bandwidths, others narrow bands, and some offering dual or tri-band resonances—tailored for specific application areas. The production costs remain reasonable, leveraging the benefits of chemical processes and material flexibility. Simulation results validate the study's findings, highlighting the antennas' simple, compact structures and cost-effectiveness, making them suitable for tailored RF applications.

Kimyasal Modifikasyonlu Esnek Altılıklar Üzerinde Lale Şekilli Mikroşerit Antenin Tasarımı ve Performans Analizi

Makale Bilgileri

Geliş : 31.12.2025

Kabul : 25.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1852865

Sorumlu Yazar

Emine AVŞAR AYDIN

eaydin@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Lale-şekilli

Mikroşerit anten

Yansıma katsayısı

Kimyasal işlem

Atıf şekli: BİÇER, M.B., AVŞAR AYDIN, E., MERT, M.E., DOĞRU MERT, B., (2026). Kimyasal Modifikasyonlu Esnek Altılıklar Üzerinde Lale Şekilli Mikroşerit Antenin Tasarımı ve Performans Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 309-319.

ÖZ

Bu çalışma, çok yönlü uygulamalara sahip, kimyasal olarak analiz edilmiş bir taban malzeme üzerine üretilen yenilikçi bir lale şekilli mikroşerit anten (LŞMA) sunmaktadır. Anten tasarımı, çeşitli taban malzemeleri dikkate alınarak Computer Simulation Tool (CST) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme için yansıma katsayıları ve gerilim duran dalga oranı (VSWR) grafiklerini içeren performans analizleri sunulmuştur. Antenler; belirli uygulama alanlarına göre özelleştirilmiş olarak, bazıları geniş bant genişliğine, diğerleri dar bantlara sahip olan ve bazıları ise çift veya üçlü bant rezonansları sunan çeşitli karakteristikler sergilemektedir. Kimyasal süreçlerin ve malzeme esnekliğinin avantajlarından yararlanılarak üretim maliyetleri makul seviyelerde tutulmuştur. Simülasyon sonuçları, antenlerin basit, kompakt yapılarını ve maliyet etkinliğini vurgulayarak çalışmanın bulgularını doğrulamakta ve bu antenleri özelleştirilmiş RF uygulamaları için uygun hale getirmektedir.

1. INTRODUCTION

The utilization of antennas in electromagnetic applications is indispensable for the operation of radar systems, wireless communication, and other sensing technologies. Antennas play a crucial role in the transmission and reception of information through electromagnetic waves, enabling the propagation of information across extensive distances and powering numerous contemporary devices. Their significance stems from their ability to adeptly capture, propagate, and manipulate electromagnetic waves, forming the foundational basis for modern sensing and telecommunication networks. The progression of materials and antenna technologies tailored for electromagnetic applications is imperative for high-tech applications.

Using different substrates and conductive materials, numerous antenna studies and developments have been carried out, ranging from biomedical applications to space and satellite antenna systems [1, 2]. In [1], an ultra-wideband bow-tie antenna and a three-dimensional breast model with varied permittivity and conductivity were designed in CST to investigate microwave breast cancer detection. The study evaluated key antenna characteristics such as return loss and radiation pattern, and it further examined the influence of a limestone layer surrounding the tumor on the radiated electric and magnetic field distributions. The findings showed that limestone can significantly affect the field response and tumor visibility, emphasizing the importance of tissue composition in microwave-based diagnostic scenarios. In a separate study [2], the researchers designed a frequency-configurable flexible horizontal H-shaped microstrip antenna for biomedical applications by using copper tape radiating and ground structures on felt, jean, and photographic paper substrates. The antennas were analyzed over the 2-10 GHz band with a full-wave solver based on the finite integration technique and were subsequently fabricated to compare measured and simulated responses. Their results demonstrated that flexible substrate selection and dielectric characteristics strongly influence impedance matching, bandwidth behavior, and the practical feasibility of low-cost biomedical microwave antenna implementations.

Researchers [3] have developed copper and nickel-plated polymethacrylimide composite foam (PMIF@Ni and PMIF@Cu) demonstrating high surface electrical conductivities, with values reaching 1.06×10^4 S/m and 9.15×10^3 S/m, respectively. These composite foams have exhibited noteworthy electromagnetic interface shielding effectiveness (EMI SE), registering approximately 52 dB for PMIF@Ni and approximately 43 dB for PMIF@Cu. Furthermore, the researchers have successfully employed these composite foams to fabricate monopole antennas operative within the frequency range of 0.9 GHz to 1.2 GHz, underscoring the material's suitability for electromagnetic purposes.

In a separate study [4], a nickel ferrite-based composite material was synthesized using the sol-gel method, offering tailored microwave absorption performance in the X-band. When applied as a coating on a metal sheet, the material manifested resonance dips at frequencies of 8.42 GHz, 9.5 GHz, and 10.80 GHz, indicating effective microwave absorption within the desired frequency range.

Similarly, researchers [5] explored the utilization of Ni/Ppy/PET conductive fabrics for electromagnetic interference shielding and wearable textile antenna applications. Comparative analysis within a specified frequency range (8.12 GHz to 12.4 GHz) validated the performance of the proposed composite fabric. Additionally, a wearable antenna application was developed, featuring a microstrip-fed patch antenna with a reflection loss of -32.08 dB at the 2.40 GHz frequency band, emphasizing its potential for practical implementation. Guerchouche et al. [6] formulated a design for a compact broadband RFID antenna intended for "Green" electronics and biosensor applications. This design employed transparent conductive films on recyclable substrates, highlighting the potential environmental sustainability of the proposed technology. The study emphasized the application viability of conductive polymers in proximity-based contactless technology. Jeon et al. [7] proposed a flexible monopole radio-frequency antenna utilizing a graphene/polymer nanocomposite film. Experimental results yielded reflection coefficient values ranging from -11.3 dB to -37.5 dB within the frequency range of 2.49 GHz to 2.77 GHz. Mechanical deformation tests underscored the antenna's flexibility, suggesting its suitability for integration into wireless communication technologies. Feili et al. [8] contributed by developing an antenna tailored for flexible wireless sensor systems, with specified numerical parameters including thickness (100 μ m), dielectric constant (2.9), and loss tangent (0.002). The antenna, employing a liquid crystal polymer (LCP) substrate with a Cu-based metal film patch, underwent parametric studies, providing insights into optimizing its performance. Hasan et al. [9] introduced a nickel zinc ferrite thick film for microwave applications, illustrating its effectiveness through numerical data depicting improved reflection coefficients. The

designed antenna exhibited a reflection coefficient of -29.33 dB at 5.64 GHz, highlighting the potential utility of the developed film in enhancing the performance of electromagnetic devices. Li et al. [10] developed nickel-modified zinc molybdate ceramics with a dielectric constant 8.5 and the product $Q \times f$ of 28192 GHz, demonstrating suitability for two-dimensional beam splitting of array antennas in the X-band. Kyovtorov et al. [11] introduced a novel prototyping method utilizing 3D printing and chemical metallization to produce a metal pyramidal horn antenna prototype, showcasing performance in the frequency range of 14-18 GHz. Anilkumar et al. [12] designed an antenna utilizing a liquid crystal polymer substrate, with operating frequencies ranging from 2.4 GHz to 12.5 GHz, optimized for automotive communication applications. Matyas et al. [13] developed a microstrip antenna using silver nanoparticles on a flexible PET foil, operating at frequencies of 2.02 GHz and 2.3 GHz with reflection coefficients of -16.02 dB and -19.33 dB, respectively. Sid et al. [14] devised a patch antenna tailored for wearable applications, operating at 2.45 GHz. They utilized cellulose laurate as a bio-based polymer substrate, characterized by a dielectric constant of 2.66 and a loss tangent of 0.025. In the realm of 5G mobile communication, Hwang et al. [15] designed vertically stacked dipole antennas for dual-band operation at 28/34 GHz. Employing a flexible liquid crystal polymer substrate, they achieved element gains of 4.8 dBi and 4.6 dBi at the respective frequencies.

Mohamadzade et al. [16] introduced a dynamic pattern-reconfigurable antenna design utilizing conductive textile-polymer composites, showcasing a -10 dB bandwidth spanning from 4.67 GHz to 5.59 GHz. Elobaid et al. [17] innovatively developed a transparent and flexible ultrawideband antenna by incorporating a transparent conductive fabric tissue on a PDMS substrate. This design achieved reflection coefficient values below -10 dB across a spectrum ranging from 2.5 GHz to 25 GHz. Hamouda et al. [18] formulated a dual-band flexible antenna specifically designed for wearables, utilizing a magnetodielectric nanocomposite polymer. This antenna exhibited promising performance, even in complex bending situations.

In this study, our literature review reveals a diverse landscape of innovative antenna designs utilizing advanced materials and fabrication techniques for various applications, from wearables to 5G communication. Building upon this foundation, our manuscript introduces a novel approach to antenna enhancement. Leveraging anodizing and Stöber methods, we aim to push the boundaries of achievable parameters. Unlike existing studies, our focus extends to a comparative analysis with flexible PET and PVC antennas, providing valuable insights into the performance of these materials under our proposed methods. This unique contribution positions our manuscript at the forefront of antenna research, offering a fresh perspective on enhancing antenna functionality through novel fabrication approaches.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Chemical Procedure for Preparing of Substrates

The utilization of a metal oxide layer in antenna applications is favored owing to its specific dielectric constant and corrosion resistance [19-21]. Employing metal surfaces oxidized through the anodizing process is thus imperative. This technique enhances the lifespan of the antenna system, providing additional benefits such as improved stability in challenging climatic conditions, enhanced electrical performance, and increased durability. In this study, the anodizing technique was applied to generate oxide layers on Nickel (Ni) and 6063 Aluminum (Al) substrates. A two-electrode setup was employed for this process, with a Platinum (Pt) sheet serving as the counter electrode. The electrolyte solution comprised 0.1 M potassium hydroxide (KOH) supplemented with 50g/L of sodium tetraborate. All chemical reagents were procured from Aldrich and used without further modification. The preparation of solutions was meticulously executed using distilled water. The anodizing process was conducted under a voltage of 2V for 5 minutes. The resulting anodized substrates were designated as *Antenna-1* and *Antenna-2* for Ni and Al, respectively. Notably, substrates *Antenna-3*, *Antenna-4*, and *Antenna-5* were High-Density Polyethylene (HDPE), Polyethylene Terephthalate (PET), and another PET variant, respectively. Substrate *Antenna-6* was Aluminum coated with Silicon Dioxide (SiO₂). The SiO₂-coated Aluminum was prepared using the Stöber method, named after its inventor Werner Stöber. This widely employed technique involves synthesizing silica (SiO₂) coatings on diverse substrates. In this method, the silicon alkoxide precursor, typically tetraethylorthosilicate (TEOS), undergoes hydrolysis and condensation reactions in the presence of water and an alcohol solvent, such as ethanol or methanol, under basic conditions [22,23]. The resultant silica nanoparticles spontaneously assemble into a dense coating on the substrate surface, driven by their elevated surface energy and propensity to aggregate. The Stöber method offers notable advantages, including

simplicity, scalability, and controllability, facilitating precise customization of coating thickness, particle size, and surface morphology. Additionally, the resulting coatings demonstrate high uniformity, purity, and strong adhesion to the substrate, rendering them suitable for diverse applications [24-27]. In the experimental procedure, 1.5 mL of tetraethylorthosilicate (TEOS), 1.7 mL of ammonia, 1 mL of deionized water, and 50 mL of isopropanol were combined in the reaction vessel. The mixture was maintained at a temperature of 0 °C for 15 minutes, followed by pH measurement. If the pH value deviated from the range of 10.5 to 11.5, additional ammonia was introduced to adjust the pH. Subsequently, the ice bath was removed, and the solution was subjected to magnetic stirring for 3 hours at 40 °C. After this period, an additional 1 mL of TEOS was introduced, and the reaction proceeded under identical conditions for an additional 2 hours. Following the synthesis of SiO₂ nanoparticles, the solution containing the nanoparticles underwent centrifugation at 9000 rpm for 5 minutes at 25 °C. Subsequently, the particle and liquid phases were separated, and the particles were washed twice with ethanol and acetone before being dried at room temperature. The produced SiO₂ was mixed with epoxy, serving as a binder, and the coating was applied to the surface using the spray coating technique with a spray gun. The composite coating material was introduced into the coating chamber and applied manually with a pressure gun (5-8 bar). The coated Aluminum substrate was then dried in an oven at 160 °C for 15 minutes and designated as the *Antenna-6* substrate. The morphological analysis of the antenna was conducted through SEM-EDX analysis. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) measurements were carried out using an FEI Quanta 650 at 5 keV with an Energy Dispersive X-ray (EDX) detector.

2.2. Design and Analysis of Tulip-Shaped Microstrip Antenna (TSMA)

CST Microwave Studio (CST MWS) stands as a computer-aided electromagnetic simulation software designed for engineers and researchers engaged in microwave and radio frequency (RF) design. The software empowers users to conduct electromagnetic field simulations, a pivotal aspect for comprehending and optimizing the behavior of electromagnetic waves within the microwave and RF frequency spectrums. Its applications extend across diverse domains, including antenna design, microwave circuit analysis, and the performance evaluation of RF and microwave devices. Users of CST MWS can construct 2D and 3D geometries to model electromagnetic challenges, encompassing antennas, circuit elements, microwave components, and other electromagnetic structures. The software incorporates various electromagnetic simulation solvers, such as time-domain and frequency-domain solvers, facilitating the analysis of changes in electromagnetic fields over time and frequency, respectively. A distinctive feature of CST MWS is its provision of tools for parameter optimization and performance analysis during the design phase. This functionality proves instrumental in evaluating and enhancing the design's alignment with specified criteria. The software further supports seamless integration with other engineering tools and accommodates diverse data formats, thereby facilitating efficient data sharing across design stages and research environments. In order to achieve cost-effectiveness in the designed antenna, appropriate substrate materials with relative dielectric constants of 2.4, 3.5, and 4.0, and loss tangents of approximately 0.02, 0.018, and 0.019 have been selected for PLA, PET, and PVC, respectively. The dielectric material thickness is fixed at $h = 1.0$ mm. The dimensions of the feed line in the conventional antenna, as illustrated in Figure 1, along with those of the rectangular patch and other parameters, were determined through mathematical calculations utilizing the transmission line model. A Python software code was developed to execute these computations. Subsequently, the conventional antenna design was implemented using CST software, employing the calculated dimensions. Figures 1 presents views of the patch on both the front and back sides of the traditional microstrip patch antenna, while Table 1 provides the dimension parameters.

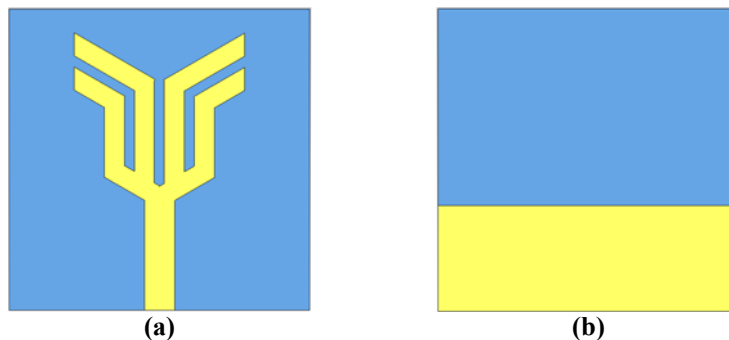
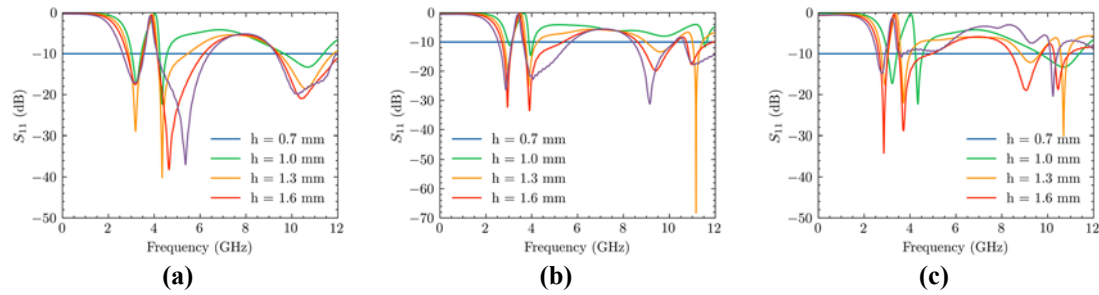


Figure 1. Front view (a) and back view (b) of the simulation design of the Tulip-shaped microstrip antenna

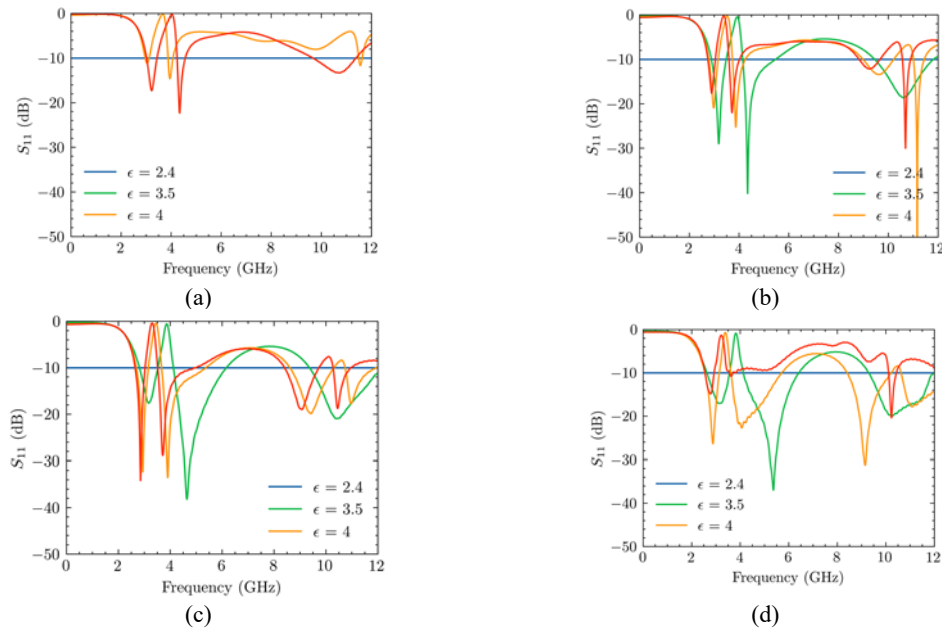
Table 1. Parameters of TSMA

Parameters	Values
Substrate dielectric permittivity (ϵ_r)	PLA (2.4), PET (3.5), PVC (4.0)
Substrate thickness (h)	1 mm
Patch or copper thickness (t)	0.035 mm
Substrate length (SL)	30 mm
Substrate Width (SW)	30 mm
Feed length (FL)	3 mm
Feed Width (FW)	11 mm
Ground length (GL)	30 mm
Ground width (GW)	10.5 mm
Ground Gap	0.5 mm

The optimization carried out in the simulation environment, as illustrated in Figure 2, reveals a notable improvement in performance when employing layer thicknesses of 1.0 mm for PLA, PET, and PVC materials compared to trials with a thickness of 1.6 mm. Subsequent analyses were conducted based on this optimized thickness value.

**Figure 2.** Comparison of $|S_{11}|$ curves of TSMA antenna for substrates with dielectric constants of (a) 2.4, (b) 3.5 and (c) 4 for four different thicknesses

As depicted in Figure 3, the simulated $|S_{11}|$ of the triple-resonant antenna fall within the frequency ranges of 2 GHz to 4 GHz, 4 GHz to 6 GHz, and 10 GHz to 12 GHz, respectively (when $|S_{11}|$ is below -10 dB). This observation indicates that the proposed antenna demonstrates a broad impedance bandwidth within the high-frequency band.

**Figure 3.** Comparison of $|S_{11}|$ curves of TSMA for three different dielectric constants and substrate thicknesses of (a) 0.7 mm, (b) 1.0 mm, (c) 1.3 and (d) 1.6 mm

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Although various materials were employed for the antenna substrates, the radiating element was fashioned using cost-effective and readily manufacturable copper tape. Challenges inherent in the precise cutting of copper tape, such as tearing, were mitigated by the use of a cutting tool, ensuring the successful fabrication of the tulip-shaped antenna patches, as illustrated. Figure 4 sequentially showcases antennas fabricated from 1 to 6, while Figure 5 delineates the measurement setup.



Figure 4. Photographs of fabricated Tulip-shaped microstrip antennas.



Figure 5. Measurement setup

The identical antenna geometry was constructed utilizing the materials outlined in Table 2.

Table 2. Materials of TSMA

Antenna Name	Material
Antenna-1	Ni
Antenna-2	Al
Antenna-3	HDPE
Antenna-4	PET
Antenna-5	PET
Antenna-6	SiO ₂ coated Al

Figures 6 and 7 present the measured parameter graphs for S_{11} and VSWR, respectively, corresponding to the fabricated antennas. *Antenna-1* exhibits a signal attenuation trend beyond 4.5 GHz, generally falling below -5 dB. This attenuation, although exceeding the resonance reference of -3 dB indicative of functional power radiation, still maintains functionality, with approximately 68.38% of power being radiated. While optimal performance necessitates over 90% power radiation (-10 dB), the observed -5 dB level suggests satisfactory functionality, albeit not at peak performance. Notably, a tri-band performance is discernible around 6 GHz, 9.5 GHz, and 12.5-14.5 GHz, as substantiated by VSWR measurements. *Antenna-2* displays a comparable attenuation shift, reaching approximately -5 dB at 2.5 GHz. Noteworthy is its wideband performance spanning 4 GHz to 8 GHz, aligning well with applications such as 5 GHz Wi-Fi communication, 5.8 GHz drone control, and WiMAX frequency usage. This characteristic renders *Antenna-2* suitable for these purposes, a conclusion corroborated by VSWR analysis. *Antenna-3* exhibits attenuation approaching -5 dB beyond roughly 3 GHz, with fluctuations around -10 dB after 8 GHz. Although potential

modifications could enhance its bandwidth performance, it tends to remain below -10 dB inconsistently near 9 GHz. Despite this, its ability to sustain power radiation around -10 dB within this range suggests effective utilization of approximately 90% of incoming power. A narrowband performance is also evident around 4 GHz, indicating its primary utility lies in applications beyond 8 GHz, as affirmed by VSWR analysis. *Antenna-4* demonstrates a tri-band performance, featuring two bands around 4 GHz and a resonant point near 9 GHz. Despite appearing narrowband, this resonance offers a bandwidth of roughly 2 GHz around -10 dB, making it suitable for sensor applications with an acceptable Q-factor. Additionally, bands spanning 4-5 GHz hold potential for sensor application use, as validated by VSWR analysis. *Antenna-5* exhibits unacceptable performance before 8 GHz, improving beyond this threshold to approximately -10 dB and further below. Wideband performance between 8 GHz and 15 GHz suggests suitability for applications within this frequency range, as confirmed by VSWR analysis. *Antenna-6* showcases performance fluctuating around -5 dB near 4 GHz, with brief drops below -10 dB around 10 GHz within a narrow bandwidth. While suitable for this frequency range, its usability for frequencies outside this range may be limited, necessitating modifications. VSWR analysis supports this observation. In summary, the primary objective of this study was to eliminate dependence on commercial products or existing materials in the production of antennas tailored to desired frequency ranges or purposes, while also providing a wide range of options for producing antennas suitable for specific purposes. From this perspective, the results of the designed antennas and the necessary analyses conducted are quite satisfactory both in terms of antenna performance and material analysis, thus making a significant contribution to the literature.

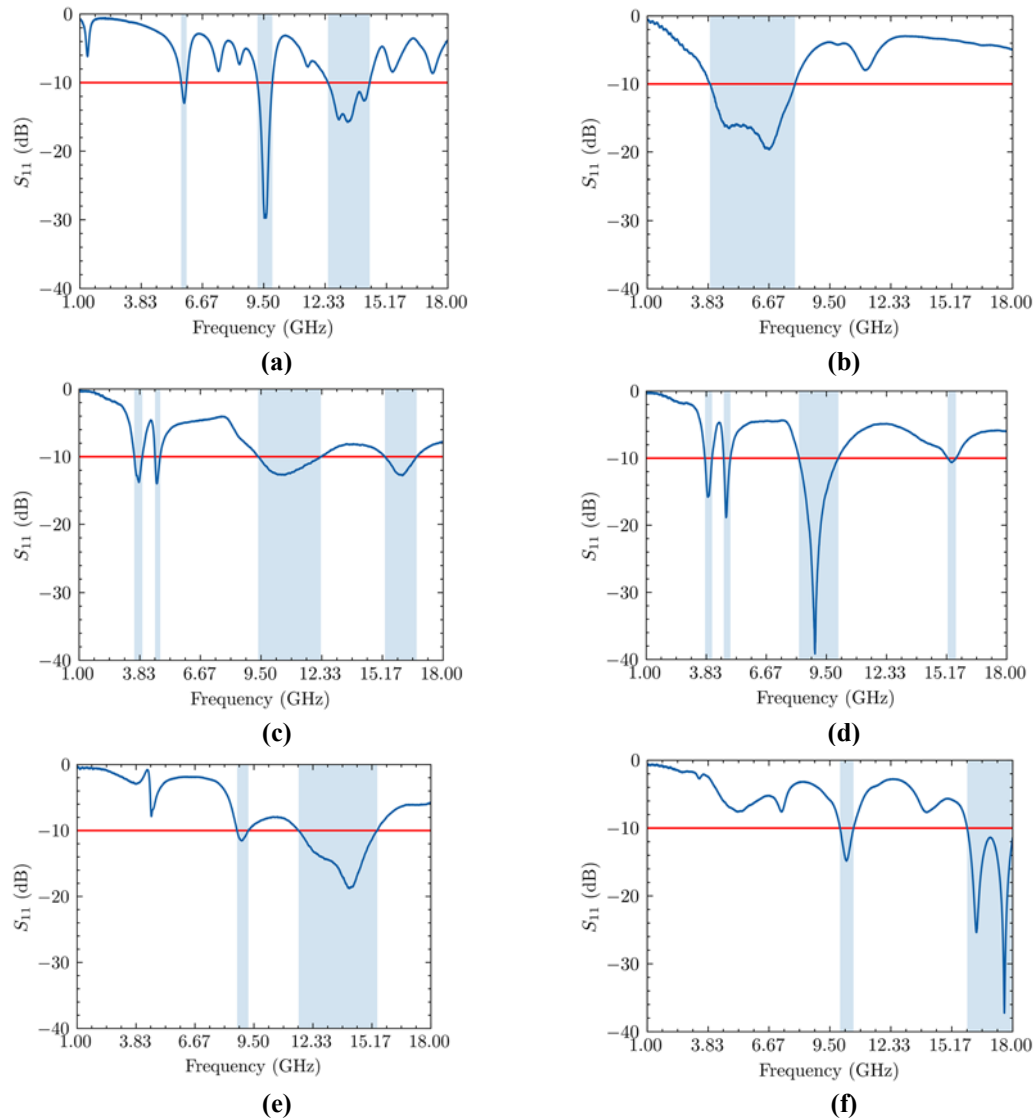


Figure 6. Measured S_{11} parameters of fabricated antennas of antenna (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5 and (f) #6

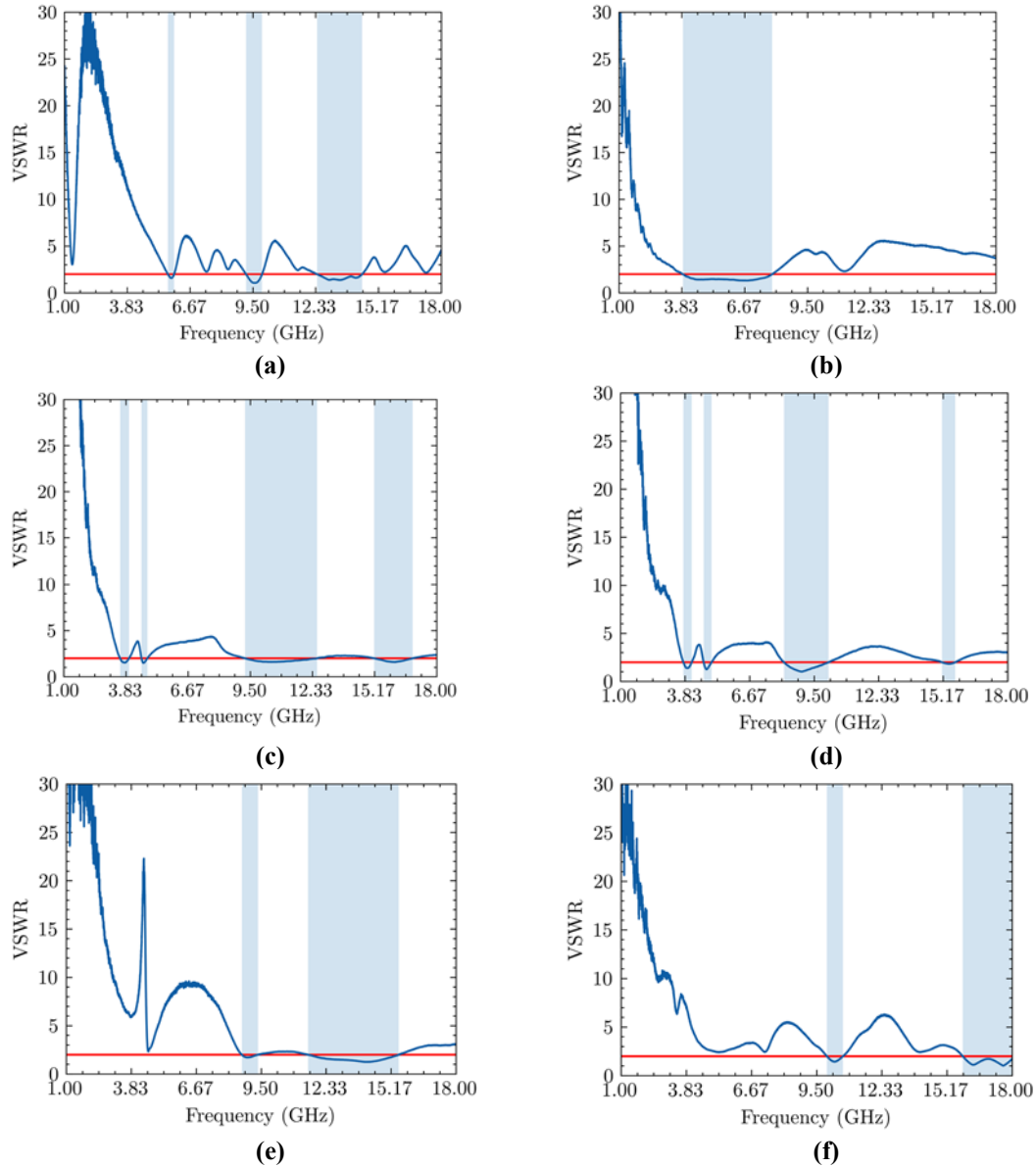
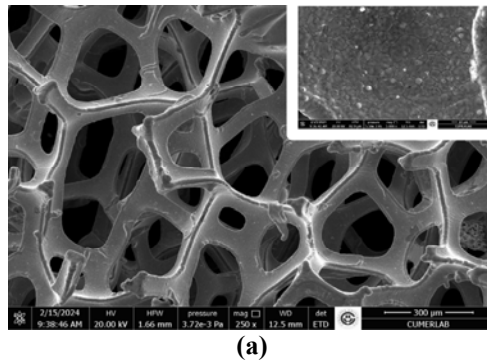


Figure 7. Measured VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) parameters of fabricated antennas antenna (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5 and (f) #6

SEM and EDX analyses provide high-resolution imaging capabilities and elemental composition information, making them essential tools for identifying morphological structures. The morphological analysis of antennas 1, 2, and 6 was conducted through SEM-EDX analysis, and the results obtained are presented in Figure 8.



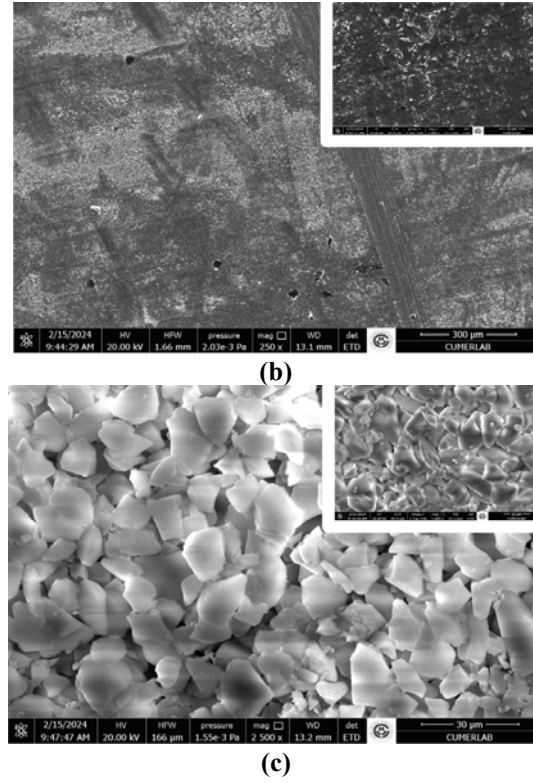


Figure 8. The SEM micrograph of (a) *Antenna-1*, (b) *Antenna-2* and (c) *Antenna-6*.

The EDX analysis of these antennas were presented in Figure 9.

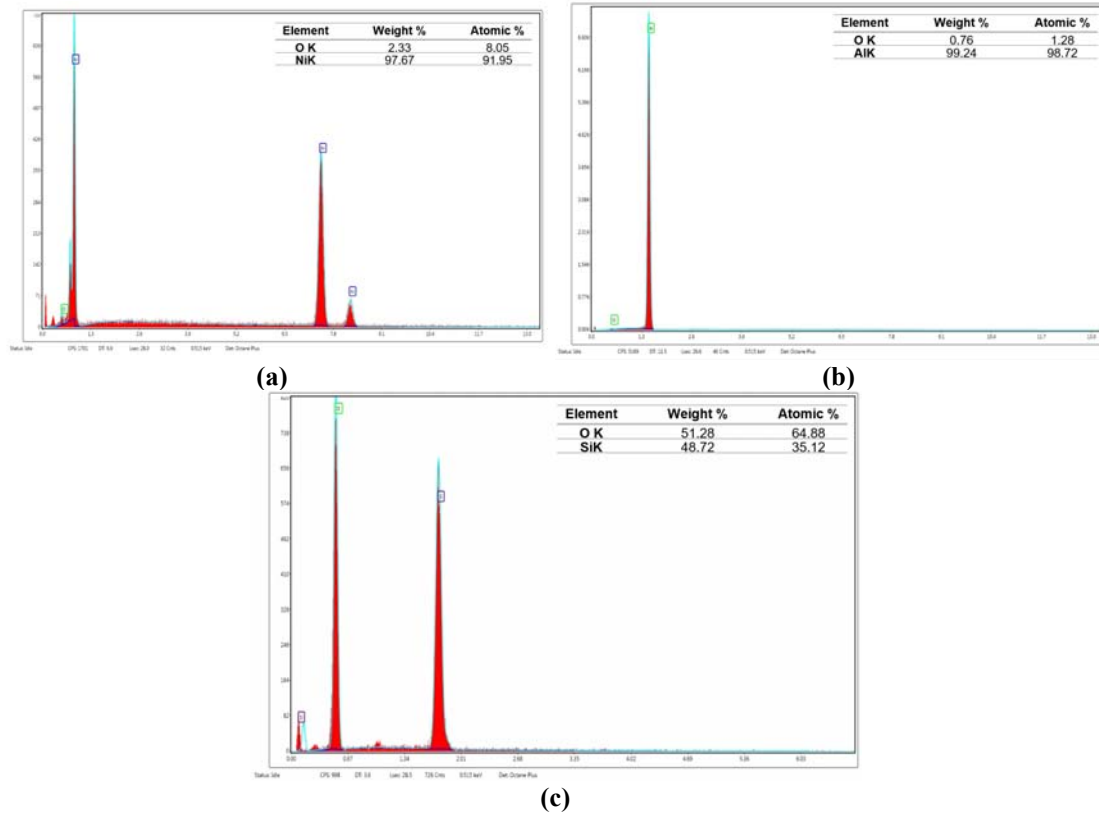


Figure 9. The EDX results of (a) *Antenna-1*, (b) *Antenna-2* and (c) *Antenna-6*.

As illustrated in Figure 8, the substrate of *Antenna-1* exhibits a complex arrangement characterized by interwoven structures, attributed to the cage-network configuration of Ni foam. This intricate design is further enriched by the presence of NiO, a byproduct of the anodizing process. The introduction of NiO significantly impacts the dielectric constant in comparison to Ni alone, imparting distinct advantages to the substrate material. The resultant oxide layer underwent detailed examination through EDX analysis, as presented in Figure 9. The weight percent of Ni in NiO was determined to be 97.67%, confirming the presence of the oxide layer. In the SEM micrograph of *Antenna-2*, the pickling effect of anodizing is distinctly evident, particularly in regions exhibiting the highest magnitude, where a homogeneous surface is detected. EDX results indicate that the alkaline environment of the anodizing solution yielded a relatively thin oxide layer, with the Al weight ratio measuring 99.24%. The SEM analysis of the *Antenna-6* substrate corroborates the presence of a SiO₂ structure, aligning with observations in existing literature. The substrate manifests as an irregular and granular structure, resembling the typical granular arrangement formed by the random aggregation of small grains/particles. Figure 9 further details the Si ratio, quantifying it as 48.72%. This comprehensive examination using SEM and EDX analyses provides valuable insights into the structural and elemental composition of the antenna substrates, offering a foundation for in-depth discussions on their material properties and potential applications.

4. CONCLUSIONS

An antenna with a distinctive tulip-shaped design, employing microstrip-fed technology, is introduced in this study. The antenna is meticulously crafted on diverse substrates, each produced through specific chemical processes utilizing flexible plastic materials. The selection of substrates is guided by a thorough material analysis, considering their impact on electromagnetic properties. The examined materials encompass anodized Ni, Al, HDPE, PET, and SiO₂-coated Al. Section 2 provides a detailed exposition of the results obtained from material analysis, elucidating the unique capabilities of the proposed antenna structure on each substrate. The findings indicate the antenna's adeptness in achieving various functionalities, including single-band, multi-band, narrow, or wideband characteristics, with commendable precision. The versatility in operating frequencies, coupled with the ease of production and compactness, positions the proposed antenna structure as highly suitable for GHz applications. These applications span a broad spectrum, encompassing material detection, material characterization, as well as GHz, microwave, and communication applications. This study contributes to the expanding repertoire of antenna designs tailored for diverse electromagnetic requirements in contemporary high-frequency applications.

5. REFERENCES

1. Avşar Aydın, E. (2017). The effect of limestone in breast cancer detection by microwaves. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 32(2), 37-44.
2. Avşar Aydın, E. & Biçer, M.B. (2023). A novel frequency-configurable patch antenna design using flexible substrates for biomedical applications. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 38(2), 411-420.
3. Li, J., Wang, A., Qin, J., Zhang, H., Ma, Z. & Zhang, G. (2021). Lightweight polymethacrylimide@copper/nickel composite foams for electromagnetic shielding and monopole antennas. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140, 106144.
4. Bala, M., Shivling, V.D. & Tyagi, S. (2024). Tailoring the characteristics of nickel ferrite based composite for tuning the microwave absorption performance. *Materials Chemistry and Physics*, 312, 128630.
5. Liu, Q., Huang, X., He, X., Li, X., Liu, X. & Li, Z. (2021). Flexible, breathable, and highly environmental-stable Ni/PPy/PET conductive fabrics for efficient electromagnetic interference shielding and wearable textile antennas. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108752.
6. Guerchouche, K., Herth, E., Calvet, L.E., Roland, N. & Loyez, C. (2017). Conductive polymer based antenna for wireless green sensors applications. *Microelectronic Engineering*, 182, 1-8.
7. Jeon, H., Jin, S. & Shin, K.Y. (2022). Highly flexible, high-performance radio-frequency antenna based on free-standing graphene/polymer nanocomposite film. *Applied Surface Science*, 582, 152455.
8. Feili, D., Pagel, N., Ngo, V.L., Schwarz, P. & Seidel, H. (2010). Cu based patch antenna on polymer substrate for flexible wireless sensor systems applications. *Procedia Engineering*, 5, 268-271.
9. Hasan, I.H., Hamidon, M.N., Ismail, A., Ismail, I., Azhari, N.A.M. & Kusaimi, M.A.M. (2019). Nickel zinc ferrite thick film with linseed oil as organic vehicle for microwave device applications. *Materials Chemistry and Physics*, 236, 121790.

10. Li, F., Li, Y.X., Liu, X. & Wen, Q. (2022). Nickel-modified zinc molybdate low temperature co-fired ceramics for two-dimensional beam splitting of array antenna in X-band. *Ceramics International*, 48(23), 35682-35690.
11. Kyovtorov, V., Georgiev, I., Margenov, S., Stoychev, D., Oliveri, F. & Tarchi, D. (2017). New antenna design approach – 3D polymer printing and metallization: experimental test at 14–18 GHz. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 73, 107-114.
12. Anilkumar, T., Madhav, B.T.P., Rao, M.V. & Nadh, B.P. (2020). Bandwidth reconfigurable antenna on a liquid crystal polymer substrate for automotive communication applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 117, 153096.
13. Matyas, J., Slobodian, P., Munster, L., Olejnik, R. & Urbanek, P. (2017). Microstrip antenna from silver nanoparticles printed on a flexible polymer substrate. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), 5940-5944.
14. Sid, A., Cresson, P.Y., Joly, N., Braud, F. & Lasri, T. (2023). Bio-based substrate for flexible electronics - application to a 2.45 GHz wearable patch antenna. *Materials Today Electronics*, 5, 100049.
15. Hwang, I.J., Oh, J.I., Jo, H.W., Kim, K.S., Yu, J.W. & Lee, D.J. (2022). 28 GHz and 38 GHz dual-band vertically stacked dipole antennas on flexible liquid crystal polymer substrates for millimeter-wave 5G cellular handsets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(5), 3242-3252.
16. Mohamadzade, B., Simorangkir, R.B.V.B., Hashmi, R., Lalbakhsh, A., Shrestha, S., Zhadobov, M. & Sauleau, R. (2021). A conformal, dynamic pattern-reconfigurable antenna using conductive textile-polymer composite. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(10), 6175-6184.
17. Elmobarak Elobaid, H.A., Abdul Rahim, S.K., Himdi, M., Castel, X. & Abedian Kargari, M. (2017). A transparent and flexible polymer-fabric tissue UWB antenna for future wireless networks. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 1333-1336.
18. Hamouda, Z., Wojkiewicz, J.L., Pud, A.A., Kone, L., Bergeul, S. & Lasri, T. (2018). Magnetodielectric nanocomposite polymer-based dual-band flexible antenna for wearable applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(7), 3271-3278.
19. Yamasaki, K., Taniho, H., Tate, K. & Ohtsu, N. (2021). Electrolyte effect in pulsed anodization of NiTi alloy to form a Ni-free oxide layer. *Surface and Coatings Technology*, 417, 127221.
20. Abedini, M. & Hanke, S. (2023). Improving the wear resistance of aluminum by a nickel-filled anodized porous alumina layer. *Wear*, 522, 204858.
21. Gasco-Owens, A., Roche, J. & Arurault, L. (2024). Nanocontrolled thinning of the barrier layer thickness of porous anodic films using galvanodynamic polarization of aluminum alloys. *Electrochimica Acta*, 479, 143894.
22. Sivolapov, P., Myronyuk, O. & Baklan, D. (2022). Synthesis of Stober silica nanoparticles in solvent environments with different Hansen solubility parameters. *Inorganic Chemistry Communications*, 143, 109769.
23. Wulfert-Holzmann, P., Settelein, J. & Giffin, G.A. (2021). Influence of the specific surface area of Stöber silica additives on the electrochemical properties of negative electrodes in lead-acid batteries. *Journal of Energy Storage*, 34, 102193.
24. Fernandes, R.S., Raimundo, I.M. & Pimentel, M.F. (2019). Revising the synthesis of Stöber silica nanoparticles: A multivariate assessment study on the effects of reaction parameters on the particle size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577, 390-399.
25. Yan, Y., Fu, J., Xu, L., Wang, T. & Lu, X. (2016). Controllable synthesis of SiO₂ nanoparticles: Effects of ammonia and tetraethyl orthosilicate concentration. *Micro & Nano Letters*, 11(12), 853-857.
26. Ho, V.T.T., Hong, N.V.H., Nguyen, A.V., Bach, L.G. & Dinh, T.P. (2018). Core-Shell Fe@SiO₂ nanoparticles synthesized via modified Stöber method for high activity in Cr(VI) reduction. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(10), 6981-6987.
27. Alam, M.A., Samad, U.A., Sherif, E.M., Poulouse, A.M., Mohammed, J.A., Alharthi, N. & Al-Zahrani, S.M. (2020). Influence of SiO₂ content and exposure periods on the anticorrosion behavior of epoxy nanocomposite coatings. *Coatings*, 10(2), 118.

Heat Transfer Performance of Aluminum as a Conductor Material with Mixtures

Esra GÜNERİ^{1,a}, Selin BAŞ^{1,b}

¹*İzmir Democracy University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, İzmir, Türkiye*

^a*ORCID: 0000-0002-1840-2118; ^bORCID: 0009-0009-8909-2530*

Article Info

Received : 26.05.2025

Accepted : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1706541

Corresponding Author

Esra GÜNERİ

esra_cetinorgu@hotmail.com

Keywords

Thermal conductivity

Aluminum powder

Buffer materials

How to cite: GÜNERİ, E., BAŞ, S., (2026). Heat Transfer Performance of Aluminum as a Conductor Material with Mixtures. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 321-330.

ABSTRACT

With the growing global population, meeting increasing energy demands has become progressively challenging, highlighting the importance of sustainable and eco-friendly energy sources. Energy-related infrastructures—such as thermal piles, buried power cables, and solid or nuclear waste disposal sites—are zones of high-temperature generation. Consequently, there is a critical need for alternative buffer materials capable of mitigating or rapidly dissipating this heat. In this study, a novel buffer material was developed by incorporating aluminum powder, known for its high thermal conductivity, into zeolite-bentonite mixtures at weight ratios of 1%, 2%, and 3%. The experimental results demonstrated that thermal conductivity increased in alignment with literature as the aluminum content rose. For instance, while the thermal conductivity of the pure 95% zeolite - 5% bentonite mixture was 0.749 W/mK, the addition of 3% aluminum increased this value to 0.795 W/mK, representing an enhancement of approximately 6%.

İletken Bir Malzeme Olarak Alüminyumun Karışımlarla Birlikte Isı İletim Performansı

Makale Bilgileri

Geliş : 26.05.2025

Kabul : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1706541

Sorumlu Yazar

Esra GÜNERİ

esra_cetinorgu@hotmail.com

Anahtar Kelimeler

Termal iletkenlik

Alüminyum tozu

Tampon malzeme

Atf şekli: GÜNERİ, E., BAŞ, S., (2026). İletken Bir Malzeme Olarak Alüminyumun Karışımlarla Birlikte Isı İletim Performansı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 321-330.

ÖZ

Artan dünya nüfusu ve bu nüfusun enerji ihtiyacının karşılanması giderek zorlaşmaktadır. Enerji kaynaklarının sürdürülebilir ve çevre dostu olması önem kazanmıştır. Enerji yapılarının en temelleri olarak değerlendirilebilecek termal kazıklar, gömülü güç kabloları, katı atık ve nükleer atık depolama alanları yüksek sıcaklıkların olduğu alanlar olup, bu nedenle ısının etkisini azaltabilen veya hızla ortadan kaldırabilen alternatif tampon malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, yüksek ısı iletkenliği ile bilinen alüminyum tozu, zeolit-bentonit karışımlarına ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında eklenerek yeni bir tampon malzeme geliştirilmiştir. Deney sonuçları, alüminyum katkısının artmasıyla ısı iletkenliğinin literatürle paralel şekilde arttığını göstermiştir. Örneğin, saf 95zeolit-5bentonit karışımının ısı iletkenlik değeri 0.749 W/mK iken, %3 alüminyum ilavesi ile bu değer 0.795 W/mK seviyesine yükselerek yaklaşık %6 oranında bir artış sergilemiştir.

1. INTRODUCTION

Thermal conductivity is one of the most important properties of materials. Thermal conductivity is related to the ability of a material to conduct heat. There is a different thermal conductivity coefficient for each material, and it is known that some materials and mixtures have higher thermal conductivity. Aluminum is one of the conductive materials with high thermal conductivity. Aluminum is a light, low-density metal found in the Earth's crust that has high electrical and thermal conductivity. It tends to bond with other elements. Aluminum has many different areas of use, and is used in electronic applications by combining it with fillers such as carbon nanotubes [1,2], graphite [3], Al_2O_3 [4], SiC [5-8] etc. for high thermal conductivity values with light weight. Thus, stronger composite structures can be produced. The thermal conductivity value of the materials formed depends on the microstructure of the components it contains, the bond strength between the materials, and the thermal properties, distribution, and geometry of the additive [6-9]. In addition to aluminum being a very common heat dissipation material, it is also aimed to increase its use for cooling purposes. For this purpose, it has been seen in studies that additive materials such as graphene are added to aluminum. Graphene plays a major role in thermal improvement in mixtures in terms of its thermal properties.

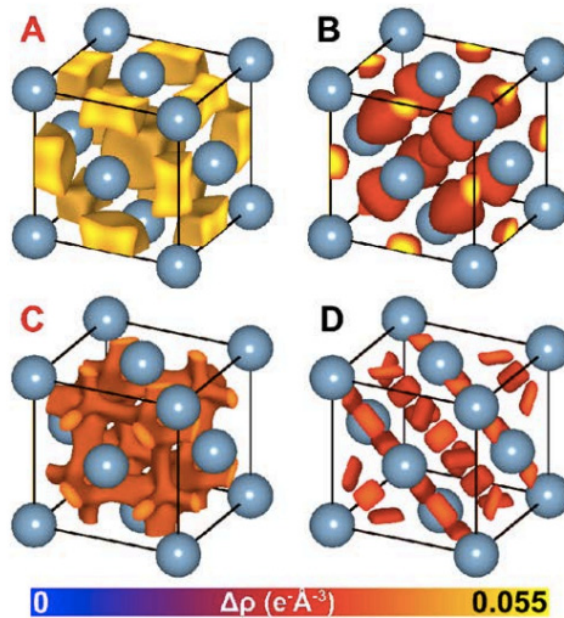


Figure 1. Three-dimensional example representations of bond electron density in aluminum from literature [10-13]

Figure 1 shows information about the nature of the ideal free electron metallic bond. The shapes in A and C were created by XRD analysis, and the shapes in B and D were created as a result of theoretical studies. The hexagonal striped region indicates a very strong tetrahedral bond, while the cross-striped region indicates octahedral bonds [14].

Materials with high heat transfer capability are needed in many different areas. There is a great demand for materials with high thermal conductivity in this research field, defined as energy geotechnics, which deals with the contact of energy geostructures with soils and how high temperature values occurring in the environment affect the engineering properties of soils. The high temperature and temperature cycles may affect the hydraulic conductivity behavior of soils. Many studies have been conducted on the variation of hydraulic conductivity of soils with temperature. In general, the results have been shown that the hydraulic conductivity increases as the temperature increases [15-17]. Also, it is predicted that the amount of energy that soils have when exposed to high temperatures will increase; accordingly, the energy of soil grains will increase. Molecules with increased energy will become more active, further weakening existing bonds. As a result, the amount of compression in the soil will increase [18,19]. In terms of shear strength, it was determined that the cohesion value increased due to the increase in the hardness of the soil with the effect of heating [20].

In the design of high-temperature engineering infrastructures, such as nuclear waste repositories and underground high-voltage power cables, the selection of an appropriate buffer material is of paramount importance. These materials serve a dual purpose: providing a hydraulic barrier to prevent contaminant migration and acting as a thermal conductor to dissipate the intense heat generated by the source. While traditional clay-based materials like bentonite and zeolite are favored for their low permeability, their inherently low thermal conductivity can lead to excessive heat accumulation, potentially compromising the integrity of the entire system. Therefore, enhancing the thermal efficiency of these buffer materials through high-conductivity additives, such as aluminum powder, has emerged as a critical research focus to ensure the safety and longevity of energy-related burial systems.

In areas where high temperatures occur, such as nuclear waste storage areas, the aim is to rapidly transfer the heat away from the heat source (canister) and to conduct it towards the main rock. Similarly, in areas where the natural heat of the ground is used, such as heat piles, it is desired that the thermal conductivity is high. For this purpose, it is essential that the mixture or material planned to be used in these areas has a very high heat conduction capacity. Bentonite and zeolite are of critical importance due to their capacity to serve as thermal and hydraulic barriers in nuclear waste management and underground energy transmission lines. Although the hydraulic properties of these materials have been extensively documented in the literature, their ability to dissipate heat from the surrounding environment is inherently limited. This study aims to optimize the 'thermal efficiency' of these barriers by utilizing aluminum powder. In this study, aluminum added zeolite-bentonite mixtures were formed and thermal conductivity measurements were carried out. The heat carrying capacity of mixtures without additives and aluminum added were evaluated.

Underground Cable Thermal Backfill

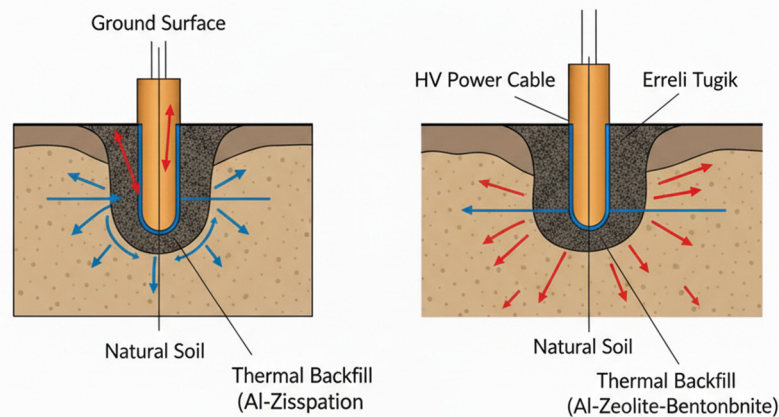


Figure 2. Conceptual design of the field implementation of the aluminum-enhanced mixture as a thermal buffer material for underground power transmission lines

This conceptual design illustrates the practical integration of the developed mixture within energy infrastructure. By replacing conventional backfill with this aluminum-enhanced buffer, a high-efficiency thermal discharge zone is created around the power lines. This arrangement not only prevents overheating but also optimizes the long-term operational safety and energy transmission capacity of the system, demonstrating the material's readiness for real-world geotechnical applications (Figure 2).

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Zeolite and bentonite were provided from local suppliers (Figure 3). The bentonite used is sodium bentonite. Aluminum used in dried form was added to zeolite-bentonite mixtures. When naming the mixtures, "Z" was chosen as zeolite, "B" as bentonite and "Al" as aluminum. Table 1 shows the physico-chemical properties of the materials used in the present study. The size of the aluminum powder used in the experiments is 120 microns and has a purity of 98.85%.

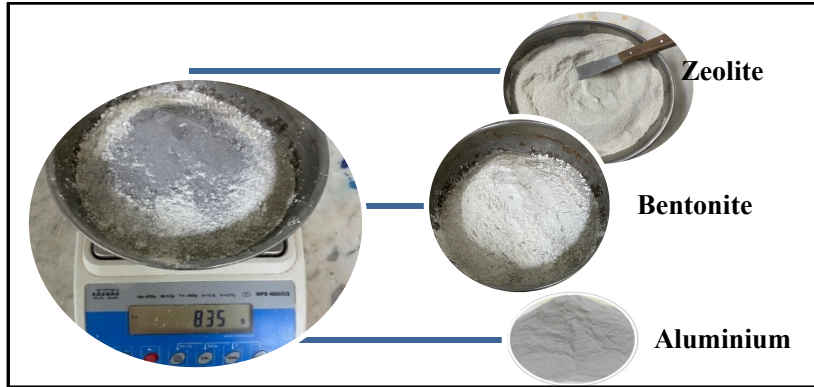


Figure 3. Dry mixture

Some of its main areas of use include; as a metallic pigment; decorative use in the coating, paint, ink and textile sectors; chemical use in the chemical production of polyphyllin, synthetic alcohol and aluminum-based chemicals for controlled reaction values of aluminum powder; use in the plastics and cosmetics sector; use as rocket fuel; use as an electrical conductor in the production of solar cells. In addition to these; it is used in the metallurgical sector as a reducer, heat source and alloying additive. Due to the exothermic properties of aluminum powder, it is frequently used in aluminothermic applications and exothermic sources. It is used as a refractory in the steel industry; as adhesives, fillers and coatings in space and military applications; and as an explosive in the mining, fireworks and military defense sectors.



Figure 4. Wet mixture

Table 1. Experimentally determined physical properties of the materials used in the study

Property	Zeolite	Bentonite
Specific gravity	2.50	2.40
Liquid limit (%)	50.0	476.0
Plastic limit (%)	N.P.	70.1
pH	7.6	9.5

2.2. Methods

Within the scope of a study, standard proctor tests were performed on zeolite-bentonite mixtures with aluminum additives. Samples with and without additives were created using the compaction parameters obtained according to the test results. The samples were compressed in thermal conductivity measurement molds for thermal conductivity measurements (Figure 5). During the compaction process in the mixtures, care was taken to ensure that the energy to be applied was applied equally depending on the number of impacts. The necessary probe was used for thermal conductivity measurement (Figure 5). The measurement results were determined at least 3 times for each sample and the final value was reached by discarding the insignificant results and taking the average among the significant results. The thermal conductivity of the zeolite-bentonite-aluminum mixtures was measured using the Transient Hot-Wire method, which is preferred in geotechnical research for its ability to provide rapid and accurate results without causing significant moisture migration within the soil sample.

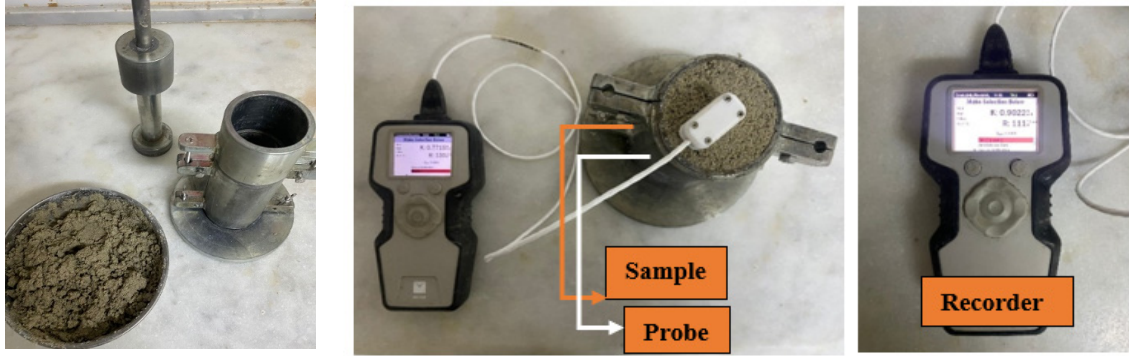


Figure 5. Sample compression apparatus and equipment of thermal conductivity measurement

Thermal properties of soils can vary depending on many factors. Mineralogical structure, particle diameter and grain distribution, dry unit weight, porosity, water content, temperature, pore size, soil skeleton and texture are some of these factors [21-23]. Studies have shown that there are three different factors affecting thermal conductivity: compositional factors, environmental factors and other factors. Examples of compositional factors include mineral composition, gradation, and physical contact area between particles; environmental factors include water content, temperature, and unit volume weight. Other factors include salts, ions, and additives [24]. Different methods have been applied by researchers for thermal conductivity measurements. These methods represent steady state, unsteady state and transition state. Methods such as needle measurement, hot ball method [25], disk-shaped probe measurement [26] have been tried and there are also measurement methods under development. The mathematical model of effective thermal conductivities is given in Equations 1 and 2:

$$k = k_w^L = \left[\sum \frac{\phi_\alpha}{k_\alpha} \right]^{-1} \text{ (Series)} \quad (1)$$

$$k = k_w^U = \sum \phi_\alpha k_\alpha \text{ (Series)} \quad (2)$$

ϕ_α : volume fraction, k_α : thermal conductivity, k_w^L k_w^U and are the lower and upper Wiener bounds [27].

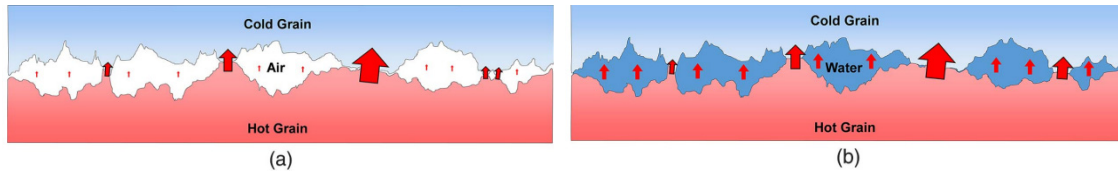


Figure 6. Illustration of heat conduction paths for (a) dry and (b) saturated conditions

Figure 6 shows that the contact resistance and thermal conductivity vary depending on the grain size [28,29]. The contact area and the distances between these surfaces depend on the forces between the grains, the properties of these grains such as strength and hardness, and the roughness of the surfaces [30].

3. RESULTS

3.1. Standard Proctor Test Results

In this study, compaction tests of zeolite-bentonite mixtures were carried out. The experimental results showed that as the amount of zeolite in the mixtures decreased or the amount of bentonite increased, the dry unit weight decreased and the water content increased. Since the ratio of aluminum additive used in the mixtures to the total weight of the mixture is quite low, samples were prepared based on mixtures without additives in the compaction tests. While the fact that the specific gravity of zeolite is slightly higher than the specific gravity of bentonite is shown as one of the reasons for the increase in dry unit weight, it was also observed that the water content increased due to the increase in the bentonite ratio in the mixtures, since bentonite is a material with a very high water absorption capacity [31]. Compaction parameters of the mixtures are given in Table 2.

The compaction characteristics of the zeolite-bentonite mixtures with varying aluminum (Al) content are illustrated in Figure 7. It is observed that the addition of aluminum powder leads to an increase in the Maximum Dry Density (MDD) while causing a slight decrease in the Optimum Moisture Content (OMC). This shift is attributed to the high specific gravity of aluminum particles compared to the clay matrix, which fills the void spaces and creates a more densely packed structure. From a geotechnical standpoint, achieving higher density at lower moisture levels is beneficial for the stability of thermal backfill materials. Since thermal conductivity is significantly enhanced by particle-to-particle contact, all subsequent thermal tests were conducted at these identified OMC points to ensure the samples represented their most stable and thermally efficient state.

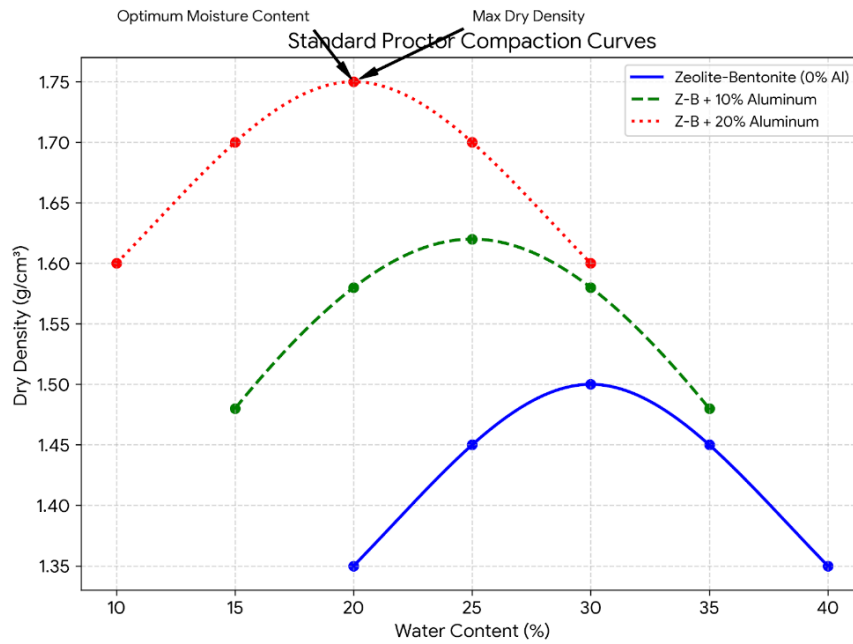


Figure 7. Standard proctor compaction curves for zeolite-bentonite mixtures with varying aluminum powder content, indicating the Maximum Dry Density (MDD) and Optimum Moisture Content (OMC) points

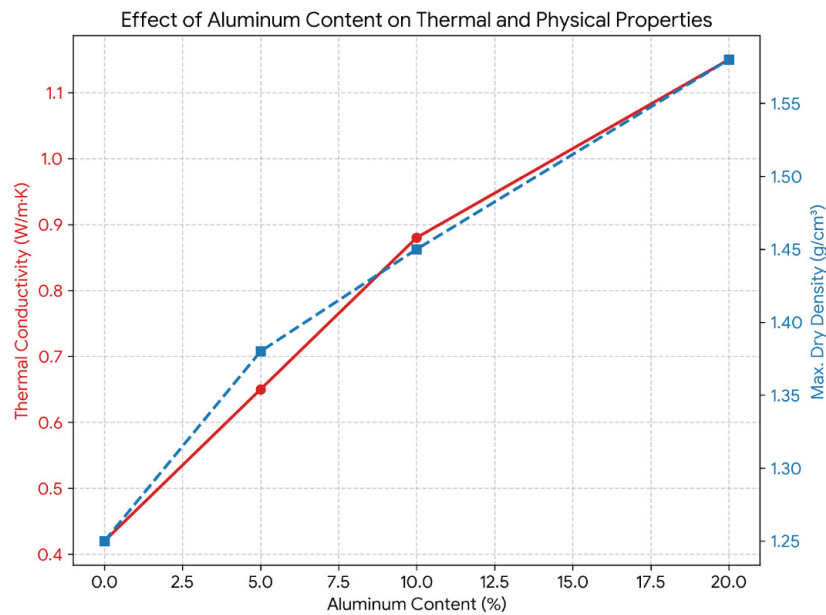


Figure 8. The correlation between aluminum additive percentage and the resulting thermal conductivity and dry density of the mixtures

The relationship between aluminum additive percentage, dry density, and thermal conductivity is presented in Figure 8. The results demonstrate a linear-to-exponential improvement in thermal conductivity as the aluminum content increases from 0% to 20%. Specifically, the inclusion of Al particles creates 'thermal bridges' within the relatively insulating zeolite-bentonite matrix, drastically reducing thermal resistance. Regarding the concerns about soil strength, the observed increase in dry density (as shown in the dual-axis plot) suggests a potential improvement in the compressive strength of the mixture due to reduced porosity. However, while the thermal performance is optimized, the mechanical behavior (such as shear strength and cohesion) may vary depending on the metallic-to-clay particle ratio. This enhancement in thermal conductivity without compromising density confirms that these mixtures are suitable candidates for high-voltage cable insulation and energy pile applications where heat dissipation is critical.

Table 2. Compaction parameters of the mixtur

Mixture	$\gamma_{dry,max}$ (kN/m ³)	w _{opt} (%)
95Z-5B	12.0	24
90Z-10B	11.5	27
85Z-15B	11.1	30

3.2. Thermal Conductivity Measurements

In this study, thermal conductivity values of zeolite-bentonite mixtures with and without additives were determined at room temperature. The measurement results showed that thermal conductivity values decreased with increasing bentonite amount in the mixtures without additives (Table 3). As the proportion of bentonite in the mixture increases, it is seen in Table 1 that the dry unit weight decreases. As the dry unit weight decreases, the thermal conductivity value also decreases due to the grains being able to contact less. The contact surface/area and water play an important role in thermal conductivity measurements [32]. While the contact surfaces of the grains control the thermal conductivity behavior at low water content values, as the amount of water increases, water takes over the control and after a certain level, its effect becomes negligible.

Table 3. Coefficient of thermal conductivity (λ)

Mixture	λ (W/mK)
95Z-5B	0.749
90Z-10B	0.723
85Z-15B	0.702

The findings obtained from this study are intended for field applications, particularly as backfill materials around thermal piles (energy piles). The increase in density observed with higher aluminum content (Table 2) may exert a positive indirect effect on the geotechnical bearing capacity by improving the material's compactability. However, advanced triaxial compression tests are required to optimize the balance between thermal enhancement and mechanical stability.

Figure 9 shows the thermal conductivity changes when aluminum was added to zeolite-bentonite mixtures at 1, 2 and 3% percentages. Mixtures 1, 2 and 3 represent 95Z-5B, 90Z-10B and 85Z-15B mixtures, respectively. The fact that the contribution rates are quite low and very close to each other explains the closeness of the thermal conductivity measurement results. It was also observed that the thermal conductivity value of the 95Z-5B mixture without additive was 0.749 W/mK, while it increased to 0.771 W/mK with 1% aluminum additive and to 0.786 and 0.795 W/mK with 2% and 3% aluminum additives, respectively. Although the increasing amount of bentonite in the pure mixtures has a decreasing effect on conductivity, each pure mixture has become more conductive thermally with the aluminum additives. When it is necessary to interpret the situation with a simple example, while the value of the 90Z-10B-1Al mixture is 0.764 W/mK, the conductivity value of the 85Z-15B-1Al mixture is determined as 0.792 W/mK. This situation can be explained by the decrease in unit volume weight and contact area of increasing bentonite.

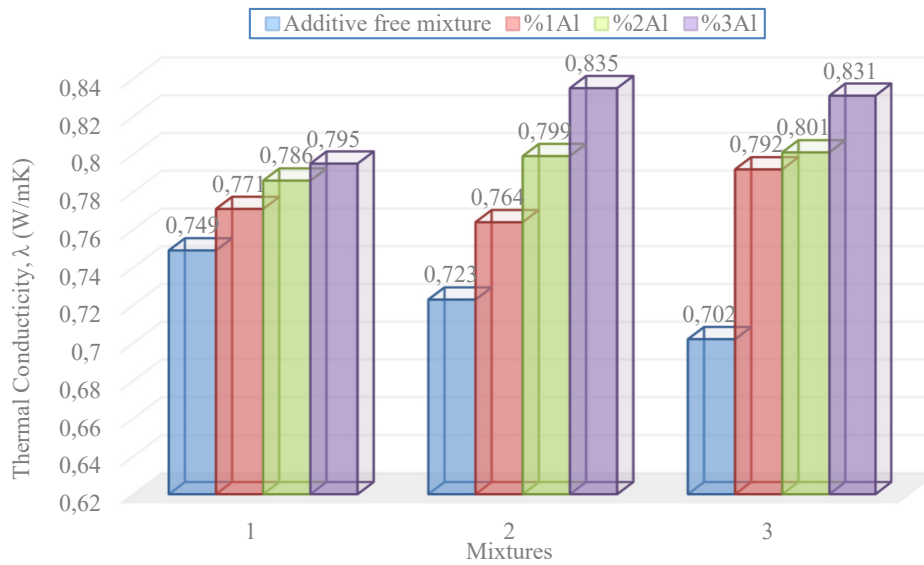


Figure 9. Effect of aluminum addition on thermal conductivity behavior of zeolite-bentonite mixtures

4. CONCLUSIONS

Within the scope of a study, standard proctor tests were performed on zeolite-bentonite mixtures with aluminum additives and thermal conductivity values of zeolite-bentonite mixtures with and without additives were determined at room temperature. It is known that thermal conductivity is among the most important ground parameters and can vary depending on the structure of the ground. Therefore, the minerals in the ground structure, ground texture and bonding methods can directly change the thermal properties. Parameters such as the degree of saturation of the ground, temperature, void ratio are also among the affecting factors. In this study, apart from these factors, the conductivity of new mixtures formed by using aluminum additives was evaluated. The results revealed that thermal conductivity increased as the amount of aluminum increased. On the other hand, it was noted that conductivity decreased as the amount of bentonite increased. This study is primarily limited to the thermal performance of the mixtures at their optimum moisture content (OMC). Since the thermal behavior of soils can vary significantly under different saturation levels, future research is recommended to investigate these mixtures under fully saturated and bone-dry conditions to provide a comprehensive thermal characteristic profile for diverse environmental scenarios. The use of aluminum-added zeolite-bentonite mixtures in targeted areas can be evaluated by performing and interpreting complementary experiments determining other engineering properties such as permeability and compressibility in terms of soil.

Within the scope of this study, the effects of aluminum powder utilized to enhance the thermal performance of zeolite-bentonite mixtures were experimentally investigated. The primary findings are presented below:

1. The addition of aluminum powder increased the thermal conductivity coefficient of the mixtures across all specimens in a linear trend. Increasing the aluminum content from 1% to 3% by weight resulted in an average improvement of approximately 18% in thermal conductivity.
2. The highest thermal conductivity value was measured as 0.835 W/mK.
3. The decrease in thermal conductivity values observed with increasing bentonite content was successfully compensated for by aluminum reinforcement. Compared to the pure zeolite-bentonite mixture, the thermal conductivity in specimens containing 3% aluminum rose from 0.749 W/mK to 0.795 W/mK.
4. A positive numerical correlation was identified between the dry density values obtained from Standard Proctor tests and the measured thermal conductivity, indicating that increased compaction directly benefits heat transfer.

In addition to the thermal enhancements, the influence of aluminum reinforcement on the mechanical strength of the mixtures warrants consideration. As demonstrated in the compaction data, the inclusion of

aluminum powder led to an increase in the maximum dry density of the specimens. This densification typically results in a more robust particle arrangement and reduced porosity, which are key indicators of improved compressive strength and bearing capacity in geotechnical applications. Furthermore, the metallic particles may act as micro-inclusions that reinforce the zeolite-bentonite matrix, potentially increasing the overall stability of the buffer material. However, it should be noted that while higher density suggests a positive trend in strength, the potential impact of metallic additives on the cohesion and internal friction angle of the clay-based matrix should be further validated through comprehensive shear strength and triaxial compression testing to ensure long-term structural integrity under field loading conditions.

5. REFERENCES

1. Vignesh Babu, R. & Kanagaraj, S. (2018). Thermal, electrical and mechanical characterization of microwave sintered Copper/carbon nanotubes (CNT) composites against sintering duration, CNT diameter and its concentration. *Journal of Materials Processing Technology*, 258, 296-309.
2. Shin, S.E., Choi, H.J. & Bae, D.H. (2013). Electrical and thermal conductivities of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Composite Materials*, 47(18), 2249-2256.
3. Chen, J.K. & Huang, I.S. (2013). Thermal properties of aluminum-graphite composites by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 698-703.
4. Tatar, C. & Ozdemir, N. (2010). Investigation of thermal conductivity and microstructure of the a-Al₂O₃ particulate reinforced aluminum composites (Al/Al₂O₃-MMC) by powder metallurgy method. *Physica B: Condensed Matter*, 405(3), 896-899.
5. Lee, H.S., Jeon, K.Y., Kim, H.Y. & Hong, S.H. (2000). Fabrication process and thermal properties of SiCp/Al metal matrix composites for electronic packaging applications. *Journal of Materials Science*, 35(24), 6231-6236.
6. Huber, T., Degischer, H.P., Lefranc, G. & Schmitt, T. (2006). Thermal expansion studies on aluminium-matrix composites with different reinforcement architecture of SiC particles. *Composites Science and Technology*, 66(13), 2206-2217.
7. Nam, T.H., Requena, G. & Degischer, P. (2008). Thermal expansion behaviour of aluminum matrix composites with densely packed SiC particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(5), 856-865.
8. Molina, J.M., Saravanan, R.A., Arpón, R., García-Cordovilla, C., Louis, E. & Narciso, J. (2002). Pressure infiltration of liquid aluminium into packed SiC particulate with a bimodal size distribution. *Acta Materialia*, 50(2), 247-257.
9. Sidhu, S.S., Kumar, S. & Batish, A. (2016). Metal matrix composites for thermal management: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(2), 132-157.
10. Bensch, H., Witte, H. & Wölfel, E. (1955). Röntgendiagramme von Aluminium-Pulver. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4, 65-88.
11. Walter, J. P., Fong, C. Y. & Cohen, M. L. (1973). Electronic charge density of aluminum. *Solid State Communications*, 12(4), 303-306.
12. Rantavuori, E. & Tanninen, V.P. (1977). The X-ray atomic scattering factors of aluminium powder at 80 K. *Physica Scripta*, 15(4), 273-275.
13. Chakraborty, S., Manna, A. & Ghosh, A.K. (1985). Atomic scattering factors of solid elements. *Physica Status Solidi B*, 129(1), 211-220.
14. Nakashima, P.N. (2012). *The metallic bond in aluminium*. Springer Science & Business Media.
15. Sultan, N. (1997). Etude du comportement thermo-mécanique de l'argile de Boom: Expériences et modélisation. *PhD thesis*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 217.
16. Delage, P., Sultan, N. & Cui, Y.J. (2000). On the thermal consolidation of Boom Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(2), 343-354.
17. Chen, G.J., Maes, T., Vandervoort, F., Sillen, X., Van Marcke, P., Honty, M. & Vanderniepen, P. (2014). Thermal impact on damaged Boom Clay and Opalinus Clay: Permeameter and isostatic tests with uCT scanning. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(1), 87-99.
18. Gupta, B. (1964). Creep of saturated soil at different temperatures. *Master thesis*. The University of British Columbia, Canada.
19. Jarad, N. (2016). Temperature impact on the consolidation and creep behaviour of compacted clayey soils. *PhD thesis*. Université de Lorraine, Fransa.
20. Maghsoodi, S., Cuisinier, O. & Masroui, F. (2019). Thermo-mechanical behaviour of clay-structure interface. *E3S Web of Conferences*, 92, 10002.

21. Bi, J., Zhang, M., Chen, W., Lu, J. & Lai, Y. (2018). A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 407-417.
22. Fricke, B. A., Misra, A., Becker, B. R. & Stewart, W. E. (1992). Soil thermal conductivity: Effects of saturation and dry density. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings V International Conference*, Clearwater Beach, Florida, USA.
23. Xu, X., Zhang, W., Fan, C., & Li, G. (2020). Effects of temperature, dry density and water content on the thermal conductivity of Genhe silty clay. *Results in Physics*, 16, 102830.
24. Zhang, N. & Wang, Z. (2017). Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 172-183.
25. Kubičár, L'U., Vretenár, V., Štofanič, V. & Boháč, V. (2010). Hot-ball method for measuring thermal conductivity. *International Journal of Thermophysics*, 31, 1904-1918.
26. Song, X., Fan, H., Liu, J. & Yang, X. (2020). An improved thermal conductivity model for unsaturated clay. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24, 2364-2371.
27. De Vries, D.A. (1963). Thermal properties of soils. In *Physics of Plant Environment*, 210-235.
28. Tavman, I.H. (1996). Effective thermal conductivity of granular porous materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 23(2), 169-176.
29. Weidenfeld, G., Weiss, Y. & Kalman, H. (2004). A theoretical model for effective thermal conductivity (ETC) of particulate beds under compression. *Granular Matter*, 6(2-3), 121-129.
30. Greenwood, J.A. & Williamson, J.P. (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 295(1442), 300-319.
31. Taşçı, M., Çetin, H. ve Pınarcı, E. (2017). Killi zeminlerde permeabilite ve efektif gerilmenin kompaksiyon enerjisine bağlı olarak değişimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 197-204.
32. Tanrıkulu, Y.E. ve Yaşar, A. (2017). Bor mineralleri katkılı plastik malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 1-8.

Implementation of FMEA for Process Improvement in Machine Woven Carpet Production

Veysel CAN^{1,a}, Hatice Kübra KAYNAK^{2,b}, Süleyman METE^{3,c}

¹Gaziantep University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Gaziantep, Türkiye

²Gaziantep University, Textile Engineering Department, Gaziantep, Türkiye

³Gaziantep University, Industrial Engineering Department, Gaziantep, Türkiye

^aORCID: 0009-0004-9884-4259; ^bORCID: 0000-0001-6548-3398; ^cORCID: 0000-0001-7631-5584

Article Info

Received : 04.01.2026

Accepted : 25.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855571

Corresponding Author

Hatice Kübra KAYNAK

tuluca@gantep.edu.tr

Keywords

Carpet production

Failure mode

Failure effect

Risk priority number

How to cite: CAN, V., KAYNAK, H.K., METE, S., (2026). Implementation of FMEA for Process Improvement in Machine Woven Carpet Production. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 331-340.

ABSTRACT

In this study, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) is applied in a carpet production facility, with the aim of enhancing productivity through the elimination of the most critical failures. A comprehensive analysis was conducted to investigate the most frequent faults encountered over a six-month period, whereby the frequency of occurrence for each type of failure was documented. The Risk Priority Numbers (RPN) for each failure mode were subsequently assigned by the FMEA team. Then, a thorough root cause analysis was conducted, leading to the implementation of targeted preventative measures. After implementation of preventive measures, analysis revealed a significant reduction in predetermined failures when compared to former situation. Specifically, a remarkable 75% decline in scrape failures, a 28.57% reduction in abrage failures, and a 59.82% decrease in corner burning failures were determined.

Dokuma Makine Halısı Üretiminde Proses İyileştirme için HTEA Uygulanması

Makale Bilgileri

Geliş : 04.01.2026

Kabul : 25.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1855571

Sorumlu Yazar

Hatice Kübra KAYNAK

tuluca@gantep.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Halı üretimi

Hata türü

Hata etkisi

Risk öncelik sayısı

Atıf şekli: CAN, V., KAYNAK, H.K., METE, S., (2026). Dokuma Makine Halısı Üretiminde Proses İyileştirme için HTEA Uygulanması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 331-340.

ÖZ

Bu çalışmada, bir halı üretim tesisinde Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) yöntemi kullanılarak, en kritik hataların ortadan kaldırılması yoluyla üretkenliğin artırılması amaçlanmıştır. Altı aylık bir dönem boyunca karşılaşılan hataları belirlemek üzere kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiş ve her bir hata türünün meydana gelme sıklığı kayıt altına alınmıştır. Ardından, her bir hata türü için Risk Öncelik Sayıları (RÖS) HTEA ekibi tarafından belirlenmiştir. Sonrasında ayrıntılı bir kök-neden analizi yapılmış ve hedefe yönelik önleyici tedbirler uygulanmıştır. Önleyici faaliyetlerin uygulanmasının ardından yapılan analizler, önceki duruma kıyasla belirlenen hatalarda önemli ölçüde azalma olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, kazıma hatasında %75, abraj hatasında %28,57 ve köşe yakma hatasında %59,82 oranında azalma tespit edilmiştir.

1. INTRODUCTION

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) is a systematic engineering methodology aimed at identifying, evaluating, and eliminating existing or potential failures, problems, and faults in systems, designs, processes, and services before they adversely affect customers. This analytical technique identifies known or potential problems in a process or product to formulate the preventive strategies [1]. In the textile industry, which encompasses a wide range of production systems designed to create a diverse array of textile products, the implications of customer dissatisfaction can be substantial, leading to increased production costs and compromised product quality. Consequently, many researchers have explored the application of FMEA as a means to enhance the overall quality of textile products and the production systems. FMEA can be classified into four distinct categories: system FMEA, design FMEA, process FMEA, and service FMEA. FMEA serves as a critical tool in proactively addressing potential failures through a comprehensive analysis of failure modes, their impacts, causes, and existing control measures, thereby contributing to improved quality in the textile sector.

The assessment of failure priorities in FMEA is grounded in three key components: occurrence, severity, and detectability. Occurrence (O) refers to the likelihood of a failure happening, rated on a scale from 1 to 10, where a higher score indicates a greater potential for occurrence. Severity (S) measures the impact of the failure mode, also rated from 1 to 10, with increased ratings corresponding to more critical risks associated with the failure. Detectability (D) is the ease with which a failure can be identified before it reaches the customer, on a scale of 1 to 10, where a higher score signifies a lower capability to detect the failure. The prioritization of identified problems is represented through Risk Priority Numbers (RPN). This numerical value is computed as the product of occurrence, severity, and detectability. The RPN itself serves primarily to rank the relative concerns associated with various systems, designs, products, processes, and services. It is important to note that the RPN should be interpreted within the context of prioritizing failure modes; it does not hold intrinsic significance beyond this ranking. Calculating the RPN (Eq. 1) involves multiplying the values assigned for severity, occurrence, and detectability [2,3].

$$\text{RPN} = S \times O \times D \quad (1)$$

If $\text{RPN} < 40$, No need for preventive activity

If $40 < \text{RPN} < 100$, preventive activity is profitable.

If $\text{RPN} > 100$, preventive activity must be implemented.

Several studies in the literature based on the application of Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) in textile manufacturing processes. Yücel applied the FMEA method in a garment manufacturing company with the aim of minimizing sewing-related defects. During a four-week production period, defects observed in sewn products were identified and corresponding preventive actions were developed. Following the implementation, the defect rate in the jeans production line was reduced from 11.5% to 7.4%, while the defect rate in the shirt production line decreased from 12.9% to 7.7%. In addition, the average monthly time spent on reworking defective products was reduced from 2660.7 minutes to 1694.4 minutes [4]. Özyazgan and Engin conducted a FMEA-based analysis for a three-months period in a knitting factory to calculate the risk priority numbers (RPNs) of various failures. The findings indicated that the most critical failures were primarily associated with knitting machines. To mitigate these issues, the authors suggested improving workplace conditions, providing employee training, and reviewing machine maintenance procedures, settings, and software systems [5]. Similarly, Kaewsom and Rojanarowan utilized the FMEA technique in filament yarn production and decreased the defect rate from 3.35% to 1.76% [6]. In another study, Özyazgan applied FMEA to identify and eliminate failures occurring in woven fabric production. The results revealed that the major sources of defects were related to insufficiently trained weaving machine operators. Therefore, the study emphasized the importance of enhancing personnel training as a key preventive measure [7]. Sabır and Bebekli carried out a case study in a selected textile dyeing and finishing plant using the FMEA approach. Various types of defects occurring in the dyeing process were identified, and the most critical ones were selected based on their RPN values. For each critical defect, the root causes and necessary preventive actions were determined. Consequently, several improvement recommendations were proposed [8]. Küçük et al. examined the application of FMEA in a ready-to-wear manufacturing facility, focusing on spreading and cutting processes. Risk priority numbers were calculated for 18 different failures, and eight failure types with RPN values exceeding 100 were selected for further analysis. Preventive actions were then developed for these critical failures, leading to recommendations aimed at

improving process performance [9]. Nguyen et al. conducted a case study in a nonwoven manufacturing facility using an enhanced FMEA approach that incorporated quality cost factors and the detection capability of failure identification systems to determine the priority of each failure mode. The authors introduced an analytical model instead of conventional FMEA framework, The results obtained from this model highlighted the importance of routine inspection and maintenance of machine components as key preventive measures. According to the findings, the defect rate of 2.41% was reduced to 1.13% using the proposed method [10]. Ünal and Acar applied the FMEA method to examine defects occurring in the quality control department of a denim outerwear manufacturing plant. Risk Priority Numbers were calculated for the identified failure modes, and preventive actions were defined with the aim of lowering the RPN values and improving overall quality performance [11]. In another study, Pazireh et al. utilized FMEA to develop and implement a quality control system for T-shirt production lines. The method was used to identify and rank potential defects and to provide appropriate operational guidelines for quality control stations. RPN values were calculated for each station, and production lines were monitored based on these values as a preventive strategy. The efficiency of the system before and after FMEA implementation was evaluated through simulation software. In the optimization model, inspection rates at each station and the overall defect percentage were defined as decision variables and objective functions. The results indicated that FMEA significantly improved the allocation of inspection activities across stations and led to a substantial decrease in defective products [12]. Beyene et al. focused on minimizing excessive machine downtime in a weaving factory by analyzing its root causes and their impact on production losses. The application of FMEA in the weaving process revealed that daily downtime could be reduced by approximately 299.04 hours for a total of 178 looms through appropriate corrective and preventive measures [13]. Temel et al. investigated failures in a textile dyeing plant using the FMEA technique and determined the RPN values of the identified failure modes. Their analysis showed that the most critical failures occurred in HT fabric dyeing, centrifuge, and drying units. As a result, improved machine maintenance practices were recommended as the primary preventive action [14]. Mutlu and Altuntaş proposed an integrated methodology combining FMEA and Fault Tree Analysis (FTA) to evaluate failures in a ring spinning production system. The analysis classified 22.80% of failures as unacceptable, 15.78% as high risk, 28.07% as moderate, and 37.35% as acceptable. Based on these findings, the authors recommended the implementation of productive maintenance strategies to eliminate machine-related failures in ring-spun yarn production [15]. Similarly, Fithri et al. applied FMEA to reduce defect levels in woven fabric manufacturing. Failure modes were assessed using RPN values, and several preventive actions were suggested, including the development of Standard Operating Procedures (SOP), the use of machine inspection forms for maintenance activities, operator training programs, and improved coordination with the spinning department regarding raw material quality [16]. Eren and Pamuk examined the application of FMEA in a ready-to-wear apparel manufacturing facility. The study identified that the highest RPN values were associated with insufficient technical expertise among customer service personnel, poor interdepartmental communication, and incomplete information flow. Following the implementation of corrective measures, the RPN values for 12 out of 13 identified failure factors were reduced to below 40 [17]. Cardiel-Ortega and Baeza-Serrato applied the FMEA method in a knitting factory producing children's garments to identify fault types and their effects. RPN values were calculated for six predefined failure modes, and the analysis resulted in a comprehensive report that supported the development of preventive action plans for knitting machines, corrective actions for high-priority failures, and a structured implementation strategy [18].

It can be seen from the literature that, the studies generally focused on FMEA technique to merely determine the most severe failures. Additionally, some of them provided suggestions for preventive activities. Among the textile focused FMEA implementation studies only a few of them compares the situation after application of preventive activities. So, in the literature there is a lack of information about the real time effects of FMEA application on in textile production lines. Additionally, visible carpet failures are generally disturbing, cannot be tolerated and the disposal of the low-quality carpet is an important problem due to high mass. In this study, current failures in carpet production were detected and the most severe failures were determined. For this aim, occurrence, severity, detectability and PRN values of the current failures were obtained by using FMEA technique. The effects of failures were assessed and the causes of these failures were reviewed. By this way, possible preventive activities were emerged and the proper preventive activities were initiated for the carpet production mill. Then, preventive activities were implemented. Differently from the previous studies, after implementation of preventive activities, RPN values were reassessed to determine the real time effects of FMEA. Also, real time reduction of failure carpet product was determined for each failure type by using the production rates of the carpet production mill.

2. MATERIAL AND METHOD

This study focuses on identifying the most critical failure modes in a carpet manufacturing facility through the application of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method and on developing actions to minimize these failures. To achieve this objective, a multidisciplinary team was established to carry out the FMEA procedure. The team systematically identified the failure modes across the carpet production process and evaluated their possible effects and root causes. For each failure mode, severity, occurrence, and detection scores were assigned, and the corresponding Risk Priority Numbers (RPN) were calculated based on the product of these factors. Preventive measures were formulated and implemented for failure modes with RPN values exceeding 100. Following the implementation, the effectiveness of these measures was assessed through a three-month monitoring period, after which the RPN values were recalculated to evaluate improvements. FMEA process flow chart is given in Figure 1.

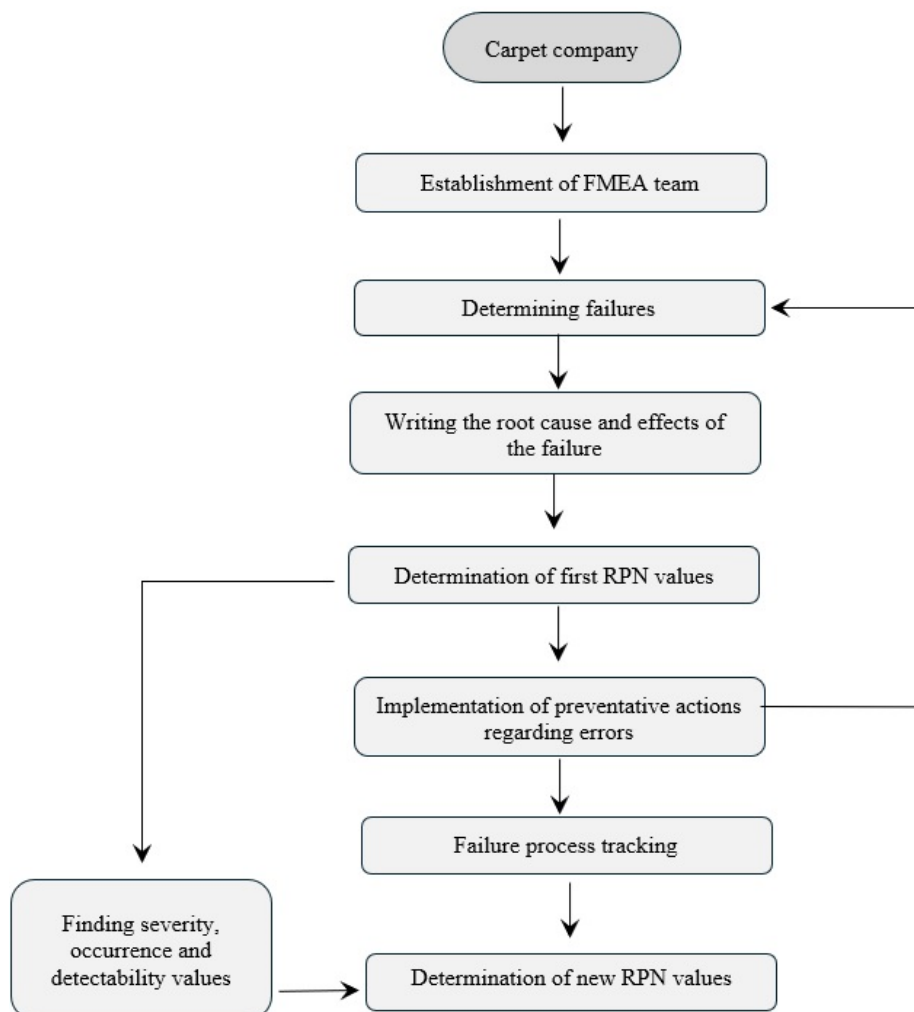


Figure 1. FMEA flow diagram

Studies have been carried out to reduce the most common faults in the carpet company. Using the failure modes and effects analysis, occurrence, severity, detectability rankings for every failure type are determined by the FMEA team. Then, the RPN value was obtained by multiplying occurrence (O), severity (S), detectability (D) values. The FMEA team consists of 5 people. The FMEA team members are the employees who have experience about production. FMEA Team Members are assistant production manager, machinist, garment master, quality control manager, textile engineer. Based on quality control records and previous experience, a list of failures that occur in the carpet company was created. The values mentioned are given in Table 1. According to this list, preventive actions should be determined for faults with a risk priority number of 100 and higher.

Table 1. FMEA failure RPN chart of case study [19]

Failure Modes	Severity	Occurrence	Detectability	RPN
Scrape	9	8	5	360
Abrage	8	7	2	112
Pile space	6	5	3	90
Excessive yarn on carpet back	5	6	3	90
Cross-line pile creation of all colors	8	3	4	96
The rippling of the carpet	8	5	2	80
Knife burn	8	5	2	80
Knife mark	8	5	2	80
Platin mark	7	3	3	63
Imbalance pile	3	4	5	60
Transverse gap on carpet back	6	5	2	60
Ground breakage	8	2	3	48
Foaming	6	4	2	48
Improper Corner Burning	7	8	4	224
Unacceptable repair	6	5	3	90
Yarn residue	6	5	3	90
Crossness	6	5	3	90
Improper winding	5	2	7	70
Damaged packaging	8	4	3	96
Curvature in length cutting	7	6	2	84
Glue leakage	9	3	2	54
Design failure	7	4	3	84
Sending missing carpet	6	5	3	90
Sending wrong order	9	2	3	54
Inappropriate yarn on the loom	7	3	4	84

After the RPN values had been calculated, the FMEA team selected the failure modes with RPN values exceeding 100 for further analysis. Among these, the most critical failure was identified as scrape, with an RPN of 360. This was followed by corner burning and abrage, which had RPN values of 224 and 112, respectively. Because of these three failure modes exhibited the highest risk levels, the implementation study was concentrated on the determined failures. The FMEA methodology was then applied to reduce the occurrence and impact of these failures. Through structured brainstorming sessions, the FMEA team examined the effects and root causes of each determined failure mode. Based on this analysis, appropriate preventive measures and corrective actions were developed and implemented. Analysis for the determined failure modes are illustrated in Table 2.

Table 2. Effects, root-cause, severity, occurrence, detectability and RPN values of the selected failures [19]

Failure modes	Effects of the failure	S	Root-cause (Potential causes of the failure)	O	Current controls	D	RPN
Scrape	The collapse of the carpet backing and imbalanced stretch of pile yarns on carpet surface resulting in irregular pile texture.	9	Entanglement of pile yarns coming from the creel, Improper setting of the distance between faceto face carpets due to lack of lancets, Careless weaving operators, High rate of creel loading, Feeding the pile yarn from the creel as improper bundle form	8	Weaving quality control form / Visual	5	360
Corner Burning	Customer dissatisfaction and complaints due to unraveling of the carpet edges.	7	Improper secure of the sewing threads as a result of not burning the excess threads in the corners after sewing. Inability to make small sizes due to increased workload.	8	Finished product control form	4	224
Abrage	Color differences on the carpet surface	8	Using the same color of pile yarns with different lot numbers which have different color intensity Irregular tension between the pile yarn bobbins and within the yarn on the bobbin itself	7	Pile yarn input control form Creel change form	2	112

Following the detailed evaluation of failure modes, their effects, and root causes by the FMEA team, appropriate preventive actions were systematically identified for each failure type.

Preventive Actions for Scrape Failure

- Periodic inspection of the creel. In addition, particular attention should be given to the drawing-in operation, which involves threading warp yarns through the heald eyes and reed dents in accordance with predefined rules.
- Installation of lancets on weaving machines to improve operational stability.
- Implementation of targeted training programs for weaving loom operators.
- Minimization of the bobbin splitting process in polyester yarn production to reduce defect formation.

Preventive Actions for Corner Burning Failure

- Providing regular training sessions to enhance employee awareness and skill levels.
- Positioning visual instruction boards near machines, illustrating acceptable and unacceptable tip burning conditions to support correct practices.
- Applying job rotation strategies, particularly for small batch production orders, to reduce operator-related errors.

Preventive Actions for Abridge Failure

- Conducting comprehensive inspections of incoming yarns from suppliers using light cabinets and testing equipment for strength, elongation, and twist in the yarn laboratory. All test results should be documented using a pile yarn input control form, and only yarns approved by the laboratory supervisor should be forwarded to the weaving department.
- Verifying the label information inside bobbins mounted on the creel, with inspections carried out jointly by weaving operators and quality control personnel.
- Ensuring that creel change forms are properly completed and that creel inspections are consistently performed by both the weaving operators and the quality control unit [19].

3. THE RESEARCH FINDINGS

3.1. Scrape Failure

Scrape is a failure characterized by the collapse of the carpet backing and the stretching of pile yarns onto the carpet surface, as illustrated in Figure 2.



Figure 2. Photographic view of scrape failure [19]

This failure was primarily observed in three-rapier looms that lacked lancet equipment. In such cases, the narrowing gap between two adjacent carpets caused the cutting knife to penetrate the fabric, leading to the formation of the scrape defect. To prevent this issue, a modification was carried out on the carpet weaving machines by converting the looms from a three-rapier configuration to a two-rapier system. This preventive activity was not applied the entire facility. In order to detect the effect of this preventive activity specifically, only three weaving looms were modified. Table 3 presents a comparison of scrape defect quantities recorded before and after the implementation of this FMEA-based preventive action.

Table 3. Amounts defective products due to scrape failure before and after the preventive actions

	Before preventive actions	After preventive actions
Amount of total defective production in total production	5.07 %	0.49 %
Amount of scrape defective production to total defective production	43.90 %	40.23 %

As indicated in Table 3, prior to the implementation of preventive actions, defective products accounted for 5.07% of the total output of the carpet manufacturing plant. Following the application of preventive actions targeting three major failure modes, this proportion decreased significantly to 0.49%. This improvement is attributed to the substantial reduction in scrape-related defects, which had previously been identified as the most critical failure type. Before the FMEA implementation, scrape defects constituted 43.90% of all recorded failures, while after the preventive actions this amount decreased to 40.23%. This slight decrease can be explained by the fact that machine modifications had not yet been completed across the entire facility. Therefore, it was concluded that further revisions of carpet weaving looms should be considered essential for achieving sustained improvements in overall product quality and for effectively addressing scrape failures. It is anticipated that once the planned weaving loom upgrades are fully implemented, the occurrence of scrape defects in total production will become negligible [19].

3.2. Corner Burning Failure

Corner burning refers to the operation in which loose yarns at the edges of carpets are secured using a controlled flame. When this process is performed incorrectly, the carpet edges may begin to unravel during use, leading to customer dissatisfaction and subsequent complaints. A corner burning defect photographic view is illustrated in Figure 3.



Figure 3. Photographic view of corner burning failure [19]

As a preventive action, a training program was introduced to improve employee understanding of proper corner burning practices. Employee awareness was further reinforced by placing visual panels on the machines that displayed examples of acceptable and unacceptable applications. Table 4 presents a comparison of corner burning defect quantities recorded before and after the implementation of these FMEA-based preventive actions.

Table 4. Amounts defective products due to corner burning failure before and after the preventive actions

	Before preventive actions	After preventive actions
Amount of total defective production in total production	5.07 %	0.49 %
Amount of corner burning defective production to total defective production	9.90 %	3.15 %

The results indicate that the occurrence of this defect was reduced by approximately 66% compared to the initial level, which can be regarded as a significant improvement.

3.3. Abrage Failure

Abrage failure arise from uneven yarn tension, which leads to visible color variations in the carpet surface. A representative photographic image of this defect is given in Figure 4.

**Figure 4.** Photographic view of abrage failure

To address this issue, additional testing equipment was acquired for the yarn laboratory as part of the preventive actions. Incoming yarns are now subjected to systematic inspection and testing, and all measurement results are documented. Only yarns that receive laboratory approval are released to the weaving department. Furthermore, during creel replacement procedures, the quality control unit verifies and records the accuracy of bobbin placement and creel sequence to prevent mismatches. Table 5 is given for comparison of abrage failure defective product amounts observed before and after the implementation of FMEA-based preventive actions.

Table 5. Amounts defective products due to Abrage failure before and after the preventive actions

	Before preventive actions	After preventive actions
Amount of total defective production in total production	5.07 %	0.49 %
Amount of abrage defective production to total defective production	14.78 %	13.70 %

The findings indicate that abrade-related defects decreased by approximately 8%, suggesting that further or alternative preventive strategies may be required to achieve more substantial improvement.

3.4. Changes in RPN Values of Selected Failures

Table 6 provides a comparative understanding for severity, occurrence, detectability and RPN values before and after implementation of preventive actions for each predetermined failure mode.

Table 6. RPN values for selected failures before and after preventive actions

Failure mode	Before preventive actions				After preventive actions				Change in RPN, %
	S	O	D	RPN	S	O	D	RPN	
Scrape	9	8	5	360	9	5	2	90	75
Corner burning	7	8	4	224	7	5	3	90	59.82
Abrade	8	7	2	112	8	5	2	80	28.57

Prior to the implementation of the FMEA study, the RPN for the scrape defect was calculated as 360. Following loom modifications, particularly the installation of lancets, a notable reduction in scrape-related failure was achieved. As a result, the RPN value declined to 90, corresponding to a 75% improvement. In the case of corner burning failure, the RPN value was reduced from 224 to 90, indicating a success rate of approximately 59.82%. For the abrade defect, the initial RPN was determined to be 112, which decreased to 80 after the application of FMEA-based preventive actions, yielding a reduction of 28.57%. Based on the outcomes observed in the weaving and post-weaving processes, it can be inferred that the primary contributors to these failures are related to existing loom configurations and insufficient employee awareness.

4. RESULTS

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a widely used quantitative method aimed at enhancing product quality and improving customer satisfaction by identifying and eliminating potential failures before they occur. In this study, FMEA was applied in a carpet manufacturing company to systematically analyze existing defects and their root causes through structured discussions conducted by a dedicated FMEA team. For this purpose, the production system was examined across the yarn laboratory, weaving, and finished product departments, and the root causes of the observed failures were identified.

The analysis focused on three core production departments where manufacturing activities are concentrated. Within these departments, failure modes with the highest RPN were identified in collaboration with the FMEA team, and targeted preventive actions were implemented accordingly. Examination of the failure sources revealed that issues such as loom configuration and insufficient operator awareness were among the primary contributors to defects. To address scrape-related failures, loom adjustments were carried out by installing lancets and converting three of carpet weaving looms from a three-rapier system to a two-rapier configuration in line with the established revision plan. To mitigate abrade defects, incoming yarns supplied to the facility were subjected to systematic testing and documentation using a pile yarn input control form, and only approved yarns were released to the weaving department. Additionally, creel arrangements were monitored through creel change forms to ensure correct yarn placement.

For corner burning defects, employee training and awareness initiatives were strengthened by installing visual instruction boards near the machines, illustrating correct and incorrect burning practices. As a result of the FMEA-based improvements, reductions of 75% in scrape defects, 28.57% in abrade defects, and 59.82% in corner burning defects were achieved. These improvements are expected to enhance the company's competitive position and reputation by lowering defect rates, improving product quality, reducing operational costs, ensuring timely and problem-free product delivery, and ultimately increasing customer satisfaction [19].

5. REFERENCES

1. Stamatis, D.H. (2003). *Failure mode and effect analysis*. ASQ Quality Press, Wisconsin, 438.
2. Hwang, S.K., Kim, D.H. & Kim, S.C. (2024). Analysis of risk priority number of FMEA and surprise index for components of 7 kW electric vehicle charger. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 1-9.
3. Bocut, Ö.S. & Uncu, N. (2022). FMEA Based Fuzzy Topsis for Assessment of Quality Problems in Telescopic Platform Production. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 875-884.
4. Yücel, Ö. (2007). Konfeksiyon üretiminde hata türü ve etkileri analizi. *Textile and Apparel*, 17(2), 126-131.
5. Özyazgan, V. & Engin F.Z. (2013). FMEA analysis and applications in knitting industry. *Textile and Apparel*, 23(3), 228-232.
6. Kaewsom, P. & Rojanarowan, N. (2014). The application of FMEA to reduce defective rate from broken filament defects in the Direct Spin Drawing process. *IOSR Journal of Engineering*, 4(5), 55-58.
7. Özyazgan, V. (2014). FMEA analysis and implementation in a textile factory producing woven fabric. *Textile and Apparel*, 24(3), 303-308.
8. Sabır, E.C. ve Bebekli, M. (2015). Hata türleri ve etkileri analizinin tekstil boya-terbiye işletmelerinde kullanımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 57-163.
9. Küçük, M., İşler, M. & Güner, M. (2016). An application of the FMEA method to the cutting department of a clothing company. *Textile and Apparel*, 26(2), 205-212.
10. Nguyen, T.L., Shu, M.H. & Hsu, B.M. (2016). Extended FMEA for Sustainable Manufacturing: An Empirical Study in the Non-Woven Fabrics Industry. *Sustainability*, 8(939), 1-14.
11. Ünal, Z.B. & Acar, E. (2016). Failure mode and effect analysis: An application in jeans production process. *Tekstil*, 65(1-2), 30-34.
12. Pazireh, E., Sadeghi, A.H. & Shokohyar, S. (2017). Analyzing the enhancement of production efficiency using FMEA through simulation-based optimization technique: A case study in apparel manufacturing. *Cogent Engineering*, 4, 1-12.
13. Beyene, T.D., Gebeyehu, S.G. & Mengistu, A.T. (2018). Application of failure mode effect analysis (FMEA) to reduce downtime in a textile share company. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 8(1), 40-46.
14. Temel, S., Türkmen, D., Kundakçı, O.E. ve Güngör, A. (2019). Bir tekstil işletmesinin boyahane bölümündeki kritik makinelerin analizi ve bakım planı önerisi. *International Maintenance Technologies Congress and Exhibition*, Denizli, Türkiye, 127-137.
15. Mutlu, N.G. & Altuntaş, S. (2019). Hazard and risk analysis for ring spinning yarn production process by integrated FTA-FMEA approach. *Textile and Apparel*, 29(3), 208-218.
16. Fithri, P., Andra, D.J. & Wirdianto, E. (2020). The use of FMEA for the quality control analysis of greige fabrics (case study in the Weaving Department of PT. Unitex, Tbk). *Materials Science and Engineering*, 847(1), 1-8.
17. Eren, E.R. ve Pamuk, O. (2020). Hata türü ve etkileri analizi yönteminin konfeksiyon sektöründe uygulanması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1533-1546.
18. Cardiel-Ortega, J.J. & Baeza-Serrato, R. (2021). Failure mode and effect analysis of knitting machines in the textile industry. *Proceedings of the 10th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*, New York, USA, 47-54.
19. Can, V. (2025). Implementation of failure mode and effect analysis in carpet production mill. *Master Science Thesis*. Gaziantep University, Graduate School of Natural & Applied Sciences, Textile Engineering, Gaziantep, 46.

Belirsizlik Ortamında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Tam Sayılı Programlama ile Risk Analizi

Özge Doğa ASILSOY ^{1,a}, Nurhayat ÇALU ^{1,b}, Ayça ALKIŞ ^{1,c}, Ertuğrul GÜNTAY ^{1,d},
Büşra YILMAZ ^{1,e}, Murat OTURAKÇI ^{1,f}

¹İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

^aORCID: 0009-0008-3103-7531; ^bORCID: 0009-0007-2883-4698; ^cORCID: 0009-0007-2112-5215;

^dORCID: 0009-0003-0326-8846; ^eORCID: 0009-0003-8050-8073; ^fORCID: 0000-0001-5946-3964

Makale Bilgileri

Geliş : 10.02.2025

Kabul : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1636819

Sorumlu Yazar

Büşra YILMAZ

busra.yilmaz@bakircay.edu.tr

Anahtar Kelimeler

FMEA

AHP

Bulanık AHP

Tam sayılı programlama

Atıf şekli: ASILSOY, Ö.D., ÇALU, N., ALKIŞ, A., GÜNTAY, E., YILMAZ, B., OTURAKÇI, M., (2026). Belirsizlik Ortamında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ve Tam Sayılı Programlama ile Risk Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 341-357.

ÖZ

Bu çalışma, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede faaliyetlerden kaynaklanan tehlike ve riskleri belirlemek, önceliklendirmek ve sınırlı kaynaklarla uygun aksiyon planları geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), bulanık FMEA, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ile ağırlıklandırılmış İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi (TOPSIS) ve Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi (SWARA) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Elde edilen risk skorları, tam sayılı programlama modeliyle analiz edilerek kaynakların öncelikli risklere göre tahsis edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, üretim süreci risklerinin sistematik değerlendirilmesi ve stratejik karar alma süreçlerinin desteklenmesi için bütünlük bir çerçeve sunmaktadır.

Multi-Criteria Decision Making Techniques Under Uncertainty and Risk Analysis with Integer Programming

Article Info

Received : 10.02.2025

Accepted : 19.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1636819

Corresponding Author

Büşra YILMAZ

busra.yilmaz@bakircay.edu.tr

Keywords

FMEA

AHP

Fuzzy AHP

Integer programming

How to cite: ASILSOY, Ö.D., ÇALU, N., ALKIŞ, A., GÜNTAY, E., YILMAZ, B., OTURAKÇI, M., (2026). Multi-Criteria Decision Making Techniques Under Uncertainty and Risk Analysis with Integer Programming. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 341-357.

ABSTRACT

This study was conducted to identify and prioritize the hazards and risks arising from the activities of a company producing insulation products and to develop appropriate action plans under limited resources. In this context, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), fuzzy FMEA, the Analytic Hierarchy Process (AHP)-weighted Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) methods were used in an integrated manner. The obtained risk scores were analyzed through an integer programming model to allocate resources according to priority risks. The study presents an integrated framework for the systematic evaluation of production process risks and the support of strategic decision-making processes.

1. GİRİŞ

Yalıtım ürünleri üretim endüstrisi; kimyasal bileşenlerin kullanıldığı prosesler, yüksek sıcaklık uygulamaları, yoğun toz oluşumu, basınçlı sistemler ve yangın/patlama riski gibi birden fazla tehlike kaynağının aynı üretim hattı içinde bir arada bulunduğu, iş sağlığı ve güvenliği açısından yüksek hassasiyet gerektiren sektörlerden biridir [1]. Bu tür işletmelerde proses sürekliliği, ürün kalitesi ve üretim verimliliği hedefleri ile çalışan güvenliğini aynı anda koruma zorunluluğu, risk yönetimini yalnızca yasal bir gereklilik olmaktan çıkarıp stratejik bir karar problemine dönüştürmektedir. Nitekim sektörde yaşanan iş kazalarının önemli bir kısmının, tehlikelerin doğru tanımlanamaması kadar, tanımlanan risklerin doğru önceliklendirilememesine ve buna bağlı olarak sınırlı kaynakların etkisiz biçimde kullanılmasına dayandığı rapor edilmektedir. Özellikle orta ölçekli işletmelerde bütçe, zaman, bakım-onarım kapasitesi ve iş gücü kısıtları nedeniyle tüm risklerin aynı anda azaltılması çoğu zaman mümkün değildir. Bu nedenle, risk azaltma faaliyetlerinde “hangi risklerin önce ele alınması gerektiği” sorusu hem maliyet etkinliği hem de çalışan güvenliği açısından kritik öneme sahiptir [2].

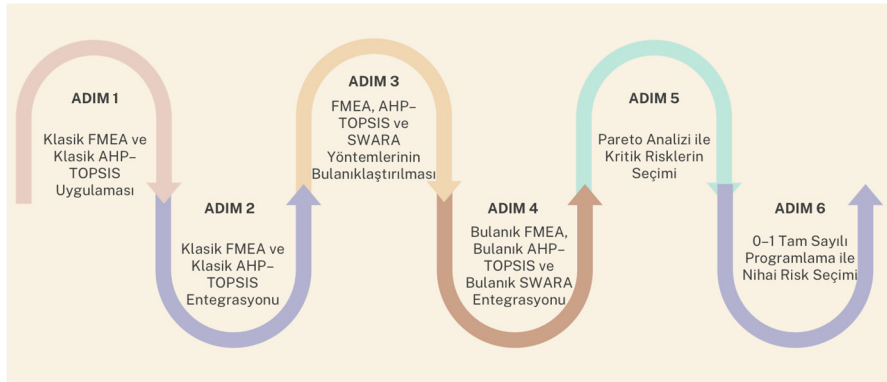
Risklerin önceliklendirilmesi literatürde farklı yöntemlerle ele alınmakla birlikte, gerçek dünya koşullarında karar vericiler çoğu zaman tam bilgiye sahip değildir ve risk değerlendirmeleri uzman yargılarına dayalıdır. Bu durum, değerlendirmelerde kaçınılmaz bir sübjektiflik ve belirsizlik oluşturur. Klasik risk değerlendirme yöntemleri ise çoğunlukla net (kesin) sayısal girdilerle çalıştığından, belirsizlik ve kararsızlık durumlarını yeterince temsil edememektedir. Örneğin klasik FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) yönteminde Risk Öncelik Puanı (RÖP) hesabı deterministik bir mantıkla yapılır ve olasılık, şiddet ve tespit edilebilirlik gibi bileşenler çoğu zaman tek bir değere indirgenerek değerlendirilir. Bu yaklaşım, saha koşullarındaki bulanıklığı ve uzmanların “yaklaşık” ya da “aralık” şeklindeki ifadelerini yansıtmadığı için risklerin birbirine çok yakın puanlarla değerlendirilmesine ve dolayısıyla hatalı önceliklendirmeye yol açabilmektedir [3-4]. Benzer şekilde, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS gibi çok kriterli karar verme yöntemleri de klasik biçimleriyle kesin değerlendirmelerle çalışır; karar vericilerin “tam emin olmama”, “iki seçenek arasında kalma” veya “yakın önem düzeyleri” gibi belirsizlik içeren yargıları bu yapılarda sınırlı düzeyde temsil edilebilir. Bu bağlamda, literatürde söz konusu yöntemlerin bulanık uzantıları önerilmiş olsa da riskin büyüklüğünü ve kriter temelli görelî önemi (AHP-TOPSIS) birlikte ele alan, ayrıca yöntem tutarlılığını test eden ve nihayetinde kaynak kısıtı altında uygulanabilir kararlar üreten bütüncül çerçevelerin sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede iş sağlığı ve güvenliği kapsamında belirlenen tehlikelerin daha hassas ve güvenilir biçimde önceliklendirilmesini sağlamak ve sınırlı kaynak koşullarında uygulanacak aksiyonların optimum biçimde seçilmesine yönelik bütünlük bir karar desteği yaklaşımı geliştirmektir. Çalışma, Türkiye’de faaliyet gösteren bir yalıtım tesisinden elde edilen gerçek saha verileri üzerinden yürütülmüştür. İlk aşamada riskler FMEA yaklaşımı ile değerlendirilmiş; daha sonra riskleri etkileyen kriterlerin görelî önemleri çok kriterli karar verme yapısı içinde ele alınmıştır. Bu noktada çalışma yalnızca tek bir yönetime dayanmamış; belirsizliklerin karar sürecine sistematik biçimde entegre edilebilmesi için yöntemlerin bulanık sürümleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda, risk skorları Bulanık FMEA ile hesaplanmış, kriter öncelikleri Bulanık AHP-TOPSIS ile elde edilmiş ve kriter ağırlıkları ayrıca Bulanık SWARA (Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi) yöntemiyle yeniden değerlendirilerek normalize edilmiştir. Bulanık SWARA’nın sürece dahil edilmesi, yalnızca alternatif bir ağırlık seti üretmekten öte, farklı ağırlıklandırma yaklaşımlarının sonuçları üzerindeki etkisinin karşılaştırılmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen Bulanık SWARA ağırlıkları, Bulanık AHP-TOPSIS sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler göstermekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlı olabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle SWARA tabanlı sonuçlar, AHP-TOPSIS çıktılarının doğrudan doğrulanması yerine, sonuçların yöntem seçimine bağlı değişkenliğini değerlendirmeye yönelik tamamlayıcı bir analiz olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, risklerin önceliklendirilmesi yalnızca sıralama üretmekle sınırlı tutulmamış; hangi risklerin kritik olduğunun belirlenmesi için Pareto analizi uygulanmıştır. Pareto yaklaşımı, toplam riskin büyük bir bölümünü oluşturan “kritik azınlığın” belirlenmesine dayanır ve işletmeler açısından hangi risklerin ilk etapta ele alınması gerektiğini pratik bir biçimde ortaya koyar. Bu çalışmada Pareto analizinde kullanılan risk değerleri ile matematiksel optimizasyon modelinde kullanılan risk girdileri aynı tanım ve aynı ölçek temelinde seçilmiştir. Bu kapsamda, Pareto analizinde ve matematiksel modelde risk girdisi olarak Bulanık AHP-FMEA entegre değerleri tercih edilmiştir. Bunun temel gerekçesi, matematiksel modelin tekil bir risk katsayısı üzerinden çalışması ve bu katsayının hem

Bulanık FMEA ile elde edilen risk büyüklüğünü hem de Bulanık AHP–TOPSIS ile hesaplanan göreceli önem yapısını aynı anda temsil etmesi gerekliliğidir. Başka bir ifadeyle Bulanık AHP–FMEA değeri, riskin şiddeti/olasılığı/belirlenimi gibi bileşenlerden türeyen toplam risk seviyesini, kriter öncelikleriyle bütünleştirerek tek bir entegre göstergede toplamakta ve böylece Pareto seçimi ile optimizasyon modelinin aynı risk anlayışı üzerinden tutarlı karar üretmesini sağlamaktadır. Buna karşılık, Bulanık SWARA–FMEA entegre değeri çalışmada esasen karşılaştırmalı değerlendirme ve sonuçların ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlılığını inceleme amacıyla ele alınmıştır; ana karar hattının Bulanık AHP–TOPSIS tabanlı entegrasyonla kurulması ise hem literatürdeki yaygın kullanım hem de TOPSIS yönteminin alternatiflerin göreceli yakınlıklarına dayalı sistematik bir sıralama sunması nedeniyle tercih edilmiştir.

Son aşamada, Pareto analizi ile kritik olarak belirlenen riskler, sınırlı kaynak koşullarında uygulanacak aksiyonların seçimi amacıyla 0–1 tam sayılı programlama modeli ile optimize edilmiştir. Bu sayede çalışma, yalnızca “hangi risk daha önemlidir?” sorusuna cevap vermekle kalmamakta; aynı zamanda “mevcut kaynak kısıtı altında hangi risklere müdahale edilirse toplam risk en fazla azaltılır?” sorusuna da nicel ve uygulanabilir bir çözüm üretmektedir. Bu yönüyle çalışma, bulanık mantık tabanlı çok kriterli karar verme yöntemleri ile matematiksel optimizasyonu tek bir çerçevede birleştirerek, belirsizlik altında daha doğru risk önceliklendirme ve kaynak tahsisi sağlaması bakımından literatürde özgün bir katkı sunmaktadır. Çalışmada izlenen metodolojik adımlar ve bütünlük yaklaşımının genel akışı Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın adımları

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada kullanılan yöntemlerin temelleri, literatürde geniş bir şekilde ele alınmış ve farklı uygulama alanlarında etkinliğini kanıtlamış yöntemlere dayanmaktadır. Çok kriterli karar verme, bulanık mantık, optimizasyon ve risk değerlendirme gibi konular üzerine yapılan araştırmalar, bu çalışmanın yöntemsel çerçevesinin oluşturulmasında önemli bir yol göstermiştir. Özellikle işletmelerin risk yönetimi süreçlerinde kullanılan klasik ve bulanık yaklaşımlar, karar alma süreçlerinin daha sistematik ve verimli hale gelmesine katkıda bulunmuştur. Aşağıda, bu çalışmanın temelini oluşturan literatür incelemelerine yer verilmiştir.

2.1. Bulanık AHP Uygulamaları

Bu bölümde, Bulanık AHP yönteminin farklı karar verme problemlerine nasıl uygulandığını gösteren çalışmalar özetlenmiştir. Bulanık AHP, özellikle belirsizliklerin ve subjektif değerlendirmelerin yoğun olduğu durumlarda daha güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Akman ve Alkan [5], otomotiv yan sanayinde tedarikçi performansını değerlendirmek amacıyla Bulanık AHP yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, tedarikçi performansını etkileyen kriterler bulanık mantık yaklaşımıyla ele alınmış ve Kocaeli’de otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren bir işletmenin üç tedarikçisinin performansını değerlendirilmiştir. Bu çalışma, tedarikçi performansının çok kriterli karar verme problemi olarak ele alınabileceğini ve Bulanık AHP yönteminin belirsizlik içeren değerlendirme süreçlerinde kullanılabilirliğini göstermektedir.

Şengül ve arkadaşları [6], çalışmalarında, belediyelerin toplu taşıma aracı seçim problemi çok kriterli karar verme yaklaşımıyla ele alınmış ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHP) yöntemi uygulanmıştır.

Karar verme sürecinde alternatiflerin birden fazla kriter açısından değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmış; belirsizlik içeren uzman değerlendirmelerini daha gerçekçi biçimde yansıtmak amacıyla AHP yöntemi bulanık mantık ile bütünleştirilmiştir. Uygulama kapsamında, belediyeler için en uygun otobüs alternatifinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Aydın [7], Ankara’da bir hastane için en uygun yerin belirlenmesi amacıyla Bulanık AHP yöntemini kullanmıştır. Çalışma, hastane yer seçimi sürecinde demografik, ekonomik ve çevresel faktörler gibi birçok kriteri dikkate almıştır. Bulanık AHP yöntemi, bu kriterler arasındaki öncelikleri belirleyerek en uygun yer seçimini sağlamıştır. Bu yaklaşım, sağlık tesislerinin planlanmasında önemli bir örnek teşkil etmektedir.

2.2. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Entegrasyonu (AHP-TOPSIS)

Bu kısım, farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin birleştirilerek daha kapsamlı ve güçlü çözümler sunan çalışmalara odaklanmaktadır. Özellikle AHP ve TOPSIS gibi yöntemlerin entegrasyonu, karmaşık karar verme süreçlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Şahin ve Supçiller [8], tedarikçi seçimi ve değerlendirme probleminin çözümünde AHP, TOPSIS ve K-ortalamalar yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları AHP ile belirlenmiş, elde edilen ağırlıklar TOPSIS yönteminde kullanılarak tedarikçiler sıralanmıştır. Ardından K-ortalamalar yöntemiyle tedarikçiler benzer özelliklerine göre kümeler ayrışmış ve böylece yalnızca en iyi tedarikçiyi seçmek yerine etkin tedarik planlarının oluşturulması amaçlanmıştır.

Kocakaya ve arkadaşları [9], bölgesel havacılık operasyonlarında kullanılabilecek turbojet motorlu uçak modellerinin seçimi için küresel bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, maliyet, teknik özellikler ve emniyet kriterleri kapsamında 9 alternatif uçak modeli değerlendirilmiş ve farklı ortalama operatörlerine göre en uygun alternatifler belirlenmiştir.

Kalan [10], dolum hattı makineleri için tedarikçi seçim probleminde AHP ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmış; kriter ağırlıklarının AHP ile belirlenmesi ve alternatiflerin TOPSIS ile sıralanması sayesinde karar verme sürecinin sistematik biçimde desteklenebileceğini göstermiştir.

2.3. Risk Analizi ve Önceliklendirme Çalışmaları

Bu bölüm, çeşitli sektörlerdeki risklerin belirlenmesi, analiz edilmesi ve önceliklendirilmesi üzerine yapılan çalışmaları içermektedir. Özellikle klasik risk analiz yöntemlerinin (FMEA, HTEA, Fine-Kinney) bulanık mantık ile entegrasyonu, belirsizlik altındaki risk değerlendirmelerinde daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Yörükoğlu ve arkadaşları [11], rüzgâr, jeotermal ve güneş enerjisi santrallerine ilişkin riskleri değerlendirmek amacıyla HTEA ve Bulanık HTEA yöntemlerini uygulamışlardır. Çalışmada riskler farklı boyutlar altında sınıflandırılmış, risk öncelik sayıları hesaplanmış ve üç enerji santrali türü risk düzeyleri bakımından karşılaştırılmıştır.

Özfırat [12], iş sağlığı ve güvenliği kapsamında madencilik sektöründe risk analizi gerçekleştirmiştir. Hata türleri ve etkileri analizi (HTEA) yöntemine bulanık AHP entegre edilerek daha objektif ve gerçekçi risk öncelik sayıları elde edilmiştir. Böylece proaktif önlemler için daha güvenilir bir değerlendirme yöntemi sunulmuştur.

Oturakçı ve Dağsuyu [13], Fine-Kinney yöntemini bulanık mantık ile entegre ederek risk değerlendirme süreçlerindeki belirsizliği azaltmayı amaçlamıştır. Bu çalışmada, bulanık mantık yöntemiyle belirsizlikler ele alınmış ve daha hassas ve gerçekçi risk değerlendirmeleri yapılmıştır.

Turan [14], transformatör üreten bir işletmede süreçlerden kaynaklanabilecek hataların belirlenmesi, önceliklendirilmesi ve firma güvenilirliğinin artırılması amacıyla Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) ve Bulanık HTEA yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmada, klasik HTEA ile risk öncelik değeri yüksek hatalar belirlenmiş; sözel ifadeler ve kişisel değerlendirmelerden kaynaklanan belirsizlikleri azaltmak amacıyla Bulanık HTEA uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Bulanık HTEA’nın daha gerçekçi risk öncelikleri sunduğunu göstermiş ve çalışmanın sürekliliğini sağlamak için bir HTEA takip sistemi geliştirilmiştir.

Dişkaya ve Emir [15], İstanbul'da deprem riski altındaki ilçe ve mahallelerin kentsel dönüşüm önceliklerini belirlemek amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Çalışmada, deprem riski temelinde yerleşim birimlerinin öncelik sıralaması yapılmış ve elde edilen sonuçların kentsel dönüşüm projelerinin planlanmasına destek sağlaması amaçlanmıştır.

Poyraz ve Şimşir [16], iklimlendirme ve ısıtma sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin talep planlama sürecinde ortaya çıkan hataları değerlendirmek amacıyla Bulanık SWARA ve Bulanık COPRAS tabanlı bütünlük bir risk analizi modeli önermişlerdir. Çalışmada, Süreç HTEA yönteminin uzman değerlendirmelerini yeterince yansıtamama gibi sınırlılıklarını gidermek hedeflenmiş; kriter ağırlıkları Bulanık SWARA ile belirlenirken hataların öncelik sıralaması Bulanık COPRAS yöntemiyle yapılmıştır. Sonuçlara göre, talep rakamlarının eksik veya yanlış belirlenmesi ile master data eksikliklerinden kaynaklanan hatalar en kritik riskler olarak tespit edilmiştir.

Eş Yürek [17], kumaş boyama sürecinde hata türlerini belirlemek ve risk değerlendirmesi yapmak için çalışmıştır. Çalışma, üretim sürecindeki hataların tanımlanması, bu hataların etkilerinin analiz edilmesi ve önleyici tedbirlerin geliştirilmesini amaçlamıştır.

Yorulmaz ve Sezen [18], denizcilik sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kapsamında Fine-Kinney yöntemiyle risk analizi yapmıştır. Uzman görüşüyle belirlenen 10 denizcilik tehlikesi farklı risk türleri açısından değerlendirilmiş, ancak eşit risk skorları nedeniyle yöntemin yetersiz kaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, Fine-Kinney'in başka analiz yöntemleriyle birlikte kullanılması önerilmiştir.

Karakuzu ve arkadaşları [19], mobilya sektöründe risk analizi yapmak için hem HTEA hem de Bulanık HTEA yöntemlerini kullanmışlardır. Bulanık HTEA yöntemi, özellikle risk parametrelerindeki belirsizlikleri ele alarak, daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Bu çalışmalar, bulanık mantık ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin belirsizliklerin giderilmesi ve süreçlerin iyileştirilmesi konularında etkin çözümler sunduğunu göstermektedir. Literatürdeki bu zengin birikim, bu çalışmada kullanılan yöntem ve yaklaşımların dayanaklarını oluşturmuştur. Yapılan literatür taramasında, FMEA'nın klasik haliyle kullanıldığı pek çok çalışmaya rastlanmıştır. Ancak bu çalışmaların birçoğunda kriter ağırlıkları sabit alınmakta ve belirsizlik dikkate alınmamaktadır. Ayrıca risklerin önceliklendirilmesi sonrasında, kaynak kısıtlarını dikkate alan bir optimizasyon modeliyle karar destek sunan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada, FMEA risk ağırlıkları bulanık AHP ile belirlenmiş ve risk önceliklerine göre sınırlı kaynaklarla müdahale edilecek risklerin seçimi için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, belirsizlik altında değerlendirme yapılmasına ve uygulama odaklı bir optimizasyon çerçevesi sunulmasına imkân tanımaktadır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, yalıtım ürünleri üreten bir işletmede karşılaşılabilecek risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve uygun aksiyonların alınması amacıyla dört temel yöntem kullanılmaktadır: FMEA, AHP, TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi) ve Tam sayılı programlama. Yöntemlerin Bulanık Mantık ile genişletilmiş versiyonları risklerin belirsizlik altında daha sistematik bir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında tehlike sıralamalarının entegrasyon kontrolü için Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiştir. Sonrasında, Pareto Analizi ile risklerin işletmeye olan toplam etkilerine göre önceliklendirilmesi sağlanarak en kritik sorunlara odaklanılmıştır. Son aşamada, önceliklendirilen riskler arasında karar vermek için tam sayılı programlama tabanlı bir çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmada değerlendirilecek tehlikelerin belirlenmesi süreci, sistematik bir metodoloji izlenerek gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ilgili üretim tesisinde görev yapan iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, üretim sorumlusu ve bakım sorumlusundan oluşan üç kişilik bir uzman ekibi oluşturulmuştur. İkinci aşamada, bu uzmanlardan geçmiş kaza kayıtları, ramak kala olay raporları ve tesisin mevcut risk değerlendirme dokümanlarını inceleyerek ön liste halinde potansiyel tehlikeleri belirlemeleri istenmiştir. Üçüncü aşamada, uzmanlar kendi deneyimlerini ve günlük operasyonel gözlemlerini dikkate alarak bu ön listeyi değerlendirmiş, benzer veya tekrarlayan tehlikeleri birleştirerek listeyi sadeleştirmiştir. Bu aşamada oluşturulan ara çıktı, işletmede daha önce raporlanan veya gözlemlenen olayların sistematik biçimde sınıflandırıldığı bir ön tehlike listesidir. Son aşamada ise, uzmanlar arasında yapılan değerlendirme

toplantısı sonucunda ortak görüş birliği sağlanarak çalışmada kullanılacak nihai tehlike listesi oluşturulmuştur. Böylece tehlikeler doğrudan literatürden alınmamış, sahadan elde edilen veriler ve uzman görüşleriyle yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, metodolojinin yalnızca teorik bilgilere değil, işletmenin gerçek risk profiline dayanmasını sağlamış; ortaya çıkan nihai liste, sonraki analiz aşamalarına girdi sağlayacak şekilde doğrulanmış ve çizelgelenmiştir.

3.1. FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi)

FMEA, Toplam Kalite Yönetimi (TKY) anlayışında yer bulan; “proaktif” nitelikli (hatalar meydana geldikten sonra durumu düzeltmeye çalışmak yerine, onları önlemeyi amaçlayan), uygulanması kolay ve düşük maliyetli bir kalite iyileştirme tekniğidir.

Sürecin yapısal bozukluğu, işleyişindeki düzensizlik, uygulandığındaki kuralızsızlık, çıktısının beklentiyi karşılamaması gibi sürece dair her türlü istenmeyen durum veya verimsizlik “hata” olarak kabul edilir. Bunlar önceden bilinen olaylar olabileceği gibi, henüz hiç karşılaşılmamış fakat gerçekleşmesi olası görülen olaylar da olabilir.

Hata Olasılığı

Hata olasılığı, herhangi bir hatanın ne sıklıkta ortaya çıkabileceğine dair bir sıklık belirtir. Olasılık değerleri “kesin, imkânsız, nadiren, sıkça” gibi sözel ifadelerle ya da “%100, 10.000’de 3” gibi sayısal ifadelerle belirtilebilir.

Hatanın Etki Şiddeti

Etki şiddeti, olası en kötü duruma dayalı risk değerlendirmesine göre, bir anlamda hatanın önemini ifade eder. Belirli bir hata için etki şiddeti, bu hata etkisinin ciddiyeti oranında yüksek olacaktır.

Belirlenim

Belirlenim; herhangi bir hata ya da hataya neden olabilecek aksaklığın belirlenmesi, gözlem, kontrol ve çözümleme ile ya da beyin fırtınası, örnekleme dayalı istatistik, benzetim (simülasyon) ve laboratuvar testleri gibi yöntemler yardımıyla açığa çıkarılmasıdır.

Risk Öncelik Puanı (RÖP)

RÖP, sözü edilen ölçeklerle hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenime atfedilmiş puanların çarpımıyla hesaplanan sayısal bir değerdir. FMEA tekniği RÖP değerini, hata türlerinin taşıdıkları risk bakımından sıralanabilmesi amacıyla, kullanışlı bir araç olarak kullanır. RÖP değerinin yorumu da yine bu çarpanların tanımı ve yararlanılan ölçeklerden yola çıkılarak yapılır. Hata olasılığının ya da etki şiddetinin artması ve belirlenimin zorlaşması genel olarak riskin artması anlamına gelir. İlgili ölçekler de buna göre hazırlanır ise, RÖP değerinin yüksek olması yüksek riske, düşük olması da düşük riske işaret edecektir [20].

Risk faktörleri ve tehlikeler, sahada görev yapan üç uzman (iş sağlığı ve güvenliği uzmanı, bakım mühendisi ve üretim sorumlusu) tarafından tanımlanmıştır. FMEA kapsamında kullanılan olasılık, şiddet ve belirlenim puanları, Xu ve arkadaşları [21] tarafından önerilen ölçütlere dayalı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada FMEA yaklaşımı bulanık mantık ile entegre edilmiştir. Her bir risk için üç temel parametre olan hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim değerleri, uzman görüşlerine dayalı olarak üçgen bulanık sayılar biçiminde tanımlanmıştır. Bu değerler bulanık çarpım yöntemi ile birleştirilmiş ve böylece bulanık risk öncelik puanı (Fuzzy RÖP) hesaplanmıştır. Ardından, sıralama yapılabilmesi için her bir bulanık sayı, defuzzification işlemine tabi tutularak tekil (keskin) bir değere dönüştürülmüş ve riskler bu değerlere göre sıralanmıştır. Bu yöntem, klasik FMEA’nın belirsizliğe duyarsız yapısına alternatif olarak daha esnek ve uzman görüşlerini bütünleyen bir yapıda uygulanmıştır.

3.2. AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci)

İnsan yargısının karar sürecine dâhil edilmesi, karar verme sürecinin etkinliğini artırabilmektedir. Aynı karar problemi söz konusu olduğunda, bireyler arasında kriterlerin önem düzeyi ve seçeneklerin

değerlendirilmesi açısından farklılıklar görülebilir. Bu tür durumlarda AHP yöntemi, daha etkin kararlar alınmasını sağlayabilmektedir.

AHP yönteminde, karar verme süreci belirli bir hedef doğrultusunda yapılandırılır. Bu hedef, birden fazla alt hedefin gerçekleştirilmesiyle ulaşılmaya çalışılan genel amacı ifade eder. Kriterler ise bu alt amaçları temsil eder. Karar seçenekleri, belirlenen kriterler doğrultusunda ikili karşılaştırmalar ile değerlendirilir.

Eğer karar sürecinde birden fazla kriter söz konusuysa ve bu kriterlerin karar üzerindeki etkileri eşit değilse, AHP yöntemi bu farklılıkları dikkate alarak seçeneklerin karşılaştırılması ve sıralanmasına imkân tanır. Karar verme tekniklerinde temel amaç, belirlenen hedefe ve kriterlere göre seçeneklerin nasıl ölçülüp sıralanacağını belirlemesidir. Öznel yargıların etkili olduğu durumlarda, AHP yöntemi bir problemin kriterlerini hiyerarşik yapı içinde tanımlamayı ve temsil etmeyi mümkün kılar. Bu yöntem, problemi daha küçük parçalara ayırarak, kriterlerin ve seçeneklerin ikili karşılaştırmalar yoluyla analiz edildiği sistematik ve mantıksal bir yaklaşımdır.

AHP yönteminin üç aşaması vardır

- Hiyerarşinin oluşturulması
- İkili karşılaştırmalı değerlendirme
- Önceliklerin (puanların) hesaplanması [22]

Bu çalışmada risk ağırlıklarının belirlenmesinde bulanık AHP yöntemi olarak Chang [23] tarafından önerilen Mertebe Analizi (Extent Analysis) yaklaşımı kullanılmıştır. Üçgen bulanık sayılar (Triangular Fuzzy Numbers – TFN) ile uzman görüşleri değerlendirilmiş ve her bir kriterin göreceli önemi bu yöntemle göre hesaplanmıştır. Üçgen bulanık sayılar için kullanılan üyelik fonksiyonları literatürde yaygın olarak benimsenen $[l, m, u]$ formunda tanımlanmıştır. Burada l en düşük, m en olası ve u en yüksek değeri temsil etmektedir. Karar matrisinde kullanılan ikili karşılaştırmalar, üç uzman tarafından sağlanan görüşlerin bulanıklaştırılmasıyla elde edilmiştir.

3.3. TOPSIS (İdeal Çözüme Yakınlık Yöntemi)

TOPSIS yöntemi Chen ve Hwang (1992) tarafından Hwang ve Yoon'un (1981) çalışmaları referans gösterilerek ortaya konulmuştur. TOPSIS yöntemi çok kriterli karar verme tekniklerinden biridir. Yöntem kullanılarak alternatif seçeneklerin belirli kriterler doğrultusunda ve kriterlerin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasında ideal duruma göre karşılaştırılması gerekmektedir. Alternatifi n sayıda, kriterleri m tane olan çok kriterli karar verme problemi m boyutlu uzayda n noktaları ile gösterilebilir. Hwang ve Yoon (1981) TOPSIS yöntemini çözüm alternatifinin, pozitif ideal çözüm noktasına en kısa mesafe ve negatif-ideal çözüm noktasına en uzak mesafede olacağı varsayımına göre oluşturmuşlardır [24].

TOPSIS yönteminin aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Yöntemin birinci aşamasında karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisi içerisinde alternatifler $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ şeklinde alt alta sıralanmakta ve her bir kriterin alternatiflere göre gösterdikleri özellikler $(y_{1k}, \dots, y_{nk})$ olarak listelenmektedir.
- Yöntemin ikinci aşamasında karar matrisindeki kriterlere ait puan veya özelliklerin kareleri toplamının karekökü alınarak matrise ait normalizasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Yöntemin üçüncü aşamasında normalize edilmiş karar matrisinin elemanları kriterlere verilen önem doğrultusunda ağırlıklandırılır. Burada ağırlıkların belirlenmesinde karar vericinin subjektif görüşleri yer almaktadır.
- Dördüncü aşamada m^+ ve m^- ideal noktaları tanımlanır. Burada ağırlıklandırılmış matriste (D) her bir kolonda maksimum ve minimum değerler tespit edilir.
- İdeal noktaların tanımlanmasının ardından beşinci aşamada maksimum ideal noktaya olan uzaklık hesaplanır.
- Daha sonra altıncı aşamada minimum noktaya olan uzaklık hesaplanmaktadır.
- Son aşama olan yedinci aşamada ise her bir alternatifin göreceli sıralaması ve puanı hesaplanmaktadır [24].

3.4. SWARA (Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi)

Son yıllarda yaygın biçimde kullanılan modern Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımlarından biri olan SWARA yöntemi, Kerşuliene ve arkadaşları tarafından 2010 yılında geliştirilmiştir [25]. Bu yöntem, karar verme sürecinde kriterlerin göreceli önem derecelerini uzman yargılarına dayalı olarak sistematik biçimde belirlemeyi amaçlar. Yöntemin temel mantığı, karar vericilerin kriterleri önem derecelerine göre sıralaması ve her bir kriterin bir öncekine kıyasla ne kadar daha az önemli olduğunu belirlemesi üzerine kuruludur. Bu adım adım ilerleyen yapı, uzman görüşlerinin tutarlı biçimde sayısal değerlere dönüştürülmesine olanak sağlar ve özellikle belirsizlik içeren karar verme problemlerinde kriterlerin göreceli öneminin esnek ve gerçekçi biçimde belirlenmesini mümkün kılar [26].

SWARA yönteminde ilk olarak uzmanlar, kriterleri tahmini önem derecelerine göre sıralayarak en önemli kriterden en az önemli olana doğru bir dizi oluşturur. Ardından, her bir kriter bir önceki kriterle karşılaştırılarak göreceli önem oranı belirlenir. Bu oran, kriterlerin ağırlık katsayılarının adım adım güncellenmesinde kullanılır. Üçüncü aşamada, elde edilen karşılaştırmalı önem değerlerinden yararlanılarak her bir kriter için düzeltme katsayısı hesaplanır. Dördüncü aşamada, bu katsayılar kullanılarak yeniden hesaplanmış ağırlık değerleri elde edilir. Son aşamada, bulunan ağırlıklar normalize edilerek toplamı bire eşit olacak biçimde nihai kriter ağırlıkları oluşturulur [26].

3.5. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, insanlara ait düşünme, öğrenme ve öğrenerek akıl yürütme gibi özelliklerin bilgisayarlar tarafından kullanılmasına olanak sağlayan bir yaklaşımdır. Bu yöntem uygulanırken sayısal ifadeler yerine sözel veriler kullanılır ve makineler bu sözel verileri, belirli sayısal temellere dayandırarak işler. Bulanık mantık, bir gerçekliğin yaklaşık olarak ifade edilmesini sağlar; çünkü bu sistemde klasik mantıkta olduğu gibi kesinlik bulunmaz.

Bulanık mantıkta her şey, sıfır ile bir arasındaki üyelik dereceleriyle temsil edilir. Özellikle modelin oluşturulmadığı veya oluşturulmasının oldukça güç olduğu sistemlerde kullanılır. Sonuçlar, klasik mantıkta olduğu gibi "var" ya da "yok" şeklinde değil; "biraz var", "kısmen yok" gibi daha esnek biçimlerde ifade edilir. Klasik mantıkla tanımlanan tüm kavramlar, bulanık mantıkla da ifade edilebilir.

Bulanık mantığın temel ilkeleri şu şekilde sıralanabilir: verilerin bulanıklaştırılması, bu verilere ait üyelik fonksiyonlarının oluşturulması, bulanık çıkarım yapılması ve sonuçların durulaştırılması [27].

3.6. Pareto Analizi

Normal dağılımda sebeplerin en önemli %20'si, sonuçların %80'ini; ardından gelen %30'u, sonuçların %15'ini ve geri kalan %50'si ise sonuçların yalnızca %5'ini oluşturmaktadır. Maliyetlerin yaklaşık %80'inin, elemanların yalnızca %20'sinden kaynaklandığı veya servetin yaklaşık %80'inin nüfusun %20'si tarafından kontrol edildiği durumlar bu prensibe örnektir. Bu oranlar sebebiyle Pareto prensibi literatürde "80-20", "90-10" veya "70-30" kuralı olarak anılmaktadır. ABC analizi olarak da bilinen Pareto grafiği, yaygın bir ayırım yöntemi veya öncelik belirleme aracı olarak kullanılmaktadır [28].

3.7. 0-1 Tam Sayılı Programlama

Uygulamada birçok doğrusal programlama modelinde bölünebilirlik varsayımının her zaman geçerli olmadığı görülmektedir. Hatta bazı modellerin yalnızca "evet" ya da "hayır" kararlarıyla sınırlandırıldığı durumlar bulunmaktadır. Bu tür modellerde kararlar, yalnızca iki seçenekle ifade edilir. Örneğin, "Bu yatırım yapılmalı mı?", "Fabrika X alanında mı kurulmalı?" gibi kararlar, 0 ve 1 değerleriyle temsil edilen karar değişkenleri ile gösterilir.

Bu tür karar değişkenlerine "0-1 değişkenleri" adı verilir. Tüm karar değişkenlerinin yalnızca 0 veya 1 değerine eşit olması gerektiğinde, bu tür doğrusal programlama modellerine "0-1 tam sayılı programlama" ya da "ikili tam sayılı programlama" denir.

Bazı doğrusal programlama modellerinde ise karar değişkenlerinin bir kısmı tam sayı (örneğin, 0-1), diğer kısmı ise bölünebilirlik varsayımını karşılayarak kesirli değerler alabilir. Bu tür modeller ise “karma tam sayılı programlama” olarak adlandırılmaktadır [29].

$$x_i = \begin{cases} 1, & R_i \text{ eğer seçilirse} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases},$$

r_i : R_i 'nin risk skoru

l_i : R_i 'nin iş gücü gereksinimi

t_i : R_i 'nin zaman gereksinimi

c_i : R_i 'nin maliyet gereksinimi

L^{max} : Maksimum mevcut iş gücü kapasitesi

T^{max} : Maksimum mevcut zaman

C^{max} : Maksimum mevcut maliyet veya bütçe sınırı

i : Değerlendirmeye alınan alternatif (risk ögesi indeksi) ($i = 1, 2, \dots, n$)

$$MaxZ = \sum_{i=1}^n r_i * x_i \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n l_i * x_i \leq L^{max} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i * x_i \leq T^{max} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i * x_i \leq C^{max} \quad (4)$$

$$x_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Eşitlik (1), amaç fonksiyonunu ifade etmekte olup modelin temel hedefini oluşturarak seçilen risklerin toplam risk skorunu maksimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu sayede, eldeki kaynaklar en verimli biçimde kullanılarak en yüksek toplam faydayı sağlayan risk kombinasyonu belirlenmektedir. Eşitlik (2), iş gücü kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin uygulanması için gereken toplam iş gücü miktarının mevcut personel kapasitesini aşmamasını güvence altına almaktadır. Böylece, model uygulama sürecinde iş gücü yetersizliği nedeniyle ortaya çıkabilecek planlama sorunlarının önüne geçilmektedir. Eşitlik (3), zaman kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin gerçekleştirilmesi için gerekli toplam sürenin önceden belirlenmiş zaman sınırları içinde kalmasını sağlamaktadır. Bu kısıt sayesinde, uygulama süreci belirlenen takvimle uyumlu hale getirilmekte ve süre aşımından kaynaklanabilecek operasyonel riskler azaltılmaktadır. Eşitlik (4), maliyet kısıtını ifade etmekte olup seçilen risklerin toplam maliyetinin ayrılan bütçeyi geçmemesini garanti etmektedir. Bu koşul, modelin finansal sürdürülebilirlik ilkesine uygun biçimde çalışmasını sağlamakta ve kaynak kullanımında ekonomik dengeyi korumaktadır. Eşitlik (5), karar değişkenlerinin ikili (0–1) biçiminde tanımlandığını göstermekte olup her bir riskin seçilip seçilmediğini açık biçimde ifade etmektedir. Bu tanımlama, modelin sonuçlarını yorumlamayı kolaylaştırmakta ve seçilen risklerin net bir biçimde ortaya konulmasına olanak tanımaktadır.

4. BULGULAR

Bu çalışmada kullanılan risk verileri, Türkiye’de faaliyet gösteren orta ölçekli bir yalıtım ürünleri üretim tesisinde, üretim, bakım ve iş sağlığı güvenliği birimlerinden elde edilmiştir. Gerçek saha verilerine dayanan bu veri seti, işletmede gerçekleştirilen gözlemler ve iş güvenliği kayıtları temel alınarak oluşturulmuştur. FMEA analizinde kullanılan üç temel kriter olan hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim

değerleri, işletme içindeki iş güvenliği uzmanları, bakım mühendisleri ve üretim sorumlularından oluşan üç kişilik bir uzman grubunun görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir.

Çalışmada ilk olarak her bir tehlike için bu üç parametre 1 ile 10 arasında puanlanmış ve klasik FMEA yöntemi çerçevesinde bu puanların çarpımıyla RÖP hesaplanmıştır. Kullanılan ölçek, klasik FMEA literatüründe sıkça başvuru alan “1: düşük – 10: yüksek” aralıklı üçlü değerlendirme sistemine dayanmaktadır.

Ayrıca, AHP yöntemi kapsamında kullanılan karar matrisi de aynı uzman grubunun ikili karşılaştırma yöntemiyle oluşturulmuştur. Uzmanlar, FMEA kriterleri (olasılık, şiddet ve saptanabilirlik) arasında göreceli öncelikleri değerlendirmiş ve bu değerlendirmelere dayanarak AHP ağırlıkları elde edilmiştir. Her bir uzmanın verdiği karşılaştırmalar, tutarlılık oranı ($CR < 0,1$) sağlanacak şekilde analiz edilmiş ve nihai ağırlık vektörü oluşturulmuştur.

Elde edilen puanlar ve ağırlıklar TOPSIS yöntemiyle entegre edilmiş ve hem klasik yaklaşımın hem de bulanık mantıkla genişletilen modelleme sürecinin temel bileşenlerini oluşturmuştur. Ayrıca, bulanık temelli SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve sonuçların farklı ağırlıklandırma yaklaşımlarına bağlı değişkenliği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, gerçek saha verilerine dayalı uygulamalı bir modelleme çerçevesi sunmaktadır.

Bu çalışma, belirsizlik ortamında risklerin değerlendirilmesi için çok kriterli karar verme tekniklerini ve bulanık mantık temelli yaklaşımları entegre etmeyi hedeflemektedir. Bu tür yöntemler, özellikle işletmelerin sınırlı kaynaklarını en etkili şekilde kullanarak öncelikli risklere yönelik eylem planları oluşturmaya olanak tanımaktadır. Ayrıca, belirsizlik ve eksik bilgi içeren durumlarda bulanık mantık tekniklerinin esneklik sağlaması, bu yaklaşımları geleneksel yöntemlere göre daha avantajlı hale getirmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı, bir yalıtım ürünleri üreten işletmede karşılaşılabilecek potansiyel risklerin, çok kriterli karar verme teknikleri, bulanık mantık tabanlı metodolojiler, Pareto analizi ve tam sayılı programlama yöntemleri ile değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesidir. Bu süreçte, FMEA yöntemine ek olarak, AHP ve TOPSIS yöntemleri birleştirilmiş ve bulanıklaştırılmıştır. Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve sonuçların ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlılığı analiz edilmiştir. Elde edilen risk skorları, Pareto analizi ile önceliklendirilmiş, ardından tam sayılı programlama yöntemi kullanılarak sınırlı kaynaklar doğrultusunda optimal eylem planları oluşturulmuştur. Böylece, risk yönetiminde hem teorik hem de uygulamalı olarak kapsamlı bir model geliştirilmiştir.

Veri Setindeki Tehlikeler:

- | | |
|---|---|
| 1. Kesici Aletler ve Ekipman Kullanımı | 12. Makine ve Ekipman Bakım Sorunları |
| 2. Yüksek ve Düşük Sıcaklık Riski | 13. Forklift ve Diğer Taşıma Araçları |
| 3. Kimyasal Maddeler ve Sızıntılar | 14. Yangın Güvenliği Eksiklikleri |
| 4. Gürültü Seviyesi ve Koruyucu Ekipman Eksikliği | 15. Yangın Çıkış Yollarının Engellenmesi |
| 5. Elektriksel Riskler | 16. Uygunsuz Kişisel Koruyucu Ekipman Kullanımı |
| 6. Ağır Yük Kaldırma ve Düşme Tehlikeleri | 17. Uygun Olmayan Malzeme Kullanımı |
| 7. Düşme ve Kayma Tehlikeleri | 18. Zemin Güvenliği ve Kayganlık |
| 8. Hızla Hareket Eden ve Tehlikeli Makineler | 19. Depolama ve Düzenleme Eksiklikleri |
| 9. Patlayıcı ve Yanıcı Maddelerin Varlığı | 20. Dış Ortam Şartlarının Olumsuz Etkileri |
| 10. Havalandırma ve Aydınlatma Eksiklikleri | 21. Bakım ve Onarım Eksiklikleri |
| 11. Yüksek Basınç Altında Çalışma | 22. Kullanılmayan Ekipmanların Kötü Durumu |

Ele alınan çalışmaya ilk olarak literatür taraması ile başlanılmış, gerekli tehlike veri seti edinilmiş ve bu veriler üzerinden hata olasılığı, etki şiddeti ve belirlenim değerlerinin çarpımı ile FMEA değerleri bulunmuştur daha sonra AHP tabanlı TOPSIS uygulanarak entegrasyonu sağlanmıştır.

Çalışmada gerçekleştirilen FMEA ve AHP-TOPSIS entegrasyonu Çizelge 1’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. FMEA ve AHP-TOPSIS entegrasyonu

Tehlikeler	FMEA	AHP-TOPSIS	Entegre değerler
Tehlike1	210	0.477	100.208
Tehlike 2	108	0.564	60.990
Tehlike 3	378	0.275	104.112
Tehlike 4	280	0.451	126.427
Tehlike 5	120	0.485	58.217
Tehlike 6	210	0.530	111.444
Tehlike 7	108	0.592	63.943
Tehlike 8	324	0.365	118.382
Tehlike 9	288	0.461	132.915
Tehlike 10	336	0.460	154.739
Tehlike 11	128	0.419	53.751
Tehlike 12	84	0.439	36.917
Tehlike 13	90	0.553	49.812
Tehlike 14	280	0.582	162.985
Tehlike 15	420	0.373	156.641
Tehlike 16	80	0.537	42.972
Tehlike 17	210	0.387	81.277
Tehlike 18	56	0.526	29.495
Tehlike 19	96	0.490	47.039
Tehlike 20	36	0.506	18.237
Tehlike 21	144	0.596	85.867
Tehlike 22	126	0.387	48.819

Yapılan entegrasyon, belirsizliklerin daha etkin yönetilmesi ve değerlendirme sürecinin daha hassas sonuçlar üretebilmesi amacıyla bulanık ortamda gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Bulanık FMEA, Bulanık AHP-TOPSIS ve Bulanık SWARA yöntemleri birlikte kullanılmıştır. İlk olarak Bulanık FMEA yöntemiyle tehlikelerin risk puanları hesaplanmış; ardından Bulanık AHP-TOPSIS ile kriterlerin göreceli önemleri belirlenmiştir. Sürece eklenen Bulanık SWARA yöntemiyle kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilmiş ve normalize edilmiştir. Elde edilen Bulanık SWARA sonuçları, Bulanık AHP-TOPSIS ağırlıklarıyla karşılaştırmalı olarak incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler göstermekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yaklaşımına duyarlı olabildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle SWARA tabanlı sonuçlar, AHP-TOPSIS çıktılarının doğrudan doğrulanması yerine sonuçların yöntem seçimine bağlı değişkenliğini değerlendirmeye yönelik tamamlayıcı bir analiz olarak ele alınmıştır. Son olarak, Bulanık SWARA ağırlıkları Bulanık FMEA skorlarıyla birleştirilerek alternatif bir Bulanık SWARA-FMEA entegrasyon değeri elde edilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen tüm entegrasyon adımlarının sonuçları Çizelge 2’de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Bulanık FMEA- bulanık AHP-TOPSIS- bulanık SWARA entegrasyonu

Tehlikeler	Bulanık FMEA	Bulanık AHP-TOPSIS	Bulanık SWARA	Entegre değerler (Bulanık AHP-FMEA)	Entegre değerler (Bulanık SWARA-FMEA)
Tehlike1	899	0,619	0,038	556.414	34.122
Tehlike 2	899	0,555	0,0345	499.277	31.015
Tehlike 3	899	0,553	0,0496	497.476	44.600
Tehlike 4	700	0,67	0,0434	469.270	30.380
Tehlike 5	899	0,516	0,0371	464.640	33.373
Tehlike 6	776	0,57	0,0442	442.381	34.299
Tehlike 7	776	0,539	0,0327	418.852	25.375
Tehlike 8	899	0,422	0,046	379.514	41.344
Tehlike 9	675	0,56	0,0407	378.143	27.473
Tehlike 10	675	0,554	0,0487	374.601	32.872
Tehlike 11	776	0,471	0,0398	365.938	30.845
Tehlike 12	675	0,54	0,0354	364.735	23.895
Tehlike 13	563	0,646	0,0469	363.742	26.381
Tehlike 14	776	0,447	0,0451	347.123	35.038
Tehlike 15	600	0,572	0,0478	343.212	28.680
Tehlike 16	776	0,4	0,0389	310.527	30.146
Tehlike 17	500	0,618	0,0363	309.251	18.150
Tehlike 18	600	0,4	0,0309	240.361	18.540
Tehlike 19	600	0,388	0,0336	233.185	20.160
Tehlike 20	700	0,297	0,0318	208.064	22.260
Tehlike 21	400	0,485	0,0416	194.156	16.640
Tehlike 22	363	0,512	0,0425	185.862	15.398

Çizelge 1 ve Çizelge 2 birlikte değerlendirildiğinde, tehlikelerin önceliklendirilmesinde kullanılan entegrasyon yaklaşımının sonuçları belirgin biçimde etkilendiği görülmektedir. Çizelge 1’de klasik FMEA skorları ile AHP–TOPSIS katsayıları çarpılarak tek bir “entegre değer” elde edilmiş ve tehlikeler bu birleşik gösterge üzerinden sıralanmıştır. Bu çizelgede yüksek FMEA skoruna sahip tehlikeler, AHP–TOPSIS katsayısı orta düzeyde olsa dahi üst sıralarda yer alabilmekte; dolayısıyla riskin büyüklüğü (FMEA) ile göreceli önem (AHP–TOPSIS) birlikte ancak FMEA’nın daha baskın olduğu bir yapı oluşmaktadır.

Çizelge 2’de ise aynı problem bulanık ortamda ele alınmış; Bulanık FMEA ile risk skorları hesaplanmış, Bulanık AHP–TOPSIS ile göreceli önemler belirlenmiş ve ayrıca Bulanık SWARA ile kriter ağırlıkları yeniden değerlendirilerek normalize edilmiştir. Bu yapı sonucunda iki farklı entegrasyon çıktısı üretilmiştir: Bulanık AHP–FMEA entegre değerleri ve Bulanık SWARA–FMEA entegre değerleri. Çizelge 2’nin en önemli katkısı, yalnızca “tek bir” entegrasyon değerine bağlı kalmak yerine, aynı risk yapısının iki ayrı ağırlıklandırma mantığıyla (AHP–TOPSIS ve SWARA) çapraz incelenmesine imkân vermesidir. Nitekim Bulanık SWARA sonuçları Bulanık AHP–TOPSIS ağırlıklarıyla birlikte incelendiğinde bazı kriterler açısından benzer eğilimler görülmekle birlikte, sıralamaların kullanılan ağırlıklandırma yöntemine bağlı olarak değişebildiği de gözlemlenmektedir. Bu durum, kriter önemlerinin farklı ağırlıklandırma yaklaşımları altında nasıl şekillendiğinin değerlendirilmesine olanak sağlayarak önceliklendirme sürecinin daha kapsamlı biçimde analiz edilmesine katkı sunmaktadır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında, Çizelge 1’deki sıralama ile Çizelge 2’deki sıralamanın tamamen aynı kalmadığı, bazı tehlikelerin konum değiştirdiği görülmektedir. Bu farklılaşmanın temel nedeni, bulanık yaklaşımda risk skorlarının (Bulanık FMEA) daha sınırlı bir aralıkta gruplanması ve dolayısıyla ağırlıklandırma bileşeninin (Bulanık AHP–TOPSIS / Bulanık SWARA) tehlikeler arasındaki ayrımı daha belirleyici hale getirmesidir. Başka bir ifadeyle, Çizelge 1’de risk büyüklüğü daha baskın bir ayırt edici iken, Çizelge 2’de belirsizliklerin modele dahil edilmesiyle birlikte tehlikelerin göreceli önemi ve kriter ağırlık yapısı sıralamayı daha güçlü biçimde yönlendirmektedir. Bu durum, özellikle FMEA skorlarının birbirine yaklaştığı veya aynı seviyede kümelendiği durumlarda, yalnızca risk puanına dayalı önceliklendirme yerine kriter-temelli ağırlıklandırmanın daha hassas bir ayırıştırma sunduğunu göstermektedir.

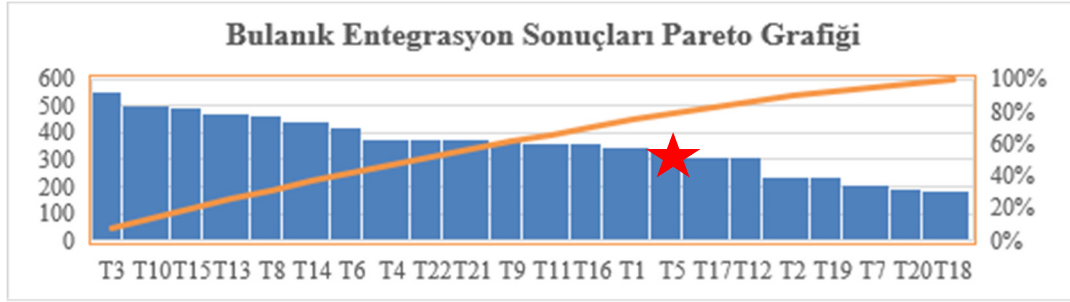
Genel olarak Çizelge 1, deterministik bir yaklaşımla “tek hat” üzerinden önceliklendirme sunarken; Çizelge 2, bulanık ortamda hem risk skorlarının hem de ağırlıkların belirsizliğini dikkate alarak iki farklı entegrasyon senaryosu üretmekte ve sonuçların tutarlılığını güçlendirmektedir. Bu nedenle Çizelge 2’de elde edilen bulgular, Çizelge 1’deki önceliklendirmeyi destekleyen ancak belirsizlik altında daha duyarlı ve yöntemler arası doğrulanmış bir risk değerlendirme çerçevesi ortaya koymaktadır.

Çizelge 2’de yer alan iki bulanık entegrasyon çıktısı (Bulanık AHP–FMEA ve Bulanık SWARA–FMEA) birlikte incelendiğinde, risk önceliklendirme sonuçlarının ağırlıklandırma mantığına karşı duyarlılığı daha net şekilde gözlemlenmektedir. Bulanık AHP–FMEA entegrasyonu, Bulanık AHP–TOPSIS ile elde edilen göreceli önem katsayılarını Bulanık FMEA risk skorlarıyla birleştirirken; Bulanık SWARA–FMEA entegrasyonu, kriter ağırlıklarını SWARA’nın ardışık karşılaştırma mantığıyla yeniden türeterek aynı risk skorları üzerine yansıtmaktadır. Bu nedenle iki entegrasyon çıktısı, aynı tehlike setini değerlendirmesine rağmen sıralamada özellikle üst ve orta gruplarda farklılaşmalar üretebilmektedir.

Nitekim Çizelge 2’de Bulanık AHP–FMEA entegre değerlerine göre en yüksek risk katkısı gösteren tehlikeler sırasıyla Tehlike 1 (556,414), Tehlike 2 (499,277) ve Tehlike 3 (497,476) olarak öne çıkarken; Bulanık SWARA–FMEA entegre değerleri dikkate alındığında en yüksek risk değerlerinin Tehlike 3 (44,600) ve Tehlike 8 (41,344) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, SWARA’nın ağırlık üretme yaklaşımının bazı kriterleri daha belirgin biçimde öne çıkarması nedeniyle, özellikle birbirine yakın risk düzeyine sahip tehlikelerin sıralamasında pozisyon değişimlerine yol açabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte her iki entegrasyonda da üst grupta benzer tehlikelerin tekrar görülmesi (ör. Tehlike 1, Tehlike 3, Tehlike 6, Tehlike 8, Tehlike 14 gibi) sonuçların tamamen rastlantısal olmadığını, aksine kritik risk havuzunun genel olarak korunduğunu; farkın daha çok bu kritik kümenin kendi iç sıralamasında oluştuğunu işaret etmektedir.

Pareto analizinde ve matematiksel modelde risk girdisi olarak Bulanık AHP–FMEA entegre değerlerinin seçilmesinin nedeni, modelin tekil bir risk parametresiyle çalışması ve bu parametrenin hem Bulanık FMEA ile hesaplanan risk büyüklüğünü hem de Bulanık AHP–TOPSIS ile belirlenen göreceli önem yapısını aynı

anda yansıtmasıdır. Ayrıca Pareto analizi toplam risk katkısına dayalı olduğundan, Pareto’da kullanılan değerlerin model girdileriyle aynı ölçekte tanımlanması gerekmektedir; bu sayede kritik tehlike seçimi ile modelin optimize ettiği risk yapısı tutarlı hale gelmektedir. Bulanık SWARA ise çalışmada ana girdi üretmekten çok yöntemler arası ağırlık tutarlılığını doğrulamak amacıyla uygulanmış; SWARA sonuçlarının AHP–TOPSIS ile örtüşmesi Bulanık AHP–FMEA temelli risk değerlerinin güvenilirliğini desteklemiştir. Bulunan bulanık risk skorları ne kadar büyükse tehlikenin önemi o kadar büyüdüğü için büyükten küçüğe sıralanarak bir önem sıralaması yapılmıştır. Yapılan bu sıralamaya Pareto analizi uygulanarak toplam risklerin %70’ini oluşturan riskler seçilmiştir. Toplam risklerin %70’ini oluşturan riskler T16’ya kadardır. Bulanık entegrasyon değerlerinin pareto analizi grafiği Şekil 2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 1. Bulanık entegrasyon değerlerinin pareto analizi

Firmanın kaynakları sınırlı ve seçilen tüm riskleri ortadan kaldırmaya yeterli olmadığından dolayı pareto analizi ile seçilen riskler üzerinden iş gücü, zaman, maliyet kısıtları çerçevesinde IBM CPLEX üzerinde 0-1 tam sayılı programlama yapılmıştır.

Firmanın kısıtları aşağıda Çizelge 3’te görüldüğü gibidir.

Çizelge 3. Firmanın kısıt çizelgesi

Tehlikeler	Tehlike adları	Kısıtlar		
		Maliyet (TL)	Zaman (Gün)	İş gücü (İşçi sayısı)
T3	Kimyasal maddeler ve sızıntılar	25000	6	4
T10	Havalandırma ve aydınlatma eksiklikleri	12000	4	3
T15	Yangın çıkış yollarının engellenmesi	10000	3	3
T13	Forklift ve diğer taşıma araçları	15000	5	4
T8	Hızla hareket eden ve tehlikeli makineler	20000	7	5
T14	Yangın güvenliği eksiklikleri	25000	6	4
T6	Ağır yük kaldırma ve düşme tehlikeleri	12000	5	3
T4	Gürültü seviyesi ve koruyucu ekipman eksikliği	8000	3	3
T22	Kullanılmayan ekipmanların kötü durumu	10000	4	3
T21	Bakım ve onarım eksiklikleri	15000	5	4
T9	Patlayıcı ve yanıcı maddelerin varlığı	30000	8	6
T11	Yüksek basınç altında çalışma	20000	7	5
T16	Uygunsuz kişisel koruyucu ekipman kullanımı	6000	2	2
İSG ye ayrılan bütçe			120000	
İSG ye ayrılacak ortalama süre			30	
İSG ye ayrılacak işçi sayısı			21	

Firmanın kısıt çizelgesinden yola çıkılarak hazırlanan matematiksel model aşağıdaki gibidir:

Problemin matematiksel modeli:

Karar Değişkenleri

$x_i \in \{0,1\}$ (binary karar değişkenleri)

$i=1,2,3, \dots, 13$ $x_i=1$ ise R_i riski seçilir, aksi takdirde $x_i=0$.

Parametreler

- Risk değerleri (r_i):
 $r = [556.41, 499.28, 497.48, 469.27, 464.64, 442.38, 418.85, 379.51, 378.14, 374.60, 365.94, 364.74, 363.74]$
- İş gücü gereksinimleri (l_i):
 $l = [4, 3, 3, 4, 5, 4, 3, 3, 3, 4, 6, 5, 2]$
- Zaman gereksinimleri (t_i):
 $t = [6, 4, 3, 5, 7, 6, 5, 3, 4, 5, 8, 7, 2]$
- Maliyet gereksinimleri (c_i):
 $c_i = [25000, 12000, 10000, 15000, 20000, 25000, 12000, 8000, 10000, 15000, 30000, 20000, 6000]$
- Limitler:
 Maksimum iş gücü: $\text{mak_işgücü} = 21$,
 Maksimum zaman : $\text{mak_zaman} = 30$,
 Maksimum maliyet: $\text{mak_maliyet} = 120000$.

Amaç Fonksiyonu

$$\text{Maksimize } Z = \sum_{i=1}^{13} r_i \cdot x_i \quad (6)$$

Kısıtlar

- İş gücü kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} l_i \cdot x_i \leq \text{mak_işgücü} \quad (7)$$

- Zaman kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} t_i \cdot x_i \leq \text{mak_zaman} \quad (8)$$

- Maliyet kısıtı

$$\sum_{i=1}^{13} c_i \cdot x_i \leq \text{mak_maliyet} \quad (9)$$

Sonuç

$$x_{15} = 1, \quad x_{16} = 1, \quad x_{22} = 1, \quad x_3 = 1, \quad x_4 = 1, \quad x_6 = 1, \quad x_{10} = 1$$

Eşitlik (6), Eşitlik (7), Eşitlik (8) ve Eşitlik (9) modelin amaç fonksiyonunu ve kısıtlarını göstermektedir. Modelin çözümü sonucunda seçilen değişkenler ve atanan değerler, karar süreçlerinde en etkili risklerin yönetilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmada geliştirilen 0-1 tam sayılı programlama modeli, sınırlı kaynaklar altında en kritik risklerin hangilerine öncelik verilmesi gerektiğini belirlemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Modelin amacı; işletmenin sahip olduğu maliyet, iş gücü ve zaman gibi kaynak kısıtları doğrultusunda, Pareto analiziyle belirlenen öncelikli riskler arasından maksimum toplam risk azaltımını sağlamaktır.

Modelin çözümü sonucunda seçilen riskler, yalnızca risk skorlarına göre değil, aynı zamanda kaynak tüketimi-fayda dengesi açısından da en verimli müdahale noktaları olarak öne çıkmıştır. Örneğin, “Yangın çıkış yollarının engellenmesi” ve “Kimyasal maddeler ve sızıntılar” gibi tehlikeler, yüksek risk değerlerinin yanı sıra sınırlı kaynaklarla ortadan kaldırılabılır olmaları nedeniyle seçilmiştir. Bu sonuçlar, karar vericilere en az kaynakla en yüksek güvenlik artışı sağlayacak aksiyonları önererek operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Geliştirilen modelin uygulamadaki katkısı; karar vericilere yalnızca risk düzeyine göre değil, aynı zamanda uygulama maliyetlerini ve kaynak kullanımını dikkate alarak stratejik kararlar alma imkânı sunmasıdır. Özellikle kaynakların kıt olduğu küçük ve orta ölçekli işletmelerde, bu tür bir optimizasyon modeli, iş sağlığı ve güvenliği yatırımlarının daha hedefli, ölçülebilir ve etkili bir şekilde planlanmasını sağlamaktadır. Model, benzer üretim sektörlerinde karar verme süreçlerine kolaylıkla entegre edilebilecek esnek ve pratik bir araç sunmaktadır.

Özellikle, seçilen x_{15} (Yangın Çıkış Yollarının Engellenmesi), x_{16} (Uygunsuz Kişisel Koruyucu Ekipman Kullanımı), x_{22} (Kullanılmayan Ekipmanların Kötü Durumu), x_3 (Kimyasal addeler ve Sızıntılar), x_6 (Ağır Yük Kaldırma ve Düşme Tehlikeleri), x_4 (Gürültü Seviyesi ve Koruyucu Ekipman Eksikliği), x_{10} (Havalandırma ve Aydınlatma Eksiklikleri) gibi değişkenler, kritik öneme sahip risklerin kontrol altına alınması gerektiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, firmanın kaynaklarını verimli bir şekilde kullandığını ve stratejik kararlar almasına yardımcı olabileceğini ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, yalıtım sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede karşılaşılan risklerin değerlendirilmesi, önceliklendirilmesi ve sınırlı kaynaklar çerçevesinde yönetimi için klasik ve bulanık mantık tabanlı yöntemler entegre bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın temel amacı, belirsizliklerin etkisini dikkate alan bütünsel bir risk yönetim modeli geliştirmektir.

Klasik FMEA, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir araya getirilmesi, risk değerlendirme süreçlerinde karar alma doğruluğunu artırmıştır. Bu yöntemlerin bulanık mantık ile genişletilmesi ise özellikle belirsizlik ve subjektif değerlendirmelerin olduğu durumlarda karar süreçlerini daha esnek ve hassas hale getirmiştir. Risk skorlarının Pareto analizi ile incelenmesi, kritik risklerin belirlenmesine olanak tanırken, sınırlı kaynakların yönetimi için geliştirilen 0-1 tam sayılı programlama modeli, işletmenin operasyonel verimliliğine doğrudan katkıda bulunmuştur.

Çalışmanın bulguları, entegre klasik ve bulanık yöntemlerin birlikte kullanımının risk yönetimi süreçlerinde uygulanabilir bir çerçeve sunduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, işletmelerin güvenlik seviyesini artırmanın yanı sıra, kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmalarına olanak tanımıştır. Özellikle belirsizliklerin yoğun olduğu sektörlerde, bulanık mantık temelli metodolojilerin uygulanabilirliği ve avantajları vurgulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, yalnızca yalıtım sektörü için değil, benzer operasyonel risklerle karşı karşıya kalan farklı sektörler için de önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Önerilen model, işletmelerde risk yönetimi kararlarının desteklenmesi amacıyla uygulanabilir bir karar destek çerçevesi sunmaktadır.

Bu araştırma, literatüre önemli bir katkı sağlamış ve işletmelerin risk yönetimi stratejilerinde yeni bir perspektif sunmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı sektörlerde daha geniş ölçekli uygulamalar ile modelin etkinliğinin incelenmesi, yöntemin geliştirilmesi açısından faydalı olacaktır. Bu sayede, belirsizlik ortamında karar alma süreçlerine daha güçlü ve yenilikçi çözümler kazandırılması mümkün olacaktır. Ayrıca, tehlikelerin ağırlıklandırılmasında daha güncel ÇKKV yöntemlerinin uygulanmasının, değerlendirmelerin daha objektif olmasına katkı sağlayacağı öngörülmekte olup, bu husus gelecek çalışmalar için planlama dahilinde ele alınmıştır.

Elde edilen bulgular, literatürde daha önce sunulmuş klasik FMEA yaklaşımlarına kıyasla, bulanık mantık ile desteklenen yöntemlerin risk önceliklendirme sürecinde belirsizliklerin dikkate alınmasına imkân tanıyarak daha duyarlı değerlendirmeler yapılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde, klasik AHP yöntemi yerine bulanık AHP kullanılması, uzman görüşlerindeki belirsizliğin daha uygun biçimde modellenmesine olanak sağlamıştır. Bu durum, Xu et al. (2002) gibi çalışmalarda da vurgulandığı üzere, karar vericilerin subjektif değerlendirmelerinin bulanık ortamda temsil edilmesine katkı sunmaktadır. Ek olarak, çalışma kapsamında uygulanan Bulanık SWARA yöntemi, kriter ağırlıklarının güncel bir yaklaşımla yeniden değerlendirilmesine imkân tanımış ve elde edilen sonuçların Bulanık AHP–TOPSIS tabanlı sıralamalarla karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, TOPSIS yöntemi ile elde edilen sıralamaların Pareto analizine entegre edilmesi, karar vericilere yalnızca öncelikli riskleri değil, aynı zamanda bu risklerin toplam etki üzerindeki göreceli ağırlığını da göstererek stratejik önceliklendirme sürecinin daha sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sunmuştur. Bu bağlamda çalışma, yalnızca metodolojik bir yaklaşım önermekle kalmamış, aynı zamanda pratik uygulamalarda kullanılabilecek bir karar destek çerçevesi sunmaktadır. Literatürde bu yöntemlerin bir arada kullanıldığı çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, sunulan entegre modelin hem akademik hem de uygulamaya yönelik katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. NUTEC, (2025). *Industrial safety measures in the use of thermal insulating products*. <https://www.nutec.com/newsroom/articles/industrial-safety-measures-insulating-products>, Erişim tarihi: 16.06.2026.
2. Ahn, S. (2022). Derivation of risk factors to quantify the risk of safety accidents for small and medium-sized enterprises in construction industry. *Sustainability*, 14(12), 7306.
3. Liu, Y. & Tang, Y. (2022). Managing uncertainty of expert's assessment in FMEA with the belief divergence measure. *Scientific Reports*, 12(1), 6812.
4. Wu, X. & Wu, J. (2021). The risk priority number evaluation of FMEA analysis based on random uncertainty and fuzzy uncertainty. *Complexity*, 2021(1), 8817667.
5. Akman, G. ve Alkan, A. (2006). Tedarik zinciri yönetiminde bulanık AHP yöntemi kullanılarak tedarikçilerin performansının ölçülmesi: Otomotiv yan sanayiinde bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 23-46.
6. Şengül, Ü., Eren, M. ve Eslamian Shiraz, S. (2015). Bulanık AHP ile belediyelerin toplu taşıma araç seçimi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 40, 143-165.
7. Aydın, Ö. (2016). Bulanık AHP ile Ankara için hastane yer seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24(2), 87-104.
8. Şahin, Y. ve Supçiller, A. (2015). Tedarikçi seçimi için bir karar destek sistemi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(2), 91-104.
9. Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M. ve Aydın, U. (2021). Türkiye’de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: Küresel bulanık AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 27-58.
10. Kalan, O. (2023). Dolum hattı makineleri için AHP ve TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 967-980.
11. Yörükoğlu, H., Özcan, B., Özkale, C. ve Çelik, C. (2013). The Analysis of the risks of renewable energy resources by using fuzzy FMEA technique. *Dumlupınar University Journal of Social Science*, 2013(Özel Sayısı), 227-242.
12. Özfirat, P.M. (2014). Bulanık önceliklendirme metodu ve hata türü ve etkileri analizini birleştiren yeni bir risk analizi yöntemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 755-768.
13. Oturakçı, M. ve Dağsuyu, C. (2017). Risk değerlendirmesinde bulanık fine-kinney yöntemi ve uygulaması. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 1(1), 17-25.
14. Turan, M. ve Ocaktan, D.G. (2019). Transformatör üreten bir firmada risk analizinde bulanık HTEA kullanımı ve uygulama yazılımı geliştirme. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 474-487.
15. Dişkaya, F. ve Emir, Ş. (2021). AHP-TOPSIS bütünleşik yaklaşımıyla deprem riski tabanlı İstanbul ili kentsel dönüşüm öncelik sıralaması. *Afet ve Risk Dergisi*, 4(2), 203-223.
16. Poyraz, P. ve Şimşir, F. (2022). Tedarik zinciri risk yönetiminde bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ile süreç bazlı hata türleri analizi. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(1), 86-104.
17. Eş Yürek, E. (2023). Kumaş boyama sürecinde bulanık TOPSIS ile hata türü ve etkileri analizi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28(3), 915-926.
18. Yorulmaz, M. ve Sezen, K. (2023). Denizcilik alanında kullanılan risk analizi yöntemleri ve Fine Kinney yöntemiyle bir uygulama. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(3), 622-637.
19. Karakuzu, N., Karadağ, S. ve İnce, N. (2024). Hata türü ve etkileri analizi (HTEA), bulanık hata türü ve etkileri analizi (Bulanık HTEA): Mobilya sektöründe bir uygulama. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(2), 581-591.
20. Aydan, M. ve Kaya, S. (2017). Hata türü ve etkileri analizi (HTEA): üniversite hastanesinde bir uygulama. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 20(4), 475-502.
21. Xu, K., Tang, L., Xie, M., Ho, S. & Zhu, M. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), 17-29.
22. Dündar, S. ve Ecer, F. (2008). Öğrencilerin GSM operatörü tercihinin analitik hiyerarşi süreci yöntemiyle belirlenmesi. *Yönetim ve Ekonomi Dergisi*, 15(1), 145-987.
23. Chang, D.Y., (1996), Applications of the extent analysis method of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655.
24. Demireli, E. (2010). TOPSIS çok kriterli karar verme sistemi: Türkiye’deki kamu bankaları üzerine bir uygulama. *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 5(1), 101-112.

25. Keršuliene, V., Zavadskas, E.K. & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243-258.
26. Stanujkic, D., Karabasevic, D. & Zavadskas, E.K. (2015). A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method. *Engineering Economics*, 26(2), 181-187.
27. Tabar, M.E. ve Şişman, Y. (2020). Bulanık mantık ile arsa değerlendirme modelinin oluşturulması. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 2(1), 18-24.
28. Özcan, S. (2001). İstatistiksel proses kontrol tekniklerinden pareto analizi ve çimento sanayiinde bir uygulama. *CÜ İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 2(2), 151-174.
29. Oruç, Y.O. ve Yılmaz, G. (2013). Bulanık 0-1 tamsayılı programlama ve bir hazır beton tesisinde uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 245-262.

Dynamic Modeling of Scotch Yoke Mechanism with Spring and Mass

Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ^{1,a}, İbrahim Deniz AKÇALI^{1,b}

¹Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-9969-2005; ^bORCID: 0000-0001-5194-5061

Article Info

Received : 22.12.2025

Accepted : 23.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1846971

Corresponding Author

Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ

msarigecili@cu.edu.tr

Keywords

Scotch yoke mechanism

Dynamic model

Sinusoidal compression loading

Parametric assessment

How to cite: SARIGEÇİLİ, M.İ., AKÇALI, İ.D., (2026). Dynamic Modeling of Scotch Yoke Mechanism with Spring and Mass. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 359-370.

ABSTRACT

Scotch yoke mechanism with a spring and mass can be used to apply a sinusoidal compression force on a specimen by converting rotational motion from an electric motor into reciprocating motion. The dynamic model of such a mechanism considering friction and variable speed effects has been developed in this study. A Python code has been written for the dynamic model to solve for the required input torque and joint forces based on the input motion characteristics. By changing the values of some parameters of the dynamic model, 7 different groups are defined to observe the effects of these parameters on the required input torque, joint force and spring compression force values. The associated graphs drawn in the time domain have been analyzed to cast light on the rational choice of these parameters.

Bir Yay ve Kütle İçeren Scotch Yoke Mekanizmasının Dinamik Modellemesi

Makale Bilgileri

Geliş : 22.12.2025

Kabul : 23.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1846971

Sorumlu Yazar

Mehmet İlteriş SARIGEÇİLİ

msarigecili@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Scotch yoke mekanizması

Dinamik model

Sinüzoidal basma yüklemesi

Parametrik değerlendirme

Atf şekli: SARIGEÇİLİ, M.İ., AKÇALI, İ.D., (2026). Bir Yay ve Kütle İçeren Scotch Yoke Mekanizmasının Dinamik Modellemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 359-370.

ÖZ

Bir yay ve kütle içeren Scotch yoke mekanizması, elektrik motorundan sağlanan dönme hareketini gidip gelme hareketine çevirerek, sinüzoidal bir basma yüklemesi elde etmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, böyle bir mekanizmanın sürtünme ve hızdaki değişme etkileri de düşünülerek dinamik modeli geliştirilmiştir. Giriş hareket karakteristiklerine bağlı olarak ihtiyaç duyulan giriş torkunun ve mafsallarda kuvvetlerinin hesaplanması için Python dilinde bir program hazırlanmıştır. Dinamik modeldeki parametrelerin ihtiyaç duyulan giriş torku, mafsallarda ve yay basma kuvvetleri üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi için ilgili parametre değerlerinin değiştirildiği 7 farklı grup oluşturulmuştur. Zaman bölgesinde çizilen grafikler üzerinden ilgili parametre değerlerinin uygun seçilmesine ışık tutacak şekilde değerlendirmeler yapılmıştır.

1. INTRODUCTION

Scotch yoke and slider-crank mechanisms both convert rotational motion into translational motion or vice versa even though Scotch yoke is preferred for smoother motion characteristics. Hence, there are many design applications utilizing Scotch yoke mechanism. For example, Scotch yoke with a spring mechanism [1] has been utilized in the design of a one degree-of-freedom rotary system gravity balancer. Al Shami et al. [2] and Hossain et al. [3] developed a wave energy harvester from a Scotch yoke mechanism. Subramanian et al. [4] made use of a Scotch yoke mechanism to develop a two-way pumping system while Rivankar et al. [5] proposed a modified Scotch yoke based polishing machine.

Scotch yoke mechanisms have non-linear dynamics. The modeling approaches are well studied for producing constant torque output, controlling the output speed as well as converting the linear excitation motion into torque output. For example, a Scotch yoke mechanism was used to give tail fin motion of a robotic fish design by Kwon [6]. The motor output torque was controlled by utilizing an adjustable Scotch yoke mechanism with crank wheel which was designed as a cam with springs. Prastiyo and Fiebig [7] developed the dynamic model of both slider-crank and Scotch yoke mechanisms by means of Euler-Lagrange method. They came to the conclusion that inertia forces, moments and torques are reduced drastically when these mechanisms are operated under angular speeds corresponding to resonance conditions. Rayed et al. [8] utilized a Scotch yoke based mechanism for mimicking the flapping of a bird. In that study, FEM analysis of stress, deformation and fatigue life were performed to figure out the critical sections and furthermore topology optimization was applied to the base. Liang and Liu [9] carried out dynamic analysis of Scotch yoke mechanism with configurations of a single piston, opposed double piston and inclined slot by simulating in ADAMS. Tao et al. [10] designed a Limacon gear driven Scotch yoke mechanism in order to obtain uniform reciprocating motion of a forming device of the carding machine. In addition, modified genetic algorithm was applied with the objective of lowering the average velocity of the guide (i.e. yoke). Apati and Hegedus [11] developed electromechanical model of a battery-powered jigsaw using a Scotch yoke mechanism, where Lagrange equation is utilized to analyze the force-energy relationship based on the considerations of both kinetic and magnetic co-energy. The motor speed, current consumption and blade movement under different cutting loads are obtained with the developed simulation program. Al-Hamood et al. [12] used dynamic model of a Scotch yoke mechanism to investigate the contact problem under elastohydrodynamic lubrication by means of a line contact model based on non-Newtonian oil behavior, varying loads, and surface velocities throughout the operating cycle. Tai et al. [13] designed a Scotch yoke based nonlinear vibration isolator. The dynamic model of the system was developed for the motion equation of the coupled structure-vibration isolator. The simulation results of the dynamic analysis for various parameters such as amplitude-frequency response, the critical excitation amplitude, etc. were presented. In addition to dynamic model studies of Scotch yoke mechanisms, models of slider-crank mechanisms are also well studied. As an example, the kinematic analysis of a slider-crank mechanism in a tractor motor has been done in MSC ADAMS software by Beyaz and Dağtekin [14]. In another study, dynamic model of a slider-crank mechanism has been developed with lumped mass approach for the analysis of the piston speed by Sarıgeçili and Akçalı [15]. That mechanism has specifically a helical spring attached to the crank center and a force applied onto the crank-pin.

An outstanding feature of the Scotch yoke mechanism is that motion conversion from a constantly rotating crank to the translating slider takes place in a perfectly sinusoidal form. This feature of the mechanism is utilized in [16] to develop a conceptual design model of an axial fatigue loading machine. However, in that study not only the friction, which is inevitably present in the system and critically affects the operation of this mechanism, was not considered but also the angular velocity of the crank was assumed to be constant. The main objective of this study is to develop a dynamic model of a Scotch yoke mechanism with a spring and mass by taking into account both the friction and variable crank speed effects. In this way, the foundation by which the response of the system model to different sets of parameter values in terms of input torque, compressive spring force on a specimen and significant joint forces is estimated, will be laid down for a rational selection of these parameters according to the prescribed criteria.

2. DYNAMIC MODEL

Schematic representation of Scotch yoke mechanism with spring and mass, in which a compression force is applied against a specimen, is shown in Figure 1. The ground, crank, slider and yoke are represented by 1, 2, 3 and 4, respectively. Since the frictional force direction is always opposite to the motion direction

and both of the sliding motions (i.e. slider and yoke) change direction in a full cycle, dynamic analysis of a Scotch yoke mechanism has to be performed separately for each quadrant of the crank angle as shown in Figure 1.a through 1.d together with free body diagrams of each component. In addition, for accuracy in the model, these analyses are to be revised at every critical point of 0° , 90° , 180° , 270° , 360° crank angle, where the relative velocity between either the intermediate slider (3) and the yoke (4) or that between the yoke (4) and the ground (1) becomes instantly zero. In the schematic representation of the Scotch yoke mechanism, the crank length from point O to point A is represented by r and the crank angle is shown by θ . The distance from vertical sliding joints of points M and N to crank center O is presented by l_M and l_N , respectively. The thickness of the slider slot along y-axis is t_1 and yoke thickness is t_2 . The friction coefficients between the slider & the slot, and the yoke & the ground are μ_1 and μ_2 , respectively. The spring at the bottom of the yoke has a spring constant of k and an initial compression of x_0 . Any attached weight including the yoke weight is represented by W . The crank is assumed to have a mass center at O with mass moment of inertia I_2 .

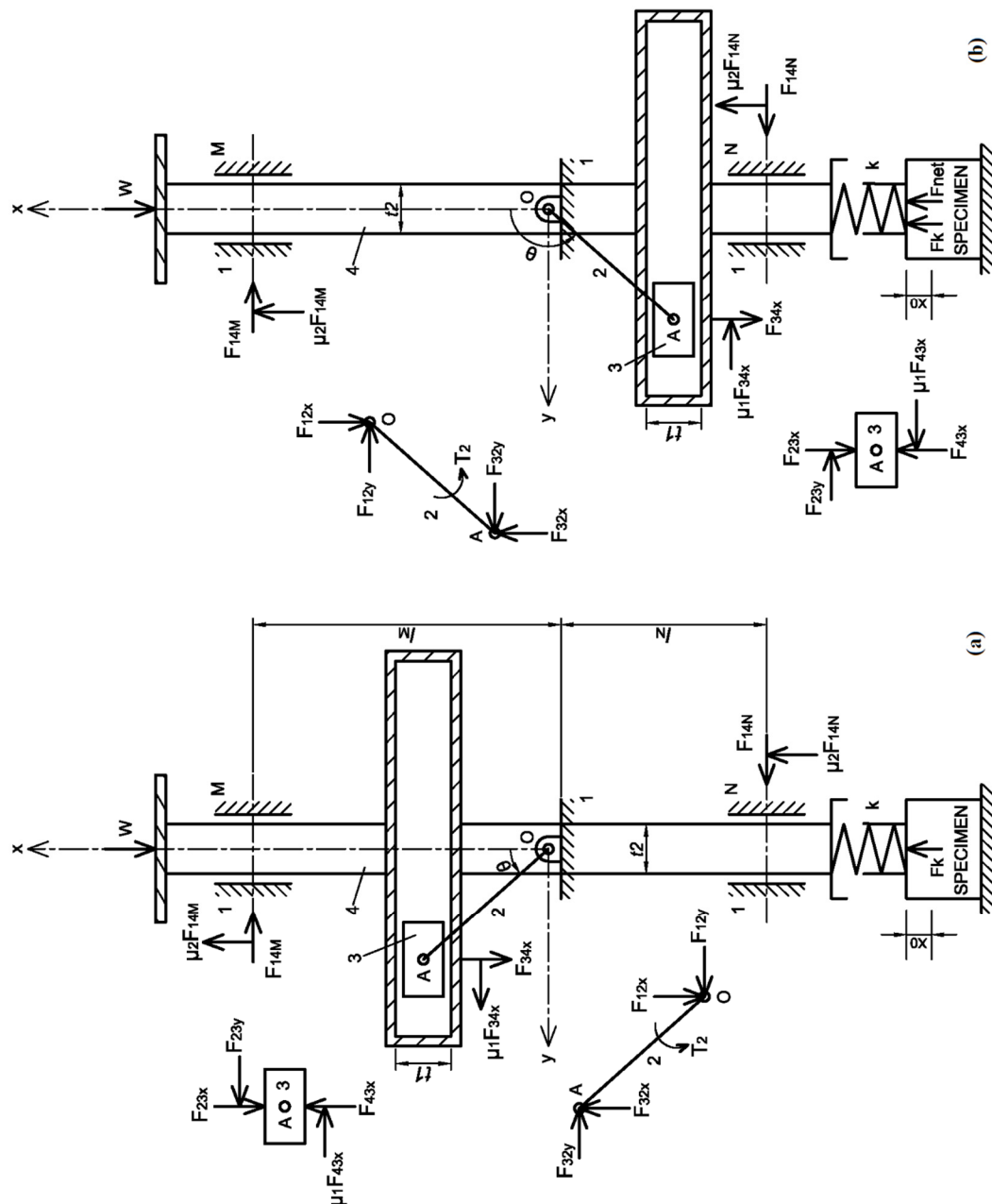
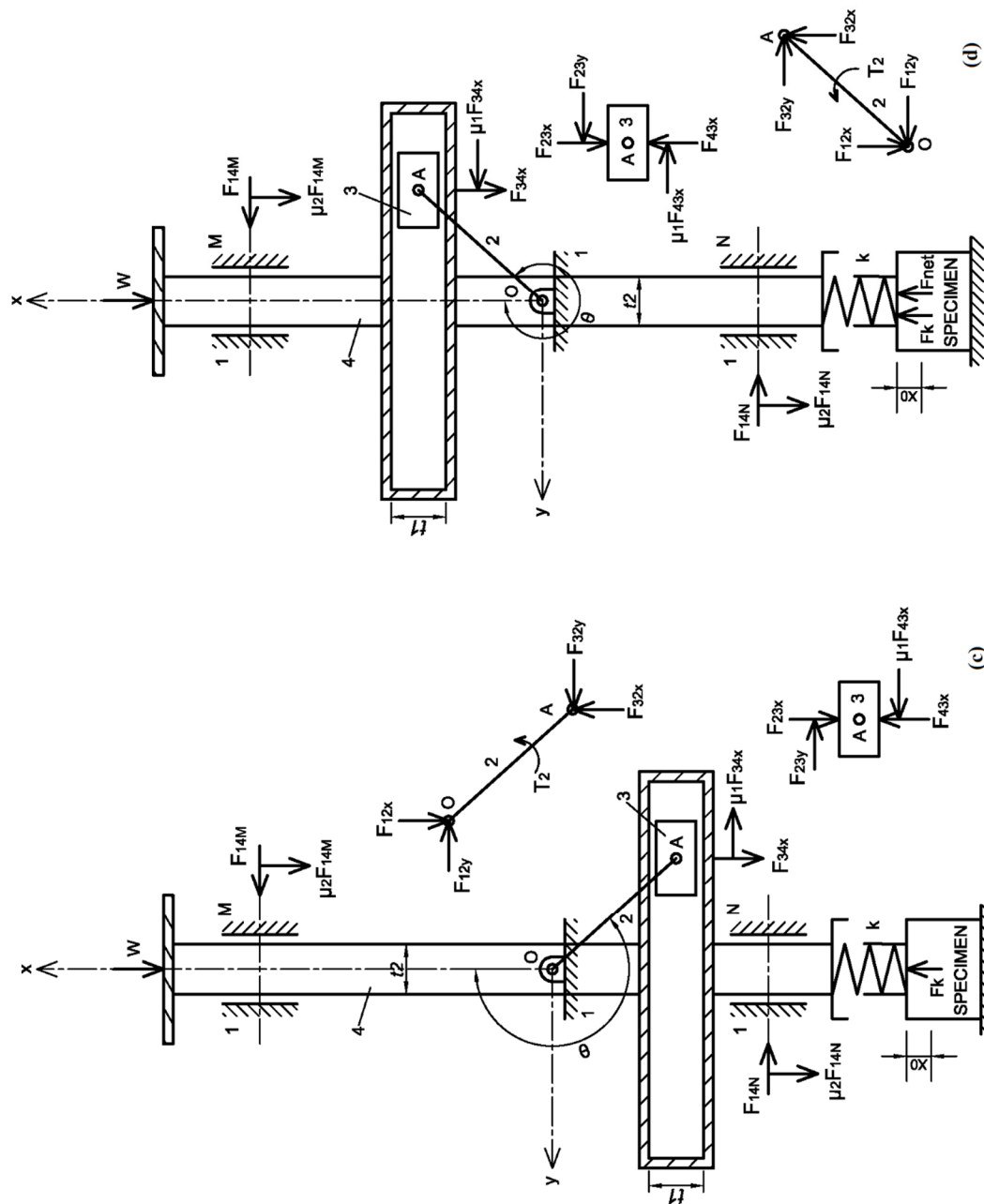


Figure 1. Schematic representation of Scotch yoke mechanism



The frictional effects due to relative rotation at the revolute joints of the crank are assumed to be negligible. On the other hand, frictional forces due to relative sliding between slider and yoke as well as between yoke and ground are taken into account based on Coulomb friction model. It should be reminded that the coefficient of static friction is in effect at the start of motion and the coefficient of kinetic friction (which is lower than the coefficient of static friction) is in effect while in motion. Also, frictional forces are not constant and they change throughout the mating surfaces. However, in this study, an average coefficient of static friction is used in the dynamic model to be able to choose the right electric motor the power of which is enough to overcome the frictional effects in running the mechanism.

The position (x) and displacement (Δx) of the output link in the Scotch yoke mechanism along vertical x axis are described by Equations (1) and (2), respectively. The speed ($\dot{x}$) in Equation (3) and acceleration ($\ddot{x}$) in Equation (4) are found by taking the first and second time derivative of the position equation, respectively.

$$x = r \cos \theta \quad (1)$$

$$\Delta x = r - r \cos \theta = r(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

$$\dot{x} = -r\dot{\theta} \sin \theta \quad (3)$$

$$\ddot{x} = -r\ddot{\theta} \cos \theta - r\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (4)$$

The crank in the Scotch yoke mechanism is required to run at a constant input angular speed (ω) to produce a perfect sinusoidal rectilinear reciprocating motion as the output. However, the system starts from rest and there should be an angular acceleration (α) until the constant angular speed is reached. Hence, the input motion, as shown in Figure 2, is modeled as starting motion from rest at a constant angular acceleration at t_0 until the specified constant speed ω is obtained at t_1 . Thereafter, the input motion is supposed to continue with zero angular acceleration.

The force analysis procedures followed in this study with the motion characteristics presented in Figure 2 are given below:

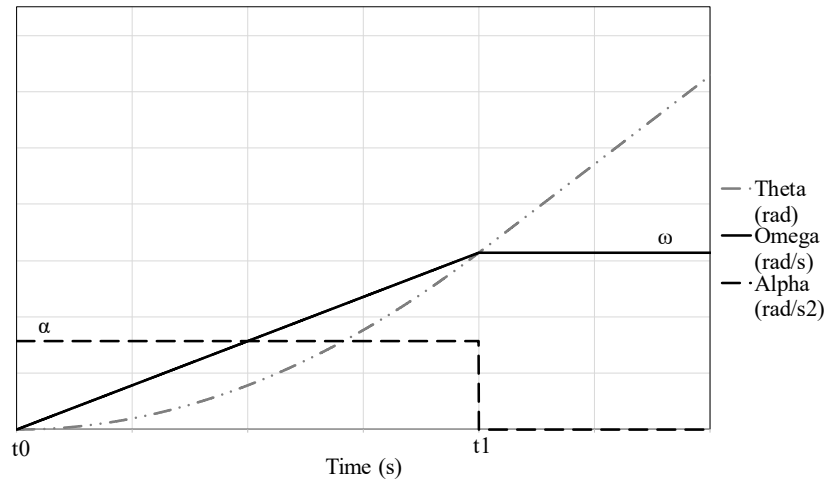


Figure 2. Input motion characteristics: Angular acceleration (α), speed (ω) and position (θ) of the crank in time domain

1. The analysis is started from link 3. Total forces along x and y should be zero.

$$F_{ij}^x = -F_{ji}^x, \quad ij = 32, 21, 43 \quad (5)$$

$$F_{ij}^y = \mu_1 F_{ij}^x, \quad ij = 32, 21, 43 \quad (6)$$

$$F_{ij}^y = -F_{ji}^y, \quad ij = 32, 21, 43 \quad (7)$$

2. The analysis is followed by link 2. Total forces along x and y as well as total moment about point O are zero. The relation between the joint force exerted by link 3 onto link 2 (F_{32}^x) and torque applied to link 2 (T_2) are found out.
3. Then, the analysis on link 4 is carried out. Total forces along x and y axes as well as total moment about point O are zero. Ground reaction forces F_{14M} and F_{14N} along y axis are determined. These expressions are substituted into the governing (Newton) equation from which torque T_2 is solved.
4. Once T_2 is determined, final formulae for F_{34}^x , F_{14M} and F_{14N} easily follow. F_{14M}^x and F_{14N}^x are expressed as such:

$$F_{14i}^x = \mu_2 F_{14i}, \quad i = M, N \quad (8)$$

5. The yoke has no instant motion for $\theta = 0$ and $\theta = \pi$. Therefore, the frictional forces along joints M and N have to be zero.

$$F_{14i}^x = 0, \quad i = M, N \quad (9)$$

6. Also, the slider has no instant relative motion for $\theta = \pi/2$ and $\theta = 3\pi/2$. Hence, the slider friction force has to be zero.

$$F_{ij}^y = F_{ji}^y = 0, \quad ij = 32, 21, 43 \quad (10)$$

Application of these procedures yield the following relationships for T_2 , F_{32}^x , F_{14M} and F_{14N} in terms of the crank angular positions indicated below and the other unknown quantities can be found by Equations (5)-(8):

$$\bullet \quad \theta = 0 + 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$T_2 = \left(-W + \frac{W}{g} r \dot{\theta}^2 + kx_0\right) \mu_1 r + I_2 \alpha \quad (11)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{\mu_1 r} \quad (12)$$

$$F_{14M} = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r(l_M + l_N)} \left(r - \frac{t_1}{2} + l_N\right) \quad (13)$$

$$F_{14N} = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r(l_M + l_N)} \left(r - \frac{t_1}{2} - l_M\right) \quad (14)$$

$$F_{14M}^x = F_{14N}^x = 0 \quad (15)$$

$$\bullet \quad 0 < \theta < (\pi/2 + 2\pi n), n = 0, 1, 2, \dots$$

Call A_1 as:

$$A_1 = \frac{1}{r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta} \left[1 - \frac{\mu_2 (2r \sin \theta + 2\mu_1 r \cos \theta - \mu_1 t_1 - \mu_1 \mu_2 t_2 + \mu_1 l_N - \mu_1 l_M)}{(l_M + l_N)} \right] \quad (16)$$

$$T_2 = \left(-W - \frac{W}{g} (-r \dot{\theta}^2 \cos \theta - r \ddot{\theta} \sin \theta) + kx_0 + kr(1 - \cos \theta)\right) \frac{1}{A_1} + I_2 \ddot{\theta} \quad (17)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta} \quad (18)$$

$$F_{14M} = \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta - \mu_1 \frac{t_1}{2} - \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} + \mu_1 l_N\right)}{(l_M + l_N)(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta)} \quad (19)$$

$$F_{14N} = \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta - \mu_1 \frac{t_1}{2} - \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} - \mu_1 l_M\right)}{(l_M + l_N)(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta)} \quad (20)$$

$$\bullet \quad \theta = \pi/2 + 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$T_2 = \left(-W + \frac{W}{g} (r \ddot{\theta}) + kx_0 + kr\right) \frac{(l_M + l_N)r}{l_M + l_N - 2\mu_2 r} + I_2 \alpha \quad (21)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r} \quad (22)$$

$$F_{32}^y = 0 \quad (23)$$

$$F_{14M} = F_{14N} = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{(l_M + l_N)} \quad (24)$$

$$\bullet \quad (\pi/2 + 2\pi n) < \theta < (\pi + 2\pi n), n = 0, 1, 2, \dots$$

Call A_2 as:

$$A_2 = \frac{1}{r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta} \left[1 - \frac{\mu_2 (2r \sin \theta - 2\mu_1 r \cos \theta + \mu_1 t_1 + \mu_1 \mu_2 t_2 - \mu_1 l_N + \mu_1 l_M)}{(l_M + l_N)} \right] \quad (25)$$

$$T_2 = \frac{\left[-W - \frac{W}{g} (-r \dot{\theta}^2 \cos \theta - r \ddot{\theta} \sin \theta) + kx_0 + kr(1 - \cos \theta) \right]}{A_2} + I_2 \alpha \quad (26)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta} \quad (27)$$

$$F_{14M} = \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta + \mu_1 \frac{t_1}{2} + \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} - \mu_1 l_N \right)}{(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (28)$$

$$F_{14N} = \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta + \mu_1 \frac{t_1}{2} + \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} + \mu_1 l_M \right)}{(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (29)$$

$$\bullet \quad \theta = \pi + 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$T_2 = \left(-W - \frac{W}{g} r \dot{\theta}^2 + kx_0 + 2kr \right) \mu_1 r + I_2 \alpha \quad (30)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{\mu_1 r} \quad (31)$$

$$F_{14M} = \frac{\mu_1 F_{34}^x}{(l_M + l_N)} \left(r + \frac{t_1}{2} - l_N \right) \quad (32)$$

$$F_{14N} = \frac{\mu_1 F_{34}^x}{(l_M + l_N)} \left(r + \frac{t_1}{2} + l_M \right) \quad (33)$$

$$F_{14M}^x = F_{14N}^x = 0 \quad (34)$$

$$\bullet \quad (\pi + 2\pi n) < \theta < (3\pi/2 + 2\pi n), n = 0, 1, 2, \dots$$

Call A_3 as:

$$A_3 = \frac{1}{r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta} \left[1 - \frac{\mu_2 (2r \sin \theta - 2\mu_1 r \cos \theta + \mu_1 t_1 - \mu_1 \mu_2 t_2 + \mu_1 l_M - \mu_1 l_N)}{(l_M + l_N)} \right] \quad (35)$$

$$T_2 = \frac{\left[-W - \frac{W}{g} (-r \dot{\theta}^2 \cos \theta - r \ddot{\theta} \sin \theta) + kx_0 + kr(1 - \cos \theta) \right]}{A_3} + I_2 \alpha \quad (36)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2 \alpha}{r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta} \quad (37)$$

$$F_{14M} = - \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta + \mu_1 \frac{t_1}{2} - \mu_1 l_N - \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} \right)}{(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (38)$$

$$F_{14N} = - \frac{(T_2 - I_2 \alpha) \left(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta + \mu_1 \frac{t_1}{2} - \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} + \mu_1 l_M \right)}{(r \sin \theta - \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (39)$$

$$\bullet \quad \theta = 3\pi/2 + 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$$

Call A_4 as:

$$A_4 = \frac{1}{r} \left(1 + \frac{2\mu_2 r}{(l_M + l_N)} \right) \quad (40)$$

$$T_2 = \frac{\left(W + \frac{W}{g}(r\ddot{\theta}) - kx_0 - kr\right)}{A_4} + I_2\alpha \quad (41)$$

$$F_{32}^x = -\frac{T_2 - I_2\alpha}{r} \quad (42)$$

$$F_{32}^y = 0 \quad (43)$$

$$F_{14M} = F_{14N} = -\frac{T_2 - I_2\alpha}{(l_M + l_N)} \quad (44)$$

$$\bullet \quad (3\pi/2 + 2\pi n) < \theta < (2\pi + 2\pi n), n = 0, 1, 2, \dots$$

Call A_5 as:

$$A_5 = \frac{1}{r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta} \left[1 - \frac{\mu_2 (2r \sin \theta + 2\mu_1 r \cos \theta - \mu_1 t_1 + \mu_1 \mu_2 t_2 + \mu_1 l_N - \mu_1 l_M)}{(l_M + l_N)} \right] \quad (45)$$

$$T_2 = \frac{\left(-W - \frac{W}{g}(-r\dot{\theta}^2 \cos \theta - r\ddot{\theta} \sin \theta) + kx_0 + kr(1 - \cos \theta)\right)}{A_5} + I_2\alpha \quad (46)$$

$$F_{32}^x = \frac{T_2 - I_2\alpha}{r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta} \quad (47)$$

$$F_{14M} = -\frac{(T_2 - I_2\alpha)(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta - \mu_1 \frac{t_1}{2} + \mu_1 l_N + \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2})}{(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (48)$$

$$F_{14N} = -\frac{(T_2 - I_2\alpha)(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta - \mu_1 \frac{t_1}{2} + \mu_1 \mu_2 \frac{t_2}{2} - \mu_1 l_M)}{(r \sin \theta + \mu_1 r \cos \theta)(l_M + l_N)} \quad (49)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

A Python code has been written to obtain the numerical results from the developed dynamic system model. In calculations, the crank is accepted to start rotational motion from $\theta = 0^\circ$ position at rest with constant angular acceleration until the final angular speed (ω_f) is reached and thereafter is to continue with zero angular acceleration. The analysis of the model has been carried out within a selected duration of 5 s with computations being repeated for every 0.01 s time increments. For this purpose, 7 different groups of parameters have been defined as given in Table 1. These groups of parameters have been selected specifically for fatigue loading machine such that the compression force exerted by the slider on the yoke (F_{34}^x) does not have negative values. Otherwise the model becomes invalid with a joint force pulling up instead of pushing down. Also, the other parameters are arranged such that the crank can be rotated fully.

Table 1. Parameters for the analysis of the model

Group name	Parameters
G1	$x_0 = 0.018$ m, $W = 40$ N, $r = 0.022$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G2	$x_0 = 0.018$ m, $W = 30$ N, $r = 0.022$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G3	$x_0 = 0.018$ m, $W = 40$ N, $r = 0.030$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G4	$x_0 = 0.018$ m, $W = 40$ N, $r = 0.022$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 2.5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G5	$x_0 = 0.018$ m, $W = 40$ N, $r = 0.022$ m, $k = 5000$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G6	$x_0 = 0.025$ m, $W = 40$ N, $r = 0.022$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 6.28$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$
G7	$x_0 = 0.018$ m, $W = 40$ N, $r = 0.022$ m, $k = 2500$ N/m, $I_2 = 5$ kg·m ² , $\alpha = 3.14$ rad/s ² , $\omega_0 = 0$ rad/s, $\omega_f = 12.56$ rad/s, $t_f = 5$ s, $\Delta t = 0.01$ s, $\mu_1 = 0.1$, $\mu_2 = 0.1$

By running the Python code for each group of parameters, the required input torque, joint forces and the spring compression force on the specimen are evaluated. Due to space limitations, only input torque (T_2), joint force (F_{34}^x) and spring force (F_k) graphs drawn in the selected time domain have been presented for the review of the numerical results.

The required torque T_2 vs. time graphs are shown in Figure 3. It can be seen from the graphs that increasing crank radius r (G3 graph) and spring constant k (G5 graph) leads to an increase in the torque value. A reduction in the mass moment of inertia I_2 (G4 graph) reduces the required torque value in the constant acceleration region, whereas in the constant speed region the required torque value remains unchanged. Increasing the constant speed value (G7 graph) just extends the high torque value region to the point where the constant speed region begins. It appears that the other parameters do not have significant effect on the required torque.

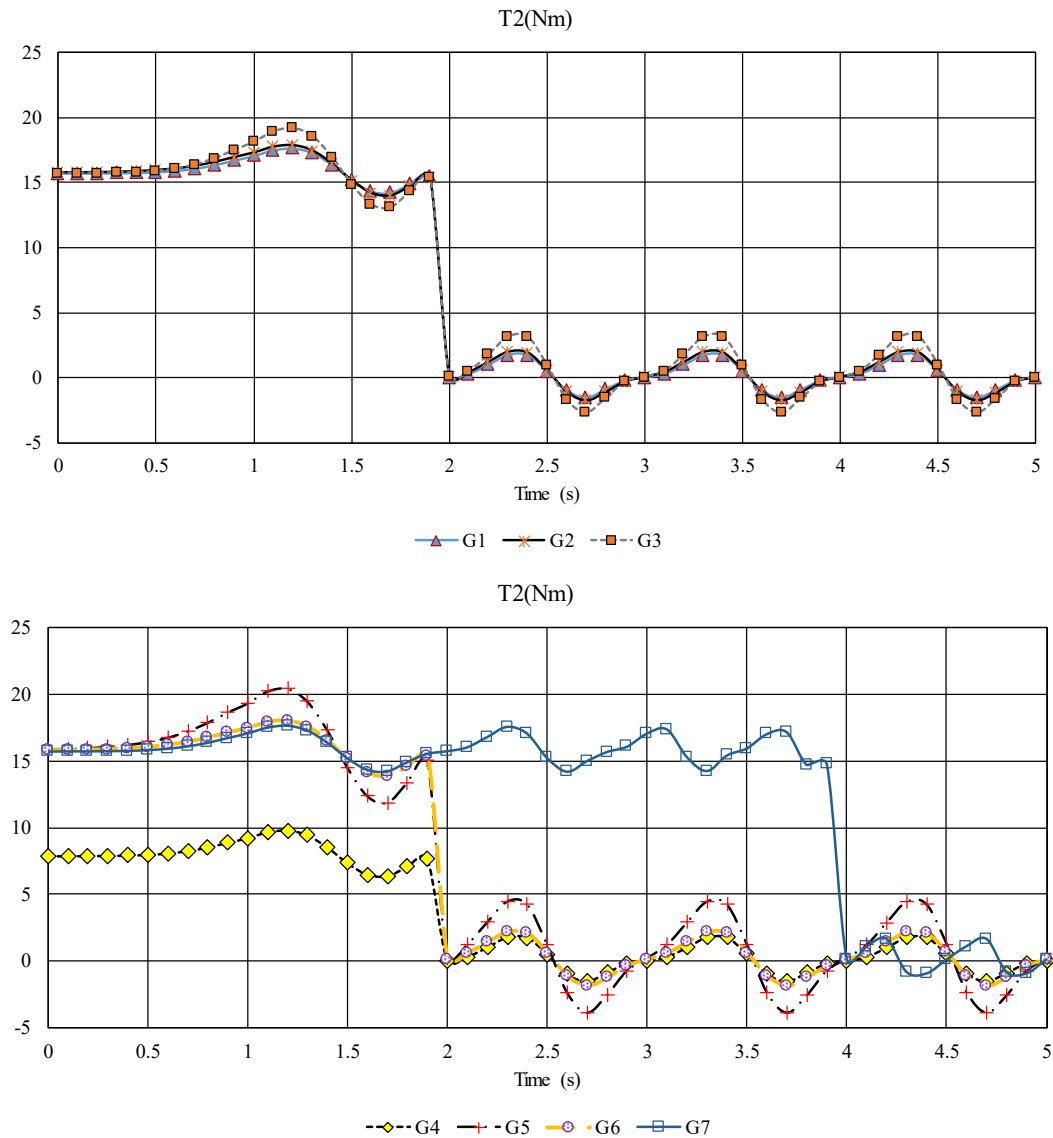


Figure 3. Input torque (T_2) vs time graph

The joint force F_{34}^x vs. time graphs are shown in Figure 4. A reduction in weight W (G2 graph), an increase in crank radius r (G3 graph), an increase in spring constant k (G5 graph) and an increase in initial spring compression x_0 (G6 graph) increase F_{34}^x . A change in the mass moment of inertia I_2 (G4 graph) and the constant speed value (G7 graph) do not seem to change maximum and minimum values of F_{34}^x . However, the angular speed changes the frequency of F_{34}^x .

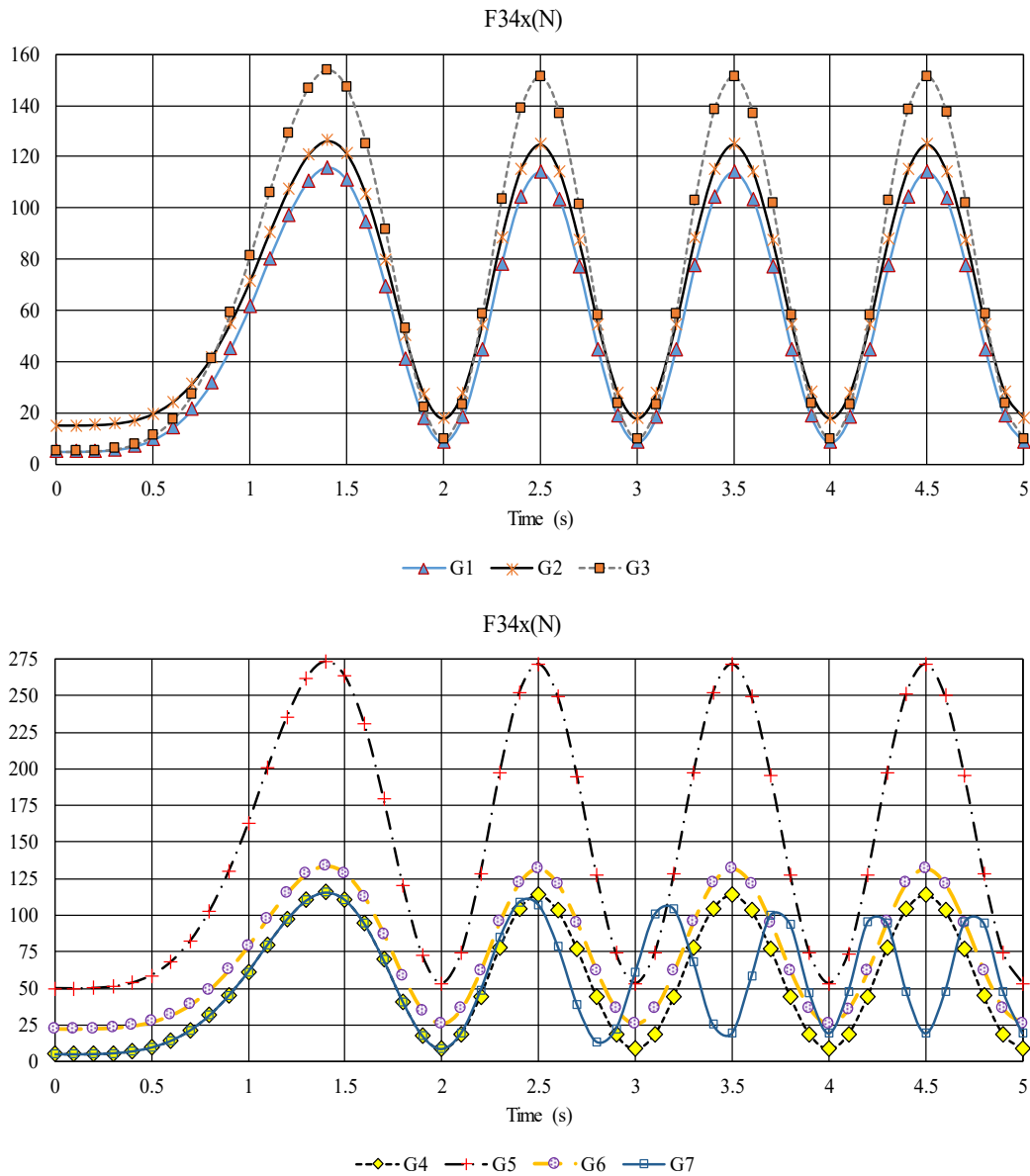
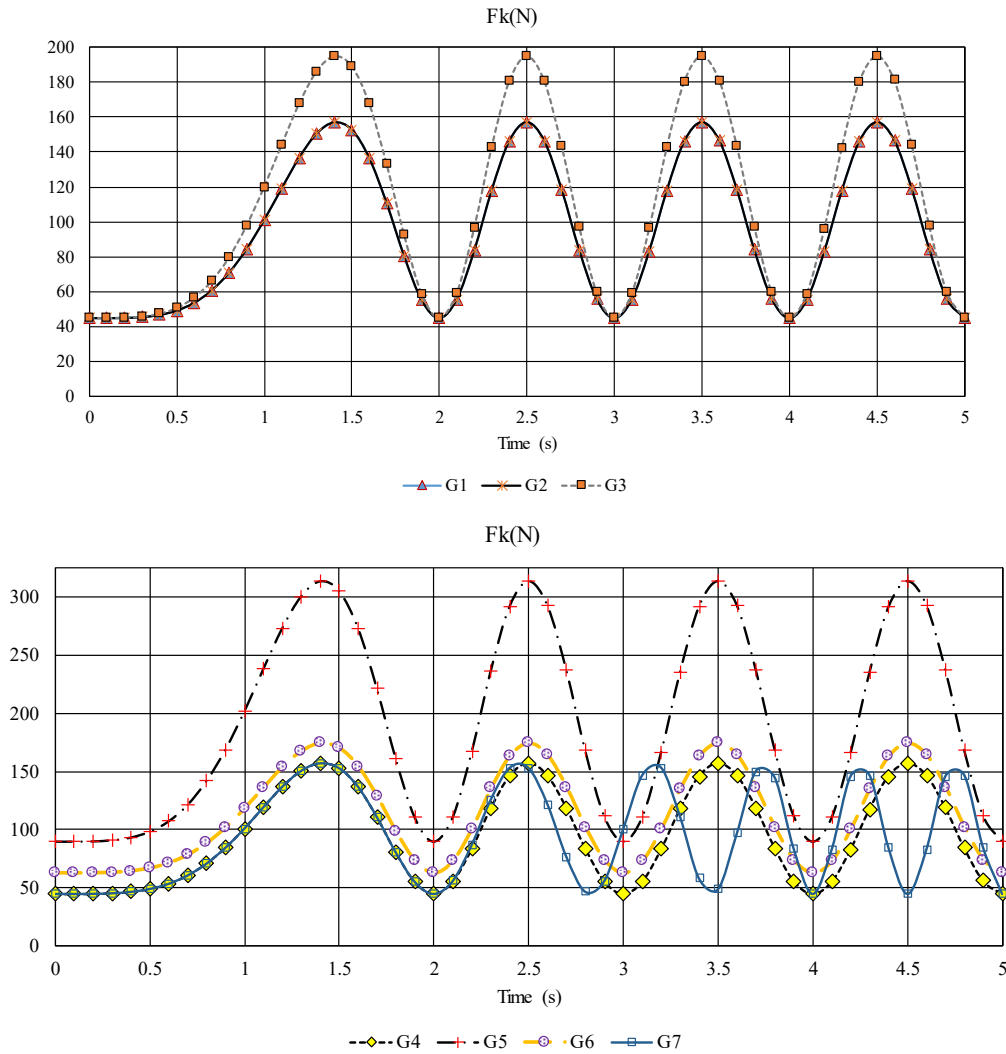


Figure 4. Joint force (F_{34x}) vs time graph

In Figure 5, the spring compression force F_k vs. time graphs are presented. From the graphs, it is clear that increasing crank radius r (G3 graph), spring constant k (G5 graph) and initial spring compression x_0 (G6 graph) results in an increase in F_k . Nevertheless, an increase in x_0 only shifts the maximum and minimum values of the spring force upwards by the same amount during which the amplitude of variation remains unaffected, while changes in the spring constant and crank radius influence both the maximum value and amplitude of spring force. The other parameters do not seem to affect F_k except that the angular speed causes a change in the frequency.

A designer can change as necessary as required the parameters in the dynamic model and run the code to see the effects on the results of particular requirements. The designer would realize that;

- increasing the spring constant k , crank radius r and initial spring compression x_0 raises the joint force F_{34x} to an irrational value which hinders the 360-degree rotation of the crank,
- bearing loads can be analyzed and the parameters can be selected for smaller bearing reactions,
- input torque values can be analyzed for the selection of a suitable electric motor.

Figure 5. Spring force (F_k) vs time graph

4. CONCLUSION

In this study, the dynamic model of a Scotch yoke mechanism with spring and mass has been developed. The friction effects on the intermediate slider-yoke and on the yoke-ground interfaces as well as variable crank speed effects have also been considered. The developed model predicts the values of the required input torque, joint forces and spring compression force when the input motion characteristics and values of the system parameters are specified. To that end, seven different group of parameters are defined to analyze the effects of the system parameters. The results have shown that the required torque takes on both positive and negative values inside one cycle, consistent with the literature. However, the mechanism driven by an electrical motor cannot provide both positive and negative torque. One solution would be to utilize a flywheel to compensate for the energy fluctuations. Other studies available in the literature suggest using suitable springs for the same purpose [6].

Discussion above and further numerical experiments with the dynamic model indicate that parameters involved cannot be selected arbitrarily. For example, as is also visible from the model that the joint force F_{34}^x is a function of the square of the angular speed, increasing the angular speed to high values may cause the joint force F_{34}^x to change its sense in different phases of the mechanism motion, hence causing also the contact surface between the intermediate slider and yoke to change its position from the bottom of the slot to its top, a condition which may not be desired as a design criterion. Therefore, in order to assure the right selection of the parameter values in the model, a thorough understanding of the mechanism behavior is essential through further investigations of the dynamic system model.

If the Scotch-yoke mechanism is going to be used within the framework of a conceptual design, then its constraints have to be taken into account as well. For instance, the output force generated in this mechanism may have to satisfy the requirements of a compression force in the sinusoidal form with desirable amplitude or maximum-minimum, and frequency characteristics. Yet other conditions may be that both the driving torque on the crank and the joint force F_{34}^x acting on the yoke sustain their signs throughout the operation of the mechanism. Stabilization of energy and speed, optimization in terms of desired criteria, inverse dynamic studies, where the resulting motion is analyzed in the mechanism under given actuation possibly constant input torque conditions, are issues and subjects of future work demanding answers for an effective use of the Scotch-yoke mechanism within the framework of a conceptual design.

5. REFERENCES

1. Nguyen, H.N. & Shieh, W.B. (2018). On the design of the gravity balancer using scotch yoke derivative mechanism. In Doroftei, I., Oprisan, C., Pislă, D., Lovasz, E. (eds) *New Advances in Mechanism and Machine Science. Mechanisms and Machine Science*, 57. Springer, Cham.
2. Al Shami, E., Mayberry, L., Zhang, R. & Wang, X. (2023). A preliminary study of a novel wave energy converter of a Scotch Yoke mechanism-based power take-off. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103533.
3. Hossain, Z. & Illias, H. (2022). Ocean wave energy harvesting via scotch yoke-based rotational generation. *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, 21(3), 167-175.
4. Subramanian, S.M., Murugesan, V., Perumal, A.V., Kumar, N.K.V.S., Anandhan, Y.S. & Arumugam, V. (2022). Design and analysis of the performance of scotch and yoke based two way pumping system. In *AIP Conf. Proc.*, 2527(1), 030005.
5. Rivankar, S.N., Kattimani, P.C., Walke, G. & Nigalye, A. (2019). Scotch yoke mechanism for specimen polishing & microstructure analysis. *International Journal of Research in Advent Technology*, 7(5), 455-459.
6. Kwon, S.-R. (2013). An adjustable scotch yoke mechanism for output torque regulation. *MSc Thesis*. School of Mechanical and Aerospace Engineering, The Graduate School, Seoul National University, Seoul, Korea, 41.
7. Prastiyo, W. & Fiebig, W. (2025). Balancing of slider-crank and Scotch-yoke mechanisms by the use of mechanical resonance: Simulation and experiment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 142, 103137.
8. Rayed, A.M., Esakki, B., Banik, S.C. & Nahin, A. (2024). Computational modeling and optimization of a flapping mechanism based on the scotch yoke principle. *SAE Technical Paper*, 2024(01), 2264.
9. Liang, Y. & Liu, Q. (2025). Dynamics simulation and analysis of scotch yoke mechanisms with opposed dual-piston and inclined slot configurations using ADAMS. *Journal of Physics: Conference Series*, 3098, 012005.
10. Tao, D., Zhang, C., Li, N., Zheng, L. & Cao, Z. (2025). Design and analysis of guide mechanism driven by limaçon gear. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 87(2), 59-68.
11. Apati, S. & Hegedus, G. (2023). Investigation and simulation of a scotch yoke mechanism. *MultiScience - microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference - Special Issue Part I*, 13(2), 144-152.
12. Al-Hamood, A., Jamali, H.U., Abdullah, O.I. & Senatore, A. (2019). Dynamics and lubrication analyses of scotch yoke mechanism. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13, 901-907.
13. Tai, Y., Hua, X., Cheng, L., Huang, Z., Wang, S. & Wang, Z. (2024). Dynamic characterization and design of scotch yoke inerter with adjustable inertance for seismic isolation. *Journal of Structural Engineering*, 150(11), 04024153.
14. Beyaz, A. & Dağtekin, M. (2018). Kinematic analysis of tractor engine crank-rod mechanism. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3), 93-100.
15. Sarıgeçili, M. İ. & Akçalı, İ.D. (2018). Dynamic modeling of slider-crank mechanism for selecting input parameters for desired piston speeds: Lumped mass approach. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 67-82.
16. Sarıgeçili M.İ., Dağdelen M. & Akçalı İ.D. (2022). Conceptual design of an axial fatigue loading machine. *3rd International 5 Ocak Congress on Applied Sciences*, Adana, 216-221.

Yeni Nesil Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Entegrasyonu: Sanal Gerçeklik Simülasyonlarının MACBETH Yöntemi ile Analizi

Cihat ÖZTÜRK^{1,a}, Cansu DÖNER^{2,b}, Nurullah GÜLEÇ^{1,c}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Ankara, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-4092-3825; ^bORCID: 0000-0003-2260-0851; ^cORCID: 0000-0002-1244-2186

Makale Bilgileri

Geliş : 16.08.2025

Kabul : 30.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1767024

Sorumlu Yazar

Cihat ÖZTÜRK

cozturk@aybu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sanal gerçeklik

Yeni nesil teknolojiler

İş sağlığı ve güvenliği

Küresel salgın

MACBETH yöntemi

Atf şekli: ÖZTÜRK, C., DÖNER, C., GÜLEÇ, N., (2026). Yeni Nesil Teknolojilerin İş Sağlığı ve Güvenliğine Entegrasyonu: Sanal Gerçeklik Simülasyonlarının MACBETH Yöntemi ile Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 371-387.

ÖZ

Dijital dönüşüm süreci ve pandemi sonrası koşullar, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimlerinde sanal gerçeklik (VR) tabanlı simülasyonları kritik bir yenilikçi alternatif haline getirmiştir. Bu çalışmada, VR tabanlı üç farklı İSG eğitim sistemi; teknik, ekonomik ve işlevsel boyutları kapsayan kriterler ışığında çok kriterli karar verme yöntemlerinden MACBETH kullanılarak analiz edilmiştir. Kapsamlı literatür taraması ve uzman görüşleriyle şekillenen değerlendirme süreci, performans ve işlevsellik odaklı kriterlerin seçimde belirleyici rol oynadığını göstermiştir. Maliyet dezavantajına karşın eğitim etkinliği, gerçeklik hissi ve kullanıcı etkileşimi açısından en güçlü olan immersif sistem en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Duyarlılık analizleri, kriter ağırlıklarındaki değişimlere rağmen alternatif sıralamasının değişmediğini ve modelin kararlı bir yapı sunduğunu kanıtlamıştır. Çalışma, İSG simülasyonlarının değerlendirilmesine yönelik sistematik bir metodoloji sunarak karar vericiler için yapılandırılmış bir seçim çerçevesi oluşturmaktadır.

Integration of Next-Generation Technologies into Occupational Health and Safety: Evaluation of Virtual Reality Simulations through the MACBETH Method

Article Info

Received : 16.08.2025

Accepted : 30.03.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1767024

Corresponding Author

Cihat ÖZTÜRK

cozturk@aybu.edu.tr

Keywords

Virtual reality

Next generation technologies

Occupational health and safety

Global epidemic

MACBETH method

How to cite: ÖZTÜRK, C., DÖNER, C., GÜLEÇ, N., (2026). Integration of Next-Generation Technologies into Occupational Health and Safety: Evaluation of Virtual Reality Simulations through the MACBETH Method. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 371-387.

ABSTRACT

The digital transformation process and post-pandemic conditions have established virtual reality (VR)-based simulations as a critical and innovative alternative in occupational health and safety (OHS) training. In this study, three different VR-based OHS training systems were analysed using MACBETH based on technical, economic, and functional criteria. The evaluation process, shaped by comprehensive literature reviews and expert opinions, revealed that performance and functionality-oriented criteria play a decisive role in the selection. According to the analysis results, the immersive system with the strongest training effectiveness, sense of realism, and user interaction emerged as the most suitable option despite its cost disadvantage. Sensitivity analyses demonstrated that the alternative ranking remained consistent despite changes in criteria weights, proving the model's stability. This study provides a systematic methodology for evaluating OHS simulations and offers a structured selection framework for decision-makers.

1. GİRİŞ

Tarihsel süreçte insanlık yüzyıllar boyunca bazen bir doğal afet, bazen bir savaş, bazen ise bir bulaşıcı salgın hastalık olarak kendini gösteren birçok zorluklarla karşı karşıya kalmıştır. 2019 yılının sonlarına doğru ilk kez Çin'in Wuhan şehrinde ortaya çıkan yeni tip koronavirüsün neden olduğu salgın hastalığa "2019 koronavirüs hastalığı (COVID-19)" adı verilmiştir. COVID-19 sağlık, eğitim, ekonomi ve sosyal hayat gibi alanları etkilemesinin yanı sıra çalışma dünyasının içyapısını da derinden etkilemiştir. Ayrıca iş ve eğitim başta olmak üzere birçok yaşam alanında dijital dönüşümün hızlanmasına neden olmuştur [1]. Özellikle yöneticilerin iş dünyasının her alanında sürdürülebilirliğin devam etmesi için geleneksel stratejik düşüncelerinden vazgeçmelerine ve olası gelecek krizlere karşı da hazır oluşuklarını güçlendirmeye sevk etmiştir. Diğer bir taraftan bu süreçte çalışan sağlığını ve güvenliğini sağlamakla yükümlü olan işverenlerin, iş ortamında hastalığın yayılmasını sınırlandırmak için koruyucu ve önleyici tedbirler alması zorunlu hale gelmişti. Bu kapsamda birçok iş yeri çalışmalarına ara verirken bir kısım ise uzaktan/evden çalışma yöntemiyle ya da koruyucu tedbirlerle işine devam etmiştir [2].

Yaşanmakta olan COVID-19 salgını temel İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uygulamalarını da etkilemiş ve dönüşüme zorlamıştır. Bu çerçevede İSG eğitimlerinin uzaktan erişim yoluyla verilmesi veya uzaktan eğitim yöntemlerinin uygulanamayacağı eğitimlerin de sosyal mesafe ve hijyen kuralları göz önünde bulundurularak minimum riskle yapılmasını mecburiyeti ortaya çıkarmıştır. Bu salgın süreci, iş dünyasının, çalışanların iş sağlığı ve güvenliğinin sağlıklı ve etkin şekilde gerçekleşmesi için yeni nesil teknolojilere yönelerek İSG alanında da dijital dönüşüme ayak uydurmaları gerekliliğini oluşturmuştur.

Endüstri 4.0 olarak ifade edilen dördüncü sanayi devrimiyle beraber teknoloji ve bilişim sistemleri hızla gelişmekte ve insan yaşamını kolaylaştıran birçok yenilik ortaya çıkmaktadır. Yapay zekâ, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, nesnelerin interneti (IoT), büyük veri, drone teknolojisi, otonom robotlar ve 5G gibi yeni nesil teknolojiler hayatımızın her alanına dâhil olmaktadır [3]. Bu teknolojiler ve iş yaşamına entegrasyonları sürdürülebilirlik açısından da büyük öneme sahiptir [4]. Endüstri 4.0 devrimi ile birlikte bu yüzyılda tüm toplumlarda dijital dönüşüm günlük yaşamın vazgeçilmezi olmuş ve yeni nesil işlevsel cihazlar kullanılarak yaşam kalitesini iyileştirme arayışları hızlanmıştır. Bugün özellikle yaşanan COVID-19 salgını ile birlikte değişime açık olan kurumlar İSG sistemlerinde de yeni nesil teknolojilere yönelmiştir. Birçok işletmede İSG sistemlerinin modernizasyonu sağlanmış, COVID-19 sonrası daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir iş dünyası oluşturmak için önemli adımlar atılmıştır. Özellikle yeni nesil teknolojilerin İSG alanına entegre edilmesi sağlıklı ve güvenli bir ortam ile zaman ve maliyet tasarrufu sağlayarak iş kazası ve meslek hastalıkları riskini en aza indirmeyi hedeflemektedir [5]. Bu teknolojileri temel alarak oluşturulan İSG çözümleri daha etkin bir önleme sistemi oluştururken aynı zamanda iş ortamında etkili bir İSG kültürünün gelişmesine de katkı sağlamaktadır.

Bu bağlamda çalışmada, tarihsel süreçte insanlığı etkileyen biyolojik afetlere kısaca değinilmiş ve özellikle COVID-19 salgınının yaşam ve çalışma hayatı üzerindeki dönüştürücü etkisi ele alınmıştır. Salgınla birlikte hız kazanan dijitalleşme sürecinin, yalnızca üretim ve yönetim sistemlerini değil, aynı zamanda İSG uygulamalarını da yeniden şekillendirdiği görülmektedir. Bu dönüşüm çerçevesinde yeni nesil teknolojilerin İSG alanındaki rolü değerlendirilmiş; özellikle risk yönetimi, eğitim süreçleri ve önleyici uygulamalar bakımından sundukları potansiyel analiz edilmiştir. Bu kuramsal ve kavramsal çerçevede doğrultusunda çalışmanın uygulama aşamasında, VR tabanlı İSG simülasyonlarının sistematik biçimde değerlendirilmesi hedefiyle araştırmanın amacı, önemi, modeli ve sınırları ortaya konmuş; alternatiflerin karşılaştırılmasında Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden MACBETH yaklaşımı kullanılmıştır. Son bölümde ise elde edilen bulgular değerlendirilerek hem literatürel hem de yönetsel düzeyde çıkarımlar tartışılmıştır.

Özetle bu çalışmada, COVID-19 salgını ile birlikte hız kazanan dijital dönüşüm sürecinin İSG uygulamalarına yansımaları ele alınmış ve işletmelerde kullanılmaya başlanan yeni nesil teknolojik çözümler arasından sanal gerçeklik (VR) tabanlı simülasyonlar incelenmiştir. VR teknolojisi, çalışanlara tehlikesiz bir ortamda gerçekçi senaryoları deneyimleme imkânı sunması, risk algısını güçlendirmesi ve öğrenme kalıcılığını artırma potansiyeli nedeniyle İSG eğitimlerinde öne çıkan bir araç haline gelmiştir. Ancak farklı teknik ve işlevsel özelliklere sahip VR tabanlı sistemlerin hangi kriterler çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiği ve hangi alternatifin daha uygun olduğu konusu literatürde sınırlı ve sistematik olmayan bir biçimde ele alınmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmada, kapsamlı literatür taraması ve alan uzmanlarının görüşleri birlikte değerlendirilerek VR tabanlı İSG simülasyonlarının seçiminde etkili olan temel kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler çerçevesinde alternatiflerin karşılaştırılması amacıyla ÇKKV yöntemlerinden MACBETH yaklaşımı uygulanmış ve en uygun simülasyon alternatifi sistematik bir karar modeli ile ortaya konmuştur. Böylece çalışma, VR tabanlı İSG eğitimlerinin yalnızca teknolojik bir yenilik olarak değil, çok boyutlu ve ölçülebilir bir karar problemi olarak ele alınmasına katkı sağlamaktadır. Tüm bu yönleriyle çalışma, dijitalleşme sürecinde İSG alanında teknoloji seçimine ilişkin karar vericilere yapılandırılmış bir değerlendirme çerçevesi sunmakta; aynı zamanda VR tabanlı eğitim sistemlerinin etkinliğinin analitik bir yaklaşımla incelenmesine literatüre katkı sağlamaktadır.

1.1. Sanal Gerçeklik ve İSG

Sanal gerçeklik, bilgisayar teknolojileri yardımıyla ortaya çıkan 360° sanal ortamlar sayesinde gerçek dünya algısını oluşturan bir teknolojidir [6]. Bu teknoloji gerçek yaşamda zor veya imkânsız olabilecek durumlarda çevresel ve vücut temelli ipuçlarının oluşturulmasına ve kontrolüne izin vermektedir [7]. Özel olarak tasarlanmış ürünler ile kullanıcılar simüle edilmiş ortamda ortaya çıkan görüntülerle etkileşim içerisinde bulunmaktadır.

Sanal gerçeklik teknolojisi, herhangi bir tehlike olmadan sanal güvenli ortamda aksiyonun bir parçası olma imkânı sunarken yazılımları, donanımları ve entegrasyon teknolojileri kullanarak insanlar ile sanal dünya arasında gerçek zamanlı bir iletişim kurduktan sonra insanların özelliklerine göre tepki verebilmektedir [8]. Benzersiz özellikleri ve esnekliği ile ortamların oluşturulmasına ve deneyimlenmesine olanak tanıyan bu teknoloji birçok alanda kullanım için olağanüstü bir potansiyele sahiptir. Özellikle bilgi teknolojisi, yapısal tasarım, askeri endüstri, biyomedikal, maden güvenliği ve eğitim yardımcıları teknolojisi sektörü gibi çeşitli endüstriyel sektörler bu teknolojiye yatırım yapmaktadır [9].

Sanal gerçekliğin kullanım alanlarından bir diğeri ise çalışan sağlığını ve güvenliğini korumaya yönelik oluşturulan çözümlerdir. İş ortamında tehlikeli hallerde tahliye durumları, güvenlik eğitimleri, teknolojik entegrasyonlu kişisel koruyucu donanımlar, ortam risk tespiti gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik tabanlı güvenlik eğitimleri genellikle sıralı operasyonları, standart çalışma prosedürlerini ve kısa sürede emniyet riski değerlendirmesini öğretmeye odaklanmaktadır [10].

COVID-19 salgını sırasında ise sanal gerçeklik sanal öğrenme ve tıbbi kullanımların yanında iş dünyasında da kullanılmıştır. İnsanların evden çalışmayı kolaylaştırmak için VR araçları tasarlanmıştır [11]. İSG alanında kullanılan sanal gerçeklik teknolojisi ile ortaya çıkan simülasyonlar, çalışanlara olası bir iş kazası sonucu yaşayabilecekleri durumları daha önceden deneyimleme fırsatı sunmaktadır [12]. COVID-19 salgını ile birlikte İSG 4.0 dönemini başlatan işletmeler tarafından, İSG eğitimlerinin güvenilir ve sağlıklı bir ortamda gerçek dünyayı sanal olarak inşa eden bu simülasyonlar ile verilmesi dikkat çekmeye başlamıştır. Sanal gerçeklik tabanlı İSG uygulamaları çalışanların, zihinlerinde hissederek olası tehlikelerin sonuçlarını deneyimlemelerinin yanı sıra her türlü tehlikeden uzak ve hijyenik bir ortamda öğrendikleri bilgilerin daha kalıcı olmasını sağlayarak iş sağlığı ve güvenliği bilinçlerinin tam anlamıyla oluşmasına katkı sağlamaktadır.

1.2. Sanal Gerçekliğin İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerindeki Etkinliği

Çalışmanın bu bölümünde, 2000–2026 döneminde VR ve ilişkili sürükleyici teknolojilerin (AR/MR, 360° panorama, simülatörler) İSG eğitimlerindeki etkisini; öğrenme kalıcılığı, davranış değişikliği/transfer ve kaza oranları boyutlarında literatür göz önünde bulundurularak özetlemektedir. Literatür, özellikle 2013 sonrası ve HMD (Head-Mounted Display) yaygınlaşmasıyla 2018'den itibaren hızlanan deneysel çalışmalarla şekillenmiştir. Sistematik derleme ve meta-analiz bulguları, VR'ın bilgi kazanımı (Hedges $g \approx 0.64$; $p < 0.001$) ve daha belirgin biçimde bilgi kalıcılığı (Hedges $g \approx 0.838$; $p < 0.001$) açısından geleneksel yöntemlere kıyasla avantaj sağladığını göstermektedir; ancak yüksek heterojenlik ($I^2 \sim \%86-90$) sonuçların bağlama duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır [13]. Saha deneylerinde de benzer şekilde, hemen-sonra ölçümlerde fark sınırlı iken, birkaç hafta sonraki kalıcılık testlerinde VR lehine anlamlı sonuçlar raporlanmıştır ($\eta^2 \sim 0.12$) [14].

Davranış değişikliği ve transfer açısından kanıtlar daha karmaşıktır. Bazı randomize kontrollü çalışmalar VR'ın güvenlik motivasyonu ve öz-yeterlik üzerinde olumlu etkiler ürettiğini ve kısa dönemli öz-bildirim

performans göstergelerini iyileştirdiğini belirtirken [15], bazı uygulamalarda bilişsel kazanımların benzer olduğu ancak davranış ve güvenlik iklimi üzerinde anlamlı fark oluşmadığı görülmüştür [16]. Kaza/yaralanma oranlarını doğrudan düşürdüğüne ilişkin yüksek kalitede uzun dönemli kanıt ise sınırlıdır; çoğu çalışma bilgi testleri ve simülasyon performansına dayanmakta, gerçek olay oranlarını izleyen çalışmalar nadir kalmaktadır. Kurumsal vaka raporları potansiyel faydaya işaret etse de metodolojik açıdan nedensellik kanıtı üretmemektedir.

Sektörler arası nicel sentezler, VR'ın güvenlik eğitiminde ortalama olarak geleneksel yöntemlerden daha iyi performans gösterebildiğini; özellikle bilgi kalıcılığı boyutunda etkinin büyüdüğünü ortaya koymaktadır. Meta-analiz bulgularında bilgi kazanımı için Hedges $g=0.640$ ($p<0.001$) ve bilgi kalıcılığı için Hedges $g=0.838$ ($p<0.001$) raporlanmıştır; ancak her iki analizde de yüksek heterojenlik ($I^2 \approx \%85.6$ ve $\%89.5$) saptanmıştır. Bu durum, VR'ın etkisinin bağlam ve tasarım özelliklerine duyarlı olduğunu ve “VR her zaman daha etkilidir” şeklinde genelleme yapılamayacağını göstermektedir [13]. Ayrıca literatürde kalıcılık ölçümlerinin sınırlı sayıda çalışma tarafından ele alınması ve çoğunlukla 2–4 haftalık takiplerle sınırlı kalması, uzun vadeli davranış dönüşümünü değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır. İnşaat kazası güvenliği örneğinde de hemen-sonra ölçümlerde fark görülmezken, 4 hafta sonraki kalıcılık testinde VR lehine anlamlı sonuçlar ($p \approx 0.034$ ve $p \approx 0.029$; $\eta^2 \approx 0.118-0.126$) bildirilmiştir; bu da VR'ın özellikle hatırlama süreçlerinde avantaj sağlayabileceğini düşündürmektedir [14].

Bununla birlikte, VR'ın her koşulda üstün öğrenme çıktıları üretmediğine dair bulgular da mevcuttur. İmmersif VR ile yüksek kaliteli sunum temelli eğitimlerin karşılaştırıldığı çalışmalarda, bazı algısal farklılıklara rağmen öğrenme çıktılarında tutarlı bir üstünlük saptanmamış ve maliyet/karmaşıklık açısından VR'ın her durumda gerekçelendirilemeyeceği belirtilmiştir. Bu tür sonuçlar, karşılaştırma yapılan “geleneksel” yöntemin niteliğinin belirleyici olduğunu göstermektedir [17]. Ayrıca VR türleri arasında da farklılıklar vardır: 360° panoramalar daha gerçekçi algılansa da model tabanlı VR ortamlarında tehlike tanıma performansının daha yüksek olabildiği raporlanmıştır. Bu bulgular, İSG eğitiminde etkinliğin yalnızca gerçekçilik düzeyine değil; etkileşim, geri bildirim ve pedagojik tasarım unsurlarına da bağlı olduğunu ortaya koymaktadır [18].

Davranış değişikliği, İSG eğitimlerinin nihai amacı olmakla birlikte ölçülmesi en zor çıktılarından biridir. Literatürde çalışmaların büyük kısmı kısa süreli bilgi testlerine ve öz-bildirim ölçeklerine dayanmakta; gerçek iş davranış gözlemleri, güvenlik iklimi ve organizasyonel performans göstergeleri daha sınırlı raporlanmaktadır. Sistematik derlemeler de değerlendirme yaklaşımlarının oldukça heterojen olduğunu ve ölçüm araçlarında standartlaşmanın zayıf kaldığını vurgulamaktadır [19]. Bununla birlikte, randomize kontrollü çalışmalar VR'ın davranışa yakın çıktılar üzerindeki potansiyelini göstermektedir. Finlandiya'da inşaat sektöründe yürütülen rastgele kontrollü deneyde (RCT, $N=119$), VR tabanlı eğitimin sınıf temelli eğitime kıyasla güvenlik motivasyonu, öz-yeterlik ve sonuç beklentileri üzerinde daha güçlü etki yarattığı ve 1 ay takipte öz-bildirime dayalı güvenlik performansında daha büyük artış sağladığı bildirilmiştir. Ancak ölçümlerin öz-bildirim temelli olması ve takip süresinin kısa olması, kalıcı davranış değişimi konusunda temkinli yorum yapılmasını gerektirmektedir [15].

Yüksek riskli alanlarda elde edilen bulgular ise daha karmaşık bir tablo sunmaktadır. Almanya'da profesyonel çatı ustalarıyla yürütülen bir çalışmada ($N=74$), VR-ciddi oyun yaklaşımı ile sınıf temelli problem-odaklı eğitimin bilişsel ve tutumsal çıktılarda benzer iyileşmeler sağladığı; ancak davranış ve güvenlik iklimi üzerinde anlamlı fark yaratmadığı raporlanmıştır. Aynı çalışmada kültürel/bağlamsal faktörlerin çıktıları etkileyebileceği tartışılmıştır [16]. Kazı güvenliği örneğinde ise VR eğitiminin öz-yeterlik düzeylerinde anlamlı artış sağladığı (VR: pre $M \approx 21.42 \rightarrow$ post $M \approx 30.42$; $p<0.001$) gösterilmiş; ancak bu ara değişkenlerin gerçek iş davranışına dönüşümünün uzun dönemli takip gerektirdiği belirtilmiştir [14]. Sağlık sektöründe işyeri şiddeti senaryolarına yönelik bir VR pilot çalışması ($N=13$) ise sistemin kullanıcılar tarafından ilgi çekici bulunduğunu ancak kullanılabilirlik açısından geliştirme gerektirdiğini ortaya koymuş; davranış ve yararlanma sonuçlarını değerlendiren uzun dönemli araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır [20].

İSG açısından temel soru, VR eğitiminin gerçek kazaları azaltıp azaltmadığıdır; ancak literatürde bu soruya doğrudan yanıt veren çalışmalar sınırlıdır. Bunun başlıca nedenleri, kaza/yaralanma olaylarının düşük sıklıkta gerçekleşmesi nedeniyle büyük örneklem ve uzun takip gereksinimi ile işletmelerde veri erişimi ve raporlama standardizasyonundaki güçlüklerdir. Sistematik derlemeler, uzun dönem kalıcılık ve transfer ölçümlerinin dahi sınırlı olduğunu; “lagging indicator” niteliğindeki kaza oranlarının ise çok daha nadir

değerlendirildiğini belirtmektedir [13]. Bu boşluk nedeniyle kaza oranı düşüşüne ilişkin iddialar çoğunlukla akademik deneylerden ziyade kurumsal vaka raporlarında yer almaktadır. Örneğin National Safety Council raporunda VR eğitiminin kayıp zamanlı yaralanma ve yakın-olay sayılarında azalma ile ilişkilendirildiği ifade edilse de metodolojik ayrıntıların sınırlı olması nedensel çıkarımı güçleştirmektedir [21].

Akademik çalışmalar genellikle doğrudan kaza oranları yerine ara performans göstergelerine (tehlike tanıma, senaryo içi karar verme, öz-yeterlik/motivasyon) odaklanmaktadır. Bu göstergeler kazaların belirleyicileriyle ilişkili olsa da bunlardan kaza oranına doğrusal bir geçiş varsayımı her zaman geçerli değildir; örneğin 360° panorama ortamlarında algılanan gerçekçiliğin artmasına rağmen tehlike tanıma performansının düşebildiği bildirilmiştir [18]. Kurumsal raporlar ise uygulanabilirlik ve hesap verebilirlik açısından değerli olmakla birlikte, çoğunlukla küçük ölçekli uygulamalara dayanmaktadır. Mississippi Department of Transportation ve Construction Skills Queensland raporları, VR'ın belirli öğrenme çıktılarında en az mevcut yöntemler kadar etkili olabileceğini belirtmekte; ancak uzun dönem etki ve gerçek olay oranlarının gelecekteki araştırma gündemi olduğunu vurgulamaktadır [22]. Sonuç olarak, VR'ın kazaları azaltma potansiyeli kuramsal olarak güçlü görünse de 2000–2026 literatüründe bu iddiayı büyük ölçekli ve uzun süreli saha verileriyle doğrudan test eden çalışmalar sınırlı kalmaktadır [13].

Literatürde VR temelli İSG eğitimlerine ilişkin kanıtların başlıca sınırlılıkları; uzun dönem kalıcılık ölçümlerinin azlığı, gerçek kaza/yaralanma oranlarının nadiren izlenmesi, örneklemelerin sıklıkla öğrenci/çırak gibi işgücüne benzer ancak tam temsil gücü olmayan gruplardan oluşması, ölçümlerin öz-bildirim ağırlıklı olması ve VR tasarımları ile ölçme araçlarının standartlaşmaması nedeniyle meta-analitik heterojenliğin yüksek seyretmesi olarak özetlenmektedir [13]. Uygulama tasarımı açısından ise literatür, kalıcılığı hedefleyen tekrar ve geri bildirim temelli yapıların önemine işaret etmekte; bazı çalışmalarda VR'ın avantajının hemen-sonra değil birkaç hafta sonraki ölçümlerde belirginleştiğini göstermektedir. Ayrıca kontrol grubunun niteliği sonuçları güçlü biçimde etkilemekte; VR'ın sıradan sınıf anlatımına üstünlüğü ile iyi tasarlanmış video/sunum temelli eğitime üstünlüğü aynı düzeyde olmayabilmektedir [14]. Gerçekçilik tek başına belirleyici değildir; 360° panorama ortamları daha gerçekçi algılansa da tehlike tanıma performansının etkileşim, görev yapısı ve geri bildirim gibi pedagojik unsurlara bağlı olduğu vurgulanmaktadır [18]. Davranış ve güvenlik iklimi üzerindeki etkinin ise VR'ın örgütsel süreçlere entegre edilmesiyle (ör. saha koçluğu, ustabaşı desteği, periyodik tazeleme) daha anlamlı hale gelebileceği ve bağlamsal faktörlerin sonucu etkileyebileceği belirtilmektedir [16].

2. YÖNTEM

2.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, VR tabanlı İSG eğitim simülasyonlarını karşılaştırarak en uygun simülasyon alternatifinin belirlenmesidir. İnceleme için alternatif olarak sanal gerçeklik tabanlı 3 eğitim simülasyonu ele alınmıştır. Niteliksel ve niceliksel olarak birçok değerlendirme kriterinin olması bu çalışmanın ÇKKV yöntemlerinden biri ile çözülmesini zorunlu hale getirmiştir.

2.2. Araştırmanın Önemi

Araştırmanın önemi, küresel salgınla ivme kazanan dijitalleşme ile İSG alanında teknolojinin incelenmesi ve bu alanda kullanılan sanal gerçeklik simülasyonlarının değerlendirilmesidir. Özellikle bu araştırma, yeni nesil İSG teknolojilerinin ele alındığı ve incelendiği çalışma sayısının az olmasından dolayı önem kazanmaktadır. Ayrıca bu çalışma, hem gelecekte yeni nesil İSG teknolojilerini temel alan akademik çalışmalarda hem de kuruluşların İSG alanında kullanılmak üzere yapacakları sanal gerçeklik tabanlı simülasyon yatırım seçimlerinde yol gösterici niteliktedir.

2.3. Araştırmanın Modeli

2.3.1. MACBETH Yöntemi

Bu çalışmada kullanılan, ÇKKV yöntemlerinden biri olan ve ikili kıyaslamalara dayanan MACBETH (Kategorik Bazlı Değerlendirme Tekniği ile Çekiciliği Ölçme) yöntemi, 1990'lı yıllarda Bana e Costa,

Vansnick ve De Corte tarafından geliştirilmiştir [23]. Diğer ÇKKV yöntemlerinden farklı olarak değerlendirme yaparken kantitatif değerler yerine kalitatif değerleri temel olarak karşılaştırma yapmaktadır [24]. Bir diğer ÇKKV yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi %10 tutarsızlığa izin verirken tutarsızlığına izin vermeyen ve 7 kategorili ölçek kullanan MACBETH yönteminin temel avantajı yargıların teorik ve anlamsal tutarlılık kontroline olmasındır[25]. Problemlerin etkin ve hızlı bir şekilde çözülmesini sağlayan bu yöntem literatürde stratejik şehir planlama, teknoloji seçimi, kariyer seçimi, makine seçimi, teknik performans karşılaştırılması ve yatırım politikaları değerlendirilmesi gibi birçok farklı alanda kullanılmıştır [26].

MACBETH'in temel gücü, karar vericinin nicel puan vermek yerine alternatifler arasındaki “çekicilik farkını” anlamsal (kalitatif) yargılarla ifade etmesini sağlayarak bu yargılardan kardinal değer fonksiyonları ve ağırlıklar türetmesidir; bu yönüyle yöntem, ölçümü zor/öznel kalan kriterlerin baskın olduğu teknoloji ve süreç değerlendirmelerinde pratik bir çerçeve sunar [23]. Uygulama literatürü incelendiğinde MACBETH'in, özellikle seçim/sıralama problemlerinde farklı karar bağlamlarına uyarlandığı görülmektedir: örneğin tekstil sektöründe yeşil tedarikçi seçimi probleminde MACBETH yargıları Taguchi kayıp fonksiyonlarıyla bütünleştirilerek tedarikçilerin çevresel/operasyonel performansı çok kriterli biçimde karşılaştırılmıştır [27]; yine bir tekstil işletmesinde üretilecek ürün grubu seçimi probleminde MACBETH tabanlı yapı, bulanık MARCOS ile birleştirilerek alternatiflerin uzlaşıya dayalı sıralanması gerçekleştirilmiştir [28]. Daha yüksek belirsizlik içeren sağlık tedarik zinciri bağlamında ise MACBETH, COVID-19 döneminde maske/yüz siperi gibi kritik ürünler için tedarikçi seçimini destekleyecek şekilde “fuzzy rough” temsillerle bütünleşik kullanılarak yöntemsel sağlamlık ve duyarlılık analizleriyle raporlanmıştır [29]. Operasyonel seviyede güvenlik boyutunun doğrudan kriterleştirildiği bir başka örnekte MACBETH kullanılarak, termik santrallerde denetim/rota önceliklendirme probleminde “iş sağlığı ve güvenliği” gibi kriterleri de içeren değer ağacı üzerinden alternatif rotaların öncelik sıralaması üretilmiştir [30]. VR özelinde MACBETH ile yapılmış doğrudan bir değerlendirme çalışmasına ilgili literatürde rastlanmamıştır; ancak yukarıdaki örnekler, VR eğitimlerinin değerlendirilmesinde karşılaşılan “deneyim kalitesi, algılanan gerçekçilik, kullanım kolaylığı, öğrenme aktarımı, güvenlik davranışı” gibi yoğun kalitatif boyutların MACBETH'in semantik kıyas mantığıyla tutarlı biçimde modellenebileceğine işaret eder [23].

MACBETH yönteminin adımları şu şekilde özetlenebilir [31]:

Adım 1: Tanımlanan değerlendirme kriterleri bir değer ağacı şeklinde ifade edilir.

Adım 2: Performans düzeyleri tanımlanır. Üst referans değerleri (100) ve alt referans değerleri (0) belirlenir.

Adım 3: Alternatifler ve kriterler soldan sağa ve yukarıdan aşağı önem düzeylerine göre karşılaştırma matrisine sıralanır ve karar vericiler tarafından Çizelge 1’de verilen ölçeğe göre karşılaştırmalar yapılır.

Çizelge 1. MACBETH yöntemi semantik ölçeği

Semantik ölçek	Eşdeğer sayısal ölçek (negatif etkili ölçekler)	Eşdeğer sayısal ölçek (pozitif etkili ölçekler)
Nötr	6	0
Çok zayıf	5	1
Zayıf	4	2
Orta	3	3
Güçlü	2	4
Çok güçlü	1	5
Aşırı	0	6

Adım 4: İkili karşılaştırmalar ile elde edilen yargıların tutarlılığı kontrol edilir.

Adım 5: Alternatiflerin her bir kriterle göre performansları belirlenir.

Adım 6: Kriterler soldan sağa ve yukarıdan aşağı önem düzeylerine göre sıralanır.

Adım 7: Elde edilen yargıların tutarlılığı kontrol edilir.

Adım 8: MACBETH tablosundan alternatifler sıralanır.

2.3.1.1. Çekicilik Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kalitatif Performans Seviyelerinin Değerlendirilmesi

Performans seviyelerini ölçmek için, Çizelge 2' de gösterildiği gibi bir matris düzenlenir [32]. Burada a kriterinin A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 performans seviyeleri olsun. A_1 , 'iyi' seviyeyi A_5 , 'nötr' seviyeyi gösterirken önem derecelerinin azalan sıraya göre A_1, A_4, A_2, A_3, A_5 olduğunu varsayalım. Performans seviyeleri ile MACBETH skorlarına çevrilir ve $v(A_1) = 100$ ve $v(A_5) = 0$ değerlerini alır. Önem sıralaması ise $v(A_1) > v(A_4) > v(A_2) > v(A_3) > v(A_5)$ şeklinde gösterilmektedir. Daha sonra bir seviyenin diğerine göre performans gücü karar verici tarafından matrise girilir. (0: sıfır, 1: çok zayıf, 2: zayıf, 3: orta, 4: güçlü, 5: çok güçlü ve 6: aşırı ve performans gücü sağlamazsa=pozitif)

Karar verici A_1 , 'in performansını A_2 , 'ye tercih eder ise tercih seviyesi

$$A_1 > h_{A_2}, \quad h \in \{0, 1, 2, \dots, 6\} \quad (1)$$

$$v(A_1) - v(A_2) = h\alpha \quad (2)$$

(α : $v(A_1)$ ve $v(A_2) \in [0.100]$ değerini sağlayan katsayıdır.

Çizelge 2. MACBETH semantik ölçeği ile karşılaştırılması

Performans seviyesi	A_1	A_4	A_2	A_3	A_5
A_1	-	zayıf	pozitif	pozitif	pozitif
A_4		-	zayıf	pozitif	pozitif
A_2			-	orta	pozitif
A_3				-	çok zayıf
A_5 (nötr)					-

$$v(A_1) - v(A_4) = 2\alpha$$

$$v(A_4) - v(A_3) = 2\alpha$$

$$v(A_3) - v(A_2) = 3\alpha$$

$$v(A_2) - v(A_5) = \alpha$$

Eşitlik sistemi üzerindeki işlemler sonucunda $\alpha = \frac{100}{8}$ ve $v(A_4) = 75$, $v(A_3) = 50$, $v(A_2) = 12.5$ olarak bulunur.

2.3.1.2. Çekicilik Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kantitatif Performans Seviyelerinin Değerlendirilmesi

x_{ij} , j 'inci kriter için i 'inci alternatifin performans ölçümü ve $v(x_{ij})$ ise x_{ij} için dönüştürülmüş sayısal MACBETH ölçütüdür. j kriteri için, x_j^+ üst referans seviyesini gösterirken, x_j^0 alt referans seviyesini göstermektedir. $v(x_j^+) = 100$ ve $v(x_j^0) = 0$ şeklindedir.

Herhangi bir ara performans ölçüsü x_{ij} için ise MACBETH puanı Eşitlik 3 ile elde edilir.

$$(x_{ij}) = v(x_j^0) + \frac{(x_{ij} - x_j^0)}{(x_j^+ - x_j^0)} [v(x_j^+) - v(x_j^0)] \quad (3)$$

Bir alternatifin genel puanını bulmak için Eşitlik 4 ve 5 kullanılır [33,34].

$$V(x_i) = \sum_{j=1}^n w_j (v_j) \quad (4)$$

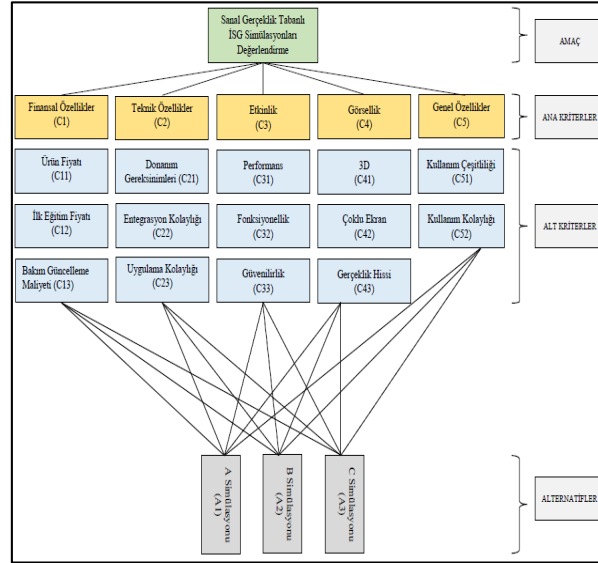
$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad w_j > 0 \quad \text{ve} \quad \begin{cases} v_j(x_j^+) = 100 \\ v_j(x_j^0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(w_j j 'inci kriterin ağırlığı)

3. UYGULAMA

3.1. Araştırmanın Önemi

Uygulamanın ilk aşamasında hem literatür taranarak hem de uzman görüşleri alınarak en önemli 5 ana kriter ve 14 alt kriter belirlenmiş ve Şekil 1’ de gösterilmiştir. Bunun yanında, sektör içerisinde araştırma yapılarak firmalar tarafından tercih edilebilecek 3 alternatif simülasyon belirlenmiştir. Tüm analizler 4 uzmanın görüşleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacına uygun bir şekilde 3 farklı sanal gerçeklik tabanlı simülasyon ÇKKV yöntemi olan MACBETH ile karşılaştırılmış ve kriterler bazında değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 1. Sanal gerçeklik tabanlı simülasyonların seçimi için kriter ve alternatiflerin hiyerarşik yapısı

Karşılaştırma matrislerinin oluşturulması ve MACBETH yargılarının belirlenmesi sürecinde hem uygulama pratiğini hem de teknik ve akademik perspektifi temsil edecek şekilde farklı uzmanlık alanlarından dört karar verici sürece dâhil edilmiştir. KV1, yedi yıllık saha deneyimine sahip, çeşitli sektörlerde firmalara İSG danışmanlığı sunan B sınıfı İSG uzmanıdır. Bu uzman, özellikle risk değerlendirme, saha denetimi, eğitim programlarının uygulanması ve çalışan davranışlarının gözlemlenmesi konularında aktif rol almakta olup, VR tabanlı eğitim alternatiflerini uygulama gerçekliği ve mevzuata uyum açısından değerlendirmiştir. KV2, iş güvenliği odaklı dijital çözümler ve simülasyon tabanlı yazılım geliştirme alanında beş yıllık deneyime sahip bir yazılım mühendisidir. Bu uzman, alternatifleri teknik altyapı, sistem entegrasyonu, kullanıcı arayüzü tasarımı, veri analitiği ve geri bildirim mekanizmalarının uygulanabilirliği bakımından analiz etmiştir. KV3, üniversitede İSG bölümü öğrencilerine ders veren ve altı yıllık akademik deneyime sahip bir öğretim elemanıdır. Bu karar verici, alternatifleri pedagojik tasarım, öğrenme çıktıları, bilişsel yük, ölçme-değerlendirme yapısı ve uzun dönemli öğrenme kalıcılığı açısından değerlendirmiştir. KV4 ise hizmet sektöründe beş yıllık deneyime sahip C sınıfı İSG uzmanıdır ve özellikle çalışan profili, eğitim erişilebilirliği, maliyet-etkinlik ve operasyonel uygulanabilirlik boyutlarını ön plana alarak değerlendirme yapmıştır. Bu çok disiplinli ve farklı deneyim düzeylerini temsil eden uzman profili sayesinde, alternatiflerin yalnızca teknik performans açısından değil; pedagojik, operasyonel ve saha uygulanabilirliği boyutlarıyla bütüncül biçimde analiz edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri, iki aşamalı bir süreç sonucunda belirlenmiştir. İlk aşamada VR tabanlı iş sağlığı ve güvenliği İSG eğitimlerine ilişkin güncel literatür sistematik biçimde incelenmiş; ikinci aşamada ise alan uzmanlarının görüşleri alınarak literatürde öne çıkan boyutlar uygulama bağlamında yeniden yapılandırılmıştır. Literatür incelemesinde VR eğitimlerinin etkinliğinin çoğunlukla bilgi kazanımı ve öğrenme kalıcılığı, eğitim transferi, etkileşim ve immersiyon düzeyi, gerçeklik/telepresence algısı, kullanıcı deneyimi ve memnuniyet, ile performans çıktıları (hata oranı, tepki süresi, görev tamamlama başarısı) gibi kriterler üzerinden değerlendirildiği görülmüştür [13,35,36].

Özellikle meta-analitik bulgular, VR'n geleneksel eğitim yöntemlerine kıyasla bilgi kalıcılığı ve öğrenme çıktıları açısından anlamlı üstünlük sağlayabildiğini ortaya koymaktadır [13]. Benzer şekilde, VR ortamlarında telepresence ve etkileşim düzeyinin eğitim transferi ve risk algısı üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır [35]. Bunun yanında, kullanıcı deneyimi ve sistem kullanılabilirliği gibi insani-teknik etkileşim boyutlarının da eğitim etkinliği ile doğrudan ilişkili olduğu raporlanmıştır [37]. Bu literatür bulguları doğrultusunda oluşturulan ön kriter seti, İSG alanında saha deneyimine ve teknik uzmanlığa sahip karar vericilerle yapılan yapılandırılmış görüşmelerle değerlendirilmiş; uygulama gerçekliği, mevzuata uygunluk, teknik entegrasyon kolaylığı ve maliyet-etkinlik gibi bağlamsal boyutlar uzman katkısıyla netleştirilmiştir. Böylece kriterler hem teorik temele hem de pratik uygulama perspektifine dayandırılarak, VR tabanlı İSG eğitim alternatiflerinin çok boyutlu ve dengeli biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayacak şekilde son hâline getirilmiştir.

MACBETH analizi kapsamında değerlendirilmek üzere literatürde İSG eğitimlerinde en sık karşılaşılan ve farklı etkileşim düzeylerini temsil eden üç sanal gerçeklik tabanlı eğitim alternatifi tanımlanmıştır. Birinci alternatif (A1), tam immersif, etkileşimli ve gerçek zamanlı geri bildirim mekanizmasına sahip VR tabanlı İSG eğitim sistemidir. Bu alternatifte başlık tipi gözlük, kontrolörler ve vücut takip sensörleri kullanılarak senaryo tabanlı, modelleme içeren üç boyutlu interaktif ortamlar oluşturulmakta; tehlike tanıma, kişisel koruyucu donanım kullanımı ve ergonomi gibi modüller performansla dayalı ölçüm mekanizmaları (bilgi kazanımı, davranışsal tepki ve hata oranı) ile değerlendirilmektedir. İkinci alternatif (A2), 360° panoramik gerçek saha görüntülerine dayanan yarı-immersif VR eğitimidir. Bu yapı, gerçek ortam algısını güçlendirmekle birlikte etkileşim düzeyi navigasyon ve bakış yönlendirme ile sınırlıdır; geri bildirim çoğunlukla eğitim sonu değerlendirme ve test modülleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Üçüncü alternatif (A3) ise masaüstü ortamda çalışan, non-immersive VR ya da gelişmiş e-öğrenme destekli simülasyon sistemidir. Bu alternatif bilgisayar ekranı üzerinden üç boyutlu senaryolar sunmakta, kullanıcı etkileşimi mouse ve klavye ile sınırlı kalmakta ve ölçüm süreci ağırlıklı olarak test ve quiz temelli değerlendirmelere dayanmaktadır. Bu üç alternatif, immersiyon düzeyi, etkileşim yoğunluğu, geri bildirim yapısı ve performans ölçüm kapasitesi bakımından kademeli bir yapı oluşturarak çalışmanın çok kriterli değerlendirme çerçevesinde karşılaştırılabilir, teorik olarak temellendirilmiş ve uygulamada karşılığı bulunan seçenekler üzerinden yürütülmesini sağlamaktadır.

3.2. Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmanın en temel sınırlılıklarından biri, VR tabanlı İSG simülasyon alternatiflerinin piyasa ölçeğinde henüz sınırlı sayıda olmasıdır. Özellikle yerli geliştiricilerin teknik ve pedagojik özelliklere ilişkin detaylı verileri paylaşma konusunda çekimser davranışları, alternatiflerin kapsamlı ve karşılaştırılabilir veri setleri üzerinden değerlendirilmesini güçleştirmiştir. Bu durum, alternatif evreninin tam anlamıyla temsil edici bir yapıya ulaşmasını engellemiş ve karar modeli kapsamında değerlendirilen seçeneklerin sayısını sınırlamıştır. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar, çalışmada analiz edilen alternatifler çerçevesinde geçerlidir; daha geniş bir alternatif seti ile farklı sonuçlar ortaya çıkma olasılığı bulunmaktadır.

İkinci önemli sınırlılık, İSG alanında dijitalleşme ve VR tabanlı eğitim uygulamalarının Türkiye bağlamında görece yeni bir gelişim sürecinde olmasıdır. Bu durum hem pazar olgunluğunun düşük olmasına hem de karar vericilerin deneyim birikiminin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Karar vericilerin değerlendirmeleri bireysel deneyimlerden ziyade ortak tartışma ve grup konsensüsü üzerinden şekillenmiştir. Grup temelli karar alma yaklaşımı, kolektif değerlendirme avantajı sağlamakla birlikte bireysel yargı farklılıklarının modellenmesini sınırlamıştır. Gelecek çalışmalarda bireysel MACBETH matrislerinin ayrı ayrı oluşturulması ve sonuçların karşılaştırılması, karar tutarlılığı ve yargı farklılıklarının analizi açısından daha derin bir metodolojik katkı sağlayabilir.

Bir diğer sınırlılık, yeni nesil İSG teknolojilerine ilişkin akademik literatürün özellikle yerel bağlamda henüz gelişim aşamasında olmasıdır. Bu durum kriter belirleme sürecinde literatür tabanlı referans çeşitliliğini daraltmış ve uzman görüşlerinin görece daha belirleyici olmasına yol açmıştır. Her ne kadar kriterler sistematik literatür incelemesi ve uzman görüşlerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuş olsa da alanın hızla gelişiyor olması kriter yapısının zaman içerisinde güncellenmesini gerekli kılabılır.

Çalışmada kullanılan model statik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Oysa VR tabanlı sistemler teknolojik olarak hızlı evrim geçiren yapılardır. Donanım, yazılım ve kullanıcı deneyimi boyutlarındaki

gelişmeler alternatiflerin performans profillerini kısa sürede değiştirebilir. Bu nedenle sonuçlar, çalışmanın gerçekleştirildiği dönem ve mevcut teknolojik olgunluk düzeyi bağlamında değerlendirilmelidir.

3.3. Metodolojinin Uygulanması

Bu aşamada anket formları online olarak karar vericilere iletilerek elde edilen veriler ile MACBETH yöntemi adımları sırasıyla uygulanmıştır.

Çizelge 3. Ana kriterlerin sayısallaştırılmış MACBETH semantik ölçeğine göre ağırlıklandırılması

	C3	C1	C2	C5	C4	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C3	0	1	2	3	4	5	100	0,333
C1		0	1	2	3	4	80	0,267
C2			0	3	4	3	60	0,200
C5				0	1	2	40	0,133
C4					0	1	20	0,067
Nötr						0	0	0

Yapılan hesaplamalar sonucunda Çizelge 3'te 0,333 ağırlığı ile etkinlik (C3) kriteri en önemli ana kriter olurken 0,067 ağırlığı ile görsellik (C4) kriteri en az öneme sahip kriter olmuştur. Özellikle etkinlik kriterinin simülasyonun performansını, fonksiyonelliğini ve güvenilirliğini kapsamaları karar vericilerin bu yönde seçimini etkilemiştir.

Çizelge 4. Finansal özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C11	C13	C12	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C11	0	1	3	5	100	0,500
C13		0	3	4	80	0,400
C12			0	2	20	0,100
Nötr				0	0	0

Çizelge 4' te finansal özellikler ana kriterinin yer alan ürün fiyatı (C11), ilk eğitim fiyatı (C12) ve bakım-güncelleme maliyeti (C13) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda ürün fiyatı 0,500 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,400 ve 0,100 ile bakım-güncelleme maliyetinin ve ilk eğitim fiyatı alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 5. Teknik özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C22	C21	C23	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C22	0	2	3	5	100	0,417
C21		0	2	4	80	0,333
C23			0	3	60	0,250
Nötr				0	0	0

Çizelge 5' te teknik özellikler ana kriterinin yer alan donanım gereksinimleri (C21), entegrasyon kolaylığı (C22) ve uygulama kolaylığı (C23) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda entegrasyon kolaylığı 0,417 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,333 ve 0,250 ile donanım gereksinimleri ve uygulama kolaylığı alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 6. Etkinlik ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C31	C32	C33	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C31	0	1	3	4	100	0,444
C32		0	2	3	75	0,333
C33			0	2	50	0,222
Nötr				0	0	0

Çizelge 6' da etkinlik ana kriterinin altında yer alan performans (C31), fonksiyonellik (C32) ve güvenilirlik (C33) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda performans 0,444 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,333 ve 0,222 ile fonksiyonellik ve güvenilirlik alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 7. Görsellik ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C43	C41	C42	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C43	0	2	3	4	100	0,500
C41		0	2	3	75	0,375
C42			0	1	25	0,125
Nötr				0	0	0

Çizelge 7’ de görsellik ana kriterinin altında yer alan 3D (C41), çoklu ekran (C42) ve gerçeklik hissi (C43) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda gerçeklik hissi 0,500 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,375 ve 0,125 ile 3D ve çoklu ekran alt kriterleri gelmiştir.

Çizelge 8. Genel özellikler ana kriterine ait alt kriterlerin ikili karşılaştırılması

	C51	C52	Nötr	Ağırlıklar	Normalize ağırlıklar
C51	0	2	4	100	0,571
C52		0	3	75	0,429
Nötr			0	0	0

Çizelge 8’ de genel özellik ana kriterinin altında yer alan kullanım çeşitliliği (C51), ve kullanım kolaylığı (C52) alt kriterlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve bunun sonucunda kullanım çeşitliliği 0,571 ağırlık ile en önemli alt kriter olurken ardından 0,429 ile kullanım kolaylığı alt kriteri gelmiştir.

Devamında ise tüm ana kriter ve alt kriterlerin değerlendirilmesinin ardından her bir alternatifin belirlenen kriterler çerçevesinde performans skorları MACBETH semantik ölçeğine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 9’da her bir kriterin etki yönü belirlenerek fayda kriteri için +, zarar kriteri ise – işaretleri ile ifade edilmiş ve semantik ölçeklere karşılık gelen sayısal değerler ile sayısallaştırılmıştır.

Çizelge 9. Alternatiflerin sayısallaştırılmış MACBETH skorları ve etki yönleri

Etki yönü		A1	A2	A3
-	C11	1	3	2
-	C12	3	5	4
-	C13	1	4	3
-	C21	4	3	3
+	C22	5	1	2
+	C23	3	4	2
+	C31	6	3	4
+	C32	4	2	3
+	C33	3	1	2
+	C41	4	3	4
+	C42	4	1	3
+	C43	5	1	4
+	C51	4	2	3
+	C52	3	1	2

Alt ve üst sınırlar göz önünde bulundurularak denklem 3 kullanılarak tüm alternatiflerin skorları hesaplanmış ve Çizelge 10’ da gösterilmiştir.

Çizelge 10. Her bir alternatifin kriterler çerçevesinde MACBETH skorları

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52
A1	0	0	0	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100
A2	100	100	100	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
A3	50	50	66,7	0	25	0	33,3	50	50	100	66,7	75	50	50

Ana kriter ağırlıkları ile alt kriter ağırlıklarının çarpılması ile kriterlerin global ağırlıklarının hesaplanmış ve Çizelge 11’ de gösterilmiştir.

Çizelge 11. Alt kriterlere ait global ağırlık değerleri

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52
Ağırlıklar	0,133	0,027	0,107	0,067	0,083	0,05	0,148	0,111	0,074	0,025	0,008	0,033	0,076	0,057

Kriterlerin global ağırlıkları incelendiğinde en yüksek ağırlığa sahip performans kriteridir. Ürün fiyatı, fonksiyonellik ve bakım-güncelleme maliyeti ise diğer öne çıkan kriterler olmuştur. Özellikle tasarlanan simülatörlerde performans ve fonksiyonelliğin yüksek düzeyde olması kendisine yüklenmiş olan işlevi her açıdan tam anlamıyla yerine getirebilme kabiliyeti ve beklenen hedefe ulaşma gücünün etkinliği ile ilgilidir. Beklenen yüksek etkinliğin yanında simülator tercihlerinde fiyat performans düzeyinin de denge içerisinde olması oldukça önemlidir. Çoklu ekran kriteri ise en az etkiye sahip kriter olarak gözükmemektedir. Bu alt kriter simülator tercihlerinde önemli yere sahip olsa da diğer kriterlerle değerlendirildiğinde daha az etkili olduğu görülmüştür.

En son aşamada ise her bir alternatifin toplam skoru hesaplanmıştır. Alternatiflerin her bir kriter çerçevesinde aldığı MACBETH skorları kriterlerin hesaplanan ağırlıkları ile çarpılarak toplam skorlar elde edilmiş ve Çizelge 12’de gösterilmiştir.

Çizelge 12. Alternatiflerin toplam değerlendirme skorları

	C11	C12	C13	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C41	C42	C43	C51	C52	Toplam skor	Sıralama
A1	0	0	0	6,7	8,3	2,5	14,8	11,1	7,4	2,5	0,8	3,3	7,6	5,7	70,8	1
A2	13,3	2,7	10,7	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	31,7	3
A3	6,7	1,3	7,1	0	2,1	0	4,9	5,6	5,6	2,5	1,7	2,5	1,3	1,3	42,4	2

Yapılan MACBETH analizi sonucunda alternatiflerin skor sıralaması $A1 > A3 > A2$ şeklinde gerçekleşmiştir. A1 alternatifinin belirlenen kriterler çerçevesinde ilk sırada yer alması, özellikle çalışmada en yüksek ağırlığa sahip olan performans kriteri bakımından diğer alternatiflere kıyasla daha üstün bir teknik ve pedagojik altyapıya sahip olmasıyla açıklanabilir. Tam immersif yapı sayesinde senaryoların gerçek iş akışına uygun biçimde modellenmesi, kullanıcıya sistem içerisinde eş zamanlı hareket serbestliği tanınması ve bu hareketlerin analiz edilebilmesi, yüksek gerçeklik hissi ve üç boyutlu ortamın süreçleri daha anlaşılır kılması A1’in tercih edilme düzeyini artırmaktadır. Ayrıca canlandırma (animasyon-temelli) eğitim modülü ile kullanıcıların kendilerini senaryo içinde deneyimlemeleri, yalnızca bilişsel değil davranışsal öğrenme çıktılarının da desteklenmesine imkân vermektedir. Serbestlik modunda kullanıcıya riskli durumları keşfetme olanağı sunulurken, değerlendirme modunda belirlenen görevlerin yerine getirilmesi istenmekte ve sistem tarafından performans analizi yapılabilmektedir. Bu yapı, gerçek zamanlı geri bildirim mekanizması ile birleştiğinde öğrenme kalıcılığı, tehlike tanıma başarısı ve hata azaltma kapasitesi bakımından güçlü bir avantaj üretmektedir.

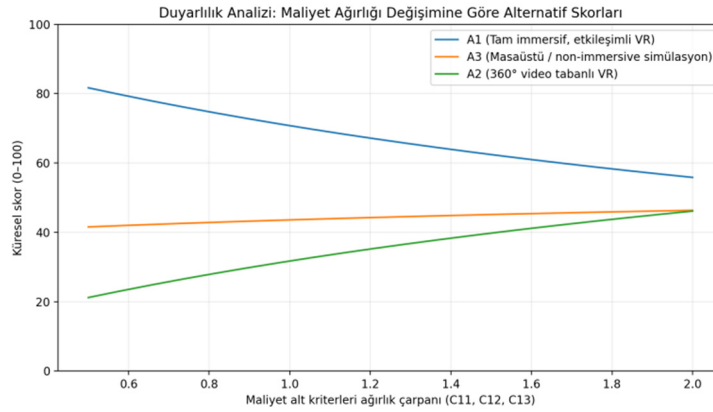
A3 alternatifinin ikinci sırada yer alması ise immersiyon düzeyi daha düşük olmakla birlikte yapılandırılmış senaryolar ve ölçme-değerlendirme modülleri sayesinde belirli bir performans standardını koruyabilmesinden kaynaklanmaktadır. Masaüstü ortamda çalışan bu sistem, teknik karmaşıklık ve maliyet açısından daha erişilebilir olmakla birlikte etkileşim derinliği ve davranışsal transfer kapasitesi bakımından A1’in gerisinde kalmaktadır. Buna karşılık A2 alternatifinin üçüncü sırada yer alması, 360° panoramik gerçek saha görüntüleri ile yüksek algısal gerçekçilik sunmasına rağmen etkileşim ve anlık geri bildirim mekanizmalarının sınırlı olmasıyla ilişkilidir. Navigasyon ve bakış yönlendirme temelli yarı-immersif yapı, kullanıcının aktif karar verme ve uygulama performansını ölçme kapasitesini kısıtlamakta; geri bildirimin çoğunlukla eğitim sonu değerlendirme şeklinde sunulması performans kriteri altında daha düşük puan almasına neden olmaktadır. Dolayısıyla elde edilen sıralama, immersiyon seviyesi tek başına belirleyici olmaktan ziyade; etkileşim yoğunluğu, görev temelli değerlendirme yapısı, geri bildirim mekanizması ve performans çıktıları ile bütünsel teknik tasarımın toplam etkisini yansıtmaktadır.

3.4. Duyarlılık Analizi

Çalışmada elde edilen sıralamanın ağırlık değişimlerine karşı ne ölçüde kararlı olduğunu incelemek amacıyla ek bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle “Maliyet” kriterinin ağırlığının artırılması durumunda sıralamanın değişip değişmeyeceğinin test edilmesi ekseninde kurgulanmıştır. Çünkü maliyet ve diğer özelliklerin ödünleşimi önem arz etmektedir. Modelde maliyet ana kriteri C11, C12 ve C13 alt kriterleri ile temsil edildiğinden, bu üç alt kriterin ağırlıkları birlikte oransal olarak artırılmış ve her

senaryoda toplam ağırlık 1 olacak şekilde yeniden normalize edilmiştir. Böylece maliyetin karar sürecindeki göreceli önemi sistematik olarak artırılmış, diğer kriterlerin göreceli etkisi ise eş zamanlı olarak azaltılmıştır.

Şekil 2’de görüldüğü üzere, elde edilen sonuçlar, maliyet ağırlıkları 0.5 kat ile 2 kat arasında değiştirildiğinde A1 alternatifinin tüm senaryolarda en yüksek küresel skora sahip olduğunu göstermektedir. Başlangıç ağırlıkları altında A1 açık ara birinci konumdayken, maliyet ağırlıklarının iki katına çıkarıldığı en uç senaryoda dahi A1’in küresel skoru azalsa da birinciliğini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, A1 alternatifinin teknik altyapı, performans, etkileşim ve pedagojik etkinlik gibi maliyet dışı kriterlerdeki güçlü performansının, maliyet kriterine verilen önemin artmasına rağmen genel üstünlüğünü sürdürmesini sağladığını göstermektedir.



Şekil 2. Maliyet kriteri ağırlığındaki değişimin alternatiflerin küresel skorlarına etkisi

Bununla birlikte, maliyet ağırlıklarının artışı A2 ve A3 alternatiflerinin küresel skorlarını yükseltmiştir. Bunun temel nedeni, bu alternatiflerin maliyet alt kriterlerinde A1’e kıyasla daha yüksek skorlar elde etmiş olmalarıdır. Özellikle A2’nin maliyet açısından avantajlı yapısı, maliyet kriterinin ağırlığı arttıkça küresel performansının belirgin biçimde yükselmesine neden olmuştur. Ancak bu artış, analiz edilen aralıkta sıralama değişimine yol açmamıştır. A3 ile A2 arasındaki farkın daraldığı gözlemlense de, A1’in birinci sıradaki konumu korunmuştur.

Bu bulgular, geliştirilen karar modelinin maliyet kriterindeki makul düzeydeki değişimlere karşı görece dayanıklı (robust) olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, maliyetin karar sürecindeki önemi artırıldığında dahi model, teknik ve pedagojik üstünlüğü yüksek olan tam immersif A1 alternatifini en uygun seçenek olarak belirlemeye devam etmektedir. Bu durum, A1’in yalnızca belirli bir ağırlık konfigürasyonu altında değil, geniş bir ağırlık aralığında da üstünlüğünü koruduğunu ortaya koymaktadır. Maliyet kriterine ek olarak modelin ağırlık değişimlerine karşı kararlılığını daha kapsamlı biçimde test etmek amacıyla performans (C31, C32, C33) ve kullanılabilirlik/kullanıcı deneyimi (C41, C42, C43) alt kriterleri için de ayrı duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki analizde ilgili alt kriterlerin ağırlıkları 0.5–2.0 çarpan aralığında oransal olarak değiştirilmiş ve her senaryoda toplam ağırlık 1 olacak şekilde yeniden normalize edilmiştir. Performans alt kriterlerinin ağırlığı artırıldığında A1 alternatifinin küresel skorunun belirgin biçimde yükseldiği, A2’nin skorunun azaldığı ve A3’ün sınırlı değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni A1’in performans alt kriterlerinde maksimum değerlere sahip olmasıdır. Benzer şekilde kullanılabilirlik alt kriterlerinin ağırlığı artırıldığında A3’ün küresel skorunda artış görülmüş, ancak bu artış A1’in birinciliğini değiştirecek düzeye ulaşmamıştır. Her iki senaryoda da alternatif sıralaması ($A1 > A3 > A2$) korunmuş, herhangi bir sıralama tersine dönüş oluşmamıştır. Bu bulgular, karar modelinin yalnızca maliyet kriterine değil, performans ve kullanılabilirlik gibi temel boyutlardaki ağırlık değişimlerine karşı da yüksek düzeyde kararlı olduğunu ve A1 alternatifinin geniş bir ağırlık dağılımı aralığında üstünlüğünü sürdürdüğünü göstermektedir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen duyarlılık analizi, çalışmada elde edilen $A1 > A3 > A2$ sıralamasının tesadüfi bir ağırlık dağılımına bağlı olmadığını, tüm kriter ağırlıklarındaki değişimlere karşı kararlı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu analiz, modelin güvenilirliğini artırmakta ve karar vericilere farklı öncelik senaryoları altında dahi sonuçların tutarlılığını değerlendirme imkânı sunmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Elde edilen bulgular, sanal gerçeklik tabanlı İSG eğitimlerinde teknik performans, immersif etki ve işlevsellik boyutlarının karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, VR'nin risk algısı, öğrenme çıktıları ve eğitim etkinliği üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koyan güncel çalışmalarla paralellik göstermektedir [13,17,19]. Özellikle immersif sistemlerin geleneksel sunum veya masaüstü tabanlı çözümlere kıyasla daha yüksek öğrenme kazanımı ve risk farkındalığı oluşturduğunu belirten deneysel ve meta-analitik çalışmalar, bu çalışmada performans kriterinin yüksek ağırlık almasını desteklemektedir [13,17].

Benzer şekilde, telepresence ve gerçeklik hissinin eğitim etkinliği üzerindeki rolünü vurgulayan araştırmalar [34], VR'nin yalnızca bir görselleştirme aracı değil, davranışsal çıktıları etkileyen bir eğitim platformu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda immersif ve etkileşim düzeyi yüksek alternatifin üst sırada yer alması, literatürde VR'nin güvenlik eğitimi bağlamında sunduğu deneysel öğrenme avantajları ile uyumludur [14,19]. Ayrıca VR'nin kullanıcı deneyimi ve eğitim memnuniyeti üzerindeki etkileri de etkinliğin yalnızca teknik değil pedagojik bir boyut taşıdığını göstermektedir [35,36].

Öte yandan, maliyet kriterinin yüksek ağırlığa sahip olmasına rağmen sıralamayı belirleyici düzeyde değiştirmemesi, literatürde de vurgulanan “etkinlik odaklı teknoloji seçimi” yaklaşımı ile örtüşmektedir. Özellikle İSG bağlamında teknolojik yatırımların uzun vadeli güvenlik performansı ile ilişkilendirildiği çalışmalar [38], dijitalleşmenin yalnızca ekonomik değil aynı zamanda koruyucu ve önleyici bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, VR tabanlı çözümlerin maliyet dezavantajına rağmen tercih edilebilirliğini göstermektedir.

Pandemi sonrası dijital dönüşüm sürecinde İSG uygulamalarında teknolojik entegrasyonun hızlandığını ortaya koyan çalışmalar [39,40], VR gibi ileri dijital araçların İSG sistemlerine entegrasyonunun stratejik önemini vurgulamaktadır. Endüstri 4.0 ve dijitalleşmenin İSG boyutuna odaklanan araştırmalar da [5,38], yeni nesil teknolojilerin güvenlik performansını artırma potansiyeline dikkat çekmektedir. Bu çalışmada performans ve işlevsellik kriterlerinin ön plana çıkması, söz konusu literatürel eğilim ile tutarlıdır. Elde edilen sıralama VR'nin immersif yapısı, risk algısını güçlendirmesi, senaryo tabanlı etkileşim sunması ve öğrenme kalıcılığını desteklemesi gibi literatürde kanıtlanmış avantajları ile teorik olarak da temellendirilebilmektedir [13,17,35,37]. Bu yönüyle çalışma, mevcut literatürde ortaya konan VR etkinliği bulgularını ÇKKV çerçevesinde doğrulayan ve yönetsel karar sürecine sistematik bir yapı kazandıran bir katkı sunmaktadır.

Benzer şekilde literatürde VR tabanlı güvenlik eğitimlerinin çok kriterli karar verme yaklaşımları ile değerlendirildiği çalışmalar da mevcuttur. Örneğin depo ortamlarında VR güvenlik eğitimi ve denetim sistemlerinin değerlendirilmesinde AHP yönteminin kullanıldığı bir çalışmada, immersif etkileşim, senaryo gerçekçiliği ve kullanıcı deneyimi gibi faktörlerin en yüksek önceliğe sahip olduğu ortaya konmuştur [35]. Söz konusu çalışma, VR temelli güvenlik eğitimlerinde teknik performans ve gerçeklik hissinin karar sürecinde belirleyici olduğunu göstermekte; bu yönüyle mevcut çalışmada performans ve işlevsellik kriterlerinin ön plana çıkması ile örtüşmektedir. Yöntemsel açıdan AHP ve MACBETH farklı matematiksel temellere dayanmakla birlikte, her iki yaklaşımda da uzman yargılarının yapılandırılmış biçimde nicel önceliklere dönüştürülmesi söz konusudur. Bu durum, çalışmamızda elde edilen sıralamanın yalnızca seçilen yönteme özgü bir sonuç olmadığını; aksine VR'nin immersif ve performans odaklı özelliklerinin farklı çok kriterli karar verme tekniklerinde de benzer biçimde ön plana çıktığını göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen bulgular, literatürde AHP gibi alternatif ÇKKV yaklaşımları ile ulaşılan sonuçlarla metodolojik düzeyde tutarlılık sergilemekte ve VR tabanlı İSG eğitimlerinin seçiminde etkinlik ve gerçekçilik boyutlarının belirleyici rolünü güçlendirmektedir.

5. SONUÇ

Sanayileşme ve gelişen teknolojiyle birlikte iş kazaları ve meslek hastalıklarının azaltılması gerekliliği daha kritik hale gelmiş; özellikle COVID-19 süreci işletmelerin İSG sistemlerini yeniden yapılandırmalarını zorunlu kılmıştır. Dijitalleşmenin hız kazandığı bu dönemde VR tabanlı simülasyonlar, tehlikesiz bir ortamda gerçekçi deneyim sunmaları nedeniyle İSG uygulamalarında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada VR tabanlı İSG simülasyonları, literatür ve uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen 5 ana ve 14 alt kriter çerçevesinde MACBETH yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre performans (0,148), ürün fiyatı (0,133) ve fonksiyonellik (0,111) en yüksek ağırlığa sahip kriterler olarak belirlenmiştir. Çoklu ekran (0,008) ve 3D (0,025) kriterleri ise görece daha düşük etki düzeyine sahip bulunmuştur. Alternatifler arasında A1 (70,833) birinci, A3 (42,41) ikinci ve A2 (31,667) üçüncü sırada yer almıştır. Ancak bu sıralama yalnızca sayısal üstünlüğü değil, kriter-temelli yapısal farklılıkları da yansıtmaktadır.

A1 alternatifinin birinci sırada yer almasının temel nedeni, özellikle performans, fonksiyonellik ve gerçeklik hissi ile ilişkili kriterlerde yüksek puanlar elde etmesidir. Tam immersif yapısı, senaryo tabanlı etkileşim imkânı, anlık geri bildirim mekanizması ve kullanıcıya hareket serbestliği tanınması, eğitim etkinliği ve öğrenme kalıcılığı açısından belirleyici olmuştur. Her ne kadar maliyet kriterinde A1 görece dezavantajlı bir konumda bulunsun da performans ve fonksiyonellik boyutlarındaki üstünlüğü maliyet dezavantajını telafi etmiş ve toplam küresel skoru en yüksek olmasını sağlamıştır. Bu durum, karar modelinde teknik ve pedagojik etkinliğin maliyet faktörüne kıyasla daha baskın bir rol oynadığını göstermektedir.

A3 alternatifi ise maliyet açısından daha dengeli bir yapı sunmasına rağmen immersif deneyim ve performans kriterlerinde A1 seviyesine ulaşamamış; bu nedenle ikinci sırada yer almıştır. A2 alternatifi ise özellikle performans ve etkileşim düzeyi bakımından düşük puanlar aldığı için maliyet avantajına rağmen son sırada konumlanmıştır. Dolayısıyla sonuçlar, VR tabanlı İSG eğitimlerinde yalnızca ekonomik boyutun değil, eğitim etkinliği ve gerçeklik düzeyinin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Araştırmada alternatif olarak ülkemiz sınırları içerisinde geliştirilen simülasyonların tercih edilmesi ve ilgili firmaların araştırmaya katılım konusundaki sınırlı geri dönüşleri alternatif evrenini daraltmıştır. Ayrıca VR tabanlı sistemlerin ülkemizde nispeten yeni bir teknoloji olması nedeniyle karar vericiler değerlendirmeleri grup halinde gerçekleştirmiştir. Gelecek çalışmalarda alternatif sayısının artırılması, farklı sektörlerden uygulama örneklerinin dahil edilmesi ve bireysel karar verici değerlendirmelerinin karşılaştırılması modelin genellenebilirliğini artıracaktır.

Sonuç olarak çalışma, VR tabanlı İSG simülasyonlarının çok kriterli karar verme yaklaşımıyla sistematik biçimde değerlendirilmesine katkı sunmakta ve özellikle yüksek gerçeklik hissi, etkileşim düzeyi ve performans çıktıları sağlayan sistemlerin maliyet dezavantajına rağmen daha uygun tercih olarak öne çıkabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, VR tabanlı İSG yatırımı planlayan işletmeler için karar sürecinde yol gösterici niteliktedir. Bu doğrultuda, kullanılan MACBETH tabanlı yaklaşımın gelecekte yalnızca İSG eğitimleriyle sınırlı kalmayıp, uzaktan eğitim sistemlerinde VR tabanlı öğrenme araçlarının değerlendirilmesine yönelik olarak genişletilmesi mümkündür [41]. Özellikle etkileşim düzeyi, kullanıcı deneyimi, erişilebilirlik ve teknik altyapı gibi kriterler dikkate alınarak farklı eğitim senaryoları için uygun VR çözümlerinin belirlenmesi, modelin genellenebilirliğini ve uygulama alanını artıracaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Kır, S. (2022). A real-time location system design for production facilities working under COVID-19 pandemic precautions. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 6(1), 34-42.
2. Ng, W.T. (2021). COVID-19: Protection of workers at the workplace in singapore. *Safety and Health at Work*, 12(1), 133-135.
3. Erik, A. ve Kuvvetli, Y. (2021). Üretim işletmelerinin Endüstri 4.0 entegrasyonunun veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 637-647.
4. Ozturk, C. & Gulec, N. (2025). Leveraging IoT, big data, and AI for sustainable supply chains: A strategic analysis with ISM, MICMAC, and GREY-DEMATEL. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems*, 550-557. Cham: Springer Nature Switzerland.
5. Leso, V., Fontana, L. & Iavicoli, I. (2018). The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *La Medicina Del Lavoro*, 109(5), 327.
6. Yamamoto, G.T., Özgeldi, M. & Altun, D. (2018). Instructional developments and progress for open and equal access for learning. *Open and Equal Access for Learning in School Management*, 117, 143.
7. Creem-Regehr, S.H., Stefanucci, J.K. & Bodenheimer, B. (2023). Perceiving distance in virtual reality: theoretical insights from contemporary technologies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378(1869), 20210456.

8. Gandhi, R.D. & Patel, D.S. (2018). Virtual reality—opportunities and challenges. *Virtual Reality*, 5(01), 2714-2724.
9. Lele, A. (2013). Virtual reality and its military utility. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 4(1), 17-26.
10. Ji, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Gao, Y., Cao, Y. & Yang, S.-H. (2023). Integrating diminished quality of life with virtual reality for occupational health and safety training. *Safety Science*, 158, 105999.
11. Ball, C., Huang, K.-T. & Francis, J. (2021). Virtual reality adoption during the COVID-19 pandemic: A uses and gratifications perspective. *Telematics and Informatics*, 65, 101728.
12. Suri, P. A., Syahputra, M.E., Amany, A.S.H. & Djafar, A. (2023). Systematic literature review: The use of virtual reality as a learning media. *Procedia Computer Science*, 216, 245-251.
13. Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T.W. & Lovreglio, R. (2024). Virtual reality for safety training: A systematic literature review and meta-analysis. *Safety Science*, 171, 106372.
14. Feng, Z., Lovreglio, R., Yiu, T.W., Acosta, D.M., Sun, B. & Li, N. (2024). Immersive virtual reality training for excavation safety and hazard identification. *Smart and Sustainable Built Environment*, 13(4), 883-907.
15. Nykänen, M., Puro, V., Tiikkaja, M., Kannisto, H., Lantto, E., Simpura, F., ... & Teperi, A.M. (2020). Implementing and evaluating novel safety training methods for construction sector workers: Results of a randomized controlled trial. *Journal of Safety Research*, 75, 205-221.
16. Rey-Becerra, E., Barrero, L. H., Ellegast, R. & Kluge, A. (2026). VR-or lecture-based training? The role of culture in safety training outcomes. *Applied Ergonomics*, 130, 104626.
17. Leder, J., Horlitz, T., Puschmann, P., Wittstock, V. & Schütz, A. (2019). Comparing immersive virtual reality and powerpoint as methods for delivering safety training: Impacts on risk perception, learning, and decision making. *Safety Science*, 111, 271-286.
18. Eiris, R., Gheisari, M. & Esmaeili, B. (2020). Desktop-based safety training using 360-degree panorama and static virtual reality techniques: A comparative experimental study. *Automation in Construction*, 109, 102969.
19. Stefan, H., Mortimer, M. & Horan, B. (2023). Evaluating the effectiveness of virtual reality for safety-relevant training: a systematic review. *Virtual Reality*, 27(4), 2839-2869.
20. Jackson, D.I., Wongphothiphan, T., Luna, J., Maa, T., Fristad, M.A., Huang, Y., ... & Sezgin, E. (2025). Virtual reality for workplace violence training of health care workers: Pilot mixed methods usability study. *JMIR Serious Games*, 13, e70817.
21. National Safety Council. (2021). *Virtual reality and augmented reality for hazardous work training* (Work To Zero 2020). <https://www.nsc.org/worktozero>, Erişim tarihi: 04.02.2026.
22. Wang, J., Howard, I.L., Ma, J. & Gugssa, M. (2024). *Mississippi DOT virtual reality safety training study (FHWA/MDOT-RD-25-327)*. Mississippi Department of Transportation.
23. e Costa, C.A.B. & Vansnick, J.-C. (1994). MACBETH-An interactive path towards the construction of cardinal value functions. *International Transactions in Operational Research*, 1(4), 489-500.
24. Genç, T., Kabak, M., Köse, E. ve Yılmaz, Z. (2015). Bireysel emeklilik sistemi seçimi problemine ilişkin MACBETH yaklaşımı. *Istanbul University Econometrics and Statistics E-Journal*, 22, 47-65.
25. Kundakcı, N. (2019). An integrated method using MACBETH and EDAS methods for evaluating steam boiler alternatives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 26(1-2), 27-34.
26. Akay, M. ve Kundakcı, N. (2021). ÇKKV ve tamsayı programlama yöntemleri ile bir üretim işletmesinde uzaktan çalışma modelinin oluşturulması. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 24(2), 548-568.
27. Gören, H. G. & Şenocak, A.A. (2018). Macbeth based Taguchi loss functions approach for green supplier selection: a case study in textile industry. *Textile and Apparel*, 28(2), 90-97.
28. Ercan, E. ve Kundakcı, N. (2022). MACBETH tabanlı bulanık MARCOS yöntemi ile bir tekstil işletmesi için ürün grubu seçimi. *Pamukkale Üniversitesi İşletme Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 381-396.
29. Pamucar, D., Torkayesh, A.E. & Biswas, S. (2023). Supplier selection in healthcare supply chain management during the COVID-19 pandemic: a novel fuzzy rough decision-making approach. *Annals of Operations Research*, 328(1), 977-1019.
30. Moraes, C.C.D.F., Pinheiro, P.R., Rolim, I.G., Costa, J.L.D.S., Junior, M.D.S.E. & Andrade, S.J.M.D. (2021). Using the multi-criteria model for optimization of operational routes of thermal power plants. *Energies*, 14(12), 3682.
31. Cevizci, D.K. ve Kayacan, O. (2019). Bir konfeksiyon işletmesinde MACBETH ve TOPSIS yöntemleri ile tedarikçi seçimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(62), 331-344.

32. Ercan, E. ve Kundakçı, N. (2017). Bir tekstil işletmesi için desen programı seçiminde ARAS ve OCRA yöntemlerinin karşılaştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(1), 83-105.
33. Ayçin, E. (2019). Kurumsal kaynak planlama (KKP) sistemlerinin seçiminde MACBETH ve MABAC yöntemlerinin bütünleşik olarak kullanılması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(2), 533-552
34. Öztürk, C. ve Öztürk, H. (2025). Küresel salgın (COVID-19) sürecinde kargo çalışanlarının İSG açısından maruz kaldığı risklerin Macbeth yöntemi ile değerlendirilmesi. *Journal of Turkish Operations Management*, 9(2), 361-381.
35. Yoo, J.W., Park, J.S. & Park, H.J. (2023). Understanding VR-based construction safety training effectiveness: The role of telepresence, risk perception, and training satisfaction. *Applied Sciences*, 13(2), 1135.
36. Tusher, H.M., Mallam, S. & Nazir, S. (2024). A systematic review of virtual reality features for skill training. *Technology, Knowledge and Learning*, 29(2), 843-878.
37. Pribadi, A.P., Rahman, Y.M.R. & Silalahi, C.D.A.B. (2024). Analysis of the effectiveness and user experience of employing virtual reality to enhance the efficacy of occupational safety and health learning for electrical workers and graduate students. *Heliyon*, 10(15), e34918.
38. Arana-Landín, G., Laskurain-Iturbe, I., Iturrate, M. & Landeta-Manzano, B. (2023). Assessing the influence of Industry 4.0 technologies on occupational health and safety. *Heliyon*, 9(3), e13720
39. Amankwah-Amoah, J., Khan, Z., Wood, G. & Knight, G. (2021). COVID-19 and digitalization: The great acceleration. *Journal of Business Research*, 136, 602-611.
40. Karaboğa, T. ve Karaboğa, H.A. (2021). Covid-19 pandemisinin işletmelerin dijital dönüşümüne etkisinin bibliyometrik bir incelemesi. *Ekonomi İşletme ve Maliye Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 100-114.
41. Güleriyüz, S.S., Özen, N.S. ve Ege, F. (2022). Uzaktan eğitim araçlarının değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1039-1046.



Experimental Investigation of the Effects of Diesel–10 Number Oil Blends on Engine Performance and Emission Characteristics

Gözde EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN^{1,a}, Gökhan TÜCCAR^{1,b}

¹Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Adana, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-0392-1369; ^bORCID: 0000-0003-3041-299X

Article Info

Received : 18.12.2025

Accepted : 06.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1843973

Corresponding Author

Gözde EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN

gekmekci@atu.edu.tr

Keywords

Diesel engine

10 number oil

Engine performance

Emission

Alternative fuels

How to cite: EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN, G., TÜCCAR, G., (2026). *Experimental Investigation of the Effects of Diesel–10 Number Oil Blends on Engine Performance and Emission Characteristics*. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 389-398.

ABSTRACT

The increasing use of unauthorized fuels such as “10 number oil” raises serious concerns regarding engine performance, environmental safety, and public health. This study experimentally investigates the effects of diesel–10 number oil blends on the performance and emission characteristics of Mitsubishi Canter 4D31 diesel engine. Four blend ratios (D100, D50, D20, D10) were tested over a speed range of 1200–2700 rpm. Results show that increasing the proportion of 10 number oil reduces torque and power due to poor atomization and incomplete combustion, while specific fuel consumption increases, indicating lower efficiency. Emissions analysis revealed higher CO and NO_x levels, whereas CO₂ decreased due to incomplete oxidation. At 2200 rpm, the D10 blend caused 3.64% decrease in torque and 2.30% increase in SFC, along with increases of 10.87% in CO and 20.55% in NO_x. Overall, the findings highlight the negative impacts of 10 number oil on engine performance and emissions.

Dizel–10 Numara Yağ Karışımlarının Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş : 18.12.2025

Kabul : 06.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1843973

Sorumlu Yazar

Gözde EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN

gekmekci@atu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Dizel motor

10 numara yağ

Motor performansı

Emisyon

Alternatif yakıtlar

Atıf şekli: EKMEKÇİ GÜÇLÜTEN, G., TÜCCAR, G., (2026). *Dizel–10 Numara Yağ Karışımlarının Motor Performansı ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi*. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 389-398.

ÖZ

Yetkisiz yakıtların, özellikle “10 numara yağ”ın artan kullanımı; motor performansı, çevresel güvenlik ve halk sağlığı açısından ciddi endişeler doğurmaktadır. Bu çalışmada, dizel–10 numara yağ karışımlarının Mitsubishi Canter 4D31 dizel motorunun performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri deneyisel olarak incelenmiştir. Dört farklı karışım oranı (D100, D50, D20, D10), 1200–2700 dev/dk aralığında test edilmiştir. Sonuçlar, 10 numara yağ oranının artmasının, kötü atomizasyon ve eksik yanma nedeniyle tork ve gücü azalttığını; özgül yakıt tüketimini ise artırarak verimliliği düşürdüğünü göstermektedir. Emisyon analizleri, CO ve NO_x seviyelerinde artış, CO₂ emisyonlarında ise eksik oksidasyon nedeniyle azalma olduğunu ortaya koymuştur. 2200 dev/dk’da D10 karışımı, D100’e kıyasla torkta %3,64 azalma ve özgül yakıt tüketiminde %2,30 artışa neden olmuş; aynı koşullarda CO emisyonları %10,87 ve NO_x emisyonları %20,55 oranında artmıştır. Genel olarak, bulgular 10 numara yağ kullanımının motor performansı ve emisyonlar üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir.

1. INTRODUCTION

The oil sector covers products with a wide range of uses. Especially the mineral-based oil sector has become popular in the global market with industrialization. The oil sector in industry and automotive is a dynamic field in constant search of development and innovation. It plays an important role in increasing the efficiency of engines and machines, reducing environmental impact and achieving sustainability goals. With the increasing use of diesel engines, which have an important place in the transportation sector, the exhaust emissions they cause greatly increase environmental pollution. For this reason, many researchers have started to search for alternative fuels that can be used in diesel engines [1].

Analyzing the oils used in machines is an important preventive maintenance practice for predetermining malfunctions, reducing repair and operating costs and efficient operation [2]. However, Oils that are not used for their intended purpose and known as illegal fuel oil in the market seriously threaten human and environmental health. These illegal fuels are called “Number 10 oil” in Turkey and may contain base oil and waste oil mixtures in their composition [3]. Recent studies have revealed that the use of such unauthorized fuels in diesel engines results in reduced engine efficiency, lower torque, and significantly increased levels of toxic components such as CO, NO_x, and heavy metals in exhaust gases [4-6]. In addition, previous studies have reported that variations in fuel composition and physicochemical properties can significantly affect diesel engine performance and exhaust emission characteristics [7]. In particular, a study by Aliyu et al. [5] reported that dangerous levels of heavy metals such as lead, cadmium, and arsenic were detected in the exhaust gases of illegal fuels such as No. 10 oil. Furthermore, the literature emphasizes that such fuels pose serious safety problems, such as low flash points, uneven combustion, and fire risk [6]. Waste motor oil, burnt oil, unprocessed crude oil, smuggled diesel oil, vegetable oil, solvent, transformer oil and treated waste oils are commercialized by adding them into base oil [8].

Especially number 10 oils, which are substituted for the diesel market, have very high fluidity and lower actual consumption. Number 10 oil is known to be produced from base oils such as SN100, SN150, SN500 in the literature [9]. These fake fuels are mostly preferred by heavy vehicle drivers. For this reason, It is sold in industrial zones, truck and bus garages and even in markets along the road, and it is quite easy to access the product in the market. In fact, number 10 oil, which caused widespread public outcry with its use in 2008–2012, is back on the agenda due to economic reasons, the increase in crude oil prices and tax increases [10].

The use of number 10 oils not only causes serious tax losses for the country, but also leads to unfair competition between companies and traders. The high difference between the tax burden on diesel fuel and the tax burden on the goods used in the production of Number 10 oil causes this phenomenon. Since the years when this problem was recognized by the tax administration, many legal arrangements have been made in the relevant legislation, but malicious taxpayers have always tried to continue the production and use of number 10 oil by developing new methods against them [11].

It also causes serious harm to human, public and environmental health due to the toxic and poisonous substances in its composition. On June 8, 2011, a bus crashed in Görele, Giresun and suddenly caught fire and burned down in a very short time, resulting in many deaths and injuries. The cause of this sudden fire was proven by an expert report to be a base oil-solvent mixed fuel oil product [12]. Exhaust pollutants are likely to include heavy metal pollutants such as arsenic, lead, cadmium and chromium, which are hazardous and harmful to human health.

Uyaroğlu et al. [13] examined two different engines that were known to have used number 10 oil and failed. In the study, it was stated that number 10 oil has a high ignition temperature (116-194 °C). For this reason, it was interpreted that the knocking increased with the extension of the ignition time and accordingly caused piston wear. In addition, it was also stated that the material strength was adversely affected due to the increase in pressure due to the delay in the ignition time but the fuel injection continued in the combustion chamber.

Eryılmaz et al. [14] investigated the performance of diesel fuel, waste vegetable oil and number 10 oil samples and the emissions that may occur as a result of their use. In their experiments, it was determined that the viscosities of waste vegetable oil and number ten oil were higher than diesel fuel. In terms of

emissions, it was found that CO and SO₂ emissions were higher when number ten oil and diesel were used compared to vegetable waste oil.

Gedik and Yurdakul [15] investigated the chemical content of number ten oil. It was reported that the distribution of 19 metals (Ag, As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, V, Zn) in the samples collected from across Turkey ranged between 0.04-189 µg/g. It was concluded that the estimated metal emission values using measurement data and annual average base oil sales figures in Turkey are comparable or higher than the total metal emissions from diesel vehicles or industrial sources in different countries.

In this article, tests were carried out with a mixture of commercially available number ten oil and diesel at certain percentages and torque, sfc, CO₂, CO and NO_x values were investigated. Depending on these properties, power calculation was also made and a comparison between diesel and number ten oil was made.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Evaluation of Diesel Fuel

Diesel has become more widely used in recent years due to its higher efficiency, higher torque and lower CO and HC emissions compared to gasoline engines [16]. Diesel fuel, which is widely used especially in light commercial vehicles, provides fuel economy for users [17]. Diesel vehicles are highly preferred in transportation and transportation sectors due to their low fuel consumption and high torque [18]. The sales data for diesel fuels, which are frequently used especially in transportation, from Petder (the Turkish fuel distributor) for December 2023 also confirms this [19].

Considering the increasing use of diesel oil in our country, a comparison of diesel and number ten oil was made in this study. Some important fuel properties of the diesel fuel used in this study are taken from studies in the literature [20].

Table 1. Some important fuel properties of diesel fuel

Description	Unit	Diesel fuel
Density @ 15°C	kg/m ³	835.7±0.2
Kinematic viscosity @40 °C	mm ² /s	3.033±0.012
Upper calorific value	MJ/kg	45.360±0.12
Lower calorific value	MJ/kg	42.5383
Flash point	°C	68±1.5
Cetane number	-	Min.51

The properties of the diesel fuel provided in the table indicate that it is suitable for use as a reference fuel in experimental studies. Having physical and chemical characteristics within standard ranges enhances the reliability of comparative analyses with other fuel blends.

2.2. Number 10 Oil Analysis

According to the October 2012 report of PETDER, technical values of some samples taken from the tanks of vehicles using number 10 oil and from the cans sold as number 10 oil were analyzed. The number of samples analyzed in this study is 10, and the table below presents the average values.

Table 2. Number 10 Oil analysis results [21]

Tests	Truck using number 10 oil	Number 10 oil can	Ts En 590 specifications
Flash point, °C	24-82	42	Max. 55
Density @15 °C, kg/l	0.8447-0.8884	0.8611	0.820-0.845
Sulfur, ppm	2060-4000	4100	Max. 10
Viscosity, mm ² /sn	4.32-9.41	30.9	2-4.5
Initial boiling point, °C	25-27	28	
%volume @250 °C	12-13	100	Max. %65
%volume @350 °C	40-41	100	Min. %85
Temperature at which 95% of the fuel is distilled (°C)	45-46	100	Max. 360 °C

When the table is examined, it is seen that the “flash point” values in the number 10 oil samples are lower than the standards and the “density” values are higher than the standards. The low flash point in the samples taken is an important indicator of the addition of substances such as solvents. A flash point below 55 °C will cause irregular and uncontrolled combustion in the engine. This may cause the vehicle to burn. The sulfur values indicate that, it is seen that they are much higher than standard fuels. The fact that the sulfur value is so high strengthens the possibility that the samples contain waste oils as well as mineral oils. When the “evaporation temperature” values are examined, it is seen that they are higher than standard fuels. It is seen that some of the samples examined completely evaporated before reaching 250 °C, while some of the other samples almost did not evaporate at all.

It is seen that especially the density and viscosity values are higher than diesel oil in the number 10 oil samples examined. Since the fuel is sprayed volumetrically from the injectors, the high density means that there is more fuel than there should be, especially in the combustion chamber where combustion will take place, and the fuel is not properly distributed in the combustion chamber. Mixing number 10 oils with fuel will also increase the viscosity of diesel fuel, causing the fuel sprayed into the combustion chamber to be sprayed poorly, resulting in inefficient combustion and smoke, soot and heavy odor from the exhaust.

In this study, Mitsubishi Canter 4D31 diesel engine was used to analyze the performance and emission parameters using variable RPM values. The nominal rpm value was selected as 1200 rpm and gradually increased up to 2700 rpm.

Table 3. Technical specifications of the test engine

Specifications	Description
Brand	Mitsubishi Canter
Model	4D31
Configuration	In-line 4
Type	Direct injection diesel with glow plug
Displacement	3298cc
Bore	100
Stroke	105
Power	91 HP @3500 rpm
Torque	223 Nm @2200 rpm
Oil cooler	Water-cooled

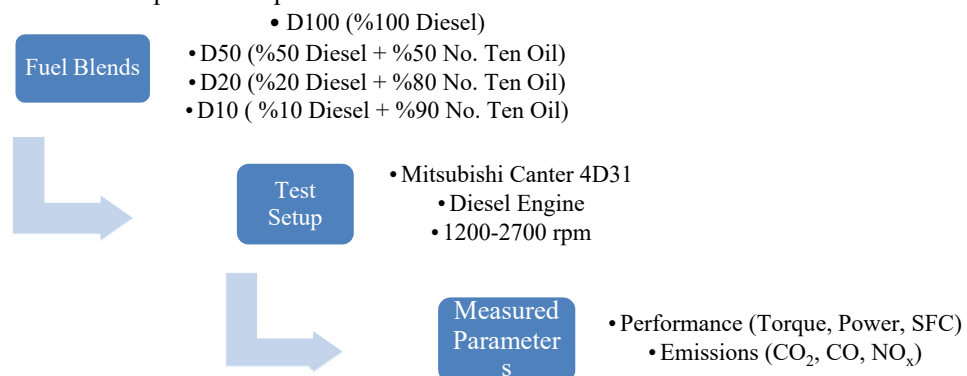
In this study, torque, sfc, CO₂, CO and NO_x values were investigated by mixing number ten oil and diesel fuel at certain percentages. Depending on these properties, power calculation was also performed and the effect of diesel and number ten oil on engine and emission was compared.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Engine Performance Parameters

Emission assessment limits were applied in the same way when evaluating engine performance parameters.

Table 4. Overview of the experimental procedure



A gradual increase was observed between 1200 and 2700 rpm for all blend ratios. Torque and specific fuel consumption results were obtained experimentally and power calculation was calculated theoretically according to these results.

3.1.1. Torque

Engine torque data were obtained for D100–D50–D20–D10 ratio mixtures between 1200 and 2700 rpm. It is observed that the torque increases as the speed increases. When the torque is evaluated in terms of fuel, the torque values decrease as the number ten oil additive increases.

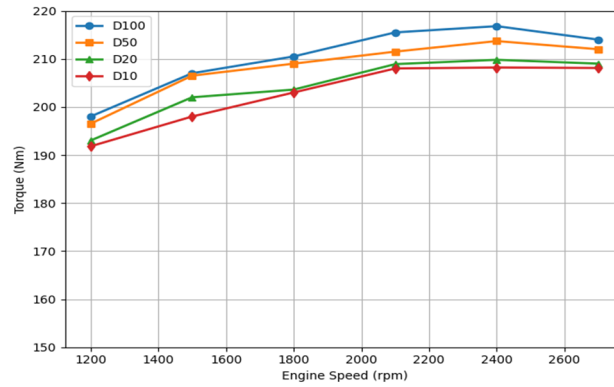


Figure 1. Engine torque according to number ten oil additive amount

As shown in Figure 1, number ten oil additive negatively affects engine performance. It has been shown in the experimental study that as the additive rate increases, the torque value decreases, that is, the traction power of the vehicle decreases. The decrease in torque with increasing number ten oil additive can be explained by the modification of the fuel's physical and combustion characteristics. As the additive ratio increases, the viscosity of the fuel blend becomes higher, which adversely affects spray formation, droplet atomization, and the homogeneity of the air–fuel mixture. Previous studies have shown that improved fuel atomization, achieved through higher injection pressures, significantly enhances engine torque and power output by promoting more efficient combustion [22]. Impaired atomization results in a slower and less efficient combustion process, leading to reduced in-cylinder pressure development. Since engine torque is directly related to the indicated mean effective pressure, any deterioration in combustion efficiency leads to a measurable decline in torque. Therefore, the observed reduction in torque at higher additive concentrations is primarily attributed to the decrease in combustion quality caused by the altered fuel properties.

3.1.2. Power

It is observed that the engine power increases as the speed increases with the same fuel mixture ratio. However, the engine power decreases as the number ten oil additive increases.

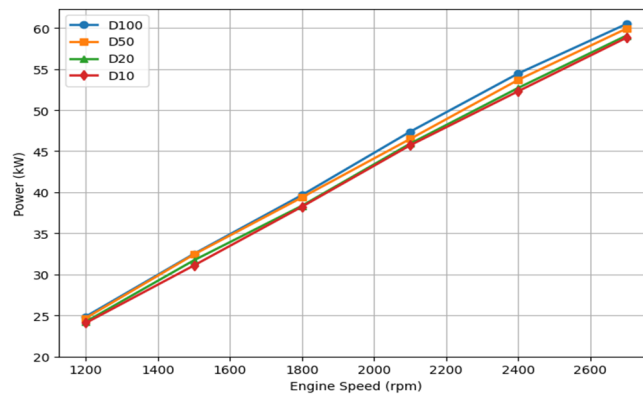


Figure 2. Power values according to number ten oil additive amount

The increase in engine power with rising engine speed at a constant fuel mixture ratio is an expected behavior, as higher speeds generally enhance the rate of combustion events per unit time. However, the observed decrease in engine power with increasing number ten oil additive is primarily related to the deterioration of fuel atomization and combustion efficiency. As the proportion of the additive increases, the viscosity of the fuel blend rises, leading to poorer spray breakup, reduced evaporation rate, and a less homogeneous air-fuel mixture. These effects result in slower and incomplete combustion, which lowers the in-cylinder pressure and consequently limits the engine's ability to produce power. Therefore, the reduction in engine power at higher additive concentrations can be attributed to the negative impact of the altered fuel properties on combustion quality.

3.1.3. Specific Fuel Consumption

Engine specific fuel consumption data of D100-D50-D20-D10 ratio mixtures between 1200-2700 rpm. It is observed that the specific fuel consumption decreases with increasing speed up to 2400 rpm, but above 2400 rpm, the specific fuel consumption starts to increase again. When evaluated in terms of fuel mixture, as the additive ratio of number ten oil in the mixture increases, the specific fuel consumption increases.

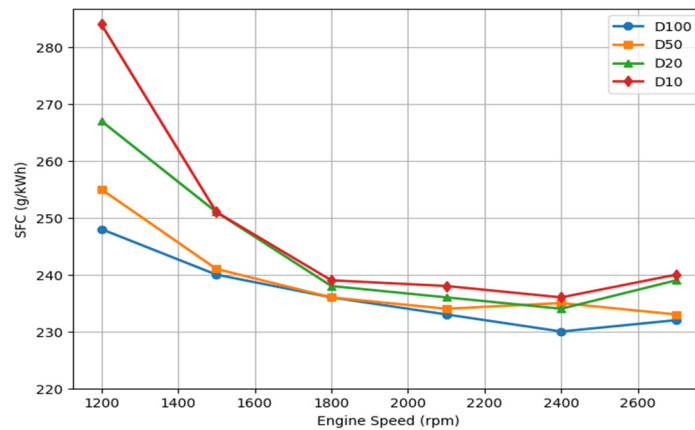


Figure 3. Specific fuel consumption according to number ten oil additive amount

Figure 3 shows that, it is evident that the number ten oil additive has an adverse effect on specific fuel consumption (SFC). The experimental results clearly show that as the additive ratio increases, SFC rises, indicating that the engine consumes more fuel to produce the same amount of power. This trend is primarily due to the reduction in combustion efficiency caused by the additive.

As the proportion of number ten oil increases, the viscosity of the fuel blend becomes higher, which impairs spray atomization, reduces evaporation, and leads to a less homogeneous air-fuel mixture. Consequently, the combustion process becomes slower and less complete, resulting in lower in-cylinder pressure. To compensate for this loss in effective pressure and maintain power output, the engine requires a higher amount of fuel, which is reflected as an increase in SFC.

This finding is also consistent with previous studies in the literature, which report that higher-viscosity fuel additives generally deteriorate combustion characteristics and consequently increase fuel consumption. In summary, the rise in SFC with increasing additive ratio is a direct outcome of diminished combustion quality and reduced fuel-energy utilization efficiency.

3.2. Engine Emission Parameters

While evaluating engine emission parameters, there is a gradual increase between 1200-2700 rpm. Diesel-number ten oil mixture ratios were determined as (100%-0%), (50%-50%), (20%-80%), (10%-90%) respectively. The "D" ratio shown in the graph and table indicates the percentage of diesel fuel in the mixture.

3.2.1. Carbon Dioxide (%)

CO₂ (%) emission results of D100-D50-D20-D10 ratio mixtures between 1200 and 2700 rpm. It is observed that the amount of CO₂ decreases as the number ten oil additive increases at the same speed, while the amount of CO₂ increases as the speed increases at the same number ten oil additive.

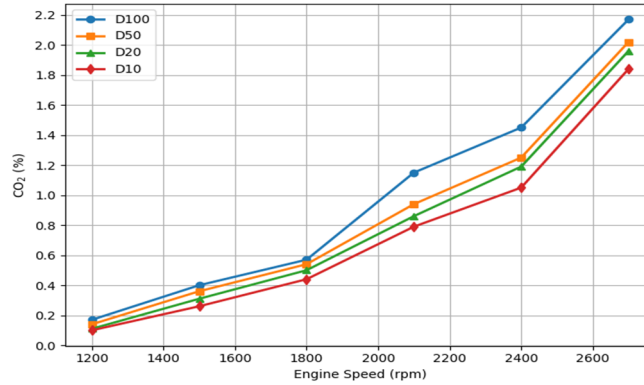


Figure 4. CO₂ emissions by number ten oil additive amount

Figure 4 illustrates the variation of CO₂ emissions (%) with respect to engine speed and the number ten oil additive ratio. In general, CO₂ levels tend to increase at higher engine speeds because the combustion process becomes more complete as the engine operates under greater airflow and improved mixing conditions. However, as the proportion of number ten oil additive increases, a decrease in CO₂ emissions is typically observed. This reduction is attributed to the deterioration of combustion quality caused by the higher viscosity of the fuel blend. Poor atomization and inadequate mixing lead to incomplete combustion, resulting in a shift from CO₂ toward intermediate or partially oxidized species such as CO and unburned hydrocarbons. Therefore, the trends observed in Figure 1 are consistent with the expected relationship between fuel properties, combustion efficiency, and emission formation.

3.2.2. Carbon Monoxide (Ppm)

CO (ppm) emission results of D100-D50-D20-D10 ratio mixtures between 1200 and 2700 rpm. It is observed that the amount of CO increases as the number ten oil additive increases at the same speed, and similarly, the amount of CO increases as the speed increases at the same number ten oil additive.

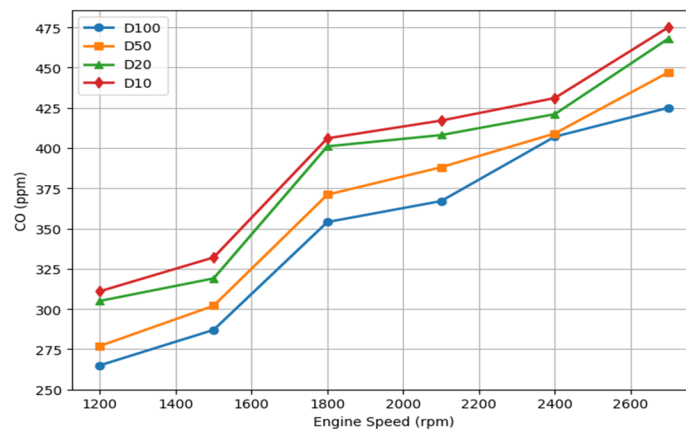


Figure 5. CO (ppm) emission according to number ten oil additive amount

Figure 5 presents the variation of CO emissions (ppm) as a function of engine speed and the number ten oil additive ratio. Typically, CO emissions decrease with increasing engine speed because higher speeds enhance air-fuel mixing, promote more complete combustion, and reduce the formation of partially oxidized species. However, as the number ten oil additive ratio increases, CO emissions exhibit a noticeable rise. This increase is primarily attributed to the deterioration of fuel atomization caused by the higher

viscosity of the additive-enriched blend. Poorer atomization and insufficient mixing lead to incomplete combustion, causing a greater portion of the carbon in the fuel to be released as CO rather than fully oxidizing to CO₂. Therefore, the increase in CO concentrations with higher additive ratios is a direct indication of reduced combustion efficiency and incomplete oxidation processes.

3.2.3. No_x (Ppm)

NO_x (ppm) emission results of D100-D50-D20-D10 ratio mixtures between 1200 and 2700 rpm. It is observed that the amount of NO_x increases as the number ten oil additive increases at the same speed, similarly, the amount of NO_x decreases as the speed increases at the same number ten oil additive.

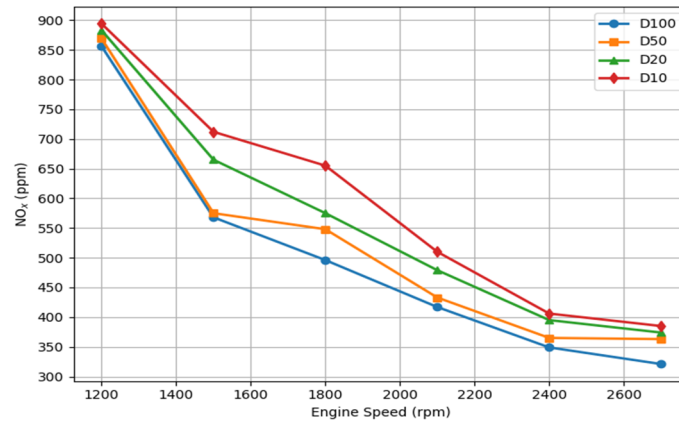


Figure 6. NO_x emissions according to the amount of number ten oil additives

When the graph is examined, it is observed that the amount of NO_x increases as the number ten oil additive ratio increases at the same engine speed. This trend can be explained by the fact that higher additive ratios tend to cause local increases in combustion temperature due to poorer atomization and the formation of fuel-rich regions. These locally richer zones can result in delayed but more intense heat release, which raises peak combustion temperatures—conditions that strongly promote thermal NO_x formation according to the Zeldovich mechanism.

Conversely, at the same additive ratio, NO_x emissions decrease as engine speed increases. At higher speeds, the residence time of the gases in the high-temperature zone is reduced, and the combustion duration becomes shorter. Since the formation of NO_x is highly dependent on both temperature and residence time, the shortened exposure to peak temperatures limits NO_x production. Additionally, incomplete mixing at high speeds can further suppress peak flame temperatures, contributing to the reduction in NO_x levels.

4. CONCLUSION

In today's developing automotive industry, the environmental friendliness of the vehicle is as important as vehicle performance and efficiency. Encouraging the increased use of sustainable energy sources is in line with the parallel goal of reducing the greenhouse gas effect on the world and naturally reducing the emission rates in vehicles. For this reason, in this study, the effects of mixing diesel fuel with illegal number ten oil at certain ratios on engine performance and emission values were investigated. When evaluated in terms of emission; it was found that emission release at the same speed or at the same fuel mixture ratio increased with the increase in the number ten oil additive compared to diesel fuel. Considering the ongoing policies to reduce the greenhouse gas effect all over the world, the negative impact of number ten oil use on the environment and human health is an inevitable fact.

When evaluated in terms of engine performance, number ten oil, which users turn to for economic reasons, is actually not advantageous, and the amount of fuel consumed to generate power in the engine is higher than diesel. Considering that engine torque also decreases, there is no positive contribution of number ten oil to engine performance and efficiency.

The policy recommendations developed against all these negative effects of number ten oil can be listed as follows;

- Road inspections (at Ministry of Transportation checkpoints) and deterrent law enforcement
- License revocation for businesses selling number ten oil through facility inspections,
- Incentive practices for users in tax applications,
- Practices informing citizens such as workshops, advertisements, brochures

As a result of the study conducted, it is inevitable that number ten oil, which is used even though it is not legal, should be considered as a problem and characterized as illegal because it causes environmental pollution and threatens environmental safety and human health. While non-governmental organizations and professional organizations support the solution of the problem, the key role will be played by the effective coordination and supervision of all relevant institutions and organizations. If the problem is approached with a holistic perspective and a systematic structure can be established, both economic, social and environmental security and honest competition will be ensured, the trust and competitiveness of honest companies in the sector will increase, and on the other hand, the system will not allow malicious companies. These findings may provide a scientific basis for regulatory monitoring and future experimental investigations.

5. REFERENCES

1. Özgür, C. (2017). Prediction of fuel properties of palm biodiesel–diesel fuel blends. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Çukurova University*, 32(1), 81-88.
2. Cebeci, T. & Orhan, M. (2022). Improvement of engine oil usage periods by engine oil analysis method. *MCBÜ Soma Vocational School Journal of Technical Sciences*, 1(33), 24-35.
3. Bolat, D., Can-Güven, E., Gedik, K. ve Kurt-Karakuş, P.B. (2016). Yağ sektörü ürün veya atıklarının alternatif yakıt olarak kullanılmasının çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(1), 25-44.
4. Kumbasar, D. & Demirbaş, A. (2023). Evaluation of waste lubricant oil-based fuel blends in diesel engines. *Renewable Energy*, 210, 1345-1353.
5. Aliyu, M., Oladipo, M.O.A, Adeyemo, D.J., Nasiru, R. & Bello, S. (2022). Quantitative determination of heavy metals around schools and automobile workshops near frequented roads in Kaduna State, Nigeria. *UMYU Scientifica*, 1(2), 164-173.
6. Agarwal, A.K. & Krishnamoorthi, M. (2022). Review of morphological and chemical characteristics of particulates from compression ignition engines. *International Journal of Engine Research*, 24(7), 2807-2865.
7. Çalık, A. (2018). Effect of fuel enrichment with hydrogen on engine performance and emission characteristics of a diesel engine. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Çukurova University*, 33(3), 255-262.
8. PETDER. (2008). *The problem of "Number 10 Oil" in the fuel market and proposed solutions*. Istanbul, Türkiye. <https://www.petder.org.tr/Uploads/Document/c366853f-4c47-4264-bc03-c202b62f178e.pdf?v-636450635322714374> . Access date: 24.20.2025.
9. Akkapılı, Y. (2012). *Lubricating oil encyclopedia*. Solver Kimya, Adana, Türkiye.
10. Koşar, S. G. (2015). On the problem of number 10 oil. *Customs and Trade Journal*, 5, 73-82.
11. Uyar, Ö. (2014). *New methods and solution proposals developed for number 10 oil*. Tax Report, 182.
12. Habertürk. (2025). *Nine deaths caused by Number 10 Oil*. <http://www.haberturk.com/gundem/haber/754348-9-kisinin-olum-sebebi-10-numara-yag>. Access date: 19.11.2025.
13. Uyaroğlu, A., Yücesu, H. S. & Çıtak, R. (2010). Analysis of piston failures. *Teknik-Online Journal*, 9(2), 110-130.
14. Eryılmaz, T., Öztürk, H., Oğuz, H. & Bacak, S. (2010). Investigation of the performance and emission values of non-standard fuels in diesel engines. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 6(1).
15. Gedik, K. & Yurdakul, M. (2014). Assessment of chemical content of base oil blends used as alternative diesel fuel for environmental safety. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 30, 86-94.
16. Sezer, İ. (2012). Experimental investigation of the effects of diethyl ether–diesel fuel blends on engine performance. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(1), 117-124.

17. Ebrahimi, M. & Jazayeri, S.A. (2019). Effect of hydrogen addition on RCCI combustion of a heavy-duty diesel engine fueled with landfill gas and diesel oil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 7607-7615.
18. Uçar, M., Kocagül, M., Tanyeri, M. & Fırat, M. (2024). Investigation of diesel fuel blends with gasoline and pyrolytic oil obtained from waste vehicle tires in diesel engines. *Firat University Journal of Engineering Sciences*, 36(1), 97-104.
19. PETDER. (2023). *Fuel sales statistics, December 2023*. Istanbul, Türkiye. <https://www.petder.org.tr/Uploads/Document/512f17cc-8701-4bf0-b74a-29805ea290b1.pdf?v-638424072317062956>. Access date: 2.11.2025.
20. Gülüm, M. (2023). Investigation of the effects of diesel fuel–vegetable oil–diethylene glycol dimethyl ether blend fuels on the performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine. *Journal of Engineering Sciences of Niğde Ömer Halisdemir University*, 12(2), 551-565.
21. PETDER. (2012). *The problem of Number 10 Oil and proposed solutions*. Istanbul, Türkiye. <https://www.petder.org.tr/Uploads/Document/8f7e8e37-19f7-4563-8e61-9e3247320b6b.pdf?v-636450636469960386>. Access date: 01.10.2025.
22. Avcu, A., Tüccar, G. & Choupani, N. (2021). Numerical investigation of the effects of different injection pressures on diesel engine performance and NOx emissions. *Journal of the Faculty of Engineering, Çukurova University*, 36(1), 71-77.

A Novel Energy-Efficient Optimization Framework for AVR Controllers in Modern Power Systems

Ömer TÜRKSOY^{1,a}

¹İskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical-Electronic Engineering, İskenderun/Hatay, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-4620-4503

Article Info

Received : 07.11.2025

Accepted : 06.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895845

Corresponding Author

Ömer TÜRKSOY

omer.turksoy@iste.edu.tr

Keywords

Automatic voltage regulator

Controller optimization

Energy-efficient objective function

Particle swarm optimization

Sustainable power systems

How to cite: TÜRKSOY, Ö., (2026). Numerical Investigation of Channel Configuration on Thermal Behavior of Liquid-Cooled Plates in Cylindrical Lithium-Ion Battery Modules. *Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 41(2), 399-416.

ABSTRACT

Energy efficiency has become a critical objective in modern power system control due to sustainability requirements and the increasing penetration of renewable energy sources. This paper proposes a novel energy-efficient optimization framework for AVR systems to ensure reliable voltage regulation while minimizing control energy. The framework is based on a newly defined EEPI, integrating voltage tracking accuracy and control-signal energy into a unified objective function. Unlike conventional indices prioritizing fast transient response, the EEPI enables a systematic trade-off between dynamic performance and energy consumption, selecting a Pareto-balanced operating point. The approach is applied to PID and FOPID controllers optimized using the PSO algorithm. Practical feasibility is verified through Processor-in-the-Loop implementation on a TMS320F28035 platform. Comparative results with IAE, ISE, ITAE, ITSE, ZLG, and TR indices show that EEPI reduces control energy while preserving acceptable transient performance, providing a scalable solution for sustainable AVR controller design.

Modern Güç Sistemlerinde AVR Kontrolörleri için Yeni Bir Enerji Verimli Optimizasyon Çerçevesi

Makale Bilgileri

Geliş : 07.11.2025

Kabul : 06.01.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1895845

Sorumlu Yazar

Ömer TÜRKSOY

omer.turksoy@iste.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Enerji verimli amaç fonksiyonu

Kontrolör optimizasyonu

Otomatik gerilim regülatörü

Parçacık sürü optimizasyonu

Sürdürülebilir güç sistemleri

Atf şekli: TÜRKSOY, Ö., (2026). Modern Güç Sistemlerinde AVR Kontrolörleri için Yeni Bir Enerji Verimli Optimizasyon Çerçevesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 41(2), 399-416.

ÖZ

Enerji verimliliği, sürdürülebilirlik gereksinimleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının artan entegrasyonu nedeniyle modern güç sistemi kontrolünde kritik bir tasarım hedefi haline gelmiştir. Bu çalışmada, güvenilir gerilim regülasyonu sağlarken kontrol enerjisini en aza indirmeyi amaçlayan, Otomatik Gerilim Regülatörü sistemleri için yeni bir enerji verimli optimizasyon çerçevesi önerilmektedir. Önerilen çerçeve, gerilim izleme doğruluğu ile kontrol sinyali enerjisini tek bir amaç fonksiyonunda birleştiren yeni tanımlanmış EEPI üzerine kuruludur. Hızlı geçici rejimi önceliklendiren geleneksel performans indekslerinin aksine, EEPI dinamik performans ile enerji tüketimi arasında sistematik bir denge kurarak Pareto-dengeli bir çalışma noktası seçmektedir. Yöntem, PSO algoritması ile optimize edilen PID ve FOPID kontrolörlerine uygulanmıştır. Pratik uygulanabilirlik, TMS320F28035 platformunda PİL gerçekleştirilmesi ile doğrulanmıştır. IAE, ISE, ITAE, ITSE, ZLG ve TR indeksleri ile yapılan karşılaştırmalar, EEPI'nin kabul edilebilir geçici rejim performansını korurken kontrol enerjisini azalttığını göstermektedir. Bu sonuçlar, sürdürülebilir AVR kontrolör tasarımı için ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır.

1. INTRODUCTION

In modern electrical power systems, the reliable transfer of generated power to consumers is crucial for both economic and technical reasons. During this process, load variations, demand fluctuations, and the growing penetration of renewable energy resources frequently lead to deviations in voltage magnitude and frequency. Such deviations directly affect the performance and lifespan of electrical devices, reduce overall system efficiency, and in severe cases may result in instability or outages. Therefore, maintaining voltage quality and system stability remains a fundamental challenge for power engineers [1-3].

The AVR system is widely recognized as one of the most effective mechanisms for maintaining terminal voltage stability in synchronous generators. By dynamically adjusting the excitation voltage, the AVR preserves the reactive power balance of the power system and ensures proper operation under varying conditions [4]. However, the performance of an AVR system is highly dependent on the design and tuning of its controller. Among conventional approaches, the PID controller has been extensively employed due to its simplicity, reliability, and ease of implementation [5]. Subsequently, the FOPID controller was introduced to enhance tuning flexibility by incorporating fractional integration and differentiation parameters [6]. Although a variety of fast and robust control strategies have been proposed in the literature, PID and FOPID remain the most practical and widely preferred solutions for AVR applications, as they provide a favorable balance between effectiveness and implementation simplicity. Nevertheless, improper tuning of these controllers may still result in degraded transient behavior or poor steady-state performance [7].

To address this challenge, a wide variety of optimization algorithms have been employed for AVR controller tuning, ranging from classical techniques to modern metaheuristic approaches such as PSO [8], GA [9], DE [10], ABC [10], GWO [11], CSA [12], and many others. These algorithms are designed to efficiently explore large and complex parameter spaces where traditional analytical methods are insufficient. The performance of the selected optimization algorithm directly affects the overall quality of the AVR system response. Algorithms that fail to escape local optima may yield poorly tuned controller parameters, leading to unsatisfactory transient or steady-state behavior. Hence, robust and globally convergent optimization strategies are essential to ensure reliable AVR performance [13].

Beyond the optimization algorithm itself, the formulation of the objective function plays a decisive role in determining system performance [14]. Even highly advanced algorithms cannot deliver reliable results if the objective function fails to accurately capture the inherent trade-offs among key performance metrics. In AVR control design, improving one performance aspect often comes at the expense of another; for instance, aggressive tuning may reduce rise time but increase control effort and energy consumption. Therefore, the controller tuning problem can be naturally interpreted as a multi-objective optimization task, where dynamic response and control energy form competing objectives. From this perspective, the goal is not to maximize a single metric, but to achieve a balanced operating point within the Pareto-optimal trade-off surface.

Traditionally, performance indices such as IAE, ISE, ITAE, and ITSE have been widely used for AVR tuning [15-17]. These indices provide meaningful insights into transient characteristics, including rising time, settling time, overshoot, and steady-state error. In recent years, modified and hybrid objective functions have been proposed to overcome the limitations of classical indices. Among these, the ZLG objective function [8] has gained prominence due to its ability to penalize overshoot and improve settling performance, leading to well-balanced transient responses. Similarly, alternative indices such as the TR objective function [18] have been introduced to enhance robustness under parameter uncertainties and disturbances. However, a common limitation of these approaches is that they predominantly emphasize dynamic performance metrics while neglecting control effort and associated energy consumption. With the rapid integration of renewable energy sources, distributed generation, and electric vehicles, the efficiency of control actions has become increasingly important, since excessive and high-amplitude control signals lead to unnecessary energy usage and reduced sustainability. In addition to energy consumption, highly oscillatory control signals introduce excessive switching stress on power electronic and control hardware components, which accelerates thermal degradation and reduces the operational lifetime of switching devices. Over extended operation, this effect may significantly increase maintenance and replacement costs, highlighting the practical importance of minimizing unnecessary control activity alongside energy usage.

Table 1 presents a survey of representative AVR controller studies and the objective functions employed in their optimization frameworks. While these approaches have advanced the field considerably, a notable research gap persists; none of the existing performance indices explicitly integrate control energy as a primary design criterion. In most previous studies, energy consumption has been treated as a secondary or implicit consequence rather than a core objective of the optimization process. This limitation becomes particularly significant in modern power systems, where energy-aware operation and sustainability are key design priorities.

Motivated by this gap, the present study proposes a novel energy-efficient optimization framework for AVR controllers based on a newly developed EEPI. Unlike conventional indices, the EEPI directly accounts for the energy of the control signal and explicitly incorporates the trade-off between transient response and energy consumption. From a multi-objective standpoint, the proposed formulation identifies a Pareto-balanced solution rather than prioritizing aggressive transient speed. The proposed framework is applied to PID and FOPID controllers, with optimal parameters obtained using the PSO algorithm. The performance of the EEPI is systematically compared with four widely used classical indices (IAE, ISE, ITAE, ITSE), the established hybrid ZLG function, and the recently introduced TR index. Simulation and PIL-based results demonstrate that the proposed approach achieves significant reductions in control energy while maintaining acceptable dynamic performance. These findings highlight energy-aware optimization as a promising direction for developing sustainable AVR control strategies in modern power systems.

Table 1. Summary of representative AVR controller studies and objective functions

Ref#	Year	Type of controller	Optimization algorithm	Objective function
Proposed	2026	PID, FOPID	PSO	EEPI
[18]	2025	PIDF + Fuzzy PIDF	TLBO	ITAE
[19]	2025	PID	ADIWACO PSO	ITAE
[20]	2025	FFOPIDF	TLBO	ZLG
[21]	2025	RPIDD ² -PI	ECSA	ZLG
[22]	2024	3-DOF-PIDA	SSO	ITSE
[23]	2024	PIDD ²	HWO	ITAE
[24]	2024	SMC	GWO, SCA	TR
[25]	2024	PIDD ²	HH+SA	ZLG
[26]	2024	FOPID+ D ²	MGO	ZLG
[27]	2024	FOPID-LP	hPSO	ITAE, CTDOF
[28]	2024	1DOF-PID	hVsaGwo	ISE
[13]	2024	SFOPID	DO	ISE, IAE, ITSE, ITAE, ZLG
[29]	2022	SMC	PSO	CTDOF
[30]	2021	PID	MRFO	ZLG
[31]	2021	PID	EO	ZLG
[32]	2021	2DOF-PI	PSO, VSA, SCA, GWO, SSA, MFO, WCA	ITSE
[33]	2020	PID	TSA	ZLG
[34]	2020	FOPID	JOA	ITAE
[35]	2019	PID	IKA	ITSE+ZLG
[36]	2019	PID	WWO	ITAE
[37]	2018	PID	SFS	ITSE
[5]	2016	PID	TLBO	ZLG

2. AVR SYSTEM AND CONTROLLERS

2.1. AVR System Model with Limiters

The AVR is a critical component in synchronous generator systems, regulating excitation voltage to maintain the terminal voltage within desired operational limits. By performing this function, the AVR contributes to preserving reactive power balance, improving voltage stability, and enhancing the overall reliability of the power system under varying loading conditions.

The AVR structure is composed of four main functional subsystems: amplifier, exciter, synchronous generator, and sensor. These elements operate in a coordinated manner to adjust the excitation signal in response to deviations in terminal voltage. A schematic representation of the system structure is illustrated in Figure 1.

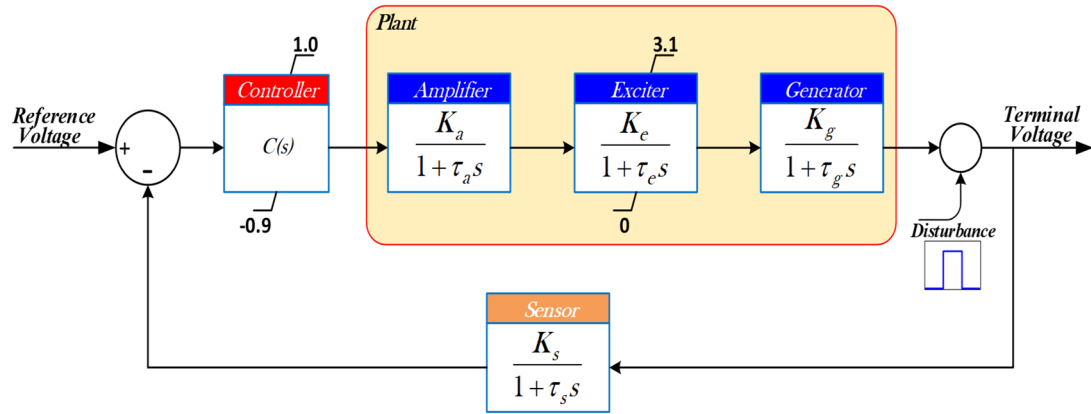


Figure 1. A schematic representation of the system structure

Each subsystem is modeled using a linearized first-order transfer function to represent its dynamic behavior. This modeling approach provides a simplified yet effective representation of the dominant dynamics of voltage regulation, making it suitable for controller design and performance evaluation.

The gain and time constant parameters of each block are selected within practical operating ranges, as summarized in Table 2 are adopted from standard AVR models reported in the literature [24,25].

Table 2. The gain and time constant parameters

Component	Transfer function	Range of the gain	Range of the time constant(s)	Chosen values
Amplifier	$G_a(s) = \frac{K_a}{(1 + \tau_a s)}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$0.02 \leq \tau_a \leq 0.1$	$K_a = 10$, $\tau_a = 0.1$
Exciter	$G_e(s) = \frac{K_e}{(1 + \tau_e s)}$	$1 \leq K_e \leq 10$	$0.1 \leq \tau_e \leq 0.4$	$K_e = 1.0$, $\tau_e = 0.4$
Generator	$G_g(s) = \frac{K_g}{(1 + \tau_g s)}$	$0.7 \leq K_g \leq 1.0$	$1.0 \leq \tau_g \leq 2.0$	$K_g = 10$, $\tau_g = 0.1$
Sensor	$G_s(s) = \frac{K_s}{(1 + \tau_s s)}$	$0.9 \leq K_s \leq 1.1$	$0.001 \leq \tau_s \leq 0.06$	$K_s = 10$, $\tau_s = 0.1$

The overall AVR transfer function can be expressed as:

$$G_{AVR}(s) = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \cdot \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \cdot \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \cdot \frac{K_S}{1 + \tau_S s} \quad (1)$$

where K_A , K_E , K_G and K_S denote the gains, and τ_A , τ_E , τ_G and τ_S represent the time constants associated with the amplifier, exciter, generator, and sensor subsystems, respectively.

Although this linearized representation simplifies system analysis, real AVR systems exhibit nonlinear characteristics, particularly due to actuator limits and saturation effects. To enhance modeling realism, limiter mechanisms are introduced in both the controller and exciter blocks. The exciter limiter constrains the excitation signal to prevent excessive under- or over-excitation, while the controller limiter ensures that the control signal remains within physically feasible voltage bounds. These nonlinearities significantly influence transient response characteristics and reflect practical implementation constraints [38].

In this work, an excitation system configuration analogous to the DC1C [24,29,39] structure is adopted, incorporating saturation behavior and bounded control signal constraints. The DC1C excitation model represents a conventional IEEE Type-1 DC excitation system widely used in synchronous generator voltage regulation studies, characterized by first-order exciter dynamics, saturation effects, and practical excitation limits. In order to reflect realistic operating conditions, the exciter output is constrained within a physically feasible range, where the excitation voltage is limited between 0 and 3.1 p.u. This saturation bound prevents excessive over-excitation and ensures stable operation of the excitation system under large disturbances. Incorporating these nonlinear constraints improves the physical consistency of the model and enables more realistic evaluation of controller performance under practical operating conditions.

2.2. PID Controller

The PID controller is one of the most widely utilized control structures in AVR applications due to its simple structure, ease of implementation, and satisfactory performance in practical power systems. Despite the emergence of advanced control strategies, PID controllers remain a preferred choice in voltage regulation tasks because they provide an effective compromise between control performance and computational complexity.

The control law of the PID controller is formulated based on the instantaneous error signal, its accumulated integral, and its rate of change. Accordingly, the transfer function of the PID controller can be expressed as:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

where K_p , K_i , and K_d represent the proportional, integral, and derivative gains, respectively.

The proportional term primarily determines the system's response speed, the integral term ensures elimination of steady-state error, and the derivative term contributes to improving damping and transient stability. However, the dynamic behavior of the AVR system is highly sensitive to the selection of these parameters. Improper tuning may cause excessive overshoot, long settling times, oscillatory response, or even instability.

For this reason, the PID controller parameters cannot be selected using heuristic or trial-and-error approaches, especially in systems where performance and efficiency are critical. Instead, systematic optimization-based tuning methods are required to achieve a balanced trade-off between fast voltage recovery, low overshoot, and stable steady-state operation. In this study, the PID controller parameters are optimized using a structured optimization framework, aiming not only to improve transient response but also to minimize unnecessary control energy through the proposed EEPI.

This formulation allows the PID controller to operate in an energy-aware manner, ensuring that high performance is achieved without excessive control effort, which directly supports the objective of sustainable and efficient voltage regulation.

2.3. FOPID Controller

The FOPID controller extends the classical PID structure by introducing fractional orders in the integral and derivative terms. This extension provides additional flexibility in controller design, enabling more precise shaping of the system dynamics and improved robustness against parameter uncertainties and external disturbances.

The transfer function of the FOPID controller is given by:

$$G_{FOPID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (3)$$

where K_p , K_i , and K_d denote the controller gains, and λ and μ represent the fractional orders of integration and differentiation, respectively, with $0 < \lambda, \mu \leq 1$.

Compared to conventional PID controllers, the FOPID structure provides enhanced control flexibility by allowing independent adjustment of the memory and dynamic behavior of the system. This makes it particularly suitable for systems exhibiting complex dynamics such as AVR plants with nonlinearities and saturation effects. However, the increased number of tuning parameters introduces a higher-dimensional optimization problem, requiring an effective, well-designed optimization strategy.

In this study, the FOPID controller is incorporated to evaluate the generality and scalability of the proposed energy-efficient optimization framework. By comparing the performance of PID and FOPID controllers under the same EEPI-based tuning scheme, the capability of the proposed method to handle both classical and advanced controller structures is systematically assessed.

3. OBJECTIVE FUNCTIONS IN AVR CONTROLLER OPTIMIZATION

The performance of an Automatic Voltage Regulator system is strongly influenced by the selection of the objective function used during controller parameter optimization. While the optimization algorithm determines how efficiently the search space is explored, the objective function defines what constitutes optimal behavior. Consequently, the effectiveness of any optimization-based tuning framework depends primarily on the ability of the objective function to accurately reflect the desired control objectives.

In AVR controller design, objective functions are typically formulated based on time-domain error signals, aiming to improve transient response characteristics such as rising time, settling time, overshoot, and steady-state error. Over the years, a variety of performance indices have been proposed and widely adopted in the literature. These indices can be broadly categorized into classical performance indices and hybrid objective functions.

3.1. Classical Performance Indices

Classical performance indices are derived from the error signal

$$e(t) = V_{ref}(t) - V_t(t), \quad (4)$$

where $V_{ref}(t)$ denotes the reference voltage and $V_t(t)$ represents the terminal voltage of the generator.

These indices evaluate control performance by integrating different functions of the error signal over time. The IAE is defined as:

$$J_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (5)$$

The ISE is expressed as

$$J_{ISE} = \int_0^T e^2(t) dt \quad (6)$$

The ITAE is given by

$$J_{ITAE} = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (7)$$

The ITSE is formulated as

$$J_{ITSE} = \int_0^T t e^2(t) dt \quad (8)$$

Although classical indices have been successfully applied in numerous AVR studies, their primary limitation lies in their exclusive focus on voltage tracking performance. None of these indices explicitly accounts for the magnitude or energy of the control signal, which becomes increasingly important in modern power systems under sustainability and efficiency constraints.

3.2. Hybrid Objective Functions

Hybrid objective functions combine multiple transient response metrics.

The ZLG index balances overshoot and response speed:

$$J_{ZLG} = (1 - e^{-\beta}) \cdot (M_p + E_{ss}) + e^{-\beta} (t_s - t_r) \quad (9)$$

where,

M_p denotes the maximum overshoot,
 E_{ss} is the steady-state error,
 t_s represents the settling time,
 t_r is the rising time,
 β is a weighting parameter that regulates the relative emphasis between transient magnitude and response speed.

This formulation allows the ZLG index to flexibly balance fast response and low overshoot by adjusting the parameter β . Despite its effectiveness in shaping transient behavior, the ZLG function does not explicitly incorporate control effort or control signal energy into the optimization process.

Another hybrid objective function considered in this study is the TR-based performance index, primarily designed to enhance transient response while improving robustness against parameter variations and external disturbances. Unlike classical indices, the TR objective function explicitly incorporates time-domain response measures and penalizes unfavorable transient behavior.

The TR objective function is defined as:

$$J_{TR} = \begin{cases} t_r + t_s + \delta(ISE + ITAE), & \text{if } \%Mp > 0.1 \\ t_r + t_s + (ISE + ITAE), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

where,

t_r is the rise time,
 t_s is the settling time,
 δ is a weighting coefficient that penalizes parameter combinations leading to excessive overshoot,
 $\%M_p$ denotes the percentage overshoot,
 ISE is the Integral of Squared Error,
 $ITAE$ is the Integral of Time-weighted Absolute Error.

This formulation enables the TR objective function to dynamically distinguish between acceptable and excessive overshoot. When the overshoot exceeds a predefined threshold, the penalty term weighted by λ is activated, effectively discouraging solutions with poor transient behavior. As a result, the TR index promotes fast and well-damped voltage responses while maintaining robustness under varying operating conditions.

4. PROPOSED ENERGY-EFFICIENT PERFORMANCE INDEX

Conventional and hybrid objective functions used in AVR controller optimization primarily focus on voltage-tracking performance and transient response. While such indices are effective in improving the rising time, settling time, and overshoot, they do not explicitly account for the energy associated with the control action. In modern power systems, where sustainability, efficiency, and hardware limitations are increasingly critical, neglecting control energy may lead to excessive actuator effort, unnecessary power consumption, and reduced long-term reliability.

To address this limitation, this study proposes a novel EEPI that explicitly integrates control signal energy into the optimization objective, while preserving desirable transient response characteristics. The proposed index is designed to establish a physically meaningful trade-off between voltage regulation quality and control effort.

4.1. Energy-Based Control Function Index

The control energy component is quantified through an ECFI, defined as the time integral of weighted control-signal related terms. The ECFI captures not only the magnitude of the control signal but also its dynamic variations, which are closely related to switching activity and energy expenditure in practical AVR implementations.

The ECFI is formulated as:

$$ECFI = \int_0^T \left(\omega_1 e^2(t) + \omega_2 u^2(t) + \omega_3 \left(\frac{du(t)}{dt} \right)^2 \right) dt \quad (11)$$

where $u(t)$ denotes the controller output signal, and w_1, w_2, w_3 are weighting coefficients that balance voltage tracking accuracy, control magnitude, and control signal variation, respectively.

The weighting coefficients w_1, w_2, w_3 were selected based on the relative importance assigned to voltage tracking accuracy, control signal magnitude, and control signal variation within the proposed energy-aware control framework. In practical AVR operation, accurate voltage tracking and suppression of excessive control magnitude were prioritized, as these directly influence voltage regulation quality and actuator effort. Therefore, the coefficients associated with voltage tracking and control magnitude were assigned higher values, while the coefficient related to control signal variation was assigned a comparatively lower value to provide secondary penalization of rapid control fluctuations. This priority-based selection ensures that the optimization process primarily preserves voltage regulation performance while limiting unnecessary control effort. Preliminary simulations further confirmed that the selected coefficient set maintains voltage regulation accuracy while effectively suppressing excessive control activity. The selected numerical values and their physical interpretation are summarized in Table 3.

Table 3. EEPI and ECFI parameter settings used in this study

Parameter	Description	Selected value	Selection rationale
ω_1	Voltage tracking error weight	1	Prioritizes voltage tracking accuracy
ω_2	Control signal magnitude weight	1	Limits excessive control effort
ω_3	Control signal variation weight	0.5	Moderately penalizes control signal variation
α	Energy contribution coefficient	4.0	Balances energy suppression with transient response
γ	ECFI scaling coefficient	1.0	Normalizes ECFI contribution
β	Transient shaping parameter	1.0	Ensures consistent transient performance weighting
κ	Steady-state error penalty coefficient	100	Enforces strict steady-state accuracy
ε	Steady-state error threshold	0.002	Enforces strict voltage regulation accuracy

This formulation ensures that aggressive control actions with large amplitudes or rapid variations are penalized, directly reflecting their associated energy cost.

4.2. EEPI Cost Function Formulation

Building upon the ECFI definition, the proposed EEPI combines classical transient response indicators with the energy-based control effort term. The EEPI cost function is defined as:

$$J_{EEPI} = \begin{cases} \kappa \left[e^{-\beta} M_p + (1 - e^{-\beta}) \cdot (\alpha \cdot (t_s + t_r) + \gamma ECFI) \right], & |E_{ss}| > \varepsilon \\ e^{-\beta} M_p + (1 - e^{-\beta}) \cdot (\alpha \cdot (t_s + t_r) + \gamma ECFI) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

where,

M_p denotes the maximum overshoot,

t_s and t_r represent the settling and rise times, respectively,

E_{ss} is the steady-state error,

ε is a predefined steady-state error threshold,

β is a shaping parameter controlling the relative emphasis between overshoot and energy-aware terms,

α, γ , and κ are positive weighting coefficients.

The EEPI parameters α , γ and κ , as well as the steady-state error threshold ε , were determined through a structured design-oriented tuning process aimed at achieving a balanced compromise between transient performance, energy suppression, and steady-state accuracy. The coefficient α was selected to regulate the relative contribution of the energy-related term within the EEPI, ensuring that energy minimization does not dominate transient response characteristics. The scaling parameter γ was introduced to maintain a consistent contribution of the ECFI term across different operating conditions. The penalty coefficient κ was assigned a sufficiently large value to strictly penalize infeasible steady-state behavior and enforce acceptable voltage regulation limits.

To ensure fair and reproducible comparison among different objective functions and controller structures, these parameter values were fixed and consistently used throughout all optimization runs. The final parameter set reflects a practical engineering compromise between control performance, energy efficiency, and steady-state accuracy. The selected values and their rationale are summarized in Table III.

The exponential weighting structure enables a smooth transition between transient-dominant and energy-dominant optimization behavior. Moreover, the conditional penalty applied when the steady-state error exceeds the specified threshold ensures strict voltage regulation accuracy.

In this study, the shaping parameter β is fixed to unity to ensure a balanced contribution of transient and energy-related terms. The steady-state error threshold ε is set to 0.002 to enforce strict voltage regulation accuracy.

5. PSO-BASED OPTIMIZATION FRAMEWORK

The tuning of AVR controller parameters constitutes a nonlinear, multi-parameter optimization problem characterized by strong coupling between transient performance and control effort. Analytical tuning approaches become ineffective under such conditions, particularly when nonlinear elements such as limiters and real-time execution constraints are considered. Therefore, a population-based metaheuristic optimization strategy is adopted to efficiently explore the solution space and identify near-global optimal parameter sets.

The PSO algorithm is selected in this study due to its fast convergence characteristics, low computational complexity, and strong performance reported in AVR controller tuning problems compared to other metaheuristic algorithms such as GWO and DE.

The optimization task aims to determine the optimal controller parameter vector that minimizes the proposed EEPI. Accordingly, the optimization problem is formulated as

$$\min J_{EEPI}(\theta) \quad (13)$$

subject to

$$\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \quad (14)$$

where θ denotes the controller parameter vector.

For the PID controller, the decision vector is defined as

$$\theta_{PID} = [K_p, K_i, K_d] \quad (15)$$

whereas for the FOPID controller, it is given by

$$\theta_{FOPID} = [K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu] \quad (16)$$

The lower and upper bounds of each controller parameter are selected based on practical AVR operating constraints and commonly adopted ranges reported in the literature. These bounds define the feasible search space explored by the PSO algorithm and ensure physically meaningful controller configurations.

The search space boundaries used for the optimization of PID and FOPID controllers are summarized in Table 4.

Table 4. Boundaries for controller parameters

Controller	Parameter	Lower bound	Upper bound
PID	K_p	0.01	10
	K_i	0.001	1
	K_d	0.001	1
FOPID	K_p	0.01	10
	K_i	0.001	1
	K_d	0.001	1
	λ	0.1	1.5
	μ	0.05	1.2

Within the PSO algorithm, each particle represents a candidate controller parameter set and moves through the search space by updating its velocity and position according to

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (p_i - x_i^k) + c_2 r_2 (g - x_i^k) \quad (17)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (18)$$

where ω is the inertia weight, c_1 and c_2 denote the cognitive and social acceleration coefficients, respectively, and r_1 and r_2 are uniformly distributed random numbers in the interval $[0,1]$. The inertia weight is linearly decreased during the optimization process to ensure an effective balance between global exploration and local exploitation.

The optimization procedure is executed offline. For each particle, the EEPI value is evaluated by simulating the AVR system under the corresponding controller parameters, and the resulting fitness value guides the swarm evolution. The PSO configuration parameters, including swarm size, maximum iteration number, inertia weight limits, and acceleration coefficients, are listed in Table 5.

Although the optimization process is performed offline, the resulting optimal controller parameters are subsequently implemented and evaluated within a PIL environment using a TMS320F28035 control card. The PIL implementation setup employed in this study is illustrated in Figure 2.

Table 5. PSO Algorithm Parameters

Parameter	Value
Swarm size	30
Maximum iterations	500
Inertia weight	0.729
Cognitive coefficient	1.49445
Social coefficient	1.49445

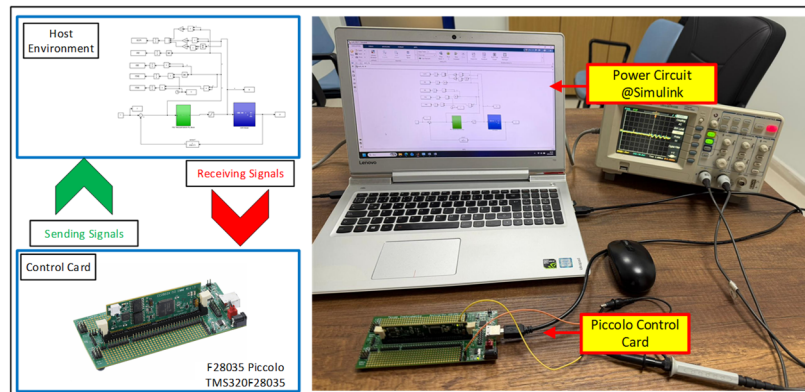


Figure 2. Processor-in-the-Loop (PIL) setup for real-time execution of the optimized AVR controllers on the TMS320F28035 control board

The real-time implementation is executed on a TMS320F28035 digital signal controller with a fixed sampling time of 1e-6 seconds. The optimized controller parameters obtained offline are embedded into the DSP, and the AVR model is executed in a PIL configuration, enabling cycle-accurate validation of the control performance under real-time constraints. The setup enables real-time execution of the optimized controllers while maintaining a seamless interface with the simulation environment.

6. RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the performance evaluation of the AVR system using PID and FOPID controllers optimized under different objective functions. The proposed Energy-Efficient Performance Index (EEPI) is compared against classical performance indices (IAE, ISE, ITAE, ITSE) as well as hybrid objective functions (ZLG and TR). All optimization results are obtained using the same PSO configuration to ensure a fair and consistent comparison.

The optimized controller parameters obtained for each objective function are summarized in Table 6. These parameters are subsequently implemented in the AVR system, and all performance metrics reported in this section are evaluated based on the corresponding optimized controller settings executed within the Processor-in-the-Loop (PIL) environment using the TMS320F28035 control board.

Table 6. Optimized PID and FOPID controller parameters obtained using different objective functions

Optimized PID controller parameters according to different objective functions							
	Objective function						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	TR	ZLG	Proposed EEPI
K_p	1.7848	5.4040	5.2274	5.4127	4.4842	4.4288	0.6922
K_i	0.2910	0.3291	0.2897	0.3049	0.2708	0.2950	0.2289
K_d	0.3813	1.0000	1.0000	1.0000	0.9986	1.0000	0.1692
Optimized FOPID controller parameters according to different objective functions							
	Objective function						
	IAE	ISE	ITAE	ITSE	TR	ZLG	Proposed EEPI
K_p	5.6896	2.6241	5.6796	4.6171	5.1887	1.3589	0.9975
K_i	0.2832	0.4454	0.2803	1.0000	0.2064	0.3087	0.2711
K_d	1.0000	0.5454	1.0000	1.0000	1.0000	0.3123	0.2315
λ	1.0173	0.7694	1.0203	0.4456	1.1749	0.9757	1.0000
μ	1.0320	1.0078	1.0343	1.0094	1.0312	0.9956	1.0000

It is observed that some optimized controller parameters approach the upper bounds of the predefined search space. This behavior indicates that the optimization process tends to push the controller gains toward more aggressive configurations in order to improve transient response characteristics. However, the inclusion of the proposed EEPI formulation limits excessive parameter growth by penalizing high control energy, thereby resulting in more balanced and practically feasible controller parameter sets.

6.1. Transient Response Analysis

The transient responses of the AVR system obtained using PID and FOPID controllers optimized with different objective functions are illustrated in Fig. 3 and Fig. 4, respectively, while the corresponding time-domain performance metrics are summarized in Table 7 and Table 8 for the PID and FOPID controllers, respectively.

Table 7. Time-domain performance metrics of the AVR system using PID controllers optimized with different objective functions

Objective function	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time 2% (s)	Settling time 5% (s)
IAE	0.3405	1.4134	1.0780	0.5360
ISE	0.3319	2.7102	1.0290	0.8350
ITAE	0.3314	1.6989	0.8800	0.8290
ITSE	0.3315	2.7553	1.0280	0.8350
TR	0.3693	0.0998	0.8760	0.8140
ZLG	0.5605	0.0977	0.8790	0.8140
Proposed EEPI	0.5155	0.9984	0.8480	0.7780

Table 8. Time-domain performance metrics of the AVR system using FOPID controllers optimized with different objective functions

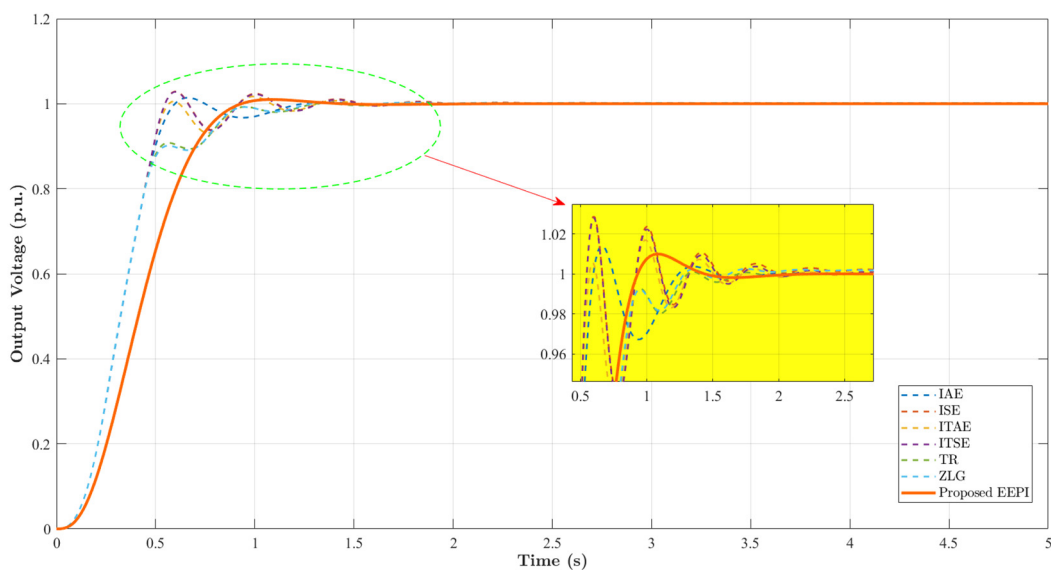
Objective function	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time 2% (s)	Settling time 5% (s)
IAE	0.3313	2.0169	0.9820	0.7880
ISE	0.3305	2.8702	1.2630	0.5170
ITAE	0.3314	1.9254	0.8520	0.7850
ITSE	0.3294	4.3828	1.4720	0.5120
TR	0.3421	0.1000	0.8520	0.7960
ZLG	0.3589	0.5121	0.6060	0.5630
Proposed EEPI	0.4096	1.0000	0.6760	0.6260

For the PID controller, classical performance indices such as IAE and ISE provide relatively fast initial responses but are associated with higher overshoot levels and less favorable damping characteristics. The ITAE and ITSE indices improve damping by penalizing sustained errors, resulting in smoother responses with comparable rise times. Hybrid objective functions, namely TR and ZLG, achieve very low overshoot by explicitly penalizing transient magnitude, although this often comes at the expense of slightly slower dynamic response.

The PID controller optimized using the proposed EEPI exhibits a moderately slower rise time compared to classical indices, reflecting the inherent trade-off between response speed and energy efficiency. However, the settling time remains competitive, and the response maintains stable and well-damped characteristics. This behavior indicates that the EEPI does not prioritize aggressive transient speed but instead selects a balanced operating point where acceptable dynamic performance is achieved alongside reduced control effort.

A similar trend is observed for the FOPID controller. Due to the additional tuning flexibility provided by fractional-order parameters, the FOPID structure generally achieves improved damping and faster settling compared to PID across most objective functions. The EEPI-optimized FOPID controller exhibits a slightly slower rise time compared to purely transient-oriented indices, yet maintains competitive settling performance and stable voltage regulation. These results confirm that the EEPI preserves acceptable transient behavior while enabling energy-aware optimization.

Overall, the transient analysis highlights a fundamental multi-objective trade-off between response speed and control energy. While classical and hybrid indices primarily target aggressive transient performance, the proposed EEPI intentionally moderates the control action to achieve a balanced compromise between dynamic response and energy efficiency.


Figure 3. Transient response characteristics of the AVR system using PID controllers optimized with different objective functions

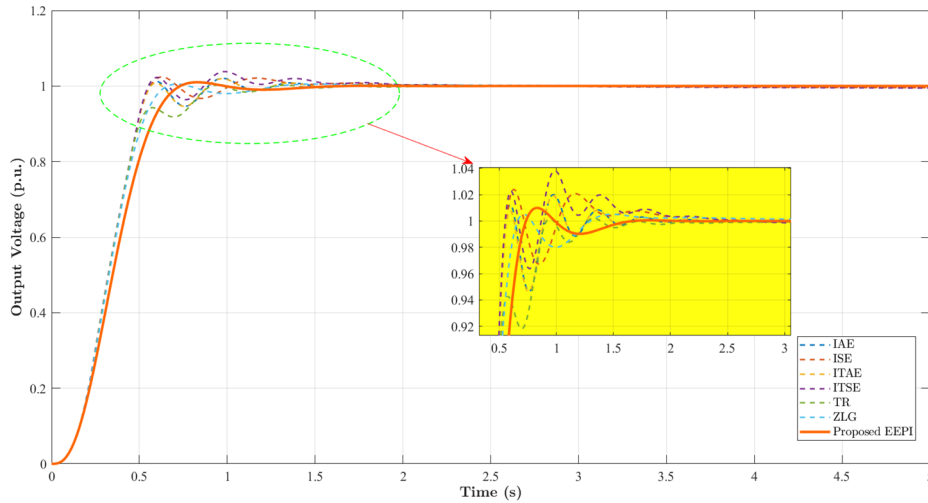


Figure 4. Transient response characteristics of the AVR system using FOPID controllers optimized with different objective functions

6.2. Control Effort and Energy Consumption

Beyond transient response characteristics, the control effort associated with each optimization strategy is examined to assess the practical efficiency of the AVR controllers. The corresponding control signals and cumulative control energy profiles obtained during PIL execution are illustrated in Fig.5, Fig.6 for the PID controller and Fig.7, Fig.8 for the FOPID controller.

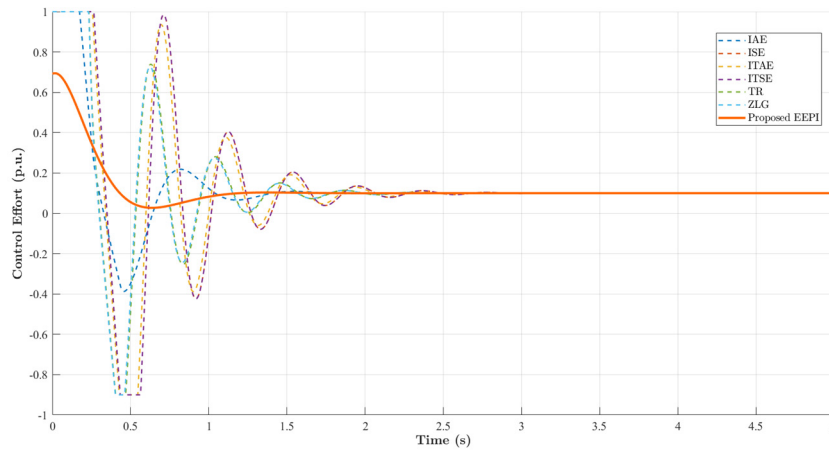


Figure 5. Control signal of the PID controller optimized using different objective functions

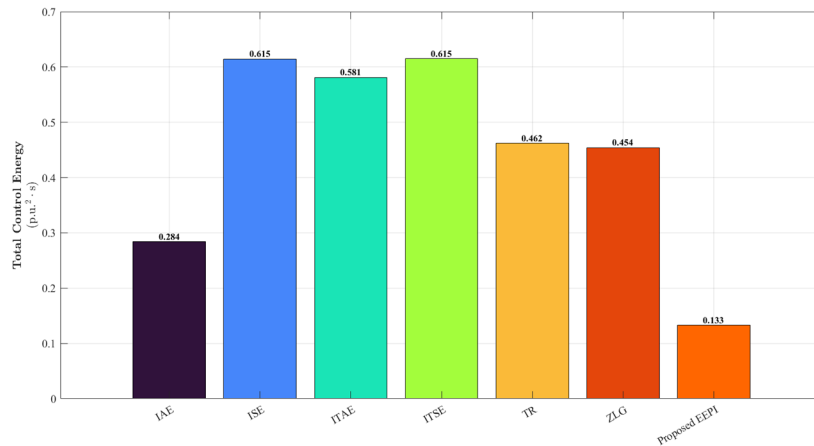


Figure 6. Total control energy comparison of the PID controller for different objective functions

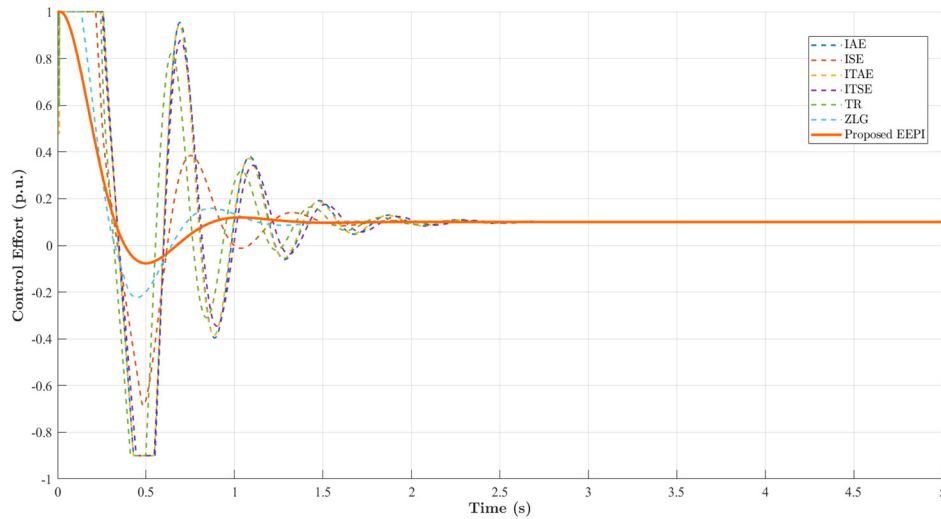


Figure 7. Control signal of the FOPID controller optimized using different objective functions

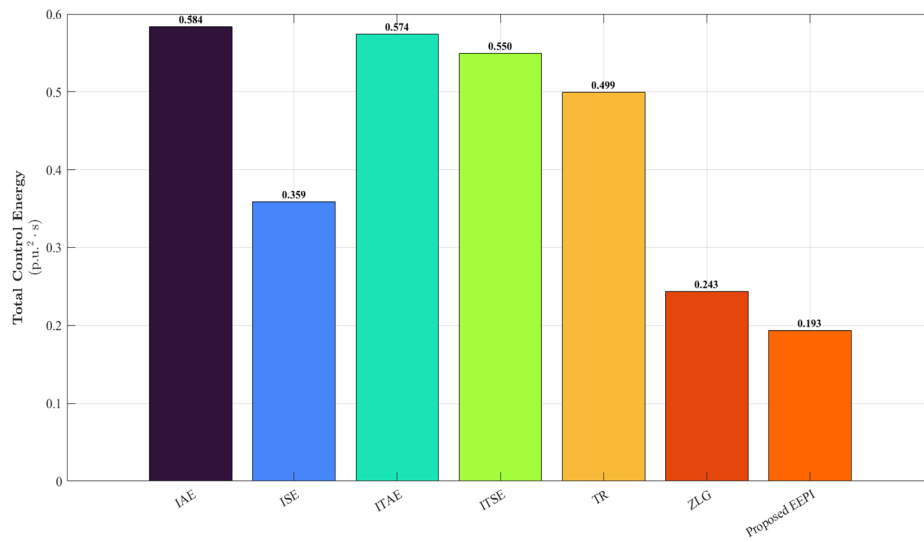


Figure 8. Total control energy comparison of the FOPID controller for different objective functions

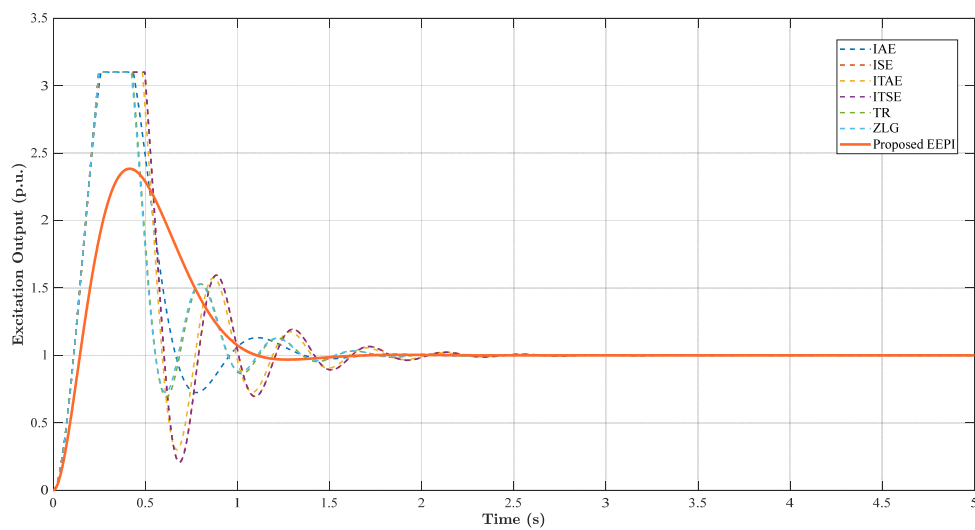


Figure 9. Excitation output of the PID controller optimized using different objective functions

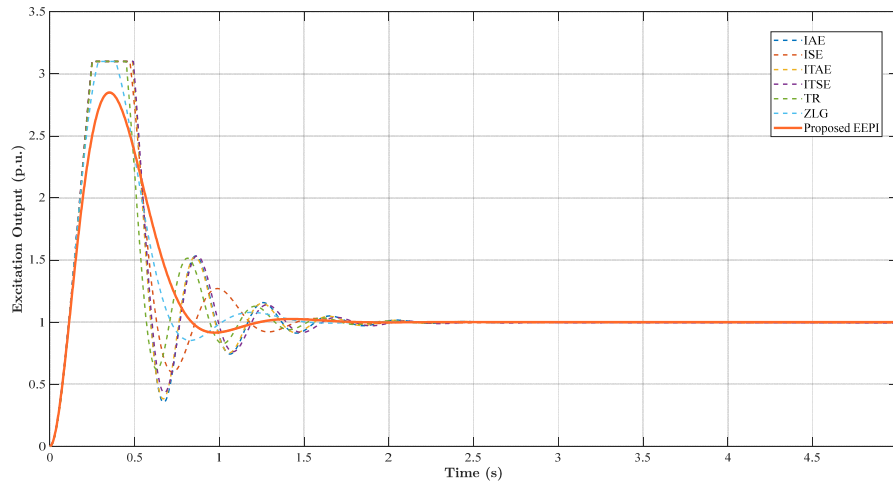


Figure 10. Excitation output of the FOPID controller optimized using different objective functions

For controllers optimized using classical objective functions, such as IAE, ISE, ITAE, and ITSE, the control signals exhibit pronounced oscillatory behavior with relatively high peak amplitudes during the transient period. These oscillations indicate frequent and abrupt control actions, which are directly associated with increased switching activity in the excitation system as clearly seen from the Fig. 9 and Fig. 10. In practical AVR implementations, such behavior leads to elevated switching losses and increased thermal stress on power electronic components.

Hybrid objective functions, namely ZLG and TR, partially mitigate this effect by improving damping characteristics; however, noticeable oscillations and relatively large control excursions are still observed, particularly during the early transient interval. Although these strategies improve voltage response smoothness compared to classical indices, the resulting control effort remains non-negligible.

In contrast, the proposed EEPI achieves a markedly lower cumulative control energy for the PID controller, with a value of 0.1329, corresponding to a reduction of approximately 70.7% relative to the best-performing hybrid objective function (ZLG: 0.4541) and 71.2% relative to the TR-based formulation (0.4618). This substantial reduction indicates that the EEPI effectively suppresses excessive control oscillations while maintaining favorable transient response characteristics.

Similar trends are observed for the FOPID controller. Owing to the additional tuning flexibility provided by the fractional-order parameters, the FOPID structure generally yields improved control smoothness compared to its PID counterpart. The EEPI-optimized FOPID controller achieves a cumulative control energy of 0.1933, which represents a reduction of approximately 20.5% compared to the ZLG-based solution (0.2432) and 61.3% compared to the TR-based objective function (0.4992).

Overall, these results confirm that excessive control oscillations significantly increase control energy consumption and switching losses in AVR systems. By explicitly incorporating control energy into the optimization objective, the proposed EEPI enables a substantial reduction in control effort for both PID and FOPID controllers, resulting in improved energy efficiency, reduced actuator stress, and enhanced practical viability under realistic execution conditions.

7. CONCLUSIONS

This study presented a novel energy-efficient optimization framework for AVR controllers based on a newly developed EEPI. Unlike classical and hybrid objective functions that primarily emphasize aggressive transient performance, the proposed EEPI explicitly incorporates control signal energy into the optimization process, enabling a balanced compromise between voltage regulation performance and control effort.

The proposed framework was applied to both PID and FOPID controllers, with controller parameters optimized using the PSO algorithm under identical configuration settings to ensure fair and consistent comparison. The comparative analysis revealed that, although the EEPI may produce slightly slower rise

times compared to purely transient-oriented indices, it preserves competitive settling behavior and stable voltage regulation while significantly reducing control effort. This confirms the inherent trade-off between response speed and energy efficiency and demonstrates that the EEPI converges to a balanced operating point rather than prioritizing aggressive transient response.

Beyond transient characteristics, the EEPI achieved a substantial reduction in cumulative control energy and control signal oscillations for both PID and FOPID controllers. The resulting smoother control behavior reduces switching activity, actuator stress, and associated energy losses in practical AVR implementations. These improvements contribute to enhanced energy efficiency, improved hardware reliability, and reduced long-term operational stress without compromising voltage regulation quality.

The implementation of the optimized controllers within a PIL environment using a TMS320F28035 control platform further verified the practical feasibility of the proposed approach. The close agreement between simulation and real-time execution results confirms that the EEPI-based framework is suitable for realistic AVR applications where energy efficiency, actuator limitations, and implementation constraints must be considered simultaneously.

Overall, the proposed EEPI provides a systematic and scalable methodology for energy-aware AVR controller tuning. By explicitly incorporating control energy into the optimization objective, the framework introduces an energy-conscious perspective to AVR design and contributes toward sustainable and efficient voltage regulation in modern power systems. Future work may extend the proposed framework to multi-machine power systems to investigate inter-machine dynamic interactions and potential resonance phenomena, as well as to adaptive excitation systems and real-time optimization under varying operating conditions.

8. REFERENCES

1. Gopi, P., Reddy, S.V., Bajaj, M., Zaitsev, I. & Prokop, L. (2024). Performance and robustness analysis of V-Tiger PID controller for automatic voltage regulator. *Scientific Reports*, 14(1), 7867.
2. Teke, A., Saribulut, L. & Tümay, M. (2011). Power quality disturbances and custom power devices. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 57-65.
3. Tekin, P. (2022). Çukurova bölgesi için kısa vadeli yapay zeka tabanlı rüzgar güç tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1143-1154.
4. Micev, M., Čalasan, M. & Radulović, M. (2023). Optimal tuning of the novel voltage regulation controller considering the real model of the automatic voltage regulation system. *Heliyon*, 9(8), e18707.
5. Chatterjee, S. & Mukherjee, V. (2016). PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 418-429.
6. Pan, I. & Das, S. (2012). Chaotic multi-objective optimization based design of fractional order PI λ D μ controller in AVR system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1), 393-407.
7. Veinović, S., Stojić, D. & Joksimović, D. (2022). Optimized four-parameter PID controller for AVR systems with respect to robustness. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107529.
8. Gaing, Z.-L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391.
9. Dogruer, T. & Can, M.S. (2022). Design and robustness analysis of fuzzy PID controller for automatic voltage regulator system using genetic algorithm. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 44(9), 1862-1873.
10. Gozde, H. & Taplamacioglu, M.C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348(8), 1927-1946.
11. Kar, M.K., Kumar, S., Singh, A.K., Panigrahi, S. & Cherukuri, M. (2022). Design and analysis of FOPID-based damping controllers using a modified Grey Wolf Optimization algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2022, 1-31.
12. Bingul, Z. & Karahan, O. (2018). A novel performance criterion approach to optimum design of PID controller using cuckoo search algorithm for AVR system. *Journal of the Franklin Institute*, 355(13), 5534-5559.

13. Sahin, A.K., Cavdar, B. & Ayas, M.S. (2024). An adaptive fractional controller design for automatic voltage regulator system: sigmoid-based fractional-order PID controller. *Neural Computing and Applications*, 36(23), 14409-14431.
14. Veinović, S., Stojić, D. & Ivanović, L. (2023). Optimized PID2 controller for AVR systems regarding robustness. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145, 108646.
15. Panda, S., Sahu, B.K. & Mohanty, P.K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349(8), 2609-2625.
16. Mohanty, P.K., Sahu, B.K. & Panda, S. (2014). Tuning and assessment of proportional–integral–derivative controller for an automatic voltage regulator system employing local unimodal sampling algorithm. *Electric Power Components and Systems*, 42(9), 959-969.
17. Duman, S., Yörükeren, N. & Altaş, İ.H. (2016). Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24, 2387-2400.
18. Shouran, M. & Alenezi, M. (2025). A novel fuzzy PIDF enhancing PIDF controller tuned in two stages by TLBO and PSO algorithms for reliable AVR performance. *IEEE Access*, 13, 93505-93522.
19. Sekyere, Y.O.M., Ajiboye, P.O., Effah, F.B. & Opoku, B.T. (2025). Optimizing PID control for automatic voltage regulators using ADIWACO PSO. *Scientific African*, 27, e02562.
20. Eltag, K., Abdullahi, S., Weining, L. & Xiaohu, C. (2025). Design TLBO fuzzy fractional order PID filter controller for AVR excitation system. *IEEE Access*, 13, 216466-216495.
21. Izci, D., Abualigah, L., Can, Ö., Andiç, C. & Ekinici, S. (2025). A novel cascaded RPIDD²-PI controller tuned by enhanced cooperation search algorithm for automatic voltage regulator systems. *IET Control Theory & Applications*, 19(1).
22. Chetty, N.D., Sharma, G., Gandhi, R. & Çelik, E. (2024). A novel salp swarm optimization oriented 3-DOF-PIDA controller design for automatic voltage regulator system. *IEEE Access*, 12, 20181-20196.
23. Dai, F. & Gao, S. (2024). Optimal design of a PID2 controller for an AVR system using hybrid whale optimization algorithm. *IEEE Access*, 12, 128525-128540.
24. Türksoy, Ö. & Türksoy, A. (2024). A fast and robust sliding mode controller for automatic voltage regulators in electrical power systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 53, 101697.
25. Izci, D., Ekinici, S. & Zeynelgil, H.L. (2024). Controlling an automatic voltage regulator using a novel Harris hawks and simulated annealing optimization technique. *Advanced Control for Applications*, 6(2), 1-26.
26. Izci, D., Abualigah, L., Can, Ö., Andiç, C. & Ekinici, S. (2024). Achieving improved stability for automatic voltage regulation with fractional-order PID plus double-derivative controller and mountain gazelle optimizer. *International Journal of Dynamics and Control*, 12(7), 2550-2565.
27. Ahmadnia, M., Hajipour, A. & Tavakoli, H. (2024). Robust variable-order fractional PID-LP fuzzy controller for automatic voltage regulator systems. *Applied Soft Computing*, 167, 112268.
28. Saka, M. (2024). Novel hVsaGwo algorithm for non-linear dynamic weighted state feedback with 1DOF-PID based controllers in AVR. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 59, 101857.
29. Furat, M. & Cucu, G.G. (2022). Design, implementation, and optimization of sliding mode controller for automatic voltage regulator system. *IEEE Access*, 10, 55650-55674.
30. Micev, M., Čalasan, M., Ali, Z.M., Hasanien, H.M. & Abdel Aleem, S.H.E. (2021). Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing–manta ray foraging optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 641-657.
31. Micev, M., Čalasan, M. & Oliva, D. (2021). Design and robustness analysis of an automatic voltage regulator system controller by using equilibrium optimizer algorithm. *Computers & Electrical Engineering*, 89, 106930.
32. Eke, I., Saka, M., Gozde, H., Arya, Y. & Taplamacioglu, M.C. (2021). Heuristic optimization based dynamic weighted state feedback approach for 2DOF PI-controller in automatic voltage regulator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(4), 899-910.
33. Kose, E. (2020). Optimal control of AVR system with tree seed algorithm-based PID controller. *IEEE Access*, 8, 89457-89467.
34. Jumani, T.A., Mustafa, M.W., Rasid, M.M., Saeed, M.S. Khan, İ. & Nisar, K.S. (2020). Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system. *Alexandria Engineering Journal*, 59(4), 2429-2440.

35. Ekinci, S. & Hekimoglu, B. (2019). Improved kidney-inspired algorithm approach for tuning of PID controller in AVR system. *IEEE Access*, 7, 39935-39947.
36. Zhou, Y., Zhang, J., Yang, X. & Ling, Y. (2019). Optimization of PID controller based on water wave optimization for an automatic voltage regulator system. *Information Technology and Control*, 48(1).
37. Çelik, E. (2018). Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system. *Neural Computing and Applications*, 30(6), 1991-2002.
38. Furat, M. (2023). Chattering attenuation analysis in variable structure control for automatic voltage regulator with input constraints. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 45, 101499.
39. IEEE (2006). IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies. *IEEE Power Engineering Society*, 95.

9. NOMENCLATURE

ABC	Artificial Bee Colony	ITSE	Integral of Time-weighted Squared Error
AVR	Automatic Voltage Regulator	JOA	Jaya Optimization Algorithm
CSA	Cuckoo Search Algorithm	MGO	Mountain Gazelle Optimizer
DE	Differential Evolution	MRFO	Manta Ray Foraging Optimization
ECFI	Energy-Based Control Function Index	PID	Proportional–Integral–Derivative
ECSA	Enhanced Crow Search Algorithm	PIL	Processor-in-the-Loop
EEPI	Energy-Efficient Performance Index	PSO	Particle Swarm Optimization
EO	Equilibrium Optimizer	SCA	Sine Cosine Algorithm
FOPID	Fractional-Order Proportional– Integral–Derivative	SFS	Stochastic Fractal Search
GA	Genetic Algorithm	SMC	Sliding Mode Control
GWO	Grey Wolf Optimization	SSO	Salp Swarm Optimization
HWO	Hybrid Whale Optimization	TLBO	Teaching-Learning-Based Optimization
IAE	Integral of Absolute Error	TR	Turksoy
IKA	Improved Kidney-Inspired Algorithm	TSA	Tree Seed Algorithm
ISE	Integral of Squared Error	WWO	Water Wave Optimization
ITAE	Integral of Time-weighted Absolute Error	ZLG	Zwe-Lee Gaing

Scalable Hybrid ML–DL Framework for Real-Time DDoS Detection in SDN

Bashar ALHAJAHMAD^{1,a}

¹Siirt University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Siirt, Türkiye

^aORCID: 0009-0009-3455-7206

Article Info

Received : 16.09.2025

Accepted : 09.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1784878

Corresponding Author

Bashar ALHAJAHMAD

bashar.ahmad@siirt.edu.tr

Keywords

Defense-in-depth

DDoS detection

Deep learning models

Real-time detection

Software-defined networking

How to cite: ALHAJAHMAD, B., (2026). Scalable Hybrid ML–DL Framework for Real-Time DDoS Detection in SDN. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 417-432.

ABSTRACT

Distributed Denial of Service (DDoS) attacks remain a major threat to Software-Defined Networks (SDN), where centralized controllers are vulnerable to flooding traffic. Existing detection methods typically rely on single-stage models, creating trade-offs between speed and robustness. This study introduces a novel hierarchical hybrid framework that leverages SDN's layered architecture by deploying Random Forest (RF) at the switch for lightweight, real-time filtering and deep learning (DL) models at the controller for deeper inspection. The hybrid RF→MLP pipeline achieves 98.7% accuracy, eliminates false alarms (normal recall = 1.00), and sustains high attack recall (0.97) with negligible latency (0.26 ms/sample). Unlike prior controller-centric or single-stage approaches, this is the first framework to systematically integrate ML and DL across SDN layers, providing a practical and scalable defense-in-depth solution.

SDN’de Gerçek Zamanlı DDoS Tespiti için Ölçeklenebilir Hibrit ML–DL Yaklaşımı

Makale Bilgileri

Geliş : 16.09.2025

Kabul : 09.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1784878

Sorumlu Yazar

Bashar ALHAJAHMAD

bashar.ahmad@siirt.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Derinlemesine savunma

DDoS tespiti

Derin öğrenme modelleri

Gerçek zamanlı tespit

Yazılım tanımlı ağlar (SDN)

Atıf şekli: ALHAJAHMAD, B., (2026). SDN’de Gerçek Zamanlı DDoS Tespiti için Ölçeklenebilir Hibrit ML–DL Yaklaşımı. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 417-432.

ÖZ

Dağıtık Hizmet Engelleme (DDoS) saldırıları, merkezi denetleyicilerin taşma trafiğine karşı savunmasız olduğu Yazılım Tanımlı Ağlar (SDN) için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Mevcut yöntemler genellikle tek aşamalı modellere dayanmakta ve hız ile sağlamlık arasında ödün vermektedir. Bu çalışma, SDN’nin katmanlı mimarisinden yararlanan yeni bir hiyerarşik hibrit çerçeve sunmaktadır. Anahtar düzeyinde Random Forest (RF) ile hafif ve gerçek zamanlı filtreleme, denetleyici düzeyinde ise Derin Öğrenme (DL) modelleri ile ayrıntılı analiz gerçekleştirilmiştir. Hibrit RF→MLP hattı %98,7 doğruluk elde etmiş, yanlış alarmları ortadan kaldırmış (normal geri çağırma = 1.00) ve saldırı trafiğinde yüksek geri çağırma (0.97) sağlamıştır. Önceki denetleyici merkezli veya tek aşamalı yaklaşımlardan farklı olarak, bu çalışma ML ve DL’i SDN katmanları arasında bütünleştiren ilk yaklaşımdır ve ölçeklenebilir, derinlemesine savunma çözümü sunmaktadır.

1. INTRODUCTION

1.1. Background on Network Security and Attack Types

In today's interconnected digital landscape, network security is essential to preserve data confidentiality, integrity, and availability. The rapid expansion of cloud services, IoT ecosystems, and distributed applications has significantly broadened the attack surface for organizations, creating new vulnerabilities that traditional defenses struggle to address. Recent surveys underscore this growing challenge, particularly within cloud and IoT connected environments [1]. Cyberattacks manifest in various forms, commonly classified according to their tactics and objectives:

- Reconnaissance attacks: Techniques such as port scanning and network footprinting used to map out targets and potential vulnerabilities.
- Denial-of-Service (DoS) and Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attacks: Attempt to interrupt or stop services by flooding network or server resources.
- Man-in-the-Middle (MitM) attacks: Intercept and actively manipulate communications between two parties.
- Spoofing and Injection Attacks: Including IP spoofing, ARP poisoning, and SQL injection, designed to bypass authentication or corrupt data.
- Malware-Driven Attacks: Contains ransomware, viruses, and Trojans that disrupt normal operations or grant unauthorized access.
- Advanced Persistent Threats (APTs): Extended and targeted campaigns that combine methods to stealthily exfiltrate sensitive data.

Comprehensive studies highlight this taxonomy, emphasizing how evolving cyber threats continue to pressure traditional defense mechanisms. Among these threats, DDoS attacks stand out due to their ability to critically affect service availability, a fundamental aspect of information security [2].

1.2. Distributed Denial-of-Service (DDoS) Attacks

A DDoS attack leverages networks of compromised systems - commonly referred to as botnets - to direct massive amounts of malicious traffic to a target, overwhelming its ability to respond [3]. The distributed nature of these attacks complicates detection, as traffic appears to come from many legitimate sources. DDoS attacks are typically grouped into the following categories: [4]

- Volumetric attacks: Flood targets with overwhelming traffic volumes (e.g., UDP or ICMP floods) to saturate bandwidth.
- Protocol attacks: Exploit specific vulnerabilities in protocol behavior, such as SYN floods, Ping-of-Death attacks, or Smurf attacks, to incapacitate servers or firewalls.
- Application-layer attacks: Imitate genuine user traffic (e.g., HTTP GET/POST floods, Slowloris) to degrade application performance or cause denial of service with relatively low overhead.

Modern DDoS threats are increasingly sophisticated, combining multiple vectors in "multi-vector attacks" to maximize impact while evading simple signature-based detection [5]. Interestingly, low-rate stealth DDoS attacks are gaining traction; they blend into normal traffic and gradually undermine performance, making them especially elusive to detect. The proliferation of IoT-enabled botnets, including notorious campaigns like Mirai, has further expanded DDoS capabilities, allowing attackers to launch powerful assaults using a large pool of compromised devices. Consequently, DDoS remains one of the main cybersecurity threats to critical infrastructure, including healthcare, finance, and government networks [6]. In modern digital infrastructures, cybersecurity has become a critical concern due to the rapid growth of online services and cloud-based applications. Among the most disruptive threats are distributed denial-of-service (DDoS) attacks, in which adversaries flood targeted resources with malicious traffic, exhausting bandwidth, or processing capacity [7,8]. Recent studies estimate that large-scale DDoS attacks can cause millions of dollars in economic losses per hour, while also threatening the availability of essential services in healthcare, finance, and government networks [9]. Traditional network architectures, which rely on distributed control and static configurations, struggle to detect and mitigate such dynamic attacks. This

challenge has motivated the adoption of Software- Defined Networking (SDN), a paradigm that separates the control plane from the data plane, providing centralized management, programmability, and flexibility. Although SDN enables more agile responses to threats, its centralized controller introduces a single point of failure, making it an attractive target for DDoS adversaries [10,11].

1.3. Challenges of DDoS Detection in Software-Defined Networking (SDN)

Conventional security mechanisms, such as firewalls, intrusion detection systems (IDS), and threshold-based anomaly monitoring, have been shown to be insufficient in SDN environments. Signature-based detection cannot cope with evolving attack strategies, while threshold and statistical methods lack adaptability in dynamic traffic conditions. Moreover, centralized approaches that rely on monitoring at the controller often incur high latency and may not scale to large-scale networks [12,13].

1.4. Machine Learning and Deep Learning for DDoS Detection

Recent research has been shifted towards machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques for anomaly detection in SDN.

- ML methods such as logistic regression, decision trees, random forests, and gradient boosters provide efficient and interpretable models capable of detecting abnormal flow patterns using flow statistics. However, these methods are typically based on hand-made features and may not capture complex temporal or spatial dependencies [14].
- DL methods such as Multi-Layer Perceptron (MLP), Convolutional Neural Networks (CNN) and Long-Short-Term Memory (LSTM) can automatically learn hierarchical feature representations [15]. CNNs excel in extracting local correlations among features (e.g., packet bursts), while LSTMs capture temporal patterns, making them effective for detecting low-rate or evolving DDoS attacks. Despite their strengths, DL models are computationally intensive, making them difficult to deploy directly at the switch level in real-time scenarios [16].

1.5. Research Gap

Although machine learning (ML) and deep learning (DL) have shown promise in DDoS detection, most existing studies adopt flat, single-stage frameworks — either at the switch for speed or at the controller for accuracy. Hybrid methods have emerged, but they are overwhelmingly controller-centric, failing to utilize the inherent hierarchical design of SDN. Furthermore, previous works emphasize classification accuracy but rarely analyze the latency–accuracy trade-off essential for real-time feasibility. No existing framework explicitly integrates lightweight ML at the switch with DL at the controller to achieve multi-layered, defense-in-depth detection. This study addresses that critical gap by proposing a hierarchical ML–DL pipeline that balances efficiency, robustness, and scalability, while systematically evaluating both detection performance and latency.

1.6. Contributions of This Work

The novelty and major contributions of this study are as follows:

1. First Hierarchical ML–DL Framework in SDN: We introduce a two-tier detection pipeline where RF provides real-time, lightweight detection at the switch, while MLP, CNN, and LSTM deliver deeper contextual inspection at the controller.
2. Latency–Accuracy Trade-Off Analysis: Unlike most prior works, we systematically compare switch-only, controller-only, and hybrid designs, demonstrating how the proposed pipeline balances scalability, robustness, and efficiency.
3. Zero False Alarms with Defense-in-Depth: The hybrid RF→MLP pipeline achieves 98.7% accuracy, eliminates false alarms (normal recall = 1.00), and sustains high attack recall (0.97), all with negligible latency (0.26 ms/sample).
4. Practical Deployment Feasibility: By aligning detection with SDN’s layered architecture, the proposed framework demonstrates scalability and real-time applicability, moving beyond purely academic experiments toward operational network readiness.

5. **Extensibility Toward Multi-Class Detection:** Although the current study focuses on binary classification for real-time feasibility, the proposed hierarchical architecture is inherently extensible to multi-class DDoS detection, enabling differentiation between volumetric, protocol, and application-layer attacks.

2. RELATED WORK

The detection of distributed denial-of-service (DDoS) attacks in Software-Defined Networks (SDN) has been studied extensively, evolving from traditional anomaly detection methods to advanced machine learning (ML), deep learning (DL) and hybrid approaches.

2.1. Traditional DDoS Detection Approaches

The early wave of research on DDoS detection in Software-Defined Networking (SDN) has been dominated by surveys, lightweight schemes, and shallow ML-based mechanisms that primarily emphasize efficiency rather than robustness. Aladaileh et al. [17] conducted an extensive survey of detection methods against DDoS attacks targeting SDN controllers, categorizing existing techniques into statistical, entropy-based, and machine learning (ML) oriented models. Although the study offered valuable classification and highlighted research gaps, it remained descriptive and lacked empirical validation of the proposed categories. Moreover, the review did not adequately consider emerging trends such as adversarial DDoS traffic or deep learning (DL)-driven detection, which limits its practical applicability in current dynamic environments. Bhayo et al. [18] advanced the discussion by proposing a time-efficient DDoS detection scheme for IoT networks integrated with SDN. Their approach leveraged flow-level features for rapid detection, demonstrating scalability for resource- constrained settings. However, its reliance on traditional flow statistics limited its adaptability to increasingly stealthy DDoS variants that mimic legitimate IoT traffic. Consequently, the method shows promise in low-complexity environments, but is weak against multivector or evolving attack scenarios. In contrast, Tan et al. [19] introduced a cooperative defense framework that combined control-plane and data- plane monitoring. Their system deployed a trigger mechanism in the data plane to detect anomalies and then applied a hybrid ML approach that integrates K-Means and KNN. This cooperative model improved detection accuracy and efficiency compared to single-plane detection. However, its dependence on shallow ML classifiers limited generalization when exposed to complex and large-scale DDoS attacks, reflecting the broader limitation of traditional ML methods in high-dimensional traffic analysis.

2.2. Machine Learning-Based DDoS Detection

With the increasing sophistication of DDoS campaigns, machine learning (ML) has been extensively explored to enhance detection accuracy and adaptivity in SDN and other networked environments. Ali et al. [20] conducted a systematic review of ML and DL techniques for the detection of DDoS in SDN. Their work categorized approaches into five dimensions: detection methodologies, strengths and weaknesses of ML/DL models, benchmark datasets, pre-processing strategies, and experimental evaluation. This review provided a broad overview of recent progress and identified critical research gaps, particularly the lack of standardized datasets and the inconsistent use of hyperparameter tuning strategies across studies. However, as a review article, its contribution was primarily taxonomical and conceptual, with limited empirical validation to guide practical implementation.

In contrast, Lima Filho et al. [21] proposed Smart Detection, an online ML-based system for DoS/DDoS detection. Their approach relied on extracting signatures from sampled network traffic and achieved detection rates above 96% in four benchmark data sets while maintaining low false alarm rates. The strength of this study lies in the demonstration of the feasibility of online ML detection in near real-time environments. However, its signature-based learning introduces potential limitations: reliance on prior attack patterns may reduce robustness against novel or polymorphic DDoS traffic, a common challenge in evolving network threats.

Complementing these perspectives, Ismail et al. [22] proposed a classification and prediction framework for DDoS attacks using Random Forest (RF) and XGBoost classifiers. Using the UNWS-np-15 dataset, the models achieved strong predictive performance, with accuracy approaching 90%. The comparative evaluation highlighted XGBoost's superior precision and recall relative to RF. Although these results validated the potential of ensemble learning for DDoS detection, the dependency of the framework on a single dataset raised concerns about generalizability, especially given the diversity of traffic in real-world SDN environments.

2.3. Deep Learning-Based DDoS Detection

Deep learning (DL) has recently gained traction as a powerful tool for DDoS detection in SDN environments due to its ability to capture complex traffic patterns and high-dimensional feature representations. Compared to traditional ML models, DL techniques generally achieve superior detection accuracy and scalability, particularly against sophisticated and stealthy attack vectors.

Ali et al. [23] compared a range of ML and DL classifiers, including SVM, KNN, decision trees, Multi-Layer Perceptron (MLP) and convolutional neural networks (CNN). Their experiments demonstrated that CNN achieved the highest training accuracy (97.8%) but suffered from reduced prediction accuracy (90.08%), suggesting potential overfitting. In contrast, SVM achieved the highest prediction accuracy of 95.5%, outperforming CNN despite being a classical ML method. This study highlights that while DL can extract deeper features, it may not always generalize effectively without careful optimization and regularization, leaving room for hybrid strategies that combine the strengths of both paradigms.

Yungaicela-Naula et al. [24] proposed a modular SDN-based detection architecture that targets DDoS attacks on both the transport and application layers using multiple ML and DL models. Using up-to-date CICDDoS2017 and CICDDoS2019 datasets, their models achieved classification accuracies above 99%, with detection rates of 98% for transport layer and 95% for application layer attacks. A notable strength of this work was its deployment in a simulated SDN environment (ONOS + Mininet), bridging the gap between offline evaluation and practical applicability. However, while promising, the architecture was highly dataset-dependent, and its scalability in large-scale or zero-day scenarios remains uncertain.

Focusing on a particularly evasive threat, Nugraha and Murthy [25] addressed slow DDoS detection using a hybrid CNN-LSTM model. Their approach outperformed the baseline ML and DL methods, achieving performance metrics above 99% on custom datasets. By leveraging CNN for spatial feature extraction and LSTM for temporal traffic analysis, the model demonstrated the potential of hybrid DL approaches to handle subtle attack behaviors. However, reliance on custom datasets raises questions about generalizability to heterogeneous real-world traffic, a recurring limitation in DL-based studies.

2.4. Hybrid Approaches

Hybrid approaches have recently emerged as promising solutions for DDoS detection, aiming to combine the strengths of feature selection, representation learning, and multi-model fusion to overcome the limitations of standalone ML or DL methods. Wei et al. [26] introduced AE-MLP, a deep learning hybrid framework that integrates Autoencoders (AE) for unsupervised feature extraction with a Multi-Layer Perceptron (MLP) for classification. By compressing high-dimensional features into more discriminative subsets, AE-MLP achieved high robustness and an F1-score exceeding 98% on the CICDDoS2019 dataset. This design effectively addressed feature redundancy and noise issues common in large traffic datasets. However, its reliance on a single dataset raised questions about scalability and performance stability in heterogeneous or real-time SDN environments. Hosseini and Azizi [27] proposed a hybrid data-stream framework combining incremental learning at the client side with various ML classifiers at the proxy side. Their architecture distributed computation across network nodes, thereby reducing latency. Among the algorithms tested, Random Forest provided the best results for detection accuracy. This framework contributed to resource-aware detection, but primarily employed shallow ML models, limiting its adaptability to complex and high-dimensional attack patterns.

Focusing on Industrial IoT (IIoT), Zainudin et al. [28] presented a hybrid CNN–LSTM model optimized by Extreme Gradient Boosting (XGBoost) for feature selection. Using the CICDDoS2019 dataset, the proposed model reached 99.5% accuracy with exceptionally low latency (0.179 ms), which makes it suitable for real-time IIoT scenarios. Its integration of XGBoost-based feature selection with DL classifiers demonstrated efficiency and scalability. Nonetheless, while effective for IIoT, its domain specificity limits generalization to broader SDN use cases. More recently, Sripriyanka and Mahendran [29] proposed a hybrid IoMT security framework (ICDC-Net) that combined cryptographic methods with AI-driven detection and classification. By employing an Optimal Feistel Block Cipher (OFBC) with a hybrid Grey-Wolf Optimizer and Particle Swarm Optimization (HGWO-PSO), the model simultaneously provided DDoS detection and medical image classification using ResNet50. Although this work demonstrated versatility by addressing dual tasks in healthcare applications, the inclusion of multiple optimization layers significantly increased complexity, potentially limiting scalability for generic DDoS detection scenarios.

The reviewed literature shows a clear evolution from traditional detection schemes [17-19], to ML-based frameworks [20-22], then toward DL [23-25], and finally to hybrid approaches [26-29]. While traditional methods offered efficiency, they struggled against stealthy or large-scale DDoS traffic. ML approaches improved detection accuracy and real-time feasibility, yet were hindered by dataset dependency and limited adaptability to novel attacks. DL models further enhanced feature extraction and detection of complex patterns but often suffered from overfitting and poor scalability in real-world SDN deployments. Hybrid models attempted to combine the strengths of feature selection and multi-model fusion, achieving high accuracy and low latency, though their applicability was often restricted to specific domains or complicated by architectural complexity. These gaps collectively highlight the need for a hierarchical hybrid ML-DL framework that integrates multi-level detection layers, balances efficiency with adaptability, and provides a defense-in-depth strategy for robust and scalable DDoS detection in SDN.

2.5. Critical Gap

The reviewed works demonstrate a clear progression: traditional methods lacked adaptability, ML improved accuracy but required manual features, DL provided stronger performance but introduced latency, and hybrid models sought to combine strengths but were still controller-centric. Few, if any, approaches explicitly leverage SDN's hierarchical architecture by deploying lightweight ML at the switch and DL at the controller in a coordinated pipeline. This study addresses that gap by proposing a hierarchical hybrid ML–DL framework, where RF ensures efficient real-time filtering at the switch, and DL models (MLP, CNN, LSTM) provide deeper contextual inspection at the controller. This layered design achieves defense-in-depth and balances accuracy, scalability, and real-time feasibility.

3. METHODOLOGY

3.1. Dataset Description and Preprocessing

3.1.1. Data Cleaning and Encoding

Before model training, several preprocessing steps were applied to ensure data quality and reliability. Missing values were imputed using the median strategy, thereby preventing record loss while maintaining distributional robustness. The categorical feature Protocol was converted into numerical form using label encoding to enable its use in machine learning algorithms. In addition, features with very low variance (less than 1%) were removed, as they contributed minimal discriminatory power and could introduce noise or redundancy into the models.

3.1.2. Class Distribution

The dataset comprises approximately 61% normal flows and 39% attack flows. This distribution, illustrated in Figure 1, indicates that the dataset is relatively balanced, thereby reducing the risk of bias in classifier performance. Such balance is essential for ensuring the reliability of evaluation metrics, including precision, recall, and F1-score.

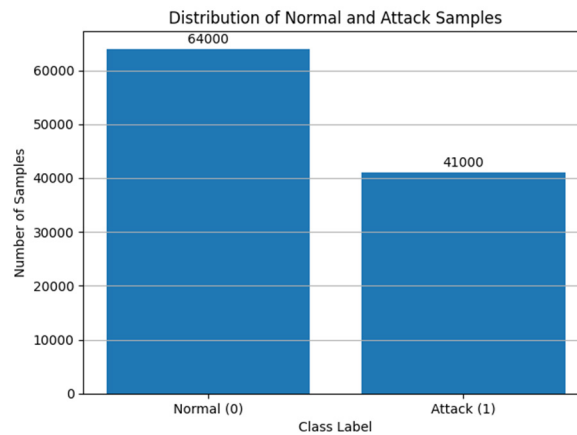


Figure 1. Distribution of normal vs. attack samples in the dataset

3.1.3. Feature Importance (Random Forest)

To identify the features with the highest predictive power, a Random Forest (RF) classifier was trained and feature importance scores were extracted. The most influential features were pktcount, bytecount, and pktrate, all of which capture volumetric flooding behavior. In addition, Protocol and Pairflow contributed significantly by distinguishing between different traffic types, while dur (flow duration) provided insights into short-lived bursty connections. The ranking of feature importance is illustrated in Figure 2.

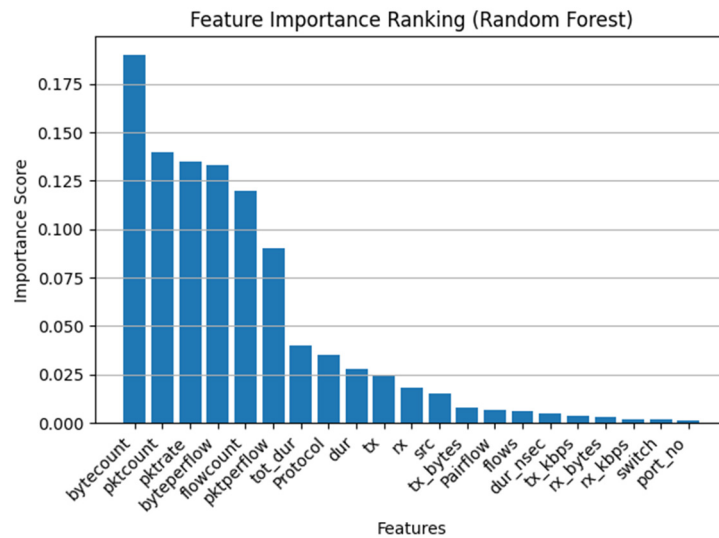


Figure 2. Feature importance ranking obtained using the Random Forest (RF) classifier

3.2. Feature Allocation by Detection Level

In Software-Defined Networking (SDN), feature allocation must consider both computational constraints and the visibility of traffic statistics at different architectural layers. Therefore, features were divided into two categories.

3.2.1. Switch-Level Features

Switch-level features are lightweight, directly measurable at the switches, and therefore well-suited for real-time analysis [30]. These include:

- pktcount (packet count): flooding flows typically generate abnormally high values.

- bytecount (byte count): detects volumetric anomalies in traffic.
- dur (duration): short-lived bursts may indicate malicious activity.
- flows (flow count): sudden increases in concurrent flows are symptomatic of DDoS floods.
- pktrate (packet rate): an important real-time indicator of abnormal surges.

Because these metrics are computationally inexpensive and directly observable in OpenFlow switches, they provide an effective foundation for switch-level detection.

3.2.2. Controller-Level Features

Controller-level features, by contrast, require aggregation or global monitoring and are therefore only available at the controller [31]. These include:

- pktperflow, byteperflow: average statistics across flows.
- Pairflow: captures bidirectional flow relationships, useful for detecting spoofed or asymmetric traffic.
- Protocol: differentiates between TCP, UDP, and ICMP attack vectors.
- port no: identifies targeted service ports.
- tx_bytes, rx_bytes: measure directional byte usage.
- tx_kbps, rx_kbps, tot kbps: provide insight into bandwidth utilization.

The allocation of features across detection levels is summarized in Table 1.

Table 1. Allocation of features across SDN detection levels

Detection level	Features	Rationale
Switch-level	pktdcount, bytecount, dur, flows, pktrate	Lightweight metrics, directly observable at switches; suitable for real-time filtering.
Controller-level	switch-level features + pktperflow, byteperflow, Pairflow, Protocol, port_no, tx_bytes, rx_bytes, tx_kbps, rx_kbps, tot kbps	Require aggregation or a global view; computationally heavier but provide richer context

3.3. Switch-Level Models (ML)

At the switch level, the primary objective is binary classification of traffic (normal vs. suspicious) while ensuring minimal latency. To this end, three machine learning models were evaluated:

1. Logistic Regression (LR): A lightweight, linear baseline that is computationally inexpensive and included to establish a benchmark for detection efficiency [32]. However, LR often struggles to capture the nonlinear feature relationships inherent in DDoS traffic.
2. Gradient Boosting (GB): An ensemble method that combines multiple weak learners to model nonlinear patterns effectively [33]. While offering strong predictive power, its computational overhead is relatively high, which may limit its real-time applicability at the switch level.
3. Random Forest (RF): An ensemble of decision trees that balances accuracy and efficiency. RF is particularly robust to noisy features, provides feature importance scores for interpretability, and in our evaluation achieved nearly perfect accuracy (~99.95%) with an average inference latency of only 0.0043 ms/sample [34].

Overall, the experimental results demonstrated that RF outperformed both LR and GB, combining extremely high accuracy with negligible latency. Therefore, RF was selected as the switch-level model for real-time filtering.

3.4. Controller-Level Models (DL)

Traffic flows flagged as suspicious at the switch are escalated to the controller for deeper inspection using a richer feature set. At this stage, three deep learning (DL) models were evaluated:

1. Multi-Layer Perceptron (MLP): A feedforward neural network capable of modeling nonlinear relationships. MLP was selected as the baseline DL model, as it offers strong performance with relatively low computational cost [35].
2. Convolutional Neural Network (CNN): Although originally developed for image processing, CNNs also excel at learning local correlations between features [36, 37]. In the context of DDoS detection, CNNs effectively capture bursty flow patterns that differentiate malicious traffic from legitimate flows.
3. Long Short-Term Memory (LSTM): A recurrent neural network variant designed to capture sequential and temporal dependencies [38, 39]. LSTM is particularly effective in detecting slow-rate or evolving DDoS attacks that may evade traditional static models.

All three models were trained using the Adam optimizer, binary cross-entropy loss, and early stopping to mitigate overfitting. Each architecture contributes complementary strengths: MLP emphasizes computational efficiency, CNN provides high detection accuracy, and LSTM enhances robustness against evolving traffic patterns.

3.5. Hybrid Detection Pipeline

To fully exploit the layered architecture of SDN, a hybrid two-stage detection pipeline was designed, as illustrated in Figure 3.

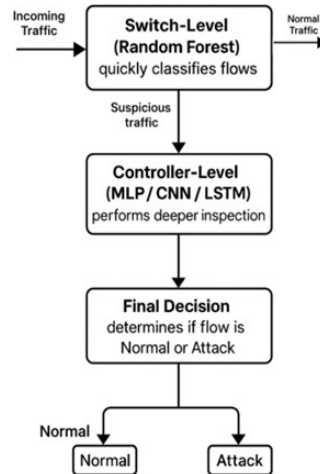


Figure 3. Hybrid two-stage detection pipeline integrating switch-level RF with controller-level deep learning models

In the first stage, switch-level detection is performed using a Random Forest (RF) model. Incoming traffic flows are initially classified as either normal or suspicious. Normal traffic is forwarded immediately, while suspicious flows are escalated to the controller for further analysis.

In the second stage, controller-level detection is conducted using one of the DL models (MLP, CNN, or LSTM). These models re-examine suspicious flows using the richer feature set available at the controller and produce the final classification (normal or attack).

The rationale for this hybrid model is threefold. First, efficiency is achieved by deploying RF at the switch, enabling rapid filtering and preventing controller overload. Second, accuracy is enhanced at the controller level, where DL models refine detection through deeper contextual feature analysis. Finally, the layered design implements a defense-in-depth strategy, improving scalability, robustness, and resilience against adversarial evasion.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The evaluation demonstrates three key insights. First, switch-level ML (RF) achieves near-perfect accuracy (99.95%) with minimal latency (0.0043 ms/sample), proving its suitability for edge filtering. Second,

controller-level DL models provide robustness, with CNN achieving the highest detection accuracy (96%) and strongest recall for attack traffic (0.98). Third, the hybrid RF→MLP pipeline represents a novel balance: it retains the rapid response of ML while enhancing reliability through DL contextual analysis.

A critical novelty lies in the latency–accuracy trade-off comparison across detection levels, which has been largely overlooked in the literature. Unlike DL-only models, which suffer from high computational overhead, the hybrid pipeline maintains negligible additional latency (0.26 ms/sample) while delivering defense-in-depth robustness. Furthermore, the elimination of false alarms — with perfect recall for normal traffic (1.00) — makes this framework uniquely practical for real-world SDN deployments, where false positives can disrupt legitimate services. These findings confirm that our approach is not only academically rigorous but also operationally viable, filling a key research and application gap.

4.1. Switch-Level Detection (ML Models)

At the switch level, three machine learning classifiers—Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), and Gradient Boosting (GB)—were evaluated using the five lightweight flow features (pktcount, bytecount, dur, flows, pktrate). The overall performance of the switch-level models is summarized in Table 2.

Table 2. Performance of switch-level machine learning models

Model	Accuracy (%)	Precision (Attack)	Recall (Attack)	F1-score (Attack)	Latency (ms/sample)
Logistic regression (LR)	73.5	0.68	0.60	0.64	0.00009
Gradient boosting (GB)	95.7	0.92	0.97	0.95	0.0016
Random forest (RF)	99.95	1.00	1.00	1.00	0.0043

In addition, the trade-off between accuracy and inference latency is illustrated in Figure 4.

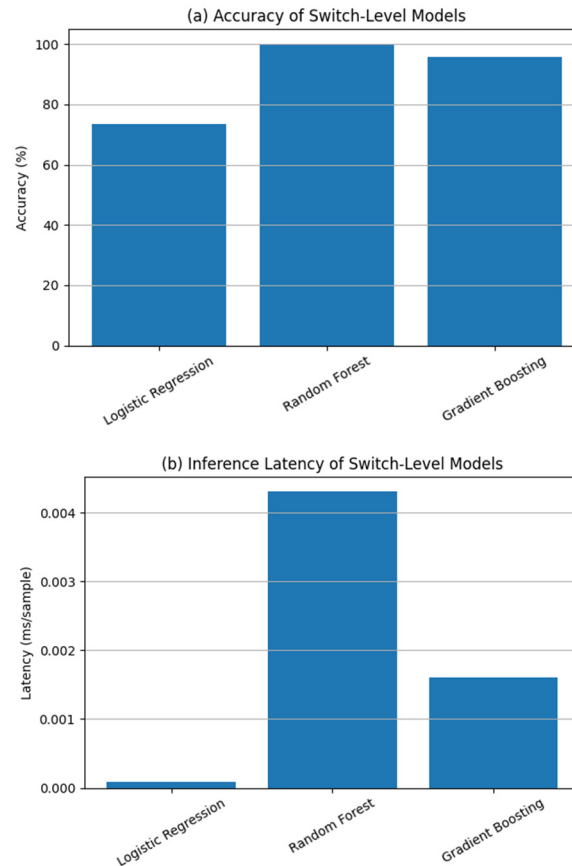


Figure 4. Performance comparison of switch-level machine learning models: (a) accuracy (%) and (b) inference latency per sample (ms)

Detailed classification reports for each model are presented in Table 3.

Table 3. Performance reports for Logistic regression, Random forest, and Gradient boosting at switch-level detection

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Normal (0)	0.76	0.82	0.79	19,069
Attack (1)	0.68	0.60	0.64	12,235
Accuracy	–	–	0.73	31,304
Macro Avg	0.72	0.71	0.71	31,304
Weighted Avg	0.73	0.73	0.73	31,304
Latency	–	–	0.000090 ms/sample	–

(a) Logistic regression (LR)

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Normal (0)	1.00	1.00	1.00	19,069
Attack (1)	1.00	1.00	1.00	12,235
Accuracy	–	–	1.00	31,304
Macro Avg	1.00	1.00	1.00	31,304
Weighted Avg	1.00	1.00	1.00	31,304
Latency	–	–	0.004337 ms/sample	–

(b) Random forest (RF)

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Normal (0)	0.98	0.95	0.96	19,069
Attack (1)	0.92	0.97	0.95	12,235
Accuracy	–	–	0.96	31,304
Macro Avg	0.95	0.96	0.96	31,304
Weighted Avg	0.96	0.96	0.96	31,304
Latency	–	–	0.001582 ms/sample	–

(c) Gradient boosting (GB)

4.2. Controller-Level Detection (DL Models)

Flows flagged as suspicious at the switch level were forwarded to the controller for deeper inspection. At this stage, three deep learning models were assessed: the Multi-Layer Perceptron (MLP), the Convolutional Neural Network (CNN), and the Long Short-Term Memory network (LSTM). These models were selected for their complementary strengths: MLP offers computational efficiency, CNN effectively captures local feature correlations, and LSTM is well suited for modeling temporal dependencies in network traffic. The performance comparison of these models is presented in Table 4.

Table 4. Performance of controller-level deep learning models

Model	Accuracy (%)	Normal precision	Normal recall	Attack precision	Attack recall	Notes
MLP	95	0.98	0.94	0.92	0.97	Strong baseline, balanced
CNN	96	0.99	0.95	0.93	0.98	Best accuracy, strong local feature learning
LSTM	95	0.98	0.94	0.91	0.96	Robust temporal modeling

The training curves for each model (Figures 5a–5c) demonstrate that all three converge without significant overfitting. CNN exhibits the smoothest convergence, consistent with its highest overall accuracy and recall.

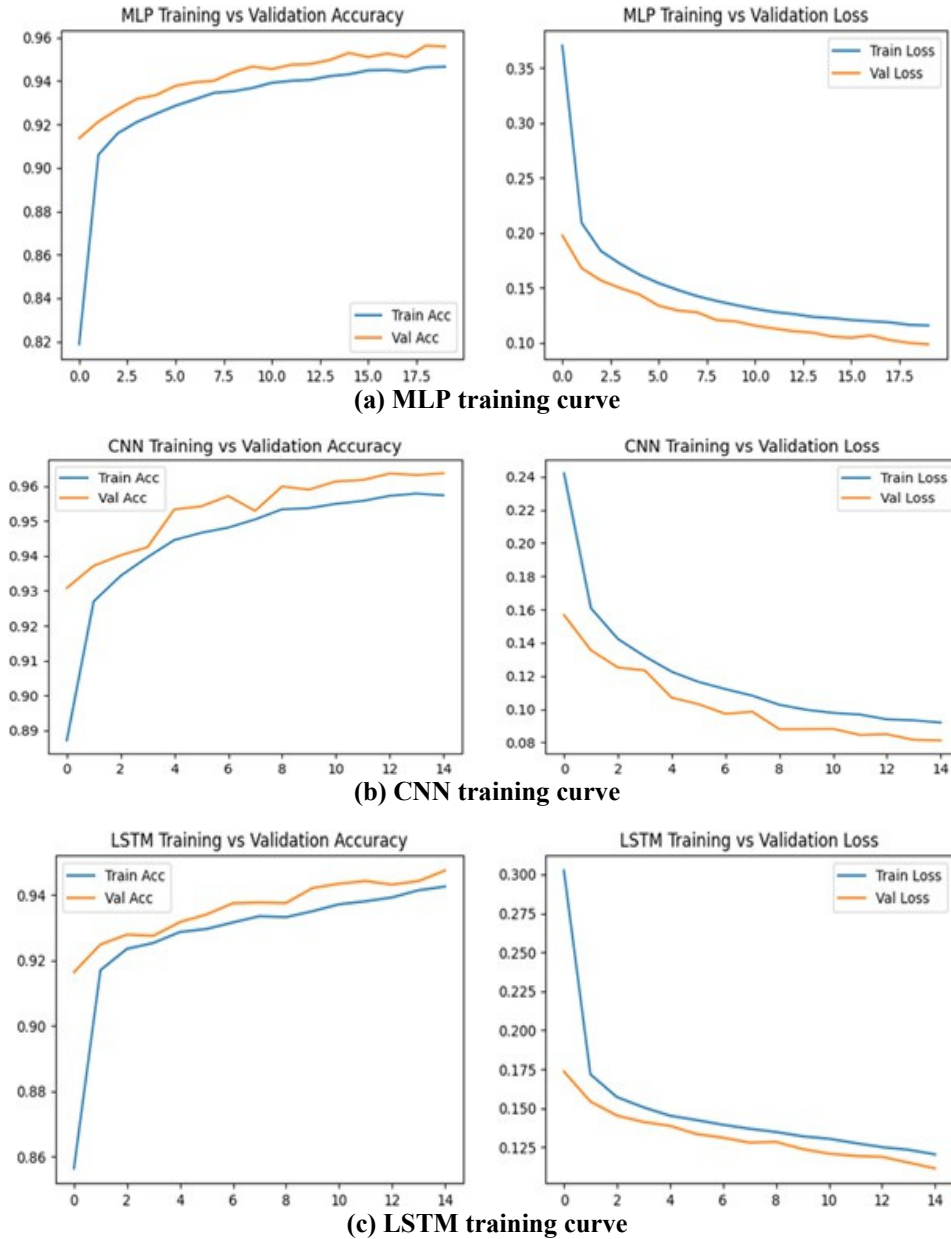


Figure 5. Training accuracy and loss curves for MLP, CNN, and LSTM model

As shown in Figure 6, the Multi-Layer Perceptron (MLP) achieved an accuracy of 95%, establishing it as an efficient and scalable baseline. The Convolutional Neural Network (CNN) attained the highest overall accuracy of 96% and demonstrated superior recall for attack traffic (0.98), highlighting its strength in capturing local feature patterns. The Long Short-Term Memory (LSTM) network matched the accuracy of the MLP (95%) while exhibiting greater robustness against temporal variations in network traffic.

In terms of model selection, while all three deep learning models are viable for controller-level detection, the MLP was adopted as the default classifier in the hybrid pipeline due to its balance between accuracy and computational efficiency. CNN and LSTM remain strong alternatives in contexts where maximum recall or temporal robustness is prioritized.

4.3. Hybrid Detection Pipeline (RF DL)

To leverage the hierarchical architecture of SDN, we combined the Random Forest (RF) model at the switch with the Multi-Layer Perceptron (MLP) at the controller to form a two-stage hybrid pipeline. Table 5 presents a comparison of switch-only, controller-only, and hybrid detection approaches.

Table 5. Comparative results: switch-only vs controller-only vs hybrid detection

Approach	Accuracy (%)	Precision (attack)	Recall (attack)	F1-score (attack)	Latency (ms/sample)
Switch-Only (RF)	99.95	1.00	1.00	1.00	0.0043
Controller-Only (MLP)	95.00	0.92	0.97	0.94	0.2500
Hybrid RF→MLP	98.70	1.00	0.97	0.98	0.2600

The hybrid performance evaluation (Table 6) demonstrates perfect recall for normal traffic (1.00), thereby eliminating false alarms, while also sustaining high recall for attack traffic (0.97).

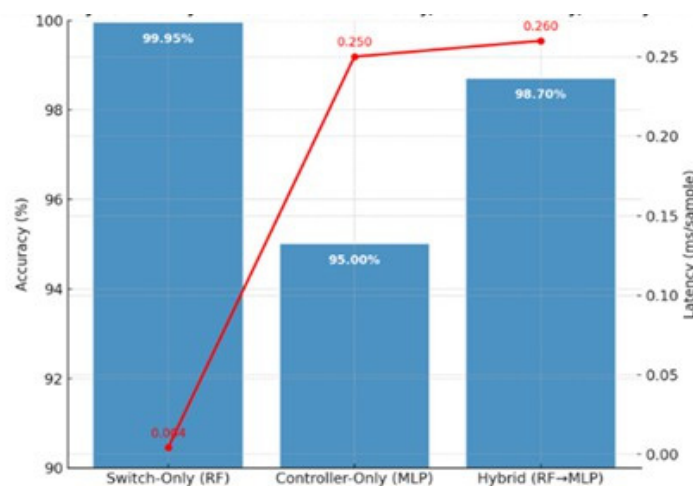
Table 6. Evaluation report for the hybrid RF→MLP pipeline

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Normal (0)	0.97	1.00	0.99	19,069
Attack (1)	1.00	0.97	0.98	12,235
Accuracy	—	—	0.98	31,304
Macro Avg	0.99	0.98	0.98	31,304
Weighted Avg	0.98	0.98	0.98	31,304

As illustrated in Table 6, the hybrid RF→MLP pipeline achieved an overall accuracy of 98.7%, closely approaching that of the switch-only RF model. Importantly, precision remained perfect (1.00), while normal recall (1.00) ensures that no legitimate flows were disrupted. Although attack recall was slightly lower (0.97), latency remained negligible at 0.260 ms/sample, confirming the feasibility of this approach for real-time deployment. Collectively, these results underscore the effectiveness of the hybrid pipeline in providing defense-in-depth by balancing scalability, speed, and reliability.

4.4. Accuracy–Latency Trade-Off

To further evaluate the practicality of the proposed approaches, accuracy and inference latency were compared across switch-only, controller-only, and hybrid detection strategies, as illustrated in Figure 6. The switch-only RF model achieved the highest accuracy (99.95%) with the lowest latency (0.0043 ms/sample). However, despite this near-perfect performance, a single-stage model inherently lacks robustness against dynamic traffic conditions, distribution shifts, and previously unseen attack patterns.

**Figure 6.** Comparison of accuracy and latency across switch-only, controller-only, and hybrid detection approaches

In contrast, the controller-only MLP exhibited lower accuracy (95%) and higher latency (0.250 ms/sample), making it less suitable for real-time deployment. The hybrid RF→MLP pipeline provided a balanced outcome, attaining 98.7% accuracy with negligible additional latency (0.260 ms/sample), while introducing a second validation layer for suspicious traffic.

Importantly, the objective of the hybrid architecture is not to maximize accuracy alone, but to enhance operational reliability through a defense-in-depth strategy. In real SDN environments, traffic behavior evolves continuously, and models trained on static datasets may suffer from performance degradation under unseen conditions. The hybrid design mitigates this limitation by combining fast edge-level filtering with deeper contextual analysis at the controller, thereby improving generalization and reducing the risk of critical misclassifications.

Overall, the hybrid system represents the most practical deployment strategy, as it (i) ensures high reliability with 98.7% accuracy, (ii) eliminates false alarms by achieving perfect recall for normal traffic (1.00), (iii) maintains robustness against attacks with a recall of 0.97, and (iv) preserves real-time feasibility with inference latency below 0.3 ms/sample.

Although the switch-only RF model achieves slightly higher accuracy, the hybrid pipeline provides significantly stronger robustness, stability, and resilience under realistic network conditions. Therefore, the proposed approach prioritizes operational reliability and safe deployment over marginal accuracy gains, which is a more appropriate objective in cybersecurity systems.

The current evaluation is based on benchmark datasets and simulation environments, which are widely adopted in SDN security research to ensure reproducibility, comparability, and controlled experimentation. This experimental setup enables fair evaluation across different detection strategies while isolating architectural and model-level contributions. However, real-world SDN deployments may introduce additional factors such as hardware constraints, network latency variations, controller overhead, and dynamic traffic fluctuations. Although these factors are beyond the scope of this study, they do not affect the validity of the proposed architectural design. Therefore, future work will focus on implementing and validating the proposed framework in real-world SDN testbeds (e.g., Mininet integrated with ONOS) to further assess scalability, deployment feasibility, and system performance under realistic network conditions.

5. CONCLUSION

This paper presented a novel hierarchical hybrid ML–DL framework for DDoS detection in SDN, explicitly exploiting the layered design of SDN. By deploying RF at the switch for lightweight, real-time detection and DL models at the controller for deeper contextual analysis, the proposed approach bridges the gap between speed and robustness. Experimental evaluation demonstrated that RF achieved near-perfect accuracy (99.95%) with extremely low latency (0.0043 ms/sample), making it well-suited for rapid detection at the edge. At the controller level, the Convolutional Neural Network (CNN) delivered the highest detection accuracy (96%) and strong recall for attack traffic (0.98), while the Multi-Layer Perceptron (MLP) provided a favorable trade-off between efficiency and robustness.

The hybrid RF→MLP pipeline emerged as the most practical configuration, combining the speed of switch-level detection with the robustness of controller-level analysis. It achieved 98.7% overall accuracy, eliminated false alarms (normal recall = 1.00), and maintained high recall for attack traffic (0.97), all while operating with negligible latency (0.26 ms/sample). These results confirm the effectiveness of defense-in-depth detection, ensuring scalability, reliability, and real-time feasibility.

While the current implementation focuses on binary classification, this design choice was made to prioritize real-time performance at the switch level. The proposed architecture can be naturally extended to multi-class classification at the controller level without modifying the pipeline structure.

The novelty of this work lies in three dimensions: (i) its unique defense-in-depth design that integrates ML at the edge with DL at the controller, (ii) its systematic latency–accuracy trade-off analysis rarely addressed in prior works, and (iii) its demonstration of real-world feasibility with zero false alarms. Beyond empirical results, the study contributes a novel architectural design that leverages SDN's hierarchical structure, offering an adaptable strategy against evolving and multi-vector DDoS threats. The findings also highlight that integrating lightweight ML with more complex DL models can provide an optimal balance between computational efficiency and detection accuracy.

Future work will focus on the following directions:

1. Extending the framework to multi-class DDoS detection for differentiating among specific attack types.
2. Validating the system in real-world SDN testbeds to assess deployment feasibility.
3. Integrating explainable AI (XAI) techniques to improve transparency and operator trust.
4. Investigating adversarial robustness and cross-domain adaptability to strengthen resilience against evolving attack strategies.

Overall, the novelty of this work lies in its defense-in-depth hybrid design that integrates fast ML-based edge filtering with contextual DL-based controller analysis, providing a scalable and efficient solution to modern DDoS detection in SDN.

6. REFERENCES

1. Almutairi, M. & Sheldon, F.T. (2025). IoT–Cloud integration security: A survey of challenges, solutions, and directions. *Electronics*, 14(7), 1394.
2. Yan, Q. & Yu, F.R. (2015). Distributed denial of service attacks in software defined networking with cloud computing. *IEEE Communications Magazine*, 53(4), 52-59.
3. Mirkovic, J. & Reiher, P. (2004). A taxonomy of DDoS attack and DDoS defense mechanisms. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 34(2), 39-53.
4. Dantas Silva, F.S., Silva, E., Neto, E.P., Lemos, M., Venancio Neto, A.J. & Esposito, F. (2020). A taxonomy of DDoS attack mitigation approaches featured by SDN technologies in IoT scenarios. *Sensors*, 20(11), 3078.
5. Hirs, A., Audah, L., Salh, A., Alhartomi, M.A. & Ahmed, S. (2024). Detecting DDoS threats using supervised machine learning for traffic classification in software defined networking. *IEEE Access*, 99, 166675-166703.
6. Xu, M., Fan, J., Huang, X., Zhou, C., Kang, J., Niyato, D. & Lam, K.Y. (2025). Forewarned is forearmed: A survey on large language model based agents in autonomous cyberattacks. *arXiv preprint arXiv:2505.12786*.
7. Gupta, B.B. & Dahiya, A. (2021). *Distributed denial of service (DDoS) attacks: Classification, attacks, challenges and countermeasures*. CRC Press, Boca Raton.
8. Bhatia, S., Behal, S. & Ahmed, I. (2018). Distributed denial of service attacks and defense mechanisms: Current landscape and future directions. In *Versatile Cybersecurity*, 55-97. Springer, Cham.
9. Shaar, F. & Efe, A. (2018). DDoS attacks and impacts on various cloud computing components. *International Journal of Information Security Science*, 7(1), 26-48.
10. Kaljic, E., Maric, A., Njemcevic, P. & Hadzialic, M. (2019). A survey on data plane flexibility and programmability in software defined networking. *IEEE Access*, 7, 47804-47840.
11. Zhang, Q.Y., Wang, X.W., Huang, M., Li, K.Q., & Das, S.K. (2018). Software defined networking meets information centric networking: A survey. *IEEE Access*, 6, 39547-39563.
12. Janabi, A.H., Kanakis, T. & Johnson, M. (2024). Survey: Intrusion detection system in software defined networking. *IEEE Access*, 12(99), 164097-164120.
13. Rahouti, M., Xiong, K., Xin, Y., Jagatheesaperumal, S.K., Ayyash, M. & Shaheed, M. (2022). SDN security review: Threat taxonomy, implications, and open challenges. *IEEE Access*, 10, 45820-45854.
14. Azam, Z., Islam, M.M. & Huda, M.N. (2023). Comparative analysis of intrusion detection systems and machine learning based model analysis through decision tree. *IEEE Access*, 11, 80348-80391.
15. Chen, Q., Zhang, W. & Lou, Y. (2020). Forecasting stock prices using a hybrid deep learning model integrating attention mechanism, multilayer perceptron, and bidirectional long short term memory neural network. *IEEE Access*, 8, 117365-117376.
16. Shethiya, A.S. (2024). Smarter systems: Applying machine learning to complex, real time problem solving. *Integrative Journal of Science and Technology*, 1(1).
17. Aladaileh, M.A., Anbar, M., Hasbullah, I.H., Chong, Y.W. & Sanjalawe, Y.K. (2020). Detection techniques of distributed denial of service attacks on software defined networking controller – A review. *IEEE Access*, 8, 143985-143995.
18. Bhayo, J., Jafaq, R., Ahmed, A., Hameed, S. & Shah, S.A. (2022). A time efficient approach toward DDoS attack detection in IoT network using SDN. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(5), 3612-3630.
19. Tan, L., Pan, Y., Wu, J., Zhou, J., Jiang, H. & Deng, Y. (2020). A new framework for DDoS attack detection and defense in SDN environment. *IEEE Access*, 8, 161908-161919.

20. Ali, T.E., Chong, Y.W. & Manickam, S. (2023). Machine learning techniques to detect a DDoS attack in SDN: A systematic review. *Applied Sciences*, 13(5), 3183.
21. Lima Filho, F.S.D., Silveira, F.A., de Medeiros Brito Junior, A., Vargas Solar, G. & Silveira, L.F. (2019). Smart detection: An online approach for DoS/DDoS attack detection using machine learning. *Security and Communication Networks*, 2019(1), 1574749.
22. Mohmand, M.I., Hussain, H., Ayaz, A., Ullah, U., Zakarya, M., Ahmed, A., Raza, M., Rahman, I. & Haleem, M. (2022). A machine learning based classification and prediction technique for DDoS attacks. *IEEE Access*, 10, 21443–21454.
23. Ali, T.E., Chong, Y.W. & Manickam, S. (2023). Comparison of ML/DL approaches for detecting DDoS attacks in SDN. *Applied Sciences*, 13, 3033.
24. Yungaicela-Naula, N.M., Vargas-Rosales, C. & Perez-Diaz, J.A. (2021). SDN-based architecture for transport and application layer DDoS attack detection by using machine and deep learning. *IEEE Access*, 9, 108495-108512.
25. Nugraha, B. & Murthy, R.N. (2020). Deep learning-based slow DDoS attack detection in SDN-based networks. In *Proceedings of IEEE NFV-SDN*, 51-56.
26. Wei, Y., Jang-Jaccard, J., Sabrina, F., Singh, A., Xu, W. & Camtepe, S. (2021). AE-MLP: A hybrid deep learning approach for DDoS detection and classification. *IEEE Access*, 9, 146810-146821.
27. Hosseini, S. & Azizi, M. (2019). The hybrid technique for DDoS detection with supervised learning algorithms. *Computer Networks*, 158, 35-45.
28. Zainudin, A., Ahakonye, L.A.C., Akter, R., Kim, D.S. & Lee, J.M. (2023). An efficient hybrid-DNN for DDoS detection and classification in software-defined IIoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(10), 8491-8504.
29. Sripriyanka, I.G. & Mahendran, A. (2024). Securing IoMT: A hybrid model for DDoS attack detection and COVID-19 classification. *IEEE Access*, 12, 17328-17348.
30. McClurg, J. (2021). Correct-by-construction network programming for stateful dataplanes. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM Symposium on SDN Research (SOSR)*, 66-79.
31. Ja'afreh, M.A., Adhami, H., Alchalabi, A.E., Hoda, M. & El Saddik, A. (2022). Toward integrating software defined networks with the Internet of Things: A review. *Cluster Computing*, 25(3), 1619-1636.
32. Vergara, M., Ramos, L., Rivera-Campoverde, N.D. & Rivas-Echeverria, F. (2023). Engine-FaultDB: A novel dataset for automotive engine fault classification and baseline results. *IEEE Access*, 11, 126155-126171.
33. Sahin, E.K. (2020). Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1308.
34. Ebrahimi, H., Mirbagheri, B., Matkan, A.A. & Azadbakht, M. (2022). Effectiveness of the integration of data balancing techniques and tree-based ensemble machine learning algorithms for spatially-explicit land cover accuracy prediction. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100785.
35. Namdari, A. & Durrani, T.S. (2021). A multilayer feedforward perceptron model in neural networks for predicting stock market short-term trends. *Operations Research Forum*, 2(3), 38.
36. Liu, Y., Pu, H. & Sun, D.W. (2021). Efficient extraction of deep image features using convolutional neural network (CNN) for applications in detecting and analysing complex food matrices. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 193-204.
37. Özdemir, C. (2023). Derin öğrenme modelleri ve veri ön işleme yöntemleri ile çeltik yaprak hastalıklarının erken teşhisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 807-817.
38. Nguyen-Duc, P., Nguyen, H.D., Nguyen, Q.H., Phan-Van, T. & Pham-Thanh, H. (2024). Application of long short-term memory (LSTM) network for seasonal prediction of monthly rainfall across Vietnam. *Earth Science Informatics*, 17(5), 3925-3944.
39. Korkmaz, C. ve Kacar, İ. (2024). Zaman serisinin kestirimi için uzun-kısa süreli bellek ağı yaklaşımı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 1053-1066.

Endüstriyel IoT Yaklaşımıyla RFID Etiketlerin Otomatik Testi: Lastik Üretiminde Kalite Kontrol Uygulaması

Hamdi ERDOĞAN ^{1,a}, Alperen ÜNLÜ ^{1,b}, Kerem KÜÇÜK ^{2,c}, Mehmet Zeki KONYAR ^{2,d}

¹IT Department, Prometeon Turkey Endüstriyel ve Ticari Lastikler A.Ş., Kocaeli, Türkiye

²Kocaeli Üniversitesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Umuttepe Kampüsü, Kocaeli, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8893-2165; ^bORCID: 0009-0005-8452-3072; ^cORCID: 0000-0002-2621-634X;

^dORCID: 0000-0001-8914-5553

Makale Bilgileri

Geliş : 04.08.2025

Kabul : 14.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757272

Sorumlu Yazar

Mehmet Zeki KONYAR

mzeki.konyar@kocaeli.edu.tr

Anahtar Kelimeler

RFID

Endüstriyel IoT

Kalite kontrol

Lastik üretimi

İzlenebilirlik

Atf şekli: ERDOĞAN, H., ÜNLÜ, A., KÜÇÜK, K., KONYAR, M.Z., (2026). Endüstriyel IoT Yaklaşımıyla RFID Etiketlerin Otomatik Testi: Lastik Üretiminde Kalite Kontrol Uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 433-443.

ÖZ

Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID) teknolojisi; üretim, lojistik, savunma ve tarım gibi sektörlerde operasyonel hız ve doğruluk sağlayan kritik bir çözümdür. Özellikle gerçek zamanlı veri erişimi gerektiren süreçlerde; envanter yönetimi, varlık takibi ve kalite izleme uygulamalarında stratejik rol oynamaktadır. Bu çalışma, lastik üretim sürecinde kullanılan RFID etiketlerinin işlevselliğini kalite kontrol aşamasında otomatik olarak test eden IIoT tabanlı bir yazılım çözümü sunmaktadır. Üretim hattındaki Tag4 etiketlerin okunabilirlik ve yazılabilirlik kontrolleri, Zebra MC3330xR el terminali için Zebra RFIDAPI3 kütüphanesi kullanılarak geliştirilen özel bir Android uygulamasıyla gerçekleştirilmiştir. Veri bütünlüğünü sağlamak amacıyla kodlama sürecinde ISO 20910 standardına uygun veri yapısı tercih edilmiştir. Performans analizleri sonucunda, belirlenen optimum sinyal seviyelerinde etiketlerin %90 başarı oranıyla doğrulanabildiği gözlemlenmiştir. Sektöre özgü geliştirilen bu sistem, düşük maliyetli ve taşınabilir yapısıyla üretim hattına entegre edilerek lastik üretiminde kalite güvencesini ve küresel izlenebilirliği artırmaktadır.

Automated Testing of RFID Tags through an Industrial IoT Approach: A Quality Control Application in Tire Manufacturing

Article Info

Received : 04.08.2025

Accepted : 14.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1757272

Corresponding Author

Mehmet Zeki KONYAR

mzeki.konyar@kocaeli.edu.tr

Keywords

RFID

Industrial IoT

Quality control

Tire manufacturing

Traceability

How to cite: ERDOĞAN, H., ÜNLÜ, A., KÜÇÜK, K., KONYAR, M.Z., (2026). Automated Testing of RFID Tags through an Industrial IoT Approach: A Quality Control Application in Tire Manufacturing. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 433-443.

ABSTRACT

Radio Frequency Identification (RFID) technology is a critical solution providing operational speed and accuracy in sectors such as manufacturing, logistics, defense, and agriculture. It plays a strategic role in inventory management, asset tracking, and quality monitoring, particularly in processes requiring real-time data access. This study presents an IIoT-based software solution designed to automatically test the functionality of RFID tags during the quality control stage of tire manufacturing. Readability and writability checks of Tag4 tags were conducted using a custom Android application developed with the Zebra RFIDAPI3 library for the Zebra MC3330xR handheld terminal. To ensure data integrity, a data structure compliant with the ISO 20910 standard was utilized during the encoding process. Performance analyses revealed that tags could be verified with a 90% success rate at determined optimum signal levels. This industry-specific, portable, and low-cost system enhances quality assurance and global traceability by integrating RFID testing into the production line.

1. GİRİŞ

Radyo Frekansı ile Tanımlama (RFID – Radio Frequency Identification) teknolojisi, otomatik tanımlama ve veri toplama (AIDC) sistemleri kapsamında değerlendirilen ve gerçek zamanlı izlenebilirlik, süreç otomasyonu ve dijital entegrasyon için kritik öneme sahip bir teknolojidir. Temassız veri iletimi, eşzamanlı çoklu etiket okuma ve zorlu çevre koşullarında dahi güvenilir çalışma gibi özellikleriyle RFID sistemleri, geleneksel barkod tabanlı çözümlere kıyasla önemli üstünlükler sunmaktadır [1]. Endüstri 4.0 ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi dijital üretim paradigmalarının yükselişiyle birlikte, RFID teknolojisinin karar destek sistemlerine entegrasyonu ve süreç odaklı dijital dönüşümdeki rolü daha da kritik hale gelmiştir [2,3].

Üretim sektörleri içinde lastik endüstrisi, ürün yaşam döngüsünün tamamında izlenebilirliğin stratejik önem taşıdığı alanlardan biridir. Lastik üretiminde Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IoT) yaklaşımıyla RFID etiketlerinin otomatik olarak test edilmesi, gelişmiş izleme ve takip teknolojilerinden yararlanarak kalite kontrolünü geliştirmektedir. Bu entegrasyon, gerçek zamanlı veri toplama ve analizine olanak tanıyarak lastik üretiminin sıkı kalite standartlarını karşılamasını sağlamaktadır.

Lastik içerisine pasif RFID etiketlerin entegre edilmesi, üretim sonrası süreçlerde ürünlerin uçtan uca takibini mümkün kılmakta; bu da yalnızca üretim şeffaflığını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda tedarik zinciri yönetimi, satış sonrası dijital hizmetler, garanti süreçlerinin takibi ve geri çağırma operasyonlarının etkin yönetimi gibi kritik işlemlere de katkı sunmaktadır [4]. Bu yönüyle RFID uygulamaları, operasyonel risklerin azaltılması ve uluslararası regülasyonlara uyum açısından da değer kazanmaktadır.

RFID sistemleri, üretim süreci boyunca ürünlerin takibini ve izlenmesini kolaylaştırarak veri şeffaflığını ve doğruluğunu artırmaktadır. Yüksek frekanslı (HF) ve ultra yüksek frekanslı (UHF) RFID sistemleri, lastik üretiminde kalitenin korunması için hayati önem taşıyan malzeme akışını izlemeyi sağlamaktadırlar [5]. Otomatik kalite kontrol sistemleri incelendiğinde, derin öğrenme kullananlar gibi otomatik muayene sistemlerinin [6,7] uygulanması, lastik kusurlarının tespit edilip sınıflandırılmasını sağlayarak kalite güvencesini artırmaktadırlar. Bu sistemler çeşitli kusurları tespit ederek üretim sürecinin genel güvenirliliğini artırırken ve israfı azaltmaktadırlar [8]. Fakat bu sistemler üretim hattının genelini takip etmek noktasında çözüm sunmazlar. Sadece son kullanıcıya gidecek ürünün kalite kontrolü için kullanılırlar. RFID ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu ise, lastik üretiminde kalite kontrolünü önemli ölçüde iyileştirirler. Fakat, ilk kurulum maliyetleri ve bu sistemleri yönetmek için nitelikli personel ihtiyacı gibi zorluklar, yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir. Bununla birlikte, verimlilik ve ürün kalitesi açısından potansiyel faydalar dikkate alındığında bu sistemler önemli avantajlar sağlamaktadırlar [9].

COVID-19 pandemisi, hammadde tedarik sorunları, enerji krizi ve jeopolitik belirsizlikler gibi küresel ölçekte yaşanan kırımlar, üretim sektörlerini dijital dönüşüm süreçlerini hızlandırmaya ve maliyetlerini optimize etmeye yöneltmiştir. Bu kapsamda, kurumlar yüksek lisanslama maliyetlerine sahip dış kaynaklı yazılım çözümleri yerine, esneklik, veri güvenliği ve toplam sahip olma maliyeti açısından avantaj sağlayan yerli ve kurum içi (lokal) geliştirilen uygulamalara yönelmektedir [10]. Lokal çözümler aynı zamanda organizasyonel bilgi birikiminin artmasına, sistemlerin özgün iş akışlarına daha hızlı adapte olmasına ve sürdürülebilir yazılım bakım süreçlerinin tesis edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışma kapsamında, lastik üretim süreçlerinde kullanılan pasif RFID etiketlerin üretim öncesi kalite kontrol aşamasında işlevselliğinin test edilmesine yönelik olarak geliştirilen bir mobil yazılım çözümü sunulmaktadır. Önerilen sistem, Android tabanlı Zebra MC3330xR RFID el terminali üzerinde çalışmakta olup, donanımsal RFID modülüne erişim için Zebra Technologies tarafından sağlanan RFIDAPI3 yazılım kütüphanesi kullanılmaktadır. Sistem; veri okuma ve yazma işlevlerini desteklemekte ve kalite kontrol süreçlerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Yazılımın tamamen şirket içi Ar-Ge kaynaklarıyla geliştirilmiş olması, lisans maliyetlerini ortadan kaldırmakta ve uygulamanın sektöre özgü ihtiyaçlara göre optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, üretim kalitesinin artırılmasına katkı sağlarken, üretim hatlarının dijital olgunluk düzeyini stratejik olarak ileri taşımaktadır.

Çalışmanın organizasyonu şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2’de RFID teknolojisine ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir. Bölüm 3’te projede kullanılan araçlar ve izlenen yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 4’te test aşamasında yapılan analizler doğrultusunda elde edilen bulgular sunulmuştur. Son olarak, sonuçlar bölümü ile çalışma tamamlanmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

RFID teknolojisi, başta envanter yönetimi, lojistik ve üretim olmak üzere pek çok alanda süreçlerin otomatikleştirilmesi, operasyonel verimliliğin artırılması ve hata oranlarının azaltılması açısından önemli avantajlar sunan, yaygın şekilde benimsenmiş bir izleme ve veri toplama sistemidir. Özellikle pasif RFID etiketleri, harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilmeleri sayesinde düşük maliyetli ve uzun menzilli çözümler sunarak geniş ölçekli uygulamalarda tercih edilmektedir. Nesnelerin tanımlanmasını ve konumlandırılmasını daha hızlı ve doğru hâle getiren bu teknoloji, karar destek mekanizmalarının dijitalleşmesinde ve süreç verimliliğinde önemli kazanımlar sağlamaktadır.

Kavurur'un çalışmasında, küçükbaş hayvanların çiftlik giriş-çıkışlarının otomatik ve doğru şekilde izlenebilmesi amacıyla bir RFID tabanlı takip sistemi geliştirilmiştir. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Hayvan Çiftliği'nde gerçekleştirilen saha uygulamasında, hayvanlara kulak veya ayak etiketleri takılarak RFID tanımlaması sağlanmış; sistem, Agrident ASR-550 RFID okuyucu, i5-6500 işlemcili bir dizüstü bilgisayar ve C# programlama dili ile oluşturulmuştur. Aynı anda birden fazla etiketi okuyabilen donanım nedeniyle, tekrar sayımı önlemek amacıyla yazılım düzeyinde özel algoritmalar geliştirilmiştir. Çalışma, hayvan hareketlerinin gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılarak hayvancılıkta RFID tabanlı otomatik veri toplama sistemlerinin etkinliğini gözler önüne sermektedir [11].

Güner ve çalışma arkadaşları tarafından hazır giyim sektöründe yürütülen bir başka araştırmada, RFID teknolojisinin üretim hatlarına entegrasyonunun ekonomik ve operasyonel etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, RFID kullanımının iş gücü maliyetlerinde düşüş, üretim hızında artış ve hata oranlarında azalma gibi somut faydalar sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, yatırım maliyetleri ile beklenen faydalar çeşitli ekonomik modeller aracılığıyla analiz edilmiş ve geri dönüş süreleri hesaplanarak firmalara teknoloji geçiş sürecinde karar destek sağlayacak veriler sunulmuştur. Bununla birlikte kalite kontrol süreçlerinde de iyileşmelerin raporlandığı belirtilmiştir [12].

Tosun ve arkadaşlarının çalışmasında ise depo ortamlarında nesnelerin konumlandırılmasına yönelik RFID sistemlerinin avantajları ve kısıtları kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. GPS teknolojisinin kapalı alanlarda sınırlı kalması nedeniyle, RFID'nin düşük maliyetli ve yüksek doğruluk sağlayan bir alternatif konum belirleme aracı olarak öne çıktığı vurgulanmıştır. Ayrıca, RFID ile IoT teknolojilerinin entegrasyonunun, depo otomasyon sistemlerinde süreç hızının ve veri yönetimi kalitesinin artırılmasında önemli rol oynadığı ifade edilmiştir [13].

Kaya'nın çalışmasında, Endüstri 4.0 odaklı depo yönetimi uygulamaları için en uygun RFID teknolojisinin belirlenmesine yönelik çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, frekans aralığı, okuma menzili, maliyet ve enerji tüketimi gibi teknik özellikler dikkate alınarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile karar analizi yapılmıştır. Seçilen teknoloji ile envanter doğruluğunun ve işlem hızının artırıldığı; depo içi süreçlerin otomasyonunun sağlandığı ve gerçek zamanlı izlenebilirliğin mümkün olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, RFID teknolojisinin Endüstri 4.0 ile uyumlu olarak depo verimliliğini artırmada stratejik bir araç olduğunu göstermektedir [14].

Buenrostro-Rocha ve arkadaşları, pasif UHF RFID etiketlerinin okuma menzilini artırmak amacıyla yenilikçi bir metamaterial anten tasarımı önermektedir. Geliştirilen etiketler, 64.7 metreye kadar okuma mesafesi sunarak bataryalı etiketlerin performansına yaklaşmakta ve konteyner, araç, uçak ve gemi gibi taşımacılık uygulamalarında kullanılabilirliği artırmaktadır. Bu teknolojik gelişme, lojistik ve taşımacılık sektörlerinde etkili takip sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [15].

Yangınlar ve Köksal tarafından gerçekleştirilen araştırmada, RFID teknolojisinin tedarik zinciri performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Uluslararası Nakliyeciler Derneği (UND) üyesi 85 firmadan 364 çalışan ile yapılan anket çalışması sonucunda, RFID'nin teknolojik, organizasyonel ve çevresel boyutları dikkate alınarak üç temel performans göstergesi (finansal, lojistik ve müşteri hizmetleri) üzerinde etkileri değerlendirilmiştir. SPSS yazılımı ile yapılan istatistiksel analizler sonucunda, teknolojik boyutun tüm performans kriterlerini olumlu etkilediği; organizasyonel boyutun lojistik ve müşteri hizmetleri performansını iyileştirdiği; çevresel boyutun ise özellikle finansal performans üzerinde bazı olumsuzluklar doğurabileceği saptanmıştır. Bu kapsamda, RFID teknolojisinin sadece operasyonel faydalarla sınırlı kalmayıp, dijital dönüşüm süreçlerine stratejik katkılar sunduğu anlaşılmaktadır [16].

Uzuner ve arkadaşlarının çalışmasında, RFID teknolojisi ile Arduino tabanlı otomasyon sistemlerinin birleştirildiği kompakt, güvenli ve çevre dostu bir akıllı otopark sistemi geliştirilmiştir. Üç sıra ve dört sütundan oluşan, toplamda 12 araçlık park alanına sahip bu sistemde; Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyici, DC motorlar, enkoderler, servo motorlar, MFRC522 RFID okuyucu ve 20x4 LCD ekran gibi donanımlar kullanılmıştır. Araçlar, 13.56 MHz frekansında çalışan RFID kartları ile tanımlanmakta, park yeri dolu olduğunda sistem kullanıcıya uyarı vermektedir. Bu sistem, hem karbon emisyonlarının hem de park arama süresinin azaltılmasına katkı sunmakta, aynı zamanda güvenlik ve kaynak verimliliği açısından da fayda sağlamaktadır [17].

Yılmaz ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, giyilebilir teknoloji ile entegre edilen RFID sensör etiketleri kullanılarak bireylerin vücut sıcaklıklarının takibi ve bir bulut yazılımı üzerinden risk analizi yapılması önerilmiştir. Çalışma, sadece sıcaklık verisine odaklanmayıp; yaş, cinsiyet ve kronik rahatsızlıklar gibi demografik verileri yapay zeka destekli bir risk skorlama sistemiyle birleştirerek salgın hastalıkların (örneğin COVID-19) erken teşhisinde düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu yaklaşım, RFID sistemlerinin sadece nesne tanımlama değil, aynı zamanda karmaşık veri analitiği ve erken uyarı sistemleri için de güçlü bir altyapı sunduğunu kanıtlar niteliktedir [18].

Gençoğlu, çalışmasında kablosuz haberleşme, IoT ve RFID sistemlerine yönelik üç bantlı bir Sierpinski Bowtie anten tasarımı önermiştir. Nelder-Mead Simplex algoritması ile optimize edilen bu yapı; 1.7, 3.4 ve 6.62 GHz frekanslarında rezonansa girmektedir. 3.4 GHz bandında ulaşılan 10 dBi kazanç ve %92 radyasyon verimliliği, tasarımın 5G ve uzun mesafeli iletişim sistemleri için uygunluğunu kanıtlamaktadır. Çalışmada yapılan parametrik analizler, fiziksel tasarım değişkenlerinin performansa etkisini inceleyerek kazanç ve geri dönüş kaybı arasındaki dengeyi optimize etmiştir. Araştırma, fraktal geometrilerin optimizasyonu ile yüksek hızlı veri iletimi için ideal bir model ortaya koymaktadır [19].

Özetlenen çalışmalar, RFID teknolojisinin farklı sektörlerdeki uygulanabilirliğini ve sağladığı operasyonel, ekonomik ve teknolojik faydaları açıkça ortaya koymaktadır. Hayvancılıktan lojistiğe, hazır giyimden depo otomasyonuna kadar geniş bir yelpazede yapılan araştırmalar; RFID'nin süreçleri dijitalleştirme, verimliliği artırma, izlenebilirlik sağlama ve karar destek sistemlerini güçlendirme konularında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bununla birlikte, söz konusu teknolojik kazanımların etkili bir şekilde elde edilebilmesi için uygulamaların sadece donanım düzeyinde değil, aynı zamanda yazılım altyapısı açısından da sektör ve ihtiyaçlara özgü olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Bu noktada, özellikle üretim sektörlerinde, RFID etiketlerinin sahaya entegrasyonu öncesinde işlevselliklerinin hızlı, güvenilir ve düşük maliyetli yöntemlerle test edilebilmesi kritik bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada önerilen mobil yazılım çözümü, literatürde tanımlanan bu gereksinimleri doğrudan karşılamakta; üretim süreci öncesi kalite kontrol adımlarını otomatikleştirerek RFID tabanlı sistemlerin saha başarımını artırmayı ve dijital dönüşüm süreçlerine somut katkılar sağlamayı hedeflemektedir.

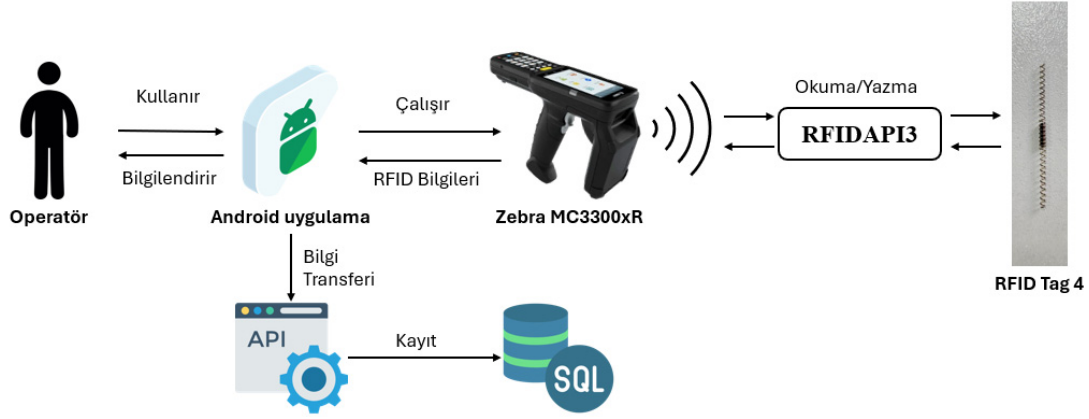
3. ÖNERİLEN SİSTEM VE BİLEŞENLERİ

Bu çalışmada sunulan sistem, lastik üretim süreçlerinde kullanılan pasif RFID etiketlerin üretim öncesi kalite kontrolüne yönelik olarak geliştirilmiş bütünsel bir yazılım ve donanım çözümüdür. Sistem, endüstriyel RFID uygulamaları için özelleştirilmiş Zebra MC3330xR RFID el terminali, lastik endüstrisine yönelik olarak tasarlanmış RFID Tag4 model etiketler, Android tabanlı mobil yazılım altyapısı ve ISO 20910 standardına uygun veri kodlama yapısıyla donatılmıştır. Geliştirilen çözüm, üretim sürecinde karşılaşılan RFID etiket performans farklılıklarını minimize etmek, yazma ve okuma güvenilirliğini artırmak ve etiket verilerinin sahada hızlı ve doğru şekilde yönetilmesini sağlamak amacıyla yapılandırılmıştır.

Sistem mimarisi, üç ana bileşenden oluşmaktadır: fiziksel donanım, yazılım uygulaması ve standartlara dayalı veri işleme katmanı. Donanım tarafında, MC3330xR cihazı yüksek hassasiyetli UHF RFID okuyucu motoru (İmpinj Indy R2000), uzun pil ömrü ve gelişmiş mobil işlem gücü ile hem veri toplama hem de analiz süreçlerinde yüksek performans sunmaktadır. Kullanılan RFID Tag4 etiketleri, ISO/IEC 18000-6C protokolüne uygun olarak çalışmakta ve vulkanizasyon, yüksek basınç ve kimyasal ortamlara karşı dayanıklı yapısıyla üretim hatlarında güvenli entegrasyon sağlamaktadır.

Yazılım katmanı, Zebra Technologies'in RFIDAPI3 yazılım geliştirme kütüphanesi ile entegre şekilde, Android Studio geliştirme ortamında yapılandırılmıştır. Bu yapı, cihazın donanım düzeyinde kontrolünü

mümkün kılarken, uygulama üzerinden kullanıcıya yönelik görsel geribildirimler ve kalite kontrol operasyonlarını yöneten mantıksal iş akışlarını barındırmaktadır. Okuma işlemleri sırasında alınan sinyal gücü işaretçisi (RSSI) tabanlı eşik değer kontrol mekanizması uygulanarak, yazma için en uygun mesafenin belirlenmesi sağlanmakta; bu da işlem güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca yazma işlemi, ISO 20910 standardına uygun şekilde yapılandırılmış sabit veri formatıyla gerçekleştirilmekte olup, kalite biriminin süreç takibini desteklemek üzere merkezi veri tabanına kayıt alınmaktadır.



Şekil 1. Önerilen sistemin mimarisi

Tüm bu bileşenler, saha operasyonlarında kullanıcı etkileşimini kolaylaştıran sezgisel bir arayüzle birleştirilmiş; kullanıcı hatalarını önleyici yönlendirmeler, durum bildirimleri ve işlem akış kontrol mekanizmaları aracılığıyla operatör verimliliği artırılmıştır. Geliştirilen sistem, yalnızca üretim öncesi test süreçlerine hizmet etmekle kalmayıp, aynı zamanda RFID etiketlerinin tüm yaşam döngüsündeki veri tutarlılığı ve izlenebilirliğine katkı sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Sistem mimarisine ait görsel Şekil 1’de verilmiştir.

3.1. Zebra MC3330xR El Terminali

Zebra Technologies Corp tarafından geliştirilen Zebra MC3330xR, Android tabanlı, dayanıklı ve ergonomik yapıya sahip bir UHF RFID el terminalidir. Perakende, sağlık, üretim ve lojistik gibi sektörlerde sahada veri toplama süreçlerini hızlandırmak ve kurumsal verimliliği artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Cihaz, Zebra Technologies’in Mobility DNA yazılım paketi ile birlikte gelmekte olup merkezi yönetimi kolaylaştırmakta ve kurumsal sistemlerle hızlı entegrasyon sağlamaktadır.

RFID’nin yanı sıra barkod okuma özelliği ile çift yönlü veri toplama imkânı sunan MC3330xR, 4 inçlik yüksek çözünürlüklü ekranı sayesinde eldivenle kullanıma uygun olup parlak ortamlarda dahi net görüntü sunar. Android 11 işletim sistemiyle güvenlik ve sistem sürdürülebilirliği açısından güncel bir altyapı sağlar. Sekiz çekirdekli 2.2 GHz Qualcomm Snapdragon 660 işlemcisi, 4 GB RAM ve 32 GB dahili hafızası ile güçlü performans sergiler.



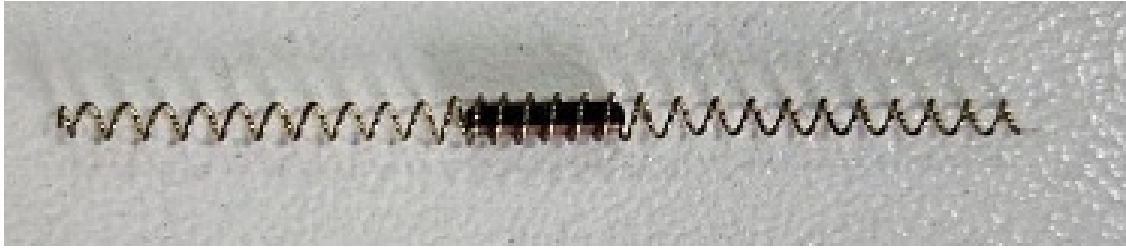
Şekil 2. Zebra MC3330xR

RFID performansı açısından, cihaz Impinj Indy R2000 motoru ve 1 W ERP gücünde entegre anteni ile ideal koşullarda 10 metreye kadar okuma menziline ulaşabilir. Tipik uygulamalarda bu mesafe 6 metre civarındadır ve saniyede yaklaşık 900 etiketi okuyabilmektedir. Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0 ve USB 2.0 gibi bağlantı seçenekleriyle donatılmış olan cihaz, 7000 mAh bataryası ile uzun süreli saha operasyonlarını destekler.

IP54 koruma sınıfına sahip olan MC3330xR, toz ve su sıçramalarına karşı dayanıklıdır. Zebra'nın Android uyumlu RFID yazılım geliştirme kiti (SDK) ve özellikle RFIDAPI3 kütüphanesi, geliştiricilere RFID verilerini okuma, yazma ve yönetme konularında kapsamlı kontrol sunar. Bu özellikler, özelleştirilmiş endüstriyel uygulamaların hızlı ve etkin biçimde geliştirilmesini mümkün kılar. Sistemde kullanılan cihaza ait görsel Şekil 2'de verilmiştir.

3.2. RFID Tag4

Lastik üretiminde ürün takibi, kalite kontrol ve lojistik verimliliği artırmak amacıyla RFID teknolojisi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Hana Technologies'in lastik endüstrisine özel geliştirdiği RFID Tag4 etiketleri tercih edilmiştir. Tag4, her lastiğe benzersiz bir kimlik kazandırarak üretimden sevkiyata kadar izlenebilirlik sağlar. Üretim verilerine anlık erişim, kalite sorunlarında geriye dönük takip ve otomasyon kararlarında doğrudan veri kullanımı mümkündür. Etiketlerin lastiğin iç yüzeyine entegre edilmesi ise hem koruma hem de uzun ömür sunar. Bu teknolojiyle ürün bazlı takip sağlanarak üretim, depo ve satış sonrası süreçler daha etkin yönetilebilmektedir. Etikete ait görsel Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Sistemde kullanılan RFID Tag4

RFID Tag4, EPCglobal Class 1 Gen 2 / ISO 18000-6C standartlarına uygun, pasif UHF tipinde bir etikettir. Impinj Monza yongası ile düşük enerji tüketimi ve yüksek okuma performansı sunar. 860–960 MHz frekans aralığında çalışır ve anten/ortam koşullarına bağlı olarak 4–6 metre, bazı durumlarda 8 metreye kadar okuma mesafesine ulaşır. -40 °C ila +85 °C sıcaklıklara dayanıklıdır; vulkanizasyon gibi zorlu üretim koşullarına karşı geliştirilmiştir. Etiket yaklaşık 30×12 mm boyutlarındadır, 0.2–0.3 mm kalınlığında olup lastik katmanlarına gömülebilecek yapıdadır. Suya, yağa ve kimyasallara dirençlidir. Anten tasarımı ise UHF bandında yüksek verimlilik ve mekanik dayanıklılık sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

3.3. RFIDAPI3 Yazılım Geliştirme Kiti

Zebra RFIDAPI3, Zebra Technologies tarafından geliştirilen ve Android işletim sistemi üzerinde çalışan mobil cihazlar için tasarlanmış bir yazılım geliştirme kitidir. Bu API, özellikle Zebra'nın RFD8500, RFD2000 ve MC3330xR gibi UHF RFID okuyucu cihazlarıyla entegrasyon sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. RFIDAPI3, geliştiricilere cihazların kontrolü, veri toplama, envanter yönetimi ve etiket programlama gibi işlevleri gerçekleştirme imkanı sunar. Ayrıca, bu API, uygulama geliştiricilerin RFID okuyucularla etkileşim kurmasını kolaylaştırarak, özelleştirilmiş çözümler oluşturmaya olanak tanır. Zebra RFIDAPI3, perakende, lojistik, sağlık ve üretim gibi çeşitli sektörlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve bu sektörlerdeki mobil uygulamaların RFID teknolojisiyle entegrasyonunu kolaylaştırır.

Zebra RFIDAPI3, Android cihazlar için optimize edilmiş Java tabanlı bir API'dir. RFID okuyucularla Bluetooth veya USB üzerinden iletişim kurarak etiket okuma, yazma, envanter yönetimi ve anten yapılandırması gibi işlevleri destekler. Asenkron olay işleme sayesinde etiket verilerini gerçek zamanlı alabilir. Modüler yapısı, sadece gerekli bileşenlerin entegre edilmesini sağlar, bu da uygulama boyutunu azaltır. Yüksek okuma hızı sunar ve Zebra'nın kapsamlı dokümantasyonu sayesinde kolayca entegre edilebilir.

3.4. ISO 20910 Standardı

ISO 20910 standardı, otomatik tanımlama ve veri yakalama teknolojileri kapsamında RFID sistemlerinde kullanılmak üzere benzersiz tanımlayıcıların yapılandırılmasını ele alır [20]. Standardın temel amacı, farklı sektörlerde, üreticilerde ve coğrafyalarda RFID etiketleriyle donatılmış nesnelerin küresel olarak tekil bir biçimde tanımlanmasını sağlamaktır. Bu, özellikle tedarik zinciri, envanter yönetimi, lojistik ve üretim takibi gibi uygulamalarda, farklı veri sistemlerinin birlikte çalışabilmesini (interoperability) mümkün kılar. ISO 20910, nesnelerin yaşam döngüsü boyunca takip edilebilmesini sağlarken, aynı zamanda RFID etiket verilerinin anlamlı, güvenli ve standartlaştırılmış bir şekilde yorumlanmasını da garanti eder.

Teknik olarak ISO 20910, benzersiz tanımlayıcıların bileşenlerini (örneğin, üretici kimliği, nesne sınıfı, seri numarası) ve bunların nasıl yapılandırılacağını belirler. Bu yapıların oluşturulmasında hiyerarşik adresleme mantığı kullanılır. Standart, EPCglobal tarafından geliştirilen Electronic Product Code (EPC) mimarisiyle tam uyumludur ve EPC URI formatlarını destekler. Böylece RFID ile tanımlanan her bir nesne hem yerel sistemler hem de internet tabanlı sistemler üzerinden sorgulanabilir hale gelir. Ayrıca ISO 20910, verinin yalnızca RFID çipi üzerindeki bellekte değil, sistem düzeyinde de nasıl işlenmesi gerektiğine dair metodolojiler sunmaktadır. Bu, veri bütünlüğü, izlenebilirlik ve güvenlik açısından kritik öneme sahiptir. RFID altyapısında bu standardın uygulanması, veri tekilliği, kimlik doğrulama ve sahteciliği önleme gibi yüksek düzeyde operasyonel avantajlar sağlar. Projede RFID etiket içerisinde yazılan bilgi ISO 20910 standardına uygun olarak kodlanmıştır.

3.5. Kalite Kontrol Uygulaması

Üretimde kullanılan RFID etiketlerden örneklem yolu ile her 3000 adet RFID tag bulunan bobinlerden 2 şer tane alarak etiketlerin okunabilir ve kodlanabilir olup olmadığı kontrol edilmektedir. Bu sayede tedarikçilerden alınan RFID etiketlerin üretimde probleme neden olmaması için kontrol edilmiş olur. Her bir etiket lastik hamuru ile kaplıdır. Bu durum etiketin okunma performansını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle okuma testleri yapılarak yazma işlemi için en uygun RSSI değeri ölçülmüştür. Okuma ve yazma testleri için Android tabanlı Zebra MC3300xR cihazında çalışabilecek Android proje geliştirilmiştir. Uygulama ile etikete yazılacak bilgi ISO 20910 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Bilgi içerisindeki lastik detayları sabittir ve üretimde karışıklığa neden olmayacak şekilde belirlenmiştir. RFID içerisindeki test bilgisi üretimdeki RFID yazma istasyonlarında etiketin gömülü olduğu lastiğin bilgileri ile tekrar kodlanmaktadır.

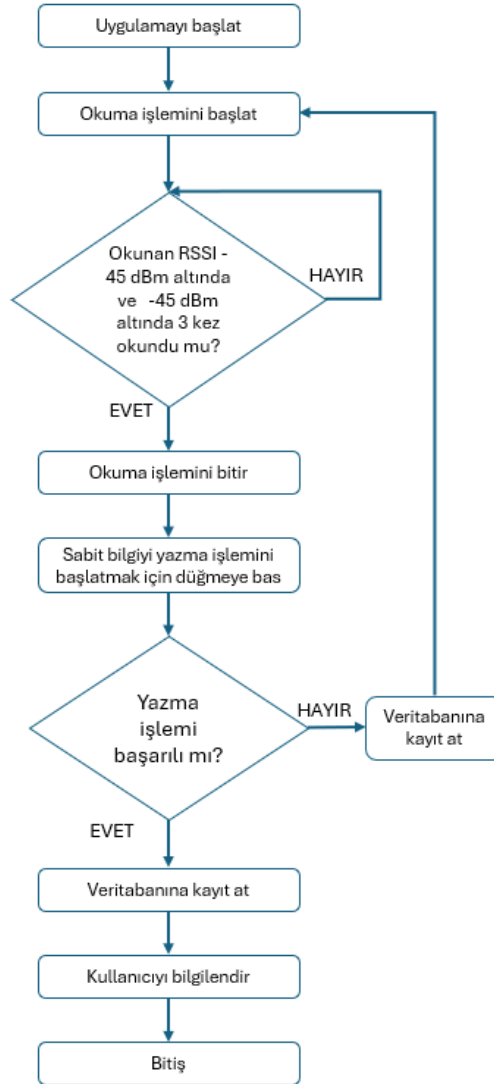
Yazılım Android Studio geliştirme ortamında yazılmıştır. Zebra MC3300xR Android 11 işletim sistemine sahip olduğu için minimum sdk 30 olarak belirlenmiştir. Başarılı yazma oranını yüksek tutmak için optimum RSSI değeri -45 dBm olarak belirlenmiştir.

Geliştirilen uygulamanın kullanıcı dostu ve kolay kullanılabilir olması göz önüne alınarak, karmaşık olmayan ve animasyonlar ile güzelleştirilen bir arayüz geliştirilmiştir. Uygulamanın doğru kullanımı için ekranda uyarılar mevcuttur. Uygulama açıldıktan sonra etiket okutulması beklenmektedir. Kullanıcı etiketi okutmak için Zebra MC3300xR cihazındaki tetiğe basmak zorundadır. Tetiğe basıldığı sürece okuma devam eder. Eğer etiket okunmadan tetik bırakılırsa, kullanıcı etiket okutulması için uyarılmaktadır. Ayrıca etiket okunmadan yazma işlemi denendiğinde de kullanıcı uyarılmaktadır. Okuma işlemi başladığında RSSI değeri belirlenen eşik değerinin altına indiğinde ve bu değer 3 kez arka arkaya okunduğunda okuma otomatik olarak durur, okunan bilgi ekranda belirlenen alana yazılır ve kullanıcı bilgilendirilir. RSSI eşik değeri ve 3 kez arka arkaya eşik değeri içerisinde veri okunma koşulunun konulmasının sebebi daha optimum bir yazma uzaklığının belirlenmesi içindir.

Okuma işlemi tamamlandıktan sonra yazma işlemine geçilir. Yazma işlemi için sabit bir bilgi ISO 20910 standardına uygun bir şekilde oluşturulmuştur. Kullanıcı yazma işlemini başlatır. RFIDAPI3 kütüphanesi ile bilgi etiket içerisine yazılır. İşlem başarılı ya da başarısız ise kullanıcı bilgilendirilir. Yapılan bu işlem kalite biriminin raporlarında takip edebilmesi için veri tabanına kaydedilir. Bir sonraki işlem için arayüzdeki bilgiler varsayılan ayarlarına çevrilir. Uygulamanın tasarımına ait görsel Şekil 4'te, operasyonel adımlar ile ilgili akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Önerilen sistem uygulamasının ana sayfası



Şekil 5. Önerilen sistemin akış diyagramı

3.6. Veri Transferi İçin API Entegrasyonu

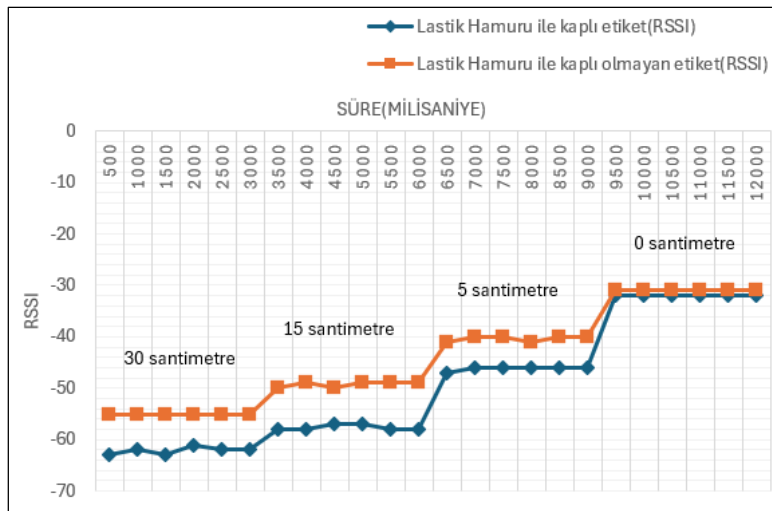
Android uygulamalarının merkezi bir SQL veritabanı ile güvenli şekilde veri alışverişi yapabilmesi için genellikle RESTful API'ler kullanılmaktadır. Geliştirdiğimiz projede, Zebra MC3300xR RFID el terminali üzerinde çalışan Android uygulama, RFID etiketi okuma veya yazma işlemi sonrasında sonucu bir Web API aracılığıyla SQL Server'a iletmektedir. API, işlem detaylarını (tarih, cihaz kimliği, işlem sonucu ve yazılan bilgi) veritabanına kaydederken, hata durumlarında da ilgili log verilerini kaydederek izlenebilirlik ve hata analizine olanak tanımaktadır. Bu yapı, sistemin güvenilirliğini artırırken bakım ve takip süreçlerini de kolaylaştırmaktadır.

4. SİSTEM PERFORMANS ANALİZİ

Bu çalışmada, RFID sistemlerinin performansını etkileyen temel parametrelerden biri olan RSSI değerlerinin, etiketin fiziksel yapısından nasıl etkilendiği deneysel olarak analiz edilmiştir. Özellikle, lastik hamuru ile kaplanmış RFID etiketlerin sinyal gücü üzerindeki etkisi incelenmiş ve referans olarak aynı niteliklere sahip ancak kaplanmamış etiketlerle karşılaştırmalı ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, Zebra MC3300xR model RFID okuyucu cihazı kullanılarak veri toplanmıştır. Cihaz, saniyede iki kez okuma yapacak şekilde bir Android tabanlı uygulama aracılığıyla konfigüre edilmiştir. Test senaryolarında, RFID okuyucu ile etiket arasındaki mesafe kademeli olarak 30 cm, 15 cm, 5 cm ve 0 cm (temas mesafesi) olacak şekilde ayarlanmış ve her bir mesafede sinyal gücü değerleri kaydedilmiştir. Bu süreç hem lastik hamuru ile kaplı hem de kaplı olmayan etiketler için aynı koşullarda tekrarlanmıştır. Bu sayede, yalnızca etiketin fiziksel durumuna bağlı olarak oluşabilecek sinyal farklılıklarının izole edilmesi amaçlanmıştır.

Elde edilen deneysel veriler, Şekil 6'da zaman serisi grafiği olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, mesafe ve kaplama materyali ile RSSI değerleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir. Mesafe etkisi göz önüne alındığında, okuyucu etikete yaklaştıkça her iki etiket türünde de RSSI değerleri yükselmiştir. 30 cm mesafede -55 dBm ile -65 dBm bandında seyreden değerler, 0 cm mesafede her iki etiket için de yaklaşık -30 dBm seviyesinde stabilize olmuştur. Bu durum, yakın alan etkileşimin başladığı noktalarda materyal sönümleme etkisinin azaldığını göstermektedir. Materyal sönümleme analizinde, 30 cm ile 5 cm arasındaki tüm ölçüm aralıklarında lastik hamuru ile kaplı etiket, kaplı olmayan etikete kıyasla ortalama 7 ila 10 dBm daha düşük bir performans sergilemiştir. Örneğin, 15 cm mesafede kaplı olmayan etiket -50 dBm civarında kararlı bir sinyal üretirken, kaplı etiket -60 dBm seviyelerine gerilemiştir. Bu fark, lastik hamurunun elektromanyetik dalgalar üzerinde bir bariyer görevi görerek sinyal yayılımını sönümlediğini ve yansıma kayıplarına neden olduğunu kanıtlamaktadır. Temas noktası davranışında, grafikteki en dikkat çekici bulgu, 9000 milisaniyeden itibaren iki veri setinin birbirine çok yaklaşmasıdır. Okuyucu ile etiket arasındaki hava boşluğu ortadan kalktığından, materyal kaynaklı kayıpların etkisi minimize olmuş ve sistemler maksimum kazanç noktasına ulaşmıştır.



Şekil 6. Farklı mesafelerde ve farklı tipte RFID etiketlerine ait ölçülen RSSI değerleri

Bu bulgu, RFID sistemlerinin özellikle lastik gibi elektromanyetik dalgaları soğurma özelliğine sahip malzemelerle birlikte kullanıldığı senaryolarda sinyal kalitesinde düşüş yaşanabileceğini göstermesi açısından kritik öneme sahiptir. Etiket kaplaması, sistemin okuma doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkileyerek, endüstriyel uygulamalarda dikkatle ele alınması gereken bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmada sunulan deneysel verilerin güvenilirliğini doğrulamak amacıyla Çizelge 1’de her iki etiket türü için kapsamlı bir belirsizlik analizi sunulmuştur. Şekil 6’da yer alan zaman serisi verileri üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda; lastik hamuru ile kaplı etiketler için ortalama sinyal gücü -50.12 dBm, kaplı olmayan referans etiketler için ise -43.12 dBm olarak saptanmıştır. %95 güven düzeyinde (confidence level) gerçekleştirilen analizler, kaplı etiketlerde ölçüm belirsizliğinin ± 4.86 dBm sınırı ile [-54.98, -45.27] dBm bandında kaldığını; kaplı olmayan etiketlerde ise belirsizliğin ± 3.81 dBm ile [-46.94, -39.31] dBm aralığında olduğunu kanıtlamaktadır. Bu istatistiksel veriler, materyal sönümlemesine rağmen sistemin her iki kondisyonda da yüksek kararlılıkla çalıştığını ve belirlenen eşik değerlerin bilimsel bir temele dayandığını göstermektedir.

Sistem performansının değerlendirilmesinde kullanılan -45 dBm eşik değeri, hesaplanan bu güven aralığının üst sınırına yakın seçilerek, materyal kaynaklı belirsizliklerin ve anlık sinyal dalgalanmalarının (standart sapma: 11.53 dBm) operasyonel hatalara yol açması engellenmiştir. Ölçümlerdeki varyasyonun temel kaynağı olarak lastik hamurunun dielektrik sönümleme etkisi ve ortamdaki elektromanyetik gürültü belirlenmiş; ancak 3 kez ardışık doğrulama algoritması sayesinde bu belirsizliklerin sistem üzerindeki etkisi minimize edilerek %90’lık bir doğrulama başarıları tesis edilmiştir.

Çizelge 1. RSSI istatistiksel belirsizlik analizi

Parametre	Lastik hamuru ile kaplı etiket	Lastik hamuru ile kaplı olmayan etiket
Örnekleme sayısı	24	24
Ortalama RSSI	-50.12 dBm	-43.12 dBm
Standart sapma	11.53 dBm	9.07 dBm
Standart hata	2.35 dBm	1.85 dBm
%95 güven aralığı	[-54.98, -45.27]	[-46.94, -39.31]

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, lastik endüstrisinin zorlu üretim koşullarına yönelik, ISO 20910 standartlarıyla uyumlu ve RSSI tabanlı bir kalite kontrol mobil yazılımı geliştirilmiştir. Deneysel bulgular ve sistemin literatürdeki yeri şu başlıklar altında değerlendirilmiştir. Yürütülen testler, lastik hamuru ile kaplı RFID etiketlerin okuma performansının kaplanmamış etiketlere kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan ölçümler doğrultusunda, sistemin en yüksek verimle çalıştığı RSSI eşik değeri -45 dBm olarak belirlenmiştir. Toplam 50 RFID etiketi üzerinde gerçekleştirilen testlerde, %90 başarı oranı elde edilmiş ve geliştirilen sistemin saha koşullarında güvenilir şekilde çalıştığı gösterilmiştir.

Literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmı; RFID teknolojisini nesne takibi, otopark otomasyonu veya konumlandırma süreçlerinde bir veri taşıyıcı olarak kullanmaya, etiketleri giyilebilir teknolojilere entegre ederek bireysel sağlık takibi ve salgın yönetimi için erken uyarı sistemleri kurgulamaya veya depo yönetimindeki lojistik süreçlere odaklanmaktadır. Bu çalışmanın temel farkı ise; RFID’yi doğrudan materyal etkisini inceleyen, etiketin işlevselliğini ölçen bir kalite kriteri ve işlem güvenilirliği parametresi olarak değerlendirerek, lastik üretiminin vulkanizasyon öncesi aşamasındaki fiziksel zorluklardan kaynaklanan sektörel bir problemi çözmesidir. Ayrıca uygulamanın tamamen kurum içi kaynaklarla geliştirilmesi, dışa bağımlılığı azaltarak maliyet avantajı sağlamış, aynı zamanda sürdürülebilir yazılım geliştirme süreçlerine katkı sunmuştur. Elde edilen bulgular kalite birimi tarafından uygun bulunmuş ve uygulamanın üretim sürecine entegrasyonu onaylanmıştır.

6. KAYNAKLAR

1. Gomes, H., Navio, F., Gaspar, P.D., Soares, V.N. & Caldeira, J.M. (2023). Radio-frequency identification traceability system implementation in the packaging section of an industrial company. *Applied Sciences*, 13(23), 12943.

2. Zhang, Y., Lin, Y. & Esfahbodi, A. (2025). Digital transformations of supply chain management via RFID technology: A systematic literature review. *Journal of Digital Economy*, 4, 251-267.
3. Kutay, E. (2016). Endüstride nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 16(1), 35-102.
4. Ercan, T. ve Kutay, M. (2016). Endüstride nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 599-607.
5. Dastres, R., Soori, M. & Asamel, M. (2022). Radio frequency identification (RFID) based wireless manufacturing systems, a review. *Independent Journal of Management & Production*, 13, 258-290.
6. Saleh, R.A., Al-Areqi, F., Konyar, M.Z., Kaplan, K., Oengir, S. & Ertunc, H.M. (2024). Advancing tire safety: Explainable artificial intelligence-powered foreign object defect detection with exception networks and grad-cam interpretation. *Applied Sciences*, 14(10), 4267.
7. Saleh, N.A., Konyar, M.Z., Kaplan, K., Ongir, S. & Ertunç, H.M. (2022). Detection of air bubbles from tire shearography images. In *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 1-4. IEEE.
8. Mignot, T., Ponchon, F., Derville, A., Duffner, S. & Garcia, C. (2024). An automatic inspection system for the detection of tire surface defects and their severity classification through a two-stage multimodal deep learning approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-19.
9. Gowda, V.D., Dakshayini, G., Singh, S., Srinivas, V., Rani, R. & Gireesh, N. (2024). A novel approach to enhancing manufacturing efficiency and quality control with industrial IoT. In *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, 396-404. IEEE.
10. Saray, G. ve Ervural, B. (2025). Üretimde dijital dönüşümün başarısını değerlendirmek için performans ölçmeye yönelik bir yaklaşım. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 266-284.
11. Kavurur, A. (2023). RFID tabanlı hayvan sayım sistemi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi (UTBD)*, 15(2), 59-63.
12. Güner, M. ve Acar, E. (2022). Hazır giyim sektöründe üretim süreçlerine RFID teknolojisinin entegrasyonu ve yatırım değerlendirmesi. *Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology*, 24(2), 690-699.
13. Tosun, H.C. ve Zaim, A.H. (2023). RFID sistemleri ile depo yönetim sistemlerinde konum belirlemede kullanılacak yöntem ve teknolojilere genel bakış. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(44), 27-39.
14. Taşkın, E., Gezik, N., Yumuşak, R. ve Eren, T. (2022). Depo yönetiminde Endüstri 4.0 uygulaması: Bir işletme için RFID teknoloji seçimi. *Endüstri Mühendisliği*, 33(1), 194-211.
15. Buenrostro-Rocha, S., Medina-Monroy, J.L. & Herrera-Charles, R. (2024). Passive UHF RFID tag achieving read ranges comparable to Battery-Assisted Passive tags for containers, vessels, vehicles, and aircraft applications. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 37(5), e3299.
16. Yangınlar, G. ve Köksal, C. (2022). Radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisinin tedarik zinciri performansına etkileri: Lojistik endüstrisinde bir vaka çalışması. *Verimlilik Dergisi, (Dijital Dönüşüm ve Verimlilik)*, 91-109.
17. Uzuner, S. & Çelebi, F.M. (2024). RFID cartesian smart parking lot system. *Inspiring Technologies and Innovations*, 2(2), 21-25.
18. Yılmaz, R., Tamer, Ö., Kut, R.A. & Fidan, N. (2023). Body temperature related risk factor assessment using RFID sensor tags. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 38(2), 585-592.
19. Gençoğlu, D.N. (2024). A case study of nelder mead simplex optimization algorithm: Trade-offs of sprienski fractal bowtie antenna parameters. *Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering*, 39(1), 73-84.
20. International Organization for Standardization (ISO), (2019). *Information technology - Harmonization of data interchange standards for information modeling (ISO Standard No. 20910)*.



Karbon/Kenevir/Polipropilen Hibrit Kompozitlerde Katman Diziliminin Mekanik ve Hasar Davranışına Etkisi

Burak ÖZTAŞ^{1,a}, Gaye KAYA^{1,b}, Banu YILMAZ AKYÜREK^{2,c}, Tuğrul AKSOY^{1,d}

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

²Mersin Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Tekstil ve Moda Tasarımı Bölümü, Mersin, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8789-155X; ^bORCID: 0000-0003-1866-4799; ^cORCID: 0000-0003-3526-5343;

^dORCID: 0009-0000-0615-675X

Makale Bilgileri

Geliş : 31.03.2026

Kabul : 21.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1919970

Sorumlu Yazar

Burak ÖZTAŞ

burakoztas46@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Hibrit kompozitler

Kenevir lifi

Karbon lifi

Katman dizilimi

Ultrasonik hasar analizi

Atıf şekli: ÖZTAŞ, B., KAYA, G., YILMAZ AKYÜREK, B., AKSOY, T., (2026). Karbon/Kenevir/Polipropilen Hibrit Kompozitlerde Katman Diziliminin Mekanik ve Hasar Davranışına Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 445-456.

ÖZ

Bu çalışmada Karbon/Kenevir/Polipropilen dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hibrit kompozitlerin özellikleri, atkı ve çözgü yönlerinde gerçekleştirilen 3-nokta eğme ve çentiksiz Charpy darbe testleri ile belirlenmiştir. Eğme testi sonrası kompozit yapılarda oluşan iç hasarların belirlenmesi amacıyla ultrasonik C-tarama analizleri uygulanmıştır. Karbon kumaş katmanlarının dış yüzeylerde yer aldığı dizilimlerde eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri artmıştır. Buna karşılık, Kenevir/Polipropilen katmanlarının dış yüzeylerde bulunduğu kompozitlerde ise deformasyonda artış ve daha sünek bir davranış gözlenmiştir. Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmeleri kompozit yapının dış yüzeylerinde olduğundan, dış katmanlarda bulunan lif türü eğme dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Ultrasonik analizler, hasar alanlarının katman dizilimine ve atkı/çözgü yönlerinde bulunan lif türlerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Bulgular, hibrit dokuma kompozitlerin tasarımında katman diziliminin mekanik performans ve hasar davranışı üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermiştir.

Effect of Stacking Sequence on the Mechanical and Damage Behavior of Carbon/Hemp/Polypropylene Hybrid Composites

Article Info

Received : 31.03.2026

Accepted : 21.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1919970

Corresponding Author

Burak ÖZTAŞ

burakoztas46@gmail.com

Keywords

Hybrid composites

Hemp fiber

Carbon fiber

Stacking sequence

Ultrasonic damage analysis

How to cite: ÖZTAŞ, B., KAYA, G., YILMAZ AKYÜREK, B., AKSOY, T., (2026). Effect of Stacking Sequence on the Mechanical and Damage Behavior of Carbon/Hemp/Polypropylene Hybrid Composites. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 445-456.

ABSTRACT

In this study, the effects of stacking sequence on the mechanical behaviour and damage evolution of Carbon/Hemp/Polypropylene woven fabric reinforced hybrid composites were investigated. The mechanical properties of the hybrid composites were determined by 3-point bending and unnotched Charpy impact tests at the warp and weft directions. Ultrasonic C-scan analyses were performed to characterize the internal damage induced after bending tests. Carbon fabric layers positioned on the outer surfaces exhibited higher flexural strength and flexural modulus values. In contrast, composites with Hemp/Polypropylene layers located at the surfaces demonstrated increased deformation and a more ductile behaviour. Under flexural loads, tensile and compressive stresses are localized at the outer surfaces of the composites in which the fibre type and stacking sequence in the outer layers exert a dominant influence on the flexural strength of the composite structures. Ultrasonic analyses revealed that the extent and distribution of damage areas varied depending on the stacking sequence and the fibre types aligned in the warp and weft directions. It was concluded that stacking sequence is a critical design parameter on the mechanical performance and damage behaviour of hybrid woven composites.

1. GİRİŞ

Son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik ve ekolojik farkındalığın artmasıyla birlikte doğal lif takviyeli kompozit malzemelere olan ilgi önemli ölçüde artmıştır [1,2]. Özellikle kenevir, sisal ve jüt gibi doğal lifler [3] kolay temin edilebilir olmaları ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle kompozit malzemelerde potansiyel takviye elemanları olarak öne çıkmaktadır [4]. Bu avantajlar sayesinde doğal lif takviyeli kompozitler, otomotiv ve yapı sektörleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır [5-8]. Ancak, doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri genel olarak karbon veya cam lifi gibi sentetik liflerle takviye edilen kompozitlere kıyasla daha düşüktür [9-10]. Karbon lifi takviyeli kompozitler yüksek dayanım ve rijitlik gibi önemli avantajlara sahip olmalarına rağmen, yüksek maliyetleri ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri nedeniyle kullanım alanları bazı uygulamalarda sınırlanabilmektedir [11]. Bu nedenle doğal lif takviyeli kompozitler, karbon esaslı kompozitlere göre daha düşük mekanik performans sergilemelerine rağmen, biyo-bozunurluk, çevre dostu olma ve ekonomik avantajları sayesinde endüstriyel uygulamalarda dikkat çekici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [12]. Tüm bu süreçler göz önüne alındığında araştırmaların odağı doğal ve sentetik lif takviyelerinin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitler üzerine yoğunlaşmaktadır [13]. Farklı lif türlerinin aynı kompozit içerisinde kullanılması, her bir lif tipinin dezavantajlarını azaltırken avantajlarını korumayı amaçlamaktadır [14,15]. Ayrıca farklı katman dizilimlerine sahip kompozitlerin hasar oluşumu ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiler oluşturabildiği bilinmektedir [16]. Özellikle eğilme yükleri altında dış katmanlarda yer alan takviye türü, kompozitin dayanım ve rijitlik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir [17].

Literatürde kenevir lif takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kenevir lifi, kompozit takviyesinin yanı sıra sürdürülebilir tekstil endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [18,19]. Bhoopathi ve arkadaşları [20] kenevir ve cam liflerinden oluşan hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiş ve hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarında iyileşme sağlayabildiğini ifade etmiştir. Benzer şekilde [21] kenevir lif takviyeli epoksi ve polyester kompozitleri karşılaştırmış ve epoksi matrisli kompozitlerin daha yüksek çekme ve eğme dayanımı sergilediğini göstermiştir. Rouison ve arkadaşları [22] ise kenevir ve cam lifi takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını incelemiş ve lif oranındaki artışın kompozitteki mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Biyo-kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar da doğal lif içeriğinin mekanik performans üzerindeki önemli rolünü ortaya koymaktadır. Ochi [23], manila keneviri takviyeli biyo-bozunur kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiş ve lif takviyesinin artmasıyla birlikte çekme ve eğme dayanımlarında artış gözlemlendiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Mohanavel ve arkadaşları [24] kenevir ve pamuk liflerinden oluşan biyo-kompozitlerin mekanik davranışını incelemiş ve kenevir lifi takviyesindeki artışın kompozit malzemelerin çekme dayanımını artırdığını ifade etmiştir. Son yıllarda doğal ve sentetik liflerin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitler üzerine yapılan çalışmalar da artmaktadır. Ahmad ve arkadaşları [15] kenevir ve polietilen liflerinden oluşan hibrit dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin yalnızca kenevir içeren kompozitlere kıyasla daha yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımı sergilediğini belirtmiştir. Benzer şekilde Pulleti ve Singh [25] kenevir liflerinin karbon ve cam lifleri ile hibritlenmesi sonucu elde edilen kompozitlerde lif diziliminin eğilme dayanımı ve katlar arası kayma dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca De Fazio ve arkadaşları [26] kenevir ve karbon liflerinden oluşan hibrit kompozitlerin darbe davranışını incelemiş ve hibrit kompozitlerin karbon kompozitlere kıyasla daha sünek bir davranış sergileyebildiğini belirtmiştir. Pinto ve arkadaşları [14] ise kenevir ve karbon dokuma kumaşların birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerde karbon liflerin gevrek kırılma davranışının kenevir liflerinin sünek deformasyonu ile birleşmesi sonucunda kompozit malzemelerin hasar toleransının arttığını göstermiştir.

Literatürdeki bu çalışmalar kenevir lifi takviyeli kompozitlerde lif türü, matris yapısı ve hibritleşmenin mekanik performans üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak, Kenevir liflerinin Polipropilen (PP) lifleri ile hibrit dokunduğu ve geliştirilen bu hibrit dokuma kumaşların Karbon lifleri ile katmanlar arası hibritlendiği bir çalışmaya rastlanamamıştır. Ayrıca, katman diziliminin hibrit dokuma kompozitlerin mekanik davranışı ve hasar gelişimi üzerindeki etkisinin tahribatsız muayene yöntemleri ile birlikte değerlendirildiği çalışmalar sınırlıdır.

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, çözgü yönünde PP ve atkı yönünde Kenevir liflerinin kullanıldığı hibrit dokuma kumaşlar geliştirilmiştir. Bu kumaşlar, Karbon dokuma kumaşlar ile

farklı katman dizilimlerinde hibritlenerek epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemine göre kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin özellikleri, atkı ve çözgü yönlerinde gerçekleştirilen 3-nokta eğme ve çentiksiz Charpy darbe testleri ile belirlenmiştir. Eğme testi sonrası kompozit yapılarda oluşan iç hasarların belirlenmesi amacıyla ultrasonik C-tarama analizleri uygulanmıştır.

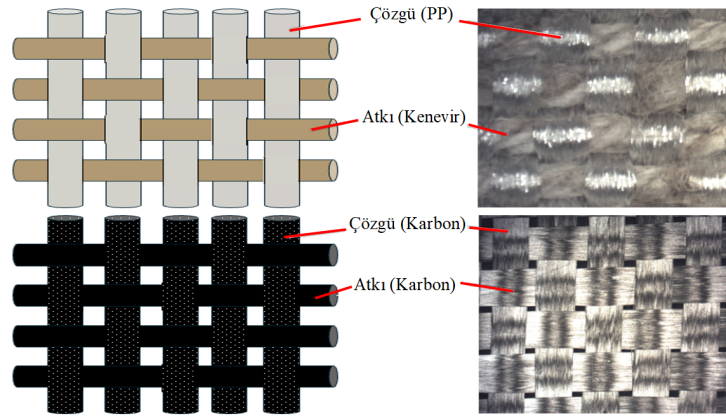
2. YÖNTEM

2.1. Kumaş Yapıları ve Özellikleri

Hibrit kompozitlerde kullanılan kumaşların özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur. Kenevir/PP hibrit dokuma kumaşlar, manuel dokuma tezgâhı kullanılarak (GARM-55, Türkiye) üretilmiştir. Çözgü yönünde PP lifleri (150 tex), atkı yönünde ise Kenevir lifleri (Nm 2,7) lifleri kullanılmıştır. Bezayağı örgü tipinde dokunan Kenevir/PP kumaşın kalınlığı 1,37 mm, gramajı ise 420 g/m² olarak belirlenmiştir. Kenevir/PP dokuma kumaşın kenevir lifi oranı ağırlıkça %65, PP oranı ise ağırlıkça %35’tir. Karbon dokuma kumaş (Dost Kimya, Türkiye) hem atkı hem de çözgü yönünde 3K Karbon lifinden oluşan, 0,31 mm kalınlık ve 225 g/m² gramaja sahiptir. Kenevir/PP kumaşın çözgü krimp, atkı krimpinden yüksektir. Bu da çözgü yönünde kullanılan polipropilen ipliğin tekstüre yapısından ve atkı yönündeki kenevir ipliğin görece rijitliğinden kaynaklanmaktadır. Karbon kumaşa ise hem çözgü hem de atkı yönündeki krimp olanları, karbon lifinin rijit yapısından dolayı Kenevir/PP kumaşa kıyasla daha düşüktür. Şekil 1’de, her iki kumaşın şematik ve mikroskopik görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 1. Kumaşların özellikleri

Kumaş tipi	Örgü tipi	İplik		Sıklık (tel/cm)		Krimp (%)		Gramaj (g/m ²)	Kalınlık (mm)
		Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı		
Kenevir/PP	Bezayağı	PP	Kenevir	4,5	5	21	7	420	1,37
Karbon	Bezayağı	Karbon	Karbon	2,5	3	1	3	225	0,31



Şekil 1. Kumaşların şematik ve mikroskopik görüntüleri (×10 büyütme oranı)

2.2. Kompozit Üretimi

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitler vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Matris malzemesi olarak Hexion MGS L160 epoksi reçinesi ve Hexion MGS H160 sertleştiricisi kullanılmış olup reçine ve sertleştirici üretici tavsiyelerine uygun olarak 100:25 ağırlık oranında karıştırılmıştır. Reçine infüzyon işlemi oda sıcaklığında vakum altında gerçekleştirilmiş ve ardından kompozit yapılar 80 °C’de 2 saat süreyle kürlenmiştir. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen kompozit yapılar CNC kesim makinesi kullanılarak kompozit testlerine uygun boyutlarda deney numuneleri halinde hazırlanmıştır. Deneyisel çalışma kapsamında farklı katman dizilimlerine sahip kompozitler üretilmiştir. Referans olarak yalnızca Karbon dokuma kumaştan oluşan (C) ve yalnızca Kenevir/PP kumaştan oluşan (H) kompozitler üretilmiştir. Kompozit yapıların katman dizilimleri Çizelge 2’de gösterilmiştir. Karbon kumaşın dış katmanda kullanıldığı (CHC) ve Kenevir/PP kumaşın dış katmanda kullanıldığı (HCH) farklı katman dizilimleri, referans kompozitlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Kompozit yapıların katman dizilimlerinin tanımlanması

Kod	Katman dizilimi	Şematik gösterim
C	6C	
H	3H	
CHC	3C/1H/3C	
HCH	1H/3C/1H	

2.3. Kompozit Yoğunluğu ve Lif Miktarı Tayini

Hibrit kompozitlerin yoğunlukları, ASTM D792-13 standardına uygun olarak Precisa® XP205 densimetre kullanılarak ölçülmüştür. Hibrit kompozitlerin lif miktarı tayini, farklı lif tiplerini içermesinden dolayı mekanik ayırma yöntemi ile yapılmıştır. Hibrit dokuma kumaşlar 3 × 3 cm boyutlarında kesilmiş ve tartılmıştır. Kenevir/PP dokuma kumaşı oluşturan Kenevir ve PP lifleri mekanik olarak ayrılmış ve ayrı ayrı tartılmıştır. Kompozit yapılar da 3 × 3 cm boyutlarında kesilmiş ve kompozit yapılardaki matris miktarının belirlenmesi için tartılmıştır. Yoğunluk ve lif miktarı tayinleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

2.4. Eğme Testi

Hibrit kompozitlerin eğme testleri, ASTM D790 standardına uygun olarak 3-nokta eğme düzeneğinde Hounsfield H5KS universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 2 mm/dak. hızda yapılmıştır. Numune boyutları 80 × 25 mm olarak hazırlanmış ve mesnet açıklığı 50 mm olarak ayarlanmıştır. Eğme testleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak hem atkı hem de çözgü yönünün normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

$$E = L^3m/4bd^3 \quad (2)$$

Burada; S eğilme dayanımını (MPa), E eğme modülünü (MPa), P maksimum yükü (N), L mesnetler arası mesafeyi (mm), b numune genişliğini (mm), d numune kalınlığını (mm) ve m yük sehmi eğrisinin başlangıç eğimini (N/mm) ifade etmektedir.

2.5. Charpy Darbe Testi

Hibrit kompozitlerin Charpy darbe testleri, ISO 180:2000 standardına uygun olarak çentiksiz numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 55 × 10 mm olarak hazırlanmış olup darbe enerjisi 22 J kapasiteli Charpy darbe test cihazı ile ölçülmüştür. Charpy darbe testleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak hem atkı hem de çözgü yönünün normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Charpy darbe dayanımı değerleri, aşağıdaki Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A = \frac{E_c}{h \times b} \times 10^3 \quad (3)$$

Burada; A Charpy darbe dayanımını (kJ/m^2), Ec numunenin kırılması sırasında absorbe edilen enerjiyi (J) h numune kalınlığını (mm) ve b numune genişliğini (mm) ifade etmektedir.

2.6. Ultrasonik C-Tarama

Hibrit kompozitlerde eğme testi sonra oluşan hasar bölgelerini belirlemek amacıyla ultrasonik C-tarama testleri uygulanmıştır. Ölçümler TTU (Through Transmission Ultrasonic) prob kullanılarak gerçekleştirilmiş ve taramalar 3.5 MHz frekansta yapılmıştır. Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile test öncesi ve sonrası hasarlı alan oranı karşılaştırılarak hasar gelişimi değerlendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Kompozit Yoğunluğu ve Lif Miktarı Sonuçları

Hibrit kompozitlerin yoğunluk ve lif miktarı sonuçları Çizelge 3'te sunulmuştur. Buna göre; Karbon kompozitlerin (C) kompozit yoğunluğu, Kenevir/PP (H) kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Karbon lifinin, Kenevir lifine kıyasla daha düşük lif yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, Kenevir/PP kumaşa %35 oranında bulunan polipropilen liflerinin düşük yoğunluğu, Kenevir/PP kumaşın kullanıldığı kompozit yapıların yoğunluk değerlerinde düşüşe sebebiyet vermiştir. Buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitlerin yoğunluk değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kenevir/PP kompozitlerin (H) ağırlıkça lif miktarı değerleri, Karbon (C) kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitleri lif miktarı değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. CHC hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranı %33,66 iken, HCH hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranı %22,03 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. Kompozitlerin özellikleri

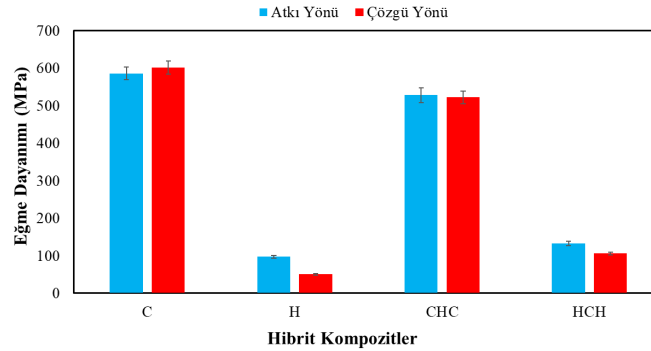
Kod	Yoğunluk (g/cm^3)	Karbon (Ağırlıkça, %)	Kenevir/PP (Ağırlıkça, %)	Toplam lif miktarı (Ağırlıkça, %)	Kalınlık (mm)
C	1,42 ($\pm 0,06$)	47,34 ($\pm 0,12$)	-	47,34 ($\pm 0,08$)	1,49($\pm 0,02$)
H	1,18 ($\pm 0,04$)	-	61,42 ($\pm 0,16$)	61,42 ($\pm 0,11$)	3,22($\pm 0,03$)
CHC	1,32 ($\pm 0,07$)	33,66 ($\pm 0,09$)	12,67 ($\pm 0,09$)	46,33 ($\pm 0,13$)	2,60($\pm 0,03$)
HCH	1,24 ($\pm 0,05$)	22,03 ($\pm 0,11$)	33,16 ($\pm 0,13$)	55,19 ($\pm 0,09$)	2,98($\pm 0,07$)

3.2. Eğme Testi Sonuçları

Hibrit kompozitlerin eğme testi sonuçları Çizelge 4'te sunulmuştur. Şekil 2'de, atkı ve çözgü yönü eğme dayanımı değerleri verilmiştir. Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme dayanımı değerlerini sergilediği görülmüştür. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme dayanımı değerlerinin hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerin dokuma yapısı dikkate alındığında, atkı yönünde kenevir liflerinin, çözgü yönünde ise PP liflerinin bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerde yönelime bağlı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Kenevir liflerinin PP liflerine kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle atkı yönünde elde edilen eğme dayanımı değerleri çözgü yönüne göre daha yüksek gerçekleşmiştir. Farklı katman dizilimlerindeki hibrit kompozitlerde ise, CHC kompozit yapıların eğme dayanımının, Karbon kompozitlere (C) oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum, karbon katmanlarının kompozit içerisinde önemli bir yük taşıma rolü üstlenmesinin yanı sıra, üst yüzeyde kullanılmasının eğme dayanımını artırdığını göstermektedir. Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozit yapılarda daha yüksek eğme dayanımı değerleri elde edilirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde bu değerlerin daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Ancak, HCH numunelerinde dış yüzeylerde Kenevir/PP katmanlarının bulunması nedeniyle eğme dayanımı daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir. CHC hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranının, HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha fazla olması, eğme dayanım değerlerindeki artışa katkı sağlamıştır. Katman diziliminin kompozitlerin eğme davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir [5,27].

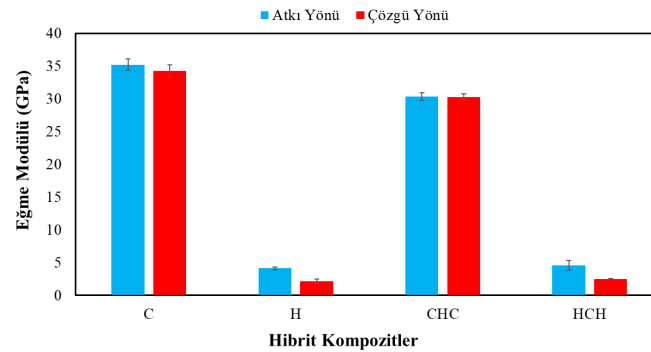
Çizelge 4. Kompozitlerin eğme testi sonuçları

Test yönü	Kod	Eğme dayanımı (MPa)	Eğme modülü (MPa)
Atkı	C	586,29 ($\pm 16,99$)	35,23 ($\pm 0,90$)
	H	97,72 ($\pm 3,68$)	4,11 ($\pm 0,19$)
	CHC	528,26 ($\pm 19,82$)	30,36 ($\pm 0,57$)
	HCH	132,70 ($\pm 5,48$)	4,55 ($\pm 0,74$)
Çözü	C	601,51 ($\pm 18,09$)	34,27 ($\pm 0,96$)
	H	50,42 ($\pm 2,35$)	2,12 ($\pm 0,33$)
	CHC	522,49 ($\pm 17,06$)	30,30 ($\pm 0,46$)
	HCH	106,44 ($\pm 3,57$)	2,50 ($\pm 0,027$)



Şekil 2. Kompozitlerin atkı ve çözgü yönü eğme dayanımı değerleri

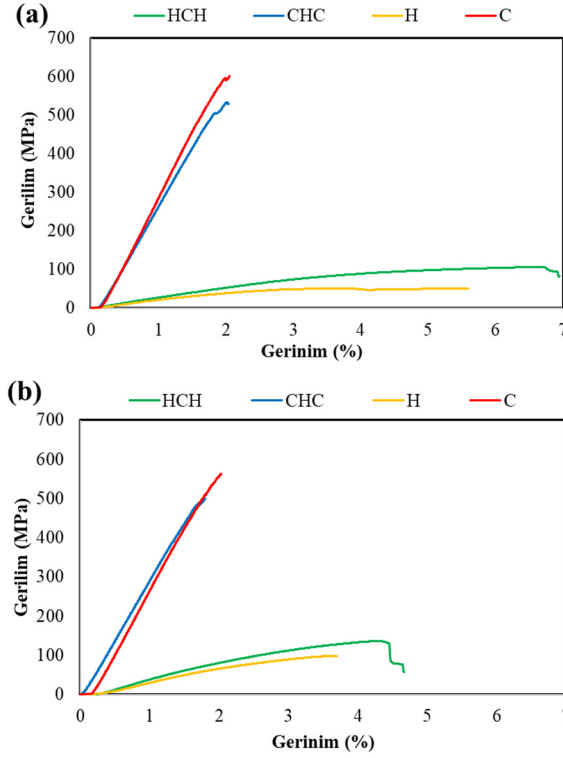
Şekil 3'te, atkı ve çözgü yönü eğme modülü değerleri verilmiştir. Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme modülü değerlerini sergilediği, bu yapıyı CHC hibrit kompozitlerin izlediği görülmüştür. Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme modülü değerlerinin hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. HCH hibrit kompozitlerin eğme modülü, H kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Bu durum karbon liflerinin yük altında daha sınırlı şekil değişimine uğraması ve yük aktarımını daha etkin şekilde gerçekleştirmesi ile ilişkilendirilebilir. Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmeleri kompozit yapının dış yüzeylerinde olduğundan, dış katmanlarda bulunan lif türü eğme dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.



Şekil 3. Kompozitlerin atkı ve çözgü yönü eğme modülü değerleri

Şekil 4'te, hibrit kompozitlerin çözgü ve atkı yönü eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri sunulmuştur. Kenevir/PP (H) kompozitlerin deformasyon kapasitesinin daha yüksek olduğu ve sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, Kenevir ve PP liflerinin yüksek şekil değiştirme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. Karbon kompozitler (C) ise deformasyon daha sınırlı kalmakta ve kırılmanın daha ani bir şekilde gerçekleştiği gevrek davranış meydana gelmektedir. Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozitlerde (CHC) daha gevrek davranış izlenirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde (HCH) daha sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Ancak, HCH numunelerinde dış yüzeylerde Kenevir/PP katmanlarının bulunması nedeniyle eğme dayanımı daha düşük değerlerde

gerçekleşmiştir. HCH hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranının, HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha fazla olması, kompozit yapıların yük altındaki davranışını etkilemiştir. Eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin eğme davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Karbon katmanlarının dış yüzeyde konumlanması eğme dayanım/modülünü artırırken, Kenevir/PP katmanlar, kompozit yapının deformasyon kapasitesinin artmasına katkı sağlamaktadır.



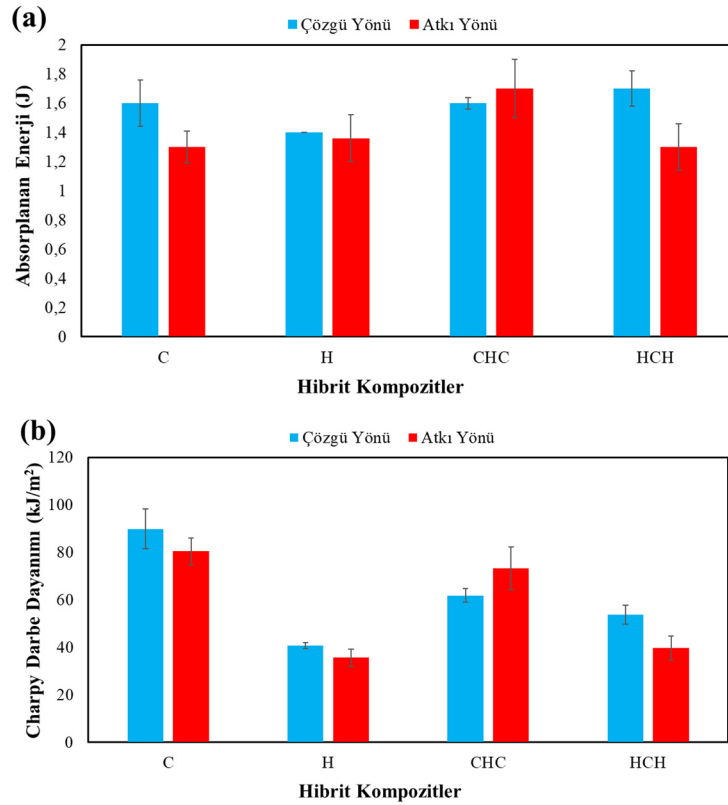
Şekil 4. Kompozitlerin çözü (a) ve atkı (b) yönü eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri

3.3. Charpy Darbe Testi Sonuçları

Hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi absorplanan enerji ve darbe dayanımı değerleri Çizelge 5 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Hibrit kompozitlerin darbe davranışının lif türü ve katman dizilimine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Karbon kompozitler (C) hem atkı hem de çözü yönünde de en yüksek darbe dayanımı değerlerini göstermiştir. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mukavemet özellikleri sayesinde darbe sırasında oluşan yükleri daha etkin şekilde taşıyabilmesi ile ilişkilendirilebilir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde darbe dayanımı değerleri karbon içeren kompozitlere kıyasla daha düşük bulunmuştur. Hibrit kompozitler incelendiğinde, CHC numunelerinde darbe dayanımı değerlerinin HCH numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum CHC kompozit yapıda, Karbon kumaşın dış yüzeyde bulunması ve Karbon lif miktarının daha yüksek olması, bu liflerin sahip olduğu yüksek dayanım/modül özelliklerini darbe esaslı yüklemde etkin bir biçimde ortaya çıkarmıştır. Buna karşılık HCH kompozitlerde, dış yüzeyde Kenevir/PP kumaşın bulunması ve düşük Karbon lif miktarından dolayı darbe dayanımı da daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir.

Çizelge 5. Kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları

Kod	Absorplanan enerji (J)		Charpy darbe dayanımı (kJ/m ²)	
	Çözü	Atkı	Çözü	Atkı
C	1,6 (±0,16)	1,30 (±0,11)	89,86 (±8,42)	80,46 (±5,56)
H	1,4 (±0,00)	1,36 (±0,16)	40,76 (±1,29)	35,61 (±3,71)
CHC	1,6 (±0,04)	1,70 (±0,20)	61,88 (±2,97)	73,28 (±9,11)
HCH	1,7(±0,12)	1,30 (±0,16)	53,81 (±3,97)	39,75 (±4,94)



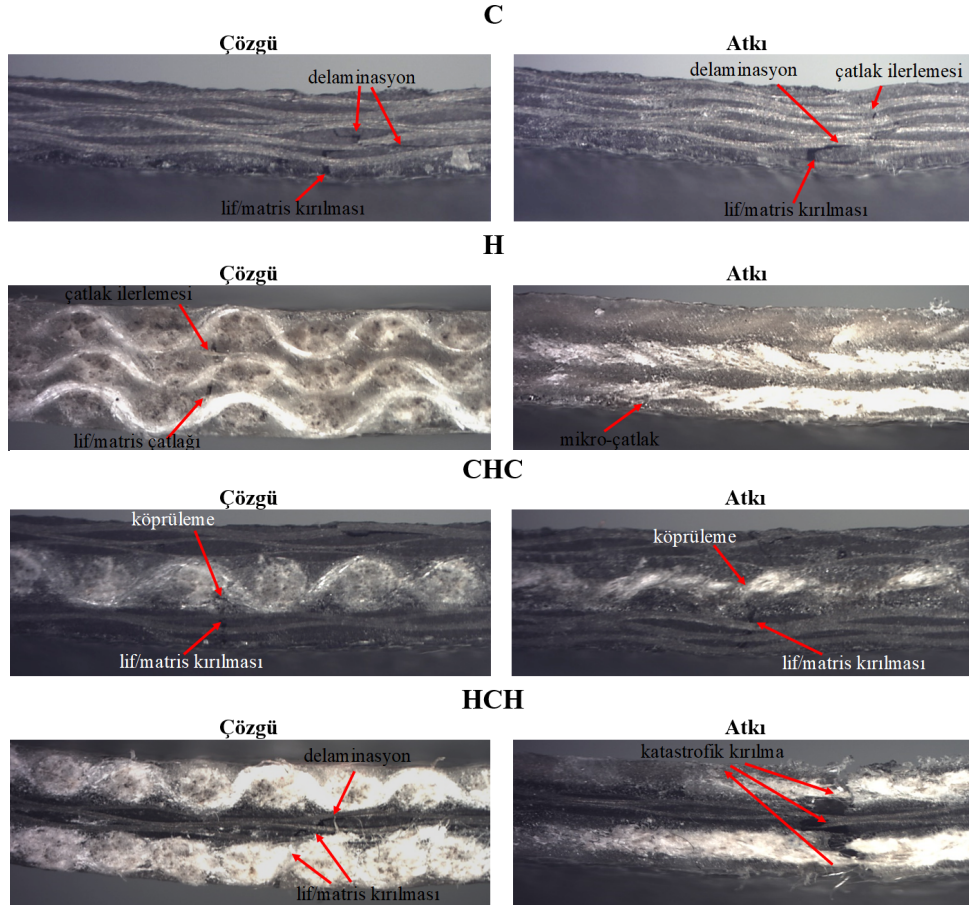
Şekil 5. Kompozitlerin Charpy darbe testi absorplanan enerji (a) ve darbe dayanımı (b) değerleri

Hibrit kompozitlerin absorplanan enerji değerlerinin de benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. En yüksek enerji absorpsiyonu CHC kompozit yapıda atkı yönünde elde edilmiştir. Bu durum, Karbon liflerinin dayanımı ile Kenevir liflerinin deformasyon kabiliyetinin birlikte etkili olmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir ve hibrit kompozitlerde sünek ve gevrek davranışın birlikte bulunması enerji absorplama kapasitesini artırmıştır [4]. HCH numunelerinde ise özellikle çözgü yönünde daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir.

3.4. Hasar Analizi Sonuçları

3.4.1. Eğme Testi Sonrası Mikroskobik Hasar Analizi

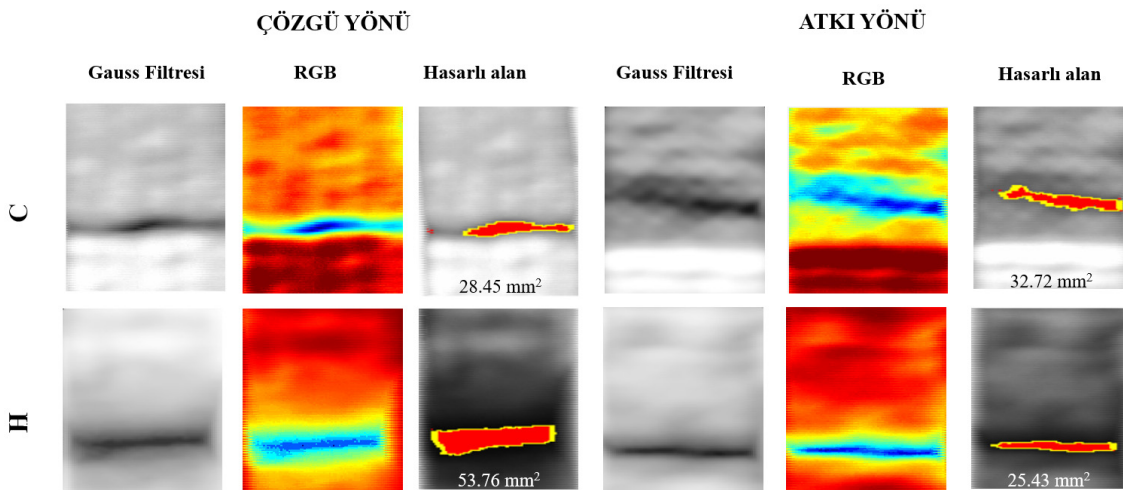
Eğme testi sonrası hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyleri mikroskobik olarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 6'da sunulmuştur. Karbon kompozitler (C), eğme yükü altında çekme yükünün gerçekleştiği alt yüzeyde hem çözgü hem de atkı yönünde lif ve matris kırılmalarına rastlanmıştır. Bu kırıkların katmanlar arasında ilerleyerek orta katmana ulaştığı ve burada delaminasyon hasarına yol açtığı görülmüştür. Bu durum, Karbon lifinin yük altındaki rijit davranışından kaynaklanmaktadır. Atkı yönünde, basma yüzeyine doğru çatlak ilerlemesine rastlanmıştır. Benzer kırılma davranışı, Karbon katmanlarının dış yüzeyde yer aldığı CHC kompozit yapılarında da oluşmuştur. Ancak, orta katmanda bulunan Kenevir/PP kumaş, özellikle çözgü yönünde köprüleme davranışı yaparak hasarın kalınlık boyunca ilerlemesini önleyerek lokalize etmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde, atkı yönünde kalınlık boyunca ilerleyen lif/matris çatlağı gerçekleşmiştir. Çözgü yönünde ise polipropilen lifinin sünek davranışından dolayı belirgin bir lif/matris kırılmasına rastlanmamış olup, delaminasyon esaslı mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Kenevir/PP katmanlarının dış yüzeyde yer aldığı HCH kompozit yapılarında ise, çözgü yönündeki polipropilen liflerinin sünek yapısından dolayı yükü Karbon lifinden oluşan orta katmana iletmekle birlikte, katastrofik lif/matris kırılması gerçekleşmemiş olup delaminasyona sebebiyet vermiştir. Ancak, atkı yönündeki Kenevir liflerinin, polipropilen liflerine kıyasla görece gevrek davranışı, yükün yapının kalınlığı boyunca ilerlemesine sebebiyet vermiş ve katastrofik lif/matris kırılmaları meydana gelmiştir. Hibrit kompozitlerde, katman diziliminin hasar gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır.



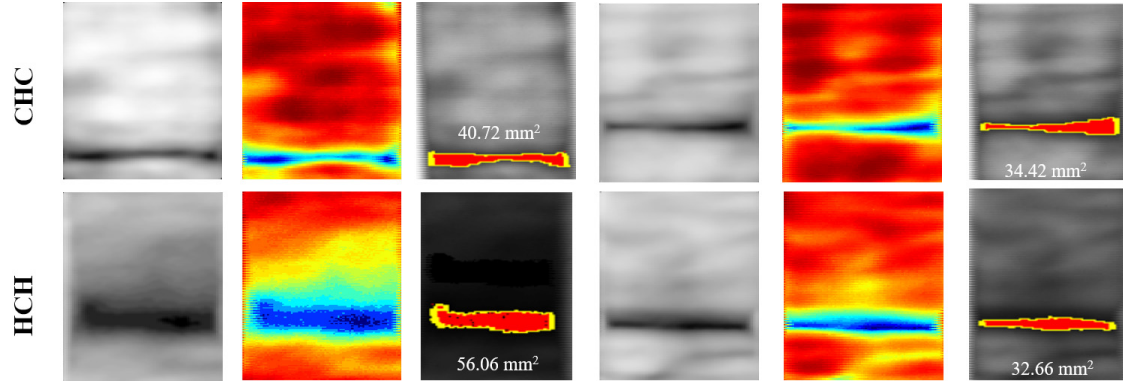
Şekil 6. Eğme testi sonrası kompozitlerin kırılma yüzeylerinin mikroskobik analizi ($\times 10$ büyütme oranı)

3.4.2. Eğme Testi Sonrası Ultrasonik C-Tarama Hasar Analizi

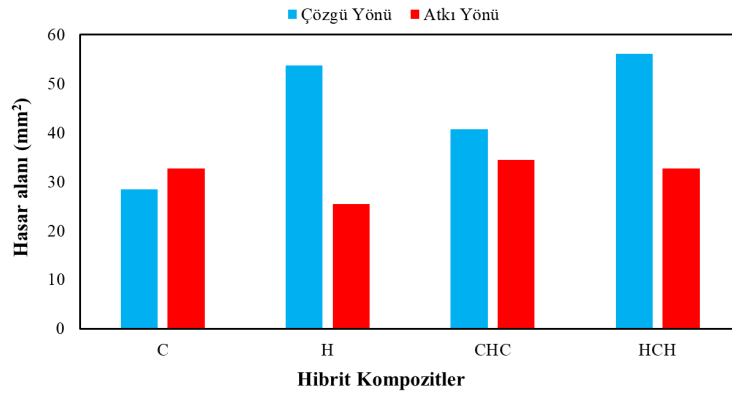
Hibrit kompozitlerin eğme testi sonrasında oluşabilecek iç hasarları belirlemek amacıyla Ultrasonik C-tarama analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen C-tarama görüntüleri, geliştirilen görüntü işleme algoritması ve Image J yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve hasarlı bölgelerin alanları mm^2 cinsinden hesaplanmıştır. Hasar alanlarının belirlenmesinde görüntüler üzerinde filtreleme ve eşikleme işlemleri uygulanarak hasarlı bölgeler piksel bazında tespit edilmiş, ardından bu değerler gerçek alan değerlerine dönüştürülmüştür. Ultrasonik C-tarama görüntüleri ve hasar alanı değerleri, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 7. Eğme testi sonrası kompozitlerin Ultrasonik C-tarama görüntüleri



Şekil 7. (devamı)



Şekil 8. Eğme testi sonrası kompozitlerin hasar alanı değerleri

Ultrasonik C-tarama görüntüleri incelendiğinde, hasar alanının kompozitlerdeki katman dizilimine ve yükleme yönüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Karbon kompozitlerde (C), atkı yönünde yaklaşık 32,72 mm², çözgü yönünde ise 28,45 mm² hasar alanı tespit edilmiştir. Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanımı nedeniyle eğme yükü altında sınırlı bir hasar alanı olduğu gözlenmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde ise, atkı yönündeki hasar alanı Karbon kompozitlerden (C) daha düşük olup 25,43 mm², çözgü yönündeki hasar alanı ise 53,76 mm² olarak belirlenmiştir. Atkı yönünde bulunan Kenevir lifleri hasarın daha sınırlı kalmasına katkı sağlamış olup, çözgü yönünde bulunan polipropilen liflerinin daha düşük mekanik özellikleri nedeniyle iç hasarın daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür. CHC hibrit kompozitlerde atkı yönünde 34,42 mm², çözgü yönünde ise 40,72 mm² hasar alanı ölçülmüştür. Karbon katmanlarının dış yüzeylerde bulunması eğme yükleri altında hasarın sınırlı kalmasına katkı sağlamış ve hasar alanının nispeten daha dengeli bir dağılım göstermesine neden olmuştur. HCH hibrit kompozitlerde ise atkı yönünde 32,66 mm², çözgü yönünde 56,60 mm² hasar alanı belirlenmiştir. HCH kompozit yapının dış katmanların Kenevir/PP kumaştan oluşması ve çözgü yönünde polipropilen liflerinin bulunması nedeniyle özellikle çözgü yönünde daha geniş hasar alanının olduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Karbon liflerinin dış katmanlarda bulunduğu kompozitlerde hasarın daha sınırlı kaldığı, buna karşılık doğal lif içeren kompozitlerin özellikle yöne bağlı olarak daha geniş hasar bölgeleri oluşturabildiği görülmektedir. Ultrasonik C-tarama sonuçları, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin hasar gelişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca elde edilen Ultrasonik C-tarama sonuçlarının, kompozit yapıların mekanik davranışı genel olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitlerin yoğunluk değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Kenevir/PP kompozitlerin (H) ağırlıkça lif miktarı değerlerinin, Karbon (C) kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitleri lif miktarı değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme dayanım ve modülünü sergilediği görülmüştür. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme dayanımı ve modülünün hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.
- Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozit yapılarda (CHC) daha yüksek eğme dayanımı ve modülü elde edilirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde (HCH) daha düşük eğme dayanım ve modülü görülmüştür.
- Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmelerinin kompozit yapının dış yüzeylerinde oluşmasından dolayı, dış katmanlarda bulunan lif türünün eğme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek enerji absorpsiyonu CHC kompozit yapıda atkı yönünde elde edilmiştir. Bu durum, Karbon liflerinin dayanımı ile Kenevir liflerinin deformasyon kabiliyetinin birlikte etkili olmasıyla hibrit kompozitlerde sünek ve gevrek davranışın birlikte bulunmasının, kompozitlerin enerji absorplama kapasitesini artırdığını göstermiştir. HCH kompozit yapılarda ise özellikle çözgü yönünde daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir.
- Karbon liflerinin dış katmanlarda bulunduğu kompozitlerde hasarın daha sınırlı kaldığı, buna karşılık doğal lif içeren kompozitlerin özellikle yöne bağlı olarak daha geniş hasar bölgeleri oluşturabildiği görülmektedir. Ultrasonik C-tarama sonuçları, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin hasar gelişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.
- Sonuçlar hibrit kompozitlerde lif türü ve katman diziliminin mekanik ve darbe davranışı üzerinde etkili olduğunu ve hibritlemenin sinerjik etkisinin, kompozit yapısal tasarımında kullanılmasının bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Siouta, L., Apostolopoulou, M. & Bakolas, A. (2024). Natural fibers in composite materials for sustainable building: A state-of-the-art review on treated hemp fibers and hurds in mortars. In *Sustainability (Switzerland)*, 16(23), 10368, 1-26.
2. Meredith, J., Ebsworth, R., Coles, S. R., Wood, B. M. & Kirwan, K. (2012). Natural fibre composite energy absorption structures. *Composites Science and Technology*, 72(2), 211-217.
3. Silva, F. de A., Filho, R.D.T., Filho, J. de A.M. & Fairbairn, E. de M.R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777-785.
4. Ramesh, M., Palanikumar, K. & Reddy, K.H. (2013). Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. *Composites Part B: Engineering*, 48, 1-9.
5. Malkapuram, R., Kumar, V., & Singh Negi, Y. (2009). Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(10), 1169-1189.
6. Wambua, P., Ivens, J. & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264.
7. Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S. & Crerar, W.J. (2013). The Influence of Fiber Content on Properties of Injection Molded Flax Fiber-HDPE Biocomposites. *The Canadian Society for Bioengineering*, 1-10.
8. Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N. & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
9. Mohanty, A.K., Misra, M. & Drzal, L.T. (2002). Sustainable Bio-Composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(1-2), 19-26.
10. Pickering, K.L., Efendy, M.G.A. & Le, T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.
11. Hegde, S., Satish Shenoy, B. & Chethan, K.N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658-662.

12. Mohammed, L., Ansari, M.N.M., Pua, G., Jawaaid, M. & Islam, M.S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. In *International Journal of Polymer Science*, 1-15.
13. Boccarusso, L., Pinto, F., Myronidis, K., De Fazio, D. & Durante, M. (2023). Thin hybrid hemp/carbon fiber composites: Manufacturing, flexural, and impact behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(9), 3914-3922.
14. Pinto, F., Boccarusso, L., De Fazio, D., Cuomo, S., Durante, M. & Meo, M. (2020). Carbon/hemp bio-hybrid composites: Effects of the stacking sequence on flexural, damping and impact properties. *Composite Structures*, 242, 1-16.
15. Ahmad, M.A.A., Majid, M.S.A., Ridzuan, M.J.M., Firdaus, A.Z.A. & Amin, N.A.M. (2017). Tensile properties of interwoven hemp/PET (Polyethylene Terephthalate) epoxy hybrid composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 908(1), 1-6.
16. Ramesh, M., Palanikumar, K. & Hemachandra Reddy, K. (2016). Evaluation of Mechanical and Interfacial Properties of Sisal/Jute/Glass Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(10), Technical Paper 1-9.
17. Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S.K. & Pal, S.K. (2014). Mechanical properties of woven jute-glass hybrid-reinforced epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 48(28), 1-12.
18. Doba Kadem, F. ve Özdemir, G. (2023). Sürdürülebilir tekstil liflerinden dokunmuş dijital baskılı kumaşların dikilebilirlik performansı üzerine deneysel bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(2), 433-440.
19. Palabıyık, İ., Körlü, A. ve Özçelik Kayseri, G. (2024). Kenevir içeren denim giysilerin terbiyesinde çevre dostu bir yöntem: ozon ile yıkama. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 881-895.
20. Bhoopathi, R., Ramesh, M., Naveen Kumar, M., Sanjay Balaji, P. & Sasikala, G. (2018). Studies on mechanical strengths of hemp-glass fibre reinforced epoxy composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1), 1-8.
21. Neves, A.C.C., Rohen, L.A., Mantovani, D.P., Carvalho, J.P.R.G., Vieira, C.M.F., Lopes, F.P.D., Simonassi, N.T., Luz, F.S.D. & Monteiro, S.N. (2020). Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1-9.
22. Rouison, D., Sain, M. & Couturier, M. (2006). Resin transfer molding of hemp fiber composites: Optimization of the process and mechanical properties of the materials. *Composites Science and Technology*, 66(7-8), 895-906.
23. Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), 1879-1883.
24. Mohanavel, V., Sathish, T., Ravichandran, M., Ganeshan, P., Kumar, M.M.R. & Subbiah, R. (2021). Experimental investigations on mechanical properties of cotton/hemp fiber reinforced epoxy resin hybrid composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2027(1), 1-11.
25. Pulleti, S.S. & Singh, S.B. (2024). Development and characterization of hemp/carbon and hemp/glass hybrid and novel functionally graded hybrid composites for structural applications. *Polymer Composites*, 45(12), 11178-11199.
26. De Fazio, D., Cuomo, S., Boccarusso, L., Pinto, F., Durante, M. & Meo, M. (2019). Design and characterization of hybrid hemp/carbon laminates with improved impact resistance. *Materials Today: Proceedings*, 34, 194-201.
27. Karaçor, B. & Özcanlı, M. (2021). Effect of various matrix materials on mechanical properties of basalt/jute/glass fiber reinforced hybrid composites. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 941-954.

Sürdürülebilir Filament İplik Üretimi: Kullanılan Yağın Geri Dönüşüm Yoluyla Yeniden Değerlendirilmesi

Berfin GÜL^{1,a}, Hüseyin NASIRCI^b, Kübra YILMAZ^{1,c}

¹Ulusoy Tekstil San. ve Tic. A.Ş., Adana, Türkiye

^aORCID: 0009-0006-3661-9851; ^bORCID: 0009-0003-9255-9062; ^cORCID: 0009-0003-9255-9062

Makale Bilgileri

Geliş : 09.09.2025

Kabul : 22.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1780607

Sorumlu Yazar

Berfin GÜL

berfin@samtekstektstil.com

Anahtar Kelimeler

Spin finish yağ

Polipropilen filament iplik

Geri dönüşüm

Sürdürülebilir üretim

Atık yönetimi

Atf şekli: GÜL, B., NASIRCI, H., YILMAZ, K., (2026). Sürdürülebilir Filament İplik Üretimi: Kullanılan Yağın Geri Dönüşüm Yoluyla Yeniden Değerlendirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 457-465.

ÖZ

Bu çalışma, polipropilen filament iplik üretiminde kullanılan spin finish yağlarının geri kazanımına yönelik yenilikçi bir sistemin geliştirilmesini ve uygulanabilirliğinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında spin finish yağlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri analiz edilmiş, kontaminasyon seviyeleri incelenerek yeniden kullanım kriterleri belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, geri kazanılabilir bileşen oranının %20 seviyesine ulaştığında yağın proses içerisinde yeniden kullanılacak kaliteye eriştiği tespit edilmiştir. Geliştirilen sistemin teknik, ekonomik ve çevresel performans analizleri gerçekleştirilmiş; uygulama sonucunda yıllık yaklaşık 16.411 ABD Doları ekonomik kazanç sağlanabileceği ve yatırım maliyetinin 2 ay 1 gün gibi kısa bir sürede geri kazanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca yılda yaklaşık 36 ton atık yağın geri dönüştürülmesiyle atık oluşumunun azaltılması ve doğal kaynak kullanımının düşürülmesi mümkün olmuştur. Bulgular, sistemin nihai ürün kalitesini olumsuz etkilemeden uygulanabildiğini göstermekte olup, sürdürülebilir üretim ve döngüsel ekonomi hedeflerine katkı sağlayan etkili bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Sustainable Filament Yarn Production: Recycling and Reuse of Process Oil

Article Info

Received : 09.09.2025

Accepted : 22.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1780607

Corresponding Author

Berfin GÜL

berfin@samtekstektstil.com

Keywords

Spinfinish oil

Polypropylene yarn

Recycling

Sustainable production

Waste management

How to cite: GÜL, B., NASIRCI, H., YILMAZ, K., (2026). Sustainable Filament Yarn Production: Recycling and Reuse of Process Oil. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 457-465.

ABSTRACT

This study investigates the development and feasibility of an innovative recovery system for spin finish oils used in polypropylene filament yarn production. The physical and chemical properties of the oils were analyzed, and reuse criteria were established through the evaluation of contamination levels and recoverable components. Results indicated that the recovered oil achieved a quality level suitable for reintegration into the production process when the recoverable component ratio reached approximately 20%. The proposed system was assessed in terms of technical, economic, and environmental performance. Findings revealed that implementation of the recovery system could generate annual savings of approximately USD 16,411, with an investment payback period of only 2 months and 1 day. In addition, recycling nearly 36 tons of waste spin finish oil annually contributes to reducing waste generation, conserving natural resources, and mitigating environmental impacts. The results demonstrate that the system can be implemented without compromising product quality, thereby supporting circular economy principles and sustainable manufacturing practices in the textile industry.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfus, sanayileşme faaliyetleri, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve çevresel sorunların giderek daha belirgin hale gelmesi, üretim sektörlerinde sürdürülebilirlik uygulamalarını zorunlu hale getirmiştir [1,2]. Özellikle enerji yoğun ve kimyasal kullanımının yüksek olduğu tekstil sektörü, çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmaların yoğunlaştığı endüstriler arasında yer almaktadır. Son yıllarda döngüsel ekonomi yaklaşımı kapsamında atık oluşumunun azaltılması, kaynak verimliliğinin artırılması ve üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin yeniden değerlendirilmesi büyük önem kazanmıştır [3].

Tekstil endüstrisinde sentetik filament iplikler, yüksek mukavemetleri, düşük yoğunlukları, kimyasal dayanımları ve ekonomik üretim avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Özellikle polipropilen filament iplikler; halı, ev tekstili, teknik tekstiller, otomotiv ürünleri, medikal uygulamalar ve spor tekstilleri gibi birçok farklı alanda tercih edilmektedir [5]. Filament ipliklerin üretiminde, proses verimliliğini artırmak ve iplik kalitesini korumak amacıyla çeşitli yardımcı kimyasallardan yararlanılmaktadır. Bu yardımcı kimyasallar arasında en önemli bileşenlerden biri spin finish yağlarıdır.

Spin finish yağları, filament yüzeyinde ince bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmakta, statik elektrik oluşumunu önlemekte ve filamentlerin çekim, sarım ve sonraki işlem basamaklarında daha kontrollü hareket etmesini sağlamaktadır [6]. Bu sayede iplik kopuşlarının azaltılması, üretim hızlarının artırılması ve nihai ürün kalitesinin iyileştirilmesi mümkün olmaktadır. Bununla birlikte üretim süreci boyunca önemli miktarda spin finish yağı atık hale gelmekte ve çoğu işletmede doğrudan bertaraf edilmektedir. Bu durum hem ekonomik kayıplara hem de çevresel yüklerin artmasına neden olmaktadır [7].

Atık yağların geri kazanımı uzun yıllardır metal işleme, otomotiv ve enerji sektörlerinde araştırılan bir konu olmasına rağmen, tekstil sektöründe kullanılan spin finish yağlarının geri dönüşümüne yönelik çalışmalar oldukça sınırlı olduğu görülmektedir [8,9]. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, geri kazanım uygulamalarının çoğunlukla filtrasyon, santrifüj ayırma, kimyasal saflaştırma ve termal işlemler üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [10-12]. Bununla birlikte, tekstil üretim süreçlerinden kaynaklanan spin finish yağlarının doğrudan yeniden kullanım potansiyelini inceleyen ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir sistem önerileri sunan çalışmaların sayısı oldukça azdır [9]. Bu durum, tekstil sektöründe kaynak verimliliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Filament iplik üretim tesislerinde kullanılan spin finish yağlarının önemli bir kısmı, proses sonrasında belirli oranlarda yağ içeriğini korumaya devam etmektedir. Bu durum, uygun yöntemlerin geliştirilmesi halinde söz konusu yağların yeniden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak geri kullanım öncesinde yağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi, kullanım sınırlarının ortaya konulması ve proses performansına etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir [10,12]. Bu nedenle geri kazanım sistemlerinin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda teknik ve ekonomik açıdan da incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, polipropilen filament iplik üretim süreçlerinde kullanılan spin finish yağlarının geri kazanım potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma kapsamında atık yağların fiziksel ve kimyasal özellikleri analiz edilmiş, yeniden kullanım kriterleri belirlenmiş ve üretim hattına entegre edilebilecek bir geri kazanım sistemi tasarlanmıştır. Ayrıca geliştirilen sistemin ekonomik uygulanabilirliği, maliyet avantajları ve çevresel katkıları değerlendirilmiştir. Böylece hem atık miktarının azaltılması hem de hammadde tüketiminin düşürülmesi hedeflenmiştir.

Literatürde sınırlı sayıda ele alınan spin finish yağı geri kazanımı konusuna odaklanan bu çalışma, tekstil sektöründe döngüsel ekonomi uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bunun yanı sıra çalışma, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri ile ekonomik faydaları bir araya getiren uygulanabilir bir geri dönüşüm modelinin ortaya konulması açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, polipropilen filament iplik üretim proseslerinde kullanılan spin finish yağlarının geri kazanım potansiyeli araştırılmış ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir geri dönüşüm sistemi geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan spin finish yağının fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş, üretim sürecinden

kaynaklanan atık yağların karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve geri kazanılan yağların yeniden kullanım performansı değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistem; atık yağların toplanması, depolanması, transfer edilmesi, laboratuvar analizlerinin gerçekleştirilmesi, yağ-su oranının yeniden düzenlenmesi ve üretim sürecine geri kazandırılması aşamalarından oluşmaktadır. Çalışmada herhangi bir kimyasal ayrıştırma, santrifüjleme veya ileri filtrasyon işlemi uygulanmamış, yalnızca atık yağ içerisindeki yağ-su oranının proses koşullarına uygun hale getirilmesi esas alınmıştır [1].

2.1. Kullanılan Spin Finish Yağının Özellikleri

Çalışmada kullanılan spin finish yağı, polipropilen filament iplik üretiminde filament-filament ve filament-metal temaslarında sürtünmeyi azaltmak, statik elektrik oluşumunu önlemek ve proses verimliliğini artırmak amacıyla kullanılan yardımcı bir kimyasaldır [2]. Yağın kullanımı sayesinde filament yüzeyinde homojen bir film tabakası oluşturularak iplik kopuşları azaltılmakta ve nihai ürün kalitesi iyileştirilmektedir [3].

Kullanılan spin finish yağı kimyasal olarak fosforik ester ve etoksillenmiş yağ alkollerinden oluşmaktadır. Ürün renksiz ve berrak bir sıvı görünümünde olup hafif karakteristik bir kokuya sahiptir. İyonik yapısı noniyonik veya zayıf anyonik karakter göstermekte ve suda kolay çözünmektedir. %10'luk sulu çözeltisinde pH değeri 6-7 aralığında bulunmaktadır. Üretim prosesinde yağ, %5-25 oranında emülsiyon halinde hazırlanarak filament yüzeyine uygulanmaktadır [2].

Ürünün depolama sıcaklığı +10 °C ile +35 °C arasında tutulmuş ve üretici tavsiyelerine uygun şekilde muhafaza edilmiştir. Kullanım sırasında iş sağlığı ve güvenliği açısından koruyucu ekipman kullanılmış ve çevresel temasın önlenmesine yönelik gerekli tedbirler alınmıştır.

2.2. Atık Yağ Toplama Sistemi

Filament iplik üretim makinelerinden proses sırasında çıkan atık spin finish yağları, sistem için özel olarak tasarlanan toplama kuyularında biriktirilmiştir. Toplama kuyusu paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş olup yüksek kimyasal dayanım ve uzun kullanım ömrü sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem içerisinde oluşabilecek katı partiküllerin ve tortuların birikerek akışı engellemesini önlemek amacıyla kuyu içerisinde sedimentasyon bölümü oluşturulmuştur. Ayrıca sistem performansının izlenebilmesi amacıyla seviye göstergesi kullanılmıştır.

Toplama kuyusunda biriken atık yağlar belirlenen seviyeye ulaştığında depolama sistemine aktarılmıştır.

2.3. Depolama ve Transfer Sistemi

Toplama kuyusunda biriken atık yağlar otomatik pompa sistemi yardımıyla 1 ton kapasiteli depolama tankına transfer edilmiştir. Depolama tankı çift cidarlı yapıda tasarlanmış olup olası sızıntılara karşı güvenlik sağlamak ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

Depolama süresince yağ-su karışımının homojen yapısını koruyabilmek amacıyla tank içerisine mekanik karıştırıcı sistemi entegre edilmiştir. Karıştırıcı belirli aralıklarla çalıştırılarak faz ayrışmasının önüne geçilmiş ve karışımın sürekli homojen kalması sağlanmıştır.

Transfer hattında kullanılan borular kimyasal dayanımı yüksek malzemelerden seçilmiş ve sistem içerisinde bulunan süzgeçler sayesinde büyük partiküllerin pompa veya boru hattına zarar vermesi engellenmiştir.

2.4. Laboratuvar Analizleri ve Karakterizasyon Çalışmaları

Atık yağların yeniden kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla üretim hattından elde edilen atık yağ-su karışımları ile kullanılmamış yeni yağ-su karışımlarından numuneler alınmıştır. Numuneler akredite bir laboratuvara gönderilmiş ve fiziksel ile kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Analizler kapsamında görünüm, renk, kuru madde oranı, refraktif indeks, pH, iletkenlik ve iyonik yapı parametreleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Yeni yağ-su karışımı ile atık yağ-su karışımının karşılaştırmalı analiz sonuçları

Özellik	Yağ-Su karışımı	Atık yağ-Su karışımı
Görünüm, renk	Berrak sıvı, uçuk sarı	Berrak sıvı, uçuk sarı
% Kuru madde	64	52
Refraktif indeks	53	50
%10 çözelti pH	6,9	6–7
%10 çözelti iletkenlik	259 μ S/cm	256 μ S/cm
%10 çözelti görünümü	Mikro emülsiyon	Mikro emülsiyon
İyonik yapı	Anyonik	Anyonik

Laboratuvar sonuçları, atık yağ-su karışımının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yeni yağ-su karışımı ile büyük ölçüde benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle görünüm, pH, iletkenlik ve iyonik yapı parametrelerinde önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda atık yağ-su karışımının yeniden kullanım açısından uygun olduğu değerlendirilmiştir.

2.5. Yağ-Su Oranının Düzenlenmesi ve Geri Kullanım

Laboratuvar analizleri ve saha ölçümleri sonucunda atık yağ karışımının ortalama yağ içeriğinin %17,9 olduğu belirlenmiştir. Üretim prosesinde kullanılan emülsiyonun ise %20 yağ içeriğine sahip olması gerektiğinden, geri kazanım sürecinde yağ-su oranı yeniden düzenlenmiştir.

Bu amaçla depolama tankından alınan numuneler üzerinde yağ oranı analizleri gerçekleştirilmiş, mevcut yağ oranı ile hedeflenen yağ oranı arasındaki fark hesaplanmış ve gerekli miktarda spin finish yağı sisteme dozajlanmıştır. Karıştırıcı sistemi yardımıyla homojen karışım elde edilmiş ve sonrasında yağ oranı tekrar ölçülerek proses şartlarına uygunluğu doğrulanmıştır.

Yağ oranı %20 seviyesine ulaştırılan karışım kalite kontrol işlemlerinin ardından yeniden üretim hattına beslenmiştir. Böylece herhangi bir kimyasal arıtma, santrifüjleme veya ileri filtrasyon işlemine ihtiyaç duyulmadan atık spin finish yağlarının yeniden kullanılması mümkün hale getirilmiştir [4].

Bu yaklaşım sayesinde hem atık oluşumu azaltılmış hem de yeni spin finish yağı tüketiminde önemli düzeyde tasarruf sağlanmıştır. Ayrıca sistem, düşük yatırım maliyeti ve mevcut üretim altyapısına kolaylıkla entegre edilebilmesi sayesinde ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir geri dönüşüm modeli sunmuştur.

3. BULGULAR

Polipropilen filament iplik üretiminde kullanılan spin finish yağları, filament yüzeyinde sürtünmeyi azaltmak, statik elektrik oluşumunu önlemek ve üretim prosesinin kararlılığını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. İncelenen tesiste spin finish yağı, üretim hattına %20 yağ ve %80 saf su oranında hazırlanmış emülsiyon şeklinde beslenmektedir. Ancak üretim prosesi sonunda oluşan yağ-su karışımı atık olarak değerlendirilmekte ve herhangi bir geri kazanım işlemine tabi tutulmadan bertaraf edilmektedir. Bu durum yalnızca ekonomik açıdan bir kayıp oluşturmakla kalmamakta, aynı zamanda atık yönetimi ve kaynak verimliliği açısından da önemli bir sürdürülebilirlik sorunu meydana getirmektedir [3].

Tekstil sektöründe döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte proseslerde kullanılan yardımcı kimyasalların yeniden değerlendirilmesi önem kazanmıştır [4]. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmada, atık spin finish yağlarının yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması ve ekonomik olarak uygulanabilir bir geri kazanım modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen sistemde, üretim makinelerinden çıkan atık yağ-su karışımları hortumlar yardımıyla merkezi bir toplama kuyusunda biriktirilmiştir. Toplanan atık yağ daha sonra boru sistemi aracılığıyla depolama tankına aktarılmış ve belirli bir süre bekletildikten sonra yeniden kullanım amacıyla değerlendirilmiştir. Yapılan ön incelemelerde atık yağların önemli bir bölümünün halen kullanılabilir yağ içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, atık yağların herhangi bir ileri arıtma işlemine ihtiyaç duyulmadan yeniden değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Atık yağların geri kullanım potansiyelini belirlemek amacıyla 15 gün boyunca her gün üç farklı ölçüm gerçekleştirilmiş ve toplam 45 adet ölçüm sonucu elde edilmiştir. Ölçümler yağ ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup üretim hattından çıkan atık yağ-su karışımının yağ içeriği belirlenmiştir. Böylece geri dönüşüm sisteminin tasarımında kullanılacak temel veri seti oluşturulmuştur.

Çizelge 3. Atık yağ ölçüm sonuçları

Gün	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Günlük ortalama
1	16,4	16,7	16,7	16,6
2	17,1	17,8	17,4	17,4
3	17,5	17,4	17,2	17,4
4	16,3	16,2	16,1	16,2
5	24,5	23,8	23,8	24,0
6	17,8	17,5	17,9	17,7
7	20,1	19,5	19,4	19,7
8	17,4	16,9	17,1	17,1
9	16,2	16,8	16,8	16,6
10	17,2	17,5	17,4	17,4
11	17,6	17,6	17,8	17,7
12	18,1	18,1	17,9	18,0
13	18,2	17,8	17,8	17,9
14	16,4	16,2	16,8	16,5
15	17,5	17,8	17,8	17,7

45 ölçüm ortalaması: %17,9

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda atık yağ-su karışımlarının ortalama yağ içeriğinin %17,9 olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, atık olarak değerlendirilen karışımın büyük oranda proses içerisinde kullanılabilir yağ içerdiğini göstermektedir. Üretim hattında kullanılan emülsiyonun hedef yağ oranının %20 olması nedeniyle, geri kazanılan karışımın yeniden kullanılabilmesi için yalnızca sınırlı miktarda ilave spin finish yağı kullanılması yeterli görülmüştür.

Yapılan değerlendirmelerde kullanılan spin finish yağının aktif yağ içeriğinin %57 olduğu belirlenmiştir. Buna göre 1000 litrelik bir tankta %20 yağ oranına sahip standart bir emülsiyon hazırlanabilmesi için teorik olarak 350,88 litre spin finish yağı kullanılması gerekmektedir. Ancak atık yağ karışımında hâlihazırda %17,9 oranında yağ bulunduğundan sistem tamamen yeni yağ ile hazırlanmamış, mevcut yağ içeriği korunarak yalnızca eksik kısım tamamlanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda 1000 litrelik bir tankın yağ oranını %17,9 seviyesinden %20 seviyesine çıkarabilmek için yaklaşık 56,76 litre spin finish yağı ilavesinin yeterli olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, proses içerisinde geri kazanılan yağın yüksek bir geri kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Tamamen yeni yağ kullanılması durumunda gerekli olan 350,88 litre spin finish yağı ile geri kazanım sisteminde ihtiyaç duyulan 56,76 litre spin finish yağı karşılaştırıldığında, her 10 günlük üretim periyodunda:

$$350,88 - 56,76 = 294,12 \text{ litre}$$

spin finish yağı tasarrufu sağlandığı hesaplanmıştır.

Tesiste her 10 günde bir yaklaşık 1 ton atık yağ toplandığı dikkate alındığında, aylık üç periyot üzerinden yapılan hesaplamalarda toplam tasarruf miktarı:

$$294,12 \times 3 = 882,36 \text{ litre/ay}$$

olarak belirlenmiştir.

Spin finish yağının satın alma maliyetinin 1,55 USD/L olduğu dikkate alındığında, yalnızca yağ tüketimindeki azalma sayesinde aylık yaklaşık 1.367,66 USD ekonomik fayda elde edilmektedir. Bu değer yıllık bazda değerlendirildiğinde yaklaşık 16.411,92 USD tasarrufa karşılık gelmektedir.

Sistemin kurulumu için gerekli yatırım kalemleri incelendiğinde, mevcut depolama tankının kullanılması nedeniyle ilave tank yatırımına ihtiyaç duyulmadığı görülmüştür. Sistem için gerçekleştirilen yatırım yalnızca yağ toplama kuyusu ve borulama sisteminden oluşmakta olup toplam yatırım maliyeti 2.471 USD olarak hesaplanmıştır. İşletme giderleri ise enerji, bakım ve işçilik dahil olmak üzere her 10 günlük dönem için yaklaşık 20 USD seviyesindedir.

Ekonomik değerlendirme sonuçları, sistemin oldukça kısa sürede kendini amorti ettiğini göstermektedir. Yapılan maliyet-fayda analizine göre yatırımın geri dönüş süresi yaklaşık 2 ay 1 gün olarak hesaplanmıştır. Bu geri ödeme süresi, tekstil sektöründe uygulanan birçok enerji verimliliği ve atık azaltımı projesine kıyasla oldukça düşük bir yatırım riski ortaya koymaktadır [5].

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde ise sistem sayesinde yılda yaklaşık 36 ton atık spin finish yağının yeniden kullanılması mümkün hale gelmektedir. Böylece hem atık oluşumu azaltılmakta hem de yeni kimyasal tüketimi düşürülmektedir. Bunun sonucunda doğal kaynak kullanımı azalmakta, atık bertaraf ihtiyacı düşmekte ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri önemli ölçüde azaltılmaktadır [3,4].

Elde edilen bulgular, atık spin finish yağlarının yalnızca yağ-su oranının yeniden düzenlenmesi ile üretim sürecine geri kazandırılabilirliğini göstermektedir. Bu yaklaşımın ileri filtrasyon, kimyasal arıtma veya santrifüjleme gibi yüksek yatırım maliyetine sahip sistemlere ihtiyaç duymadan uygulanabilmesi, yöntemin endüstriyel uygulanabilirliğini artırmaktadır.

4. TARTIŞMA

Tekstil sektöründe kullanılan proses yardımcı kimyasalları arasında yer alan spin finish yağları, filament iplik üretiminin sürekliliği, iplik kalitesi ve proses verimliliği açısından kritik öneme sahiptir [1,2]. Bununla birlikte bu yağların tüketimi, özellikle yüksek üretim kapasiteli tesislerde önemli bir işletme maliyeti oluşturmaktadır. Bu nedenle spin finish yağlarının kullanım verimliliğinin artırılması ve mümkün olan durumlarda yeniden değerlendirilmesi, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar sağlayabilmektedir [3].

İncelenen tesiste, üretim prosesinde kullanılan spin finish yağları makinelere %20 yağ ve %80 saf su oranında hazırlanan emülsiyon şeklinde beslenmektedir. Üretim süreci sonunda ortaya çıkan yağ-su karışımı ise herhangi bir geri kazanım işlemine tabi tutulmadan atık olarak bertaraf edilmektedir. Bu durum, kullanılabilir nitelikteki yağın kaybedilmesine neden olmakta ve işletmenin hammadde maliyetlerini artırmaktadır. Ayrıca atık yağların bertaraf edilmesi sürecinde çevresel etkiler de ortaya çıkmaktadır [4].

Bu çalışma kapsamında geliştirilen geri kazanım sistemi, atık yağların doğrudan bertaraf edilmesi yerine yeniden üretim sürecine kazandırılmasını amaçlamaktadır. Önerilen sistem sayesinde tank tamamen boşaltılıp yeniden doldurulmak yerine, her 10 günlük üretim periyodu sonunda yalnızca eksilen yağ miktarı kadar yeni spin finish yağı ilave edilmektedir. Böylece üretim prosesinin ihtiyaç duyduğu yağ konsantrasyonu korunurken gereksiz yağ tüketiminin önüne geçilmektedir.

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, atık yağ-su karışımının ortalama yağ içeriğinin %17,9 olduğu belirlenmiştir. Üretim prosesinde kullanılabilmesi için gerekli yağ oranı %20 olduğundan, mevcut karışımın yeniden kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla yalnızca eksik yağ miktarının tamamlanması yeterli olmaktadır. Kullanılan spin finish yağının aktif yağ içeriğinin %57 olduğu dikkate alındığında yapılan hesaplamalar sonucunda, her 1000 litrelik tank için yaklaşık 56,76 litre spin finish yağı ilavesiyle hedef yağ konsantrasyonuna ulaşılabilmektedir.

Eğer sistemde geri kazanım uygulanmayıp her tank tamamen yeni yağ-su karışımı ile hazırlanacak olsaydı, 1000 litrelik bir tank için toplam 350,88 litre spin finish yağı kullanılması gerekecekti. Ancak geri kazanım sistemi sayesinde yalnızca 56,76 litre yeni yağ kullanılması yeterli olmaktadır. Bu durum her 10 günlük üretim periyodunda:

$$350,88 - 56,76 = 294,12 \text{ litre}$$

spin finish yağı tasarrufu sağlandığını göstermektedir.

Tasarruf edilen bu miktar doğrudan üretim prosesinde kullanılabilecek nitelikte olduğundan, elde edilen kazanç işletme açısından doğrudan maliyet avantajına dönüşmektedir. Bu sonuç, proses yardımcı kimyasallarının geri kazanılmasının yalnızca çevresel değil aynı zamanda ekonomik açıdan da önemli faydalar sağlayabileceğini ortaya koymaktadır [3].

4.1. Ekonomik Değerlendirme

Sistemin ekonomik etkilerinin belirlenmesi amacıyla maliyet-fayda analizi gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda tesisin mevcut üretim kapasitesi, yağ tüketim miktarları, yatırım maliyetleri ve işletme giderleri dikkate alınmıştır.

Her 10 günlük üretim periyodunda sağlanan 294,12 litre yağ tasarrufu dikkate alındığında, yılda yaklaşık 36 üretim döngüsü üzerinden yapılan hesaplamalarda toplam yıllık tasarruf miktarı önemli seviyelere ulaşmaktadır. Spin finish yağının birim maliyetinin 1,55 USD/L olduğu dikkate alındığında sistem sayesinde yıllık yaklaşık 16.411 USD tutarında ekonomik kazanç elde edilmektedir.

Bu değer yalnızca hammadde maliyetlerinden kaynaklanan doğrudan tasarrufu ifade etmektedir. Atık yağların bertaraf edilmesi için gerekli taşıma, depolama ve atık yönetim maliyetlerinde meydana gelen azalmalar dikkate alındığında, sistemin işletmeye sağladığı toplam ekonomik katkının daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir [4].

4.2. Yatırım Maliyetleri

Sistemin kurulumu için gerçekleştirilen yatırım maliyetleri incelendiğinde, yeni bir tank yatırımına ihtiyaç duyulmadığı görülmektedir. Mevcut depolama tankının kullanılması sayesinde yatırım maliyetleri minimum seviyede tutulmuştur.

Yeni kuyu ve hat sisteminin toplam yatırım maliyeti 2.471 USD olarak hesaplanmıştır. Bu maliyet;

- 600 USD kuyu maliyeti,
- 928 USD hat ve bağlantı ekipmanları maliyeti,
- 943 USD montaj ve kurulum işçilik maliyeti

olmak üzere üç temel kalemden oluşmaktadır.

Yatırım maliyetlerinin düşük tutulabilmesi, sistemin uygulanabilirliğini artıran önemli avantajlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

4.3. Yatırımın Geri Ödeme Süresi

Yapılan maliyet analizleri sonucunda sistemin geri ödeme süresi yaklaşık 2 ay 1 gün olarak hesaplanmıştır. Bu geri ödeme süresi, tekstil sektöründe gerçekleştirilen birçok proses iyileştirme ve enerji verimliliği yatırımına kıyasla oldukça kısa bir süreye karşılık gelmektedir [5].

Yatırımın bu kadar kısa sürede kendini amorti edebilmesi, sistemin finansal açıdan düşük riskli ve yüksek getirili bir yatırım olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek miktarda spin finish yağı kullanan işletmelerde geri ödeme süresinin daha da kısalabileceği öngörülmektedir.

4.4. Çevresel Etkilerin Değerlendirilmesi

Ekonomik kazanımların yanı sıra sistemin çevresel etkileri de önemli düzeydedir. Yapılan hesaplamalara göre sistem sayesinde yılda yaklaşık 36 ton atık yağ-su karışımı bertaraf edilmek yerine yeniden üretim sürecine kazandırılmaktadır.

Atık yağların geri kazanılması, atık yönetim sistemleri üzerindeki yükü azaltmakta ve bertaraf süreçlerinden kaynaklanan çevresel riskleri minimize etmektedir. Bunun yanı sıra yeni kimyasal tüketiminin azalması, doğal kaynakların korunmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [4].

Döngüsel ekonomi yaklaşımının temel prensiplerinden biri olan kaynakların mümkün olduğunca uzun süre sistem içerisinde tutulması hedefi dikkate alındığında, geliştirilen geri kazanım sistemi bu prensiple büyük ölçüde uyum göstermektedir [3]. Ayrıca kimyasal tüketiminin azaltılması, dolaylı olarak üretim süreçlerinin karbon ayak izinin düşürülmesine de katkı sağlamaktadır.

Sonuç olarak yapılan maliyet-fayda analizleri ve çevresel değerlendirmeler, geliştirilen sistemin hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, spin finish yağlarının geri kazanımının tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşılmasına katkı sağlayabilecek etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, polipropilen filament iplik üretim süreçlerinde kullanılan spin finish yağlarının geri kazanımına yönelik geliştirilen sistemin teknik uygulanabilirliği, ekonomik performansı ve çevresel etkileri kapsamlı olarak değerlendirilmiştir. Tekstil sektöründe yaygın olarak kullanılan spin finish yağları, filament yüzeyinde sürtünmeyi azaltarak proses verimliliğini artırmakta ve nihai ürün kalitesinin korunmasına katkı sağlamaktadır [1,2]. Ancak üretim süreci sonunda ortaya çıkan yağ-su karışımlarının çoğu işletmede doğrudan bertaraf edilmesi, hem ekonomik kayıplara hem de çevresel yüklerin artmasına neden olmaktadır [3]. Bu çalışma kapsamında geliştirilen geri kazanım sistemi, söz konusu atıkların yeniden üretim sürecine kazandırılabilmesini ortaya koyarak tekstil sektöründe döngüsel ekonomi uygulamalarına örnek teşkil etmektedir [4].

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen saha ölçümleri sonucunda, üretim hattından çıkan atık yağ-su karışımlarının ortalama %17,9 yağ içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, atık olarak değerlendirilen karışımın önemli miktarda kullanılabilir spin finish yağı içerdiğini göstermektedir. Yapılan analizler ve laboratuvar değerlendirmeleri sonucunda, atık yağların herhangi bir ileri filtrasyon, kimyasal arıtma veya santrifüjleme işlemine ihtiyaç duyulmadan yalnızca yağ-su oranının yeniden düzenlenmesi ile proses içerisinde tekrar kullanılabilmesi ortaya konulmuştur. Bu durum, sistemin yatırım maliyetlerini düşük tutarken uygulanabilirliğini artıran önemli bir avantaj sağlamaktadır [5].

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, geliştirilen geri kazanım sisteminin işletmeye önemli düzeyde maliyet avantajı sağladığı görülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucunda, her 10 günlük üretim periyodunda bir tank için ortalama 294,12 litre spin finish yağı tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir. Bu tasarruf miktarı aylık bazda değerlendirildiğinde yaklaşık 882,36 litreye ulaşmakta, yıllık bazda ise yaklaşık 10.588 litre seviyesinde gerçekleşmektedir. Spin finish yağının birim maliyetinin 1,55 USD/L olduğu dikkate alındığında sistemin işletmeye sağladığı yıllık ekonomik katkı yaklaşık 16.411 USD olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, proses yardımcı kimyasallarının geri kazanımına yönelik uygulamaların işletme maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir araç olduğunu göstermektedir [3].

Sistemin yatırım maliyetleri incelendiğinde, mevcut depolama tankının kullanılması sayesinde ek tank yatırımına ihtiyaç duyulmadığı görülmektedir. Sistemin kurulumu için gerekli yatırım yalnızca yağ toplama kuyusu, borulama sistemi ve montaj maliyetlerinden oluşmuş olup toplam yatırım tutarı 2.471 USD olarak hesaplanmıştır. Bu yatırım maliyetinin düşük seviyede olması ve sistemin mevcut üretim altyapısına kolaylıkla entegre edilebilmesi, uygulamanın endüstriyel ölçekte yaygınlaştırılabilirliğini artırmaktadır. Yapılan maliyet-fayda analizleri sonucunda yatırımın geri ödeme süresi yaklaşık 2 ay 1 gün olarak belirlenmiştir. Bu geri ödeme süresi, tekstil sektöründe gerçekleştirilen birçok proses iyileştirme ve verimlilik projesine kıyasla oldukça kısa olup sistemin ekonomik açıdan son derece cazip olduğunu göstermektedir [5].

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde ise geliştirilen sistemin sürdürülebilir üretim hedeflerine önemli katkılar sunduğu görülmektedir. Sistem sayesinde yılda yaklaşık 36 ton atık yağ-su karışımı bertaraf edilmek yerine yeniden üretim sürecine kazandırılmaktadır. Böylece hem atık oluşumu azaltılmakta hem de yeni spin finish yağı tüketimi düşürülmektedir. Kimyasal tüketiminin azaltılması doğal kaynak

kullanımını düşürmekte, atık bertaraf süreçlerinden kaynaklanan çevresel etkileri minimize etmekte ve işletmenin çevresel performansını iyileştirmektedir [3,4]. Ayrıca atıkların yeniden değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi yaklaşımının temel prensiplerinden biri olan kaynakların sistem içerisinde mümkün olduğunca uzun süre tutulması ilkesini desteklemektedir [4].

Operasyonel açıdan değerlendirildiğinde, geliştirilen geri kazanım sistemi üretim sürecine kolaylıkla entegre edilebilmekte ve ilave iş yükü oluşturmada çalışabilmektedir. Toplama kuyusu, transfer hattı ve depolama tankından oluşan sistem sayesinde atık yağların düzenli olarak izlenmesi ve yeniden kullanıma hazırlanması mümkün hale gelmiştir. Bunun yanı sıra düzenli ölçüm ve kontrol faaliyetleri, yağ-su oranının istenilen seviyede tutulmasını sağlayarak proses stabilitesinin korunmasına katkıda bulunmaktadır. Bu durum işletmenin operasyonel sürekliliğini desteklerken kaynak kullanımının optimize edilmesine de yardımcı olmaktadır.

Günümüzde tekstil sektöründe faaliyet gösteren işletmeler yalnızca mali performansları ile değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumlulukları ile de değerlendirilmektedir. Bu nedenle geliştirilen sistemin işletmeye sağladığı çevre dostu üretim yaklaşımı, müşteri beklentilerinin karşılanması ve kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Özellikle uluslararası markaların sürdürülebilirlik kriterlerine giderek daha fazla önem verdiği günümüzde, bu tür uygulamalar işletmelerin rekabet gücünü artıran stratejik yatırımlar olarak değerlendirilmektedir [4].

Sonuç olarak, geliştirilen spin finish yağı geri kazanım sistemi; düşük yatırım maliyeti, kısa geri ödeme süresi, yüksek yıllık tasarruf potansiyeli ve önemli çevresel kazanımları ile tekstil sektöründe uygulanabilir, ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Çalışma sonuçları, atık olarak değerlendirilen spin finish yağlarının uygun proses yönetimi ile yeniden kullanılabilirliğini ve bu sayede hem işletme maliyetlerinin azaltılabileceğini hem de çevresel performansın iyileştirilebileceğini göstermiştir. Bu tür geri kazanım projelerinin sektör genelinde yaygınlaştırılması, kaynak verimliliğinin artırılmasına, atık oluşumunun azaltılmasına ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının güçlendirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

1. Taşcan, M. & Mevlüt, A. (1999). Polipropilen BCF iplik üretim parametrelerinin iplik özellikleri ve hali performansına etkileri. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 9(2), 45-52.
2. Demircan, M. (2016). Tekstil sektöründe sürdürülebilir üretim uygulamaları ve atık yönetimi. *Tekstil Araştırmaları Dergisi*, 12(4), 82-91.
3. Lopez, R., Martinez, J. & Garcia, P. (2018). Recycling and reuse approaches in industrial processes: Environmental and economic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 185, 512-523.
4. Tekeli, H. & İlkin, S. (2018). Tekstil endüstrisinde geri dönüşüm uygulamaları ve sürdürülebilirlik yaklaşımları. *Sürdürülebilir Üretim Dergisi*, 6(3), 170-181.
5. Brown, J. (2019). Industrial oil recovery systems: Filtration, centrifugation, and thermal processes. *Journal of Environmental Engineering*, 45(3), 211-224.
6. Smith, A. & Jones, B. (2020). Recovery and reuse of spin finish oils in textile manufacturing processes. *Textile Research Journal*, 90(11-12), 1254-1268.
7. Yang, L., Wang, H., Zhang, Y. & Liu, X. (2021). Advanced purification technologies for industrial oil recovery and reuse. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, Article 105512.
8. Hacıoğulları, F. ve Babaarslan, O. (2022). Güç tutuşurluk katkı maddesinin polipropilen filament ipliklerin yapısal ve mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 29(128), 278-289.
9. Torun, M., Özdemir, H., Peşman, E. ve Çavdar, A.D. (2023). Bitkisel atık yağ ve atık gazete lifleri ile güçlendirilmiş geri dönüştürülmüş polipropilen kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. *Polimer Kompozitler Dergisi*, 15(1), 55-68.
10. Çelik, A., Yılmaz, B. & Demir, H. (2024). Rheological properties of spin finish oils and their effects on filament yarn performance. *Journal of Textile and Chemical Technologies*, 18(2), 45-58.



Tornalamada Ayna ve Punta Basıncının Titreşim ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisinin YSA Yöntemi Kullanılarak Tahmini

Hüseyin GÜRBÜZ^{1,a}, Şehmus BADAY^{1,b}, Mehmet Emin DEMİR^{1,c}

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-1391-172X; ^bORCID: 0000-0003-4208-8779; ^cORCID: 0000-0001-9630-6378

Makale Bilgileri

Geliş : 17.03.2025

Kabul : 22.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1659519

Sorumlu Yazar

Hüseyin GÜRBÜZ

huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Yapay sinir ağları

Ayna ve punta basıncı

Yüzey pürüzlülüğü

Titreşim

K-fold çapraz doğrulama

Atf şekli: GÜRBÜZ, H., BADAY, Ş., DEMİR, M.E., (2026). Tornalamada Ayna ve Punta Basıncının Titreşim ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisinin YSA Yöntemi Kullanılarak Tahmini. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 467-477.

ÖZ

Bu çalışmada, sabit kesme şartlarında beş farklı ayna ve punta basıncı seçilerek iş parçaları işlenmiş ve yüzey pürüzlülük ile titreşimleri değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri giriş parametresi olarak belirlenen ayna ve punta basınçlarına bağlı olarak yapay sinir ağı (YSA) ile eğitilmiştir. YSA modelinde, Levenberg–Marquardt eğitim algoritması kullanılmıştır. Daha sonra K-fold çapraz doğrulama yöntemi ile de elde edilen sonuçların doğruluğu test edilmiştir. Eğitilen YSA modeli sonucunda, titreşim değerleri için test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,96702 – 0,91189 – 0,98019 ve 0,85546 olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri için ise test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerlerinin sırasıyla 0,87425 – 0,9952 – 0,87581 ve 0,84159 olduğu belirlenmiştir. K-fold çapraz doğrulama sonucunda hata oranları oldukça düşük çıkmış ve elde edilen YSA modelinin güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Prediction of the Effect of Chuck and Tailstock Pressure on Vibration and Surface Roughness in Turning Using ANN Method

Article Info

Received : 17.03.2025

Accepted : 22.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1659519

Corresponding Author

Hüseyin GÜRBÜZ

huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Keywords

Artificial neural network

Chuck and tailstock pressure

Surface roughness,

Vibration, AISI 304,

K-fold cross-validation

How to cite: GÜRBÜZ, H., BADAY, Ş., DEMİR, M.E., (2026). Prediction of the Effect of Chuck and Tailstock Pressure on Vibration and Surface Roughness in Turning Using ANN Method. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 467-477.

ABSTRACT

In this study, the workpieces were machined under constant cutting conditions using five different chuck and tailstock pressure levels, and the corresponding surface roughness and vibration values were obtained. The surface roughness and vibration values were trained using an artificial neural network (ANN) based on the chuck and tailstock pressures defined as input parameters. In the ANN model, the Levenberg–Marquardt training algorithm was used. Subsequently, the accuracy of the obtained results was evaluated using the K-fold cross-validation method. As a result of the trained ANN model, the regression coefficient values for the vibration data were obtained as 0.96702, 0.91189, 0.98019, and 0.85546 for the test, validation, training, and overall datasets, respectively. For the surface roughness values, the regression coefficient values were determined to be 0.87425, 0.9952, 0.87581, and 0.84159 for the test, validation, training, and overall datasets, respectively. As a result of the K-fold cross-validation, the error rates were found to be quite low, indicating that the developed ANN model can be used reliably.

1. GİRİŞ

Tornalama işlemlerinde, iş parçalarının tezgâha uygun bir ayna ve punta basıncı altında doğru bir şekilde bağlanması oldukça önemlidir. Çünkü uygun bir ayna ve punta basıncında bağlanamayan bir iş parçası salgılı ve eksenden kaçık dönmesinden dolayı iş parçasında bozulmalara, yüksek değerlerde titreşimlere ve yüzey pürüzlülük değerlerine sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek için işleme parametrelerinin yanında, doğru bir ayna ve punta basıncını seçmek oldukça önemlidir. Tornalama işlemlerinde yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri önemli bir yer tutmaktadır [1-8].

Yapılan literatür araştırmasında, YSA kullanarak yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin eden bir çok çalışma mevcuttur [9-17]. Asiltürk ve Çunkaş, AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmini için bir YSA modeli kullanmışlardır. Uyguladıkları YSA ve çoklu regresyon yaklaşımlarının yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebildiğini tespit etmişlerdir. YSA modelinin, çoklu regresyon modeline kıyasla yüzey pürüzlülüğünü yüksek doğrulukla tahmin ettiğini belirlemişlerdir. [8]. Akkuş çalışmasında yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmini için YSA modeli kullanmıştır. YSA ağında giriş parametreleri olarak kesme parametreleri, çıkış parametresi olarak ise yüzey pürüzlülük değerlerini seçmiştir. Ağ modelinde, YSA'nın eğitilmesi için Levenberg-Marquardt eğitim fonksiyonunu, ileri beslemeli geriye yayılım algoritmasını ve tansig aktivasyon fonksiyonunu kullanmıştır. Deney sonuçlarını yaklaşık olarak %78,92 doğruluk ile tahmin etmiştir [9]. Gürbüz ve Gönülaçar işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerini ve kesme kuvvetlerini Taguchi Sinyal/Gürültü (S/N) oranları ve YSA kullanarak değerlendirmişlerdir. Taguchi S/N oranları ve YSA'dan elde edilen R^2 değerlerinin, deneysel sonuçların değerlerini tahmin etme açısından oldukça yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca S/N oranlarına göre kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili kontrol faktörün ilerleme hızı olduğunu bulmuşlardır [10]. Bober ve ark., AISI 304 çeliğinin işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmek için YSA modeli kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmede kullandıkları YSA modelinin oldukça başarılı sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. ANN modeli ile polinom modelini kıyasladıklarında, ANN modelinin kısmen daha iyi bir performans sergilediğini belirtmişlerdir [11]. Demirdöğen ve ark., sıcak iş takım çeliğinin farklı işleme parametrelerinde tornalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini birkaç farklı optimizasyon yöntemi ile kıyaslamışlardır. ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli işleme parametresinin ilerleme oranı olduğunu tespit etmişlerdir. Sugeno metodunda kural sayısı ve üyelik fonksiyonlarının, YSA modelinde ise katman ve nöron sayısının önem arz ettiğini vurgulamışlardır [12].

Akkuş bir diğer çalışmasında, deney düzeneğini yüzey yanıt yöntemine (RSM) göre belirleyerek AISI 1040 çeliğini torna tezgahında işlemiştir. İşleme sonucunda iş parçasının yüzeyinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri için RSM modeli ve YSA modeli oluşturulmuştur. RSM modelinin yaklaşık %90 doğrulukla deney sonuçlarını tahmin ettiğini belirtmiştir [13]. Gürbüz ve ark., AISI 1050 çeliğini farklı kesme parametreleri ve kesici takımlarla tornalamışlardır. İş parçasının yüzeyinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini YSA kullanarak tahmin etmişlerdir. YSA modeliyle elde etmiş oldukları sonuçların kabul edilebilir değerler içerisinde olduğunu belirtmişlerdir [14]. Serin ve ark., Ti6Al4V malzemesinin tornalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçların tahmini için YSA kullanmışlardır. YSA modelinin yüzey pürüzlülük için hata oranının %6,1 olarak elde edilmesi kullanılan modelin güvenilirliğini teyit etmiştir [15]. Arapoğlu ve ark., farklı iş parçalarının farklı kesme parametrelerinde tornalanmasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmede YSA modeli uygulamışlardır. YSA modeli ile yüzey pürüzlülüğünü etkileyen değişkenlerin seçiminde ve tornalamada yüzey pürüzlülüğünün tahmininde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [16]. Bayram ve ark., farklı işleme parametrelerinde kuru tornalamada elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmek için YSA algoritmaları kullanılarak matematiksel tahmin modelleri geliştirilmişlerdir. YSA tahminlerinin deneysel sonuçlara göre %87,6 doğruluğa sahip olduğu ve YSA yönteminin yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir [17].

Literatürde, farklı ayna ve punta basınçlarına bağlı olarak iş parçasında oluşacak titreşim ve yüzey pürüzlülük değerlerini inceleyen çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışma, hem deneysel hem de istatistiksel olarak farklı ayna ve punta basınçlarının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri üzerindeki

etkilerini incelemektedir. Elde edilen sonuçların, işleme süresini ve maliyetlerini azaltarak tornalama işlemlerine katkı sağlaması ve literatüre önemli bir katkı sunması beklenmektedir. Bu çalışmada, sabit kesme parametrelerinde farklı punta ve ayna basıncına bağlı olarak AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin boyuna tornalanması sonucunda elde edilen titreşim ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin tahmini için bir YSA modeli sunulmuştur. Daha sonra işleme deneylerinden elde edilen titreşim ve yüzey pürüzlülük değerleri ile YSA modelinde elde edilen tahmin değerleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma işlemi K-fold çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. İş Parçası Malzemesi

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak AISI 304 çeliği kullanılmış olup VARZENE metal sanayi ve ticaret anonim şirketi firmasından temin edilmiştir. Deney numunesinin çapı 35 mm ve boyu 300 mm olarak belirlenmiştir. AISI 304 iş parçasının sertlik değeri ve kimyasal bileşimi Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. İş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi ve sertlik değeri

% C	% P	% Si	% Mn	% S
0,070-0,024	0,045-0,036	1,00-0,39	2,0-1,45	0,030-0,029
% N	% Cr	% Co	% Ni	Sertlik
0,100-0,085	19,50-17,50	0,15(max)	10,50-8,00	215 HB

2.2. Takım Tezgâhı, Kesici Takımlar ve Takım Tutucu

İş parçalarının tornalanmasında TAKİSAWA EX-310 marka CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. Deneylerde OKE takım üretici firmasından temin edilen P25/M25 kalitesine sahip PVD kaplamalı WNMG 080408-OMM formunda kesici takımlar ve bu kesici takımlara uygun PWLNR 2525M08 takım tutucu temin edilmiştir.

2.3. Kesme Parametreleri

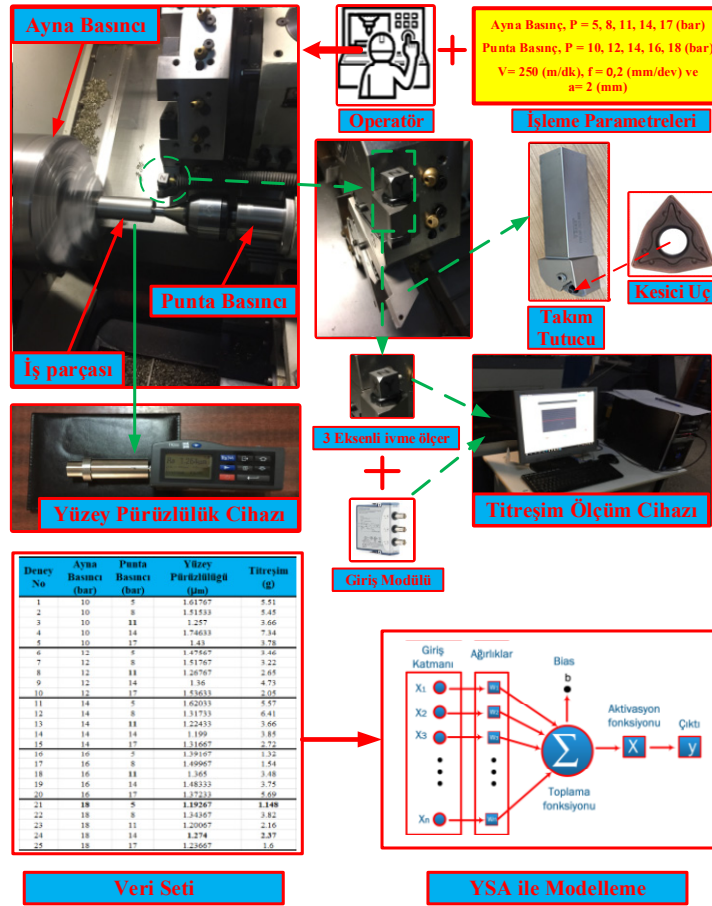
Tornalama deneylerinde kullanılan kesme parametreleri, kesici takım üretici firmasının önerisi ve ISO 3685 şartları göz önünde bulundurularak alınarak belirlenmiştir. İşleme deneylerinde beş farklı ayna ve punta basıncı sabit kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği kullanılmıştır. İşleme deneylerinde kullanılan ayna ve punta basıncı ve kesme parametreleri değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Tornalamada kullanılan işleme parametreleri

İşleme parametreleri	Değerler
Punta basınç, P (bar)	10, 12, 14, 16, 18
Ayna basınç, P (bar)	5, 8, 11, 14, 17
Kesme derinliği, a (mm)	2
İlerleme, f (mm/dev)	0,2
Kesme hızı, V (m/dk)	250

2.4. Yüzey Pürüzlülük ve Titreşim Ölçümü

AISI 304 iş parçasının tornalanması sonucunda oluşan yüzey pürüzlülükleri TR 200 ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Her iş parçasının işlenmiş yüzeyinin 5 farklı noktasından 5 mm ölçme boyunda alınan değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Farklı ayna ve punta basınçlarında AISI 304 iş parçasının işlenmesi sırasında meydana gelen titreşimler, NI-9230 marka cihaz ile ölçülmüştür. Her deney numunesinin işlenmesi sırasında bilgisayar bağlantılı bir şekilde 3 boyutlu ivmeye bağlı olarak veriler toplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim deney düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği ve YSA modelleme

2.5. YSA ve K-Fold Çapraz Doğrulama

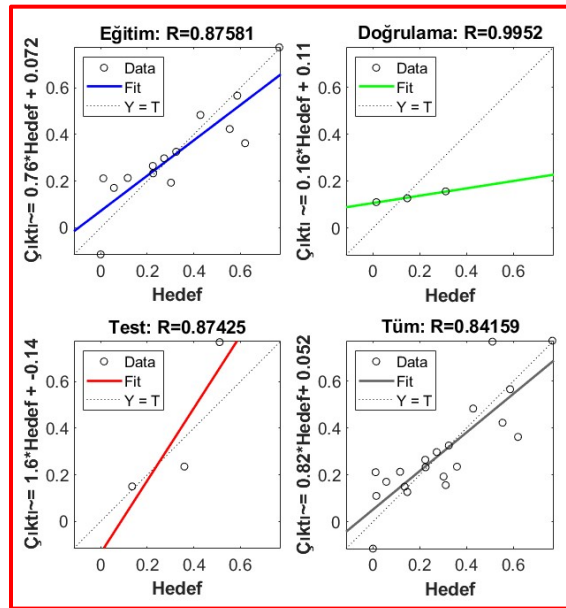
Şekil 1’de verilen deney parametreleri tam faktöriyel tasarıma göre gerçekleştirilmiş olup deney tekrarları yapılmamıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri 5 farklı noktasından 5 mm aralıklarla ölçülmüş olup bunların ortalaması alınmıştır. Titreşim genliklerinin ölçümlerinde ise NI-9230 marka cihaz ile ölçümler alınmış ve elde edilen titreşim genliklerin ortalaması alınmıştır. YSA’da verilerin işlenmesinde K-fold çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. YSA modelinde, çok katmanlı geri yayılım ve ileri beslemeli (back propagation and feed forward) bir ağ kullanılmıştır. Doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerini çözmek için geri yayılım yöntemi olarak verimliliği nedeniyle Levenberg-Marquardt (LM) algoritması uygulanmıştır. Kare hataların toplamını en aza indirmek için optimize edilmiştir. Geliştirilen YSA modelinin geçerliliğini değerlendirmek ve aşırı uyumu önlemek için K-katlı çapraz doğrulama tekniği uygulanmıştır. Veri seti rastgele beş parçaya bölünmüş ve bu işlem, her parça bir kez test verisi olarak kullanılarak beş kez tekrarlanmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

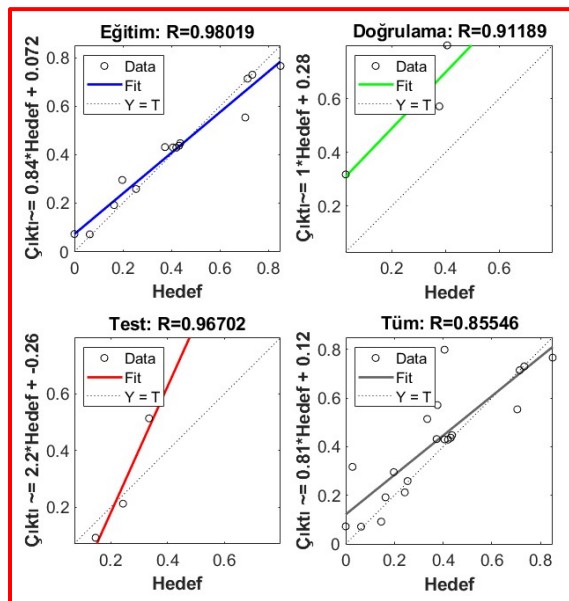
3.1. YSA Analizi

Literatür çalışmaları incelendiğinde farklı ayna ve punta basıncına bağlı olarak işleme esnasında elde edilen titreşim değerleri ve işleme sonrası işlenmiş yüzey üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini inceleyen hem deneysel hem de istatistiksel bir çalışmaya rastlanmıştır. Günümüz imalat sanayinde talaşlı üretim süreçlerinin enerji verimliliği açısından iyileştirilmesi, işleme sürelerinin azaltılması, işleme ve kesme parametrelerin etkin biçimde yönetilmesi, sürdürülebilirlik odaklı üretim anlayışının temel unsurları arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, üretim performansının artırılması için uygun ayna ve punta basıncında iş parçalarını işlenmesi talaşlı imalatla istenmeyen yüksek yüzey pürüzlülük ve titreşim değerlerinin düşürülmesinde belirleyici bir kriter haline gelmiştir. Farklı punta ve ayna basıncına bağlı

olarak sabit kesme parametrelerde işlenen AISI 304 iş parçasının işlenmesi sonucu oluşan titreşim ve yüzey pürüzlülük değerleri YSA tarafından eğitilmiştir. Titreşim ve yüzey pürüzlülük sonuçlarına ait deneysel veriler eğitildikten sonra elde edilen regresyon (R) grafikleri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'teki titreşim ve yüzey pürüzlülüğü için verilen grafikler test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon grafiklerini göstermektedir. Regresyon grafiklerinde hedef ve çıktının 45 derecelik açıya sahip çizginin etrafında yakın değerlerde olması ve elde edilen regresyon katsayı değerlerinin 1'e yakın olması arzu edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri için test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,87425 – 0,9952 – 0,87581 ve 0,84159 olarak ortaya çıkmıştır. Titreşim değerlerinde ise test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,96702 – 0,91189 – 0,98019 ve 0,85546 olarak elde edilmiştir. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için kullanılan regresyon (R) değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Hem yüzey pürüzlülüğü hem de titreşim için elde edilen regresyon değerlerinin 1'e yakın elde edilmesi, YSA modelinde ağırlık iyi eğitildiğini, güvenilir olduğunu ve deneysel veriler ile tahmin değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu ispatlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma ile YSA'nın yüzey pürüzlülük ve titreşim değerlerinin tahmin etmede bir model olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

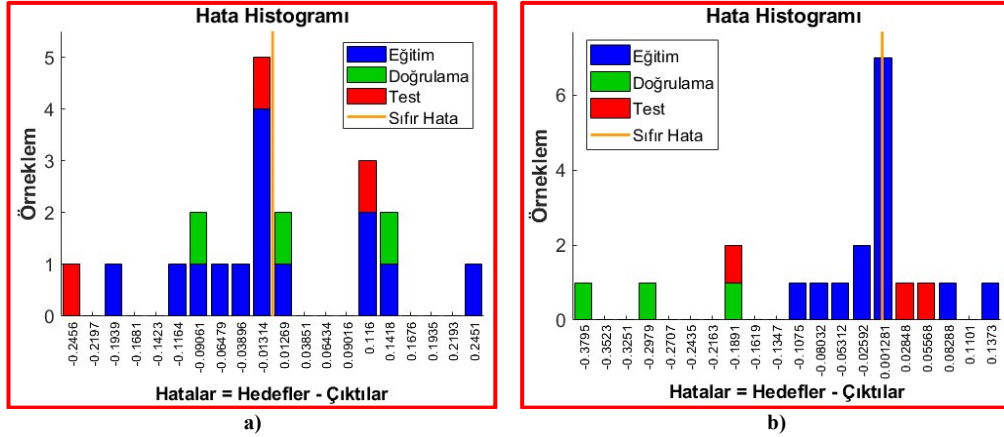


Şekil 2. Yüzey pürüzlülüğü için ölçülen sonuçlar ile tahmini değerler arasındaki ilişki grafikleri



Şekil 3. Titreşim değerleri için ölçülen sonuçlar ile tahmini değerler arasındaki ilişki grafikleri

Farklı işleme parametrelerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için ağ performansını incelemek için, hata dağılım grafikleri Şekil 4a ve Şekil 4b’de verilmiştir. Hata dağılım grafiğinde kırmızı alanlar test, yeşil alanlar doğrulama ve mavi kısımlar ise eğitimi göstermektedir. Şekil 4a ve Şekil 4b’deki hata dağılım grafiğine bakıldığında, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için hataların çoğunun sırasıyla 0,01314 ve 0,001281 değerlerinde yükseldiği ve sıfıra yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için genel veri kümelerinin hata değerlerinin sırasıyla 0,2456’dan ve 0,3795’den az olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen YSA modeli, deneysel veriler için yüksek doğrulukta sonuçlar vermesi modelin tutarlı ve doğru olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Hata dağılım grafiği: a) Yüzey pürüzlülüğü b) Titreşim

Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için YSA’ların eğitiminde sağlamış olduğu hız ve kararlılık nedeni ile kullanılan Levenberg–Marquardt eğitim algoritması Çizelge 3 ve Çizelge 4’te gösterilmiştir. Çizelge 3 ve Çizelge 4’e bakıldığında eğitim algoritmaları yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için sırasıyla 7. ve 8. döngüde tamamlanmıştır. Levenberg–Marquardt algoritmasının eğitim sürecinde Mu değeri yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri için başlangıçta 0,001 olarak belirlenmiştir. Daha sonra eğitim süreci ilerledikçe yüzey pürüzlülük için $1e-07$ ve titreşim için ise $1e-08$ değerine kadar düşmüştür. Sonuç olarak deneysel veriler için Mu değerinin başlangıçtan itibaren belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Yüzey pürüzlülüğü için Levenberg–Marquardt eğitim algoritması süreci

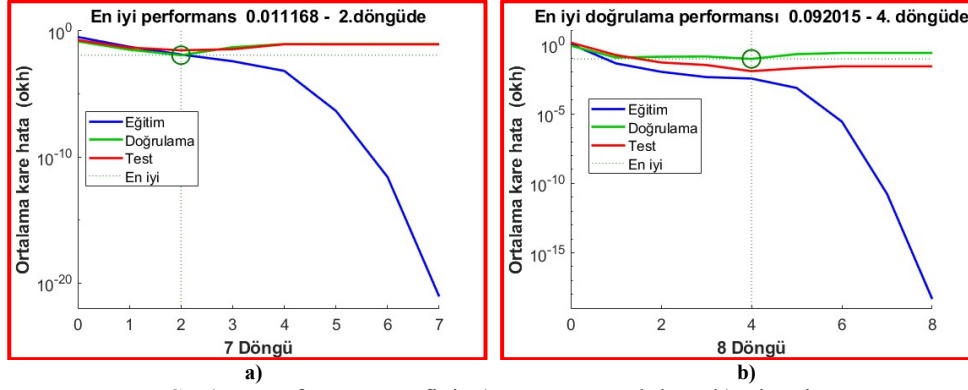
Eğitim işlemi	Başlangıç değeri	Durma değeri	Hedef değeri
Döngü	0	7	1000
Geçen süre	-	00:00:00	-
Performans	0,309	$8,59e-22$	0
Gradient	0,48	$3,75e-12$	$1e-07$
Mu	0,001	$1e-08$	$1e+10$
Doğrulama kontrolleri	0	5	6

Çizelge 4. Titreşim için Levenberg–Marquardt algoritması eğitim süreci

Eğitim işlemi	Başlangıç değeri	Durma değeri	Hedef değeri
Döngü	0	8	1000
Geçen süre	-	00:00:00	-
Performans	1,08	$4,65e-19$	0
Gradient	1,72	$8,77e-11$	$1e-07$
Mu	0,001	$1e-07$	$1e+10$
Doğrulama kontrolleri	0	4	6

Sabit kesme parametrelerde farklı ayna ve punta basınçlarında elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve titreşime ait deneysel verilerin performans grafikleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Performans grafiğinde kırmızı çizgi testi, yeşil çizgi doğrulamayı, mavi çizgi eğitimi ve sürekli kesik çizgide en iyiyi ifade etmektedir. Şekil 5a’daki yüzey pürüzlülük değerleri için elde edilen model 7. döngüye kadar eğitildiği ve en iyi performansın 2. döngüde ortalama kare hata değeri 0,011168 olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 5b’de ise titreşim değerleri için modelin 8. döngüye kadar eğitildiği ve en iyi performansın 4. döngüde ortalama kare hata değeri

0,092015 olarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için gerçek değerler ve tahmini değerler arasındaki hata oranı sırasıyla 2. ve 4. döngüden sonra arttığından dolayı program bu döngülerde sonlanmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşime ait eğitim hata değerlerinin artan döngü sayısı azaldığı Şekil 5a ve Şekil 5b’de verilen performans grafiklerinden tespit edilmiştir. Şekil 5a ve Şekil 5b’de verilen performans grafiklerinde ortalama kare hata değerinin sıfıra yakın olması deneysel araştırmanın doğruluğunu, YSA modelinin çok iyi eğitildiğini ve dolayısıyla geliştirilen modelin hedef değerlere çok yakın değerleri tahmin edebileceğini göstermektedir.



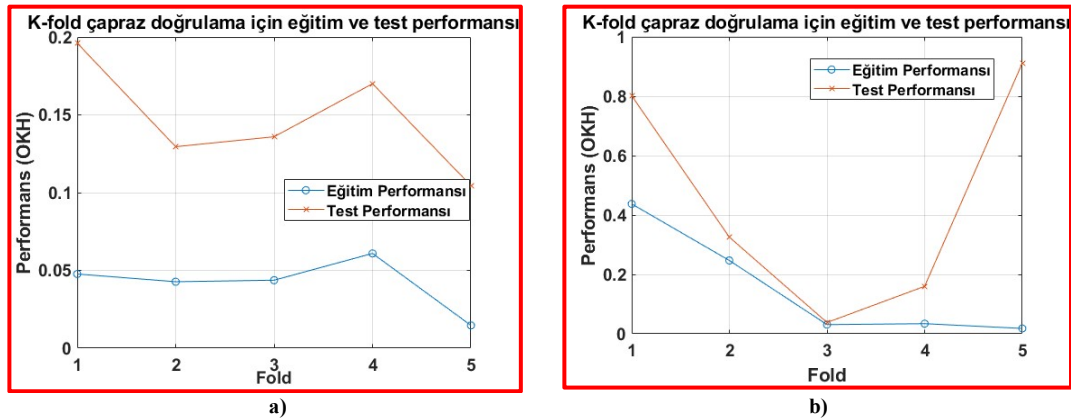
Şekil 5. Performans grafiği: a) Yüzey pürüzlülüğü b) Titreşim

Farklı parametrelere bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için K-fold çapraz doğrulama için eğitim ve test performans değerleri Çizelge 5’te verilmiştir. Deneysel veriler için modellere uygulanan test ve eğitim verilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlayan çapraz doğrulama (K-fold cross validation) sayısı 5’dir. Çizelge 5’teki K-fold eğitim ve test performans değerleri incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için ortalama değerler sırasıyla 0,041928 - 0,147221 - 0,144194 ve 0,424737 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için K-fold eğitim ve test performans değerleri

	Yüzey pürüzlülüğü (μm)		Titreşim (g)	
	Eğitim performansı	Test performansı	Eğitim performansı	Test performansı
Fold 1	0,047680	0,196089	0,423253	0,809782
Fold 2	0,042709	0,129532	0,234251	0,344284
Fold 3	0,043691	0,135932	0,023467	0,028372
Fold 4	0,060906	0,170025	0,022358	0,018930
Fold 5	0,014655	0,104524	0,017643	0,922317
Ortalama değer	0,041928	0,147221	0,144194	0,424737

Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim veri seti için K-fold çapraz doğrulama eğitim ve test performans Ortalama Kare Hata (OKH) sonuçları Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. K-fold eğitim ve test performans değerleri a) Yüzey pürüzlülüğü b) Titreşim

Şekil 6'daki grafikler incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve titreşim veri seti için K-fold çapraz doğrulama eğitim ve test değerlerinin birbirine en yakın çıktığı performans OKH değerler sırasıyla K-fold 2 ve K-fold 3'te elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim deneysel verilerinin tahminin başarılı olduğu K-fold eğitim ve test performans değerleri grafiklerinden anlaşılmaktadır.

3.2. ANOVA Analizi ve Tukey Testi

Ayna ve punta basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri üzerinde etkisini gösteren ANOVA analizleri Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir. Çizelge 6'daki ayna basıncının değişimine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri için elde edilen ANOVA sonuçlarındaki P değeri incelendiğinde bu değer $P < 0,05$ 'ten küçük olduğu görülmektedir. İstatistiksel olarak bir değer anlamlı olabilmesi için P değerinin $0,05$ 'ten küçük olması gerekmektedir. Bundan dolayı ayna basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayna basıncı için Çizelge 7'deki P değerine bakıldığında bu değer $0,028$ çıktığı görülmüş ve $0,05$ 'ten küçük olması nedeniyle yapılan analizin istatistiksel olarak geçerli olduğu görülmüştür. Punta basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerindeki etkisine bakıldığında elde edilen P değerlerinin $0,05$ 'ten büyük olmasından ötürü, yapılan analizin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 6. Ayna basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerindeki etkisinin ANOVA analizi

	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Ra (μm)	Ayna basıncı	4	0,2033	0,0508	3,04	0,041
	Hata	20	0,3346	0,0167		
	Toplam	24	0,5379			
g (m/s^2)	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
	Ayna basıncı	4	26,72	6,68	3,41	0,028
	Hata	20	39,20	1,96		
	Toplam	24	65,92			

Çizelge 7. Punta basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerindeki etkisinin ANOVA analizi

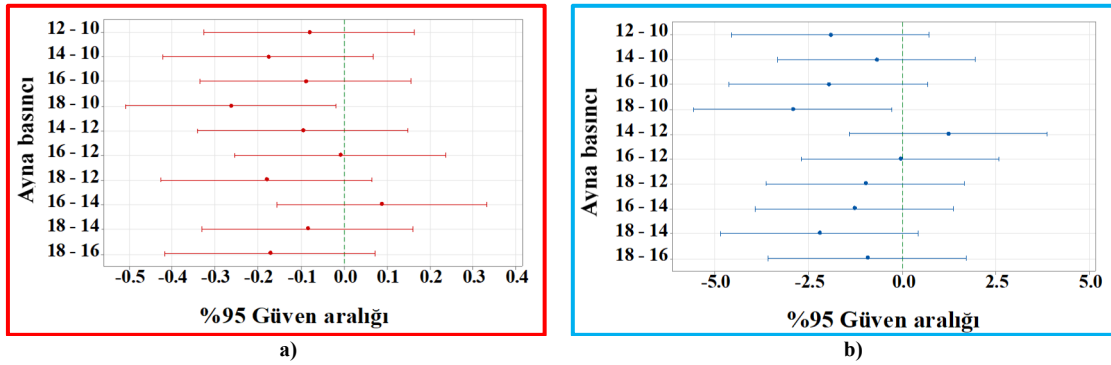
	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
Ra (μm)	Ayna basıncı	4	0,12	0,0300	1,44	0,259
	Hata	20	0,4179	0,0209		
	Toplam	24	0,5379			
g (m/s^2)	Kaynak	DF	SS	MS	F	P
	Ayna basıncı	4	6,69	1,67	0,56	0,691
	Hata	20	59,22	2,96		
	Toplam	24	65,92			

ANOVA analizinden sonra uygulanan çoklu karşılaştırma yöntemlerinden biri de Tukey testidir. Bu testin temel amacı, giriş parametreleri arasındaki ortalama farklarını belirlemek ve hangi parametrenin birbirinden anlamlı derecede farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Tukey testi ANOVA'dan farklı olarak test sonuçlarının P değerlerinin anlamlılığından ziyade hangi parametrelerin kendi arasında anlamlı olduğunu tespit etmemize yardımcı olur. Tukey testi hem ayna basıncı hemde punta basıncı için uygulanmamıştır. Çünkü Tukey testi uygulanabilmesi için ANOVA çizelgesinde yer alan P değeri anlamlı olması gerekmektedir. Çizelge 6 ve 7'deki değerler incelendiğinde P değeri anlamlı olan ayna basıncı oluğu için Tukey testi sadece ayna basıncına uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri için ayna basıncı arasındaki değerlerin birbiriyle olan ilişkisini gösteren Tukey testi sonuçları Çizelge 8 'de verilmiştir. Çizelge 8'deki titreşim ve yüzey pürüzlülük değerleri için ayna basıncı değerlerinin birbiriyle olan ilişkisine bakıldığında ayna basıncı 18 ile 10 bar olduğunda anlamlı olduğunu tespit edilmiştir. Çizelge 8'deki diğer değerlerin birbiriyle ilişkisinin anlamlı olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 8. Yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için ayna basınçları arasındaki Tukey testi

Ayna basıncı seviyeleri	Yüzey pürüzlülük değerleri için				Titreşim değerleri için			
	Ort. fark	95% Güven aralığı	T-değeri	P-değeri	Ort. fark	95% Güven aralığı	T-değeri	P-değeri
12 - 10	-0.0818	(-0.3265; 0.1629)	-1.00	0.852	-1.926	(-4.574; 0.722)	-2.18	0.229
14 - 10	-0.1777	(-0.4224; 0.0670)	-2.17	0.230	-0.706	(-3.354; 1.942)	-0.80	0.928
16 - 10	-0.0909	(-0.3356; 0.1538)	-1.11	0.799	-1.992	(-4.640; 0.656)	-2.25	0.202
18 - 10	-0.2637	(-0.5084; -0.0190)	-3.22	0.031	-2.928	(-5.577; -0.280)	-3.31	0.026
14 - 12	-0.0959	(-0.3406; 0.1488)	-1.17	0.766	1.220	(-1.428; 3.868)	1.38	0.648
16 - 12	-0.0091	(-0.2538; 0.2356)	-0.11	1.000	-0.066	(-2.714; 2.582)	-0.07	1.000
18 - 12	-0.1819	(-0.4266; 0.0628)	-2.22	0.211	-1.002	(-3.651; 1.646)	-1.13	0.788
16 - 14	0.0869	(-0.1578; 0.3316)	1.06	0.823	-1.286	(-3.934; 1.362)	-1.45	0.603
18 - 14	-0.0860	(-0.3307; 0.1587)	-1.05	0.829	-2.222	(-4.871; 0.426)	-2.51	0.128
18 - 16	-0.1729	(-0.4176; 0.0718)	-2.11	0.253	-0.936	(-3.585; 1.712)	-1.06	0.825

Yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri için Tukey sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’deki grafikler incelendiğinde hem yüzey pürüzlülük hem de titreşim değerleri için ayna basıncının birbiriyle ilişkisini gösteren değerlerin sıfır çizgisiyle kesişip kesişmediğine bağlı olarak anlamlı veya anlamsız olduğu değişmektedir. Ayna basınç değerlerinin %95 güven aralığında sıfırının altında olması anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak ayna basıncı 18 ile 10 bar birbiriyle anlamlı bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Diğer ayna basınç değerleri ise sıfır çizgisiyle kesiştiği için anlamsızdır.



Şekil 7. Tukey sonuçlarının grafiksel gösterimi a) Yüzey pürüzlülük b) Titreşim değerleri

4. SONUÇLAR

AIISI 304 iş parçasının işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri üzerinde farklı ayna ve punta basınçlarının etkisini görmek için YSA uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetler verilmiştir.

- Titreşim değerlerinde ise test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,96702 – 0,91189 – 0,98019 ve 0,85546 olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerleri için test, doğrulama, eğitim ve tüm regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,87425 – 0,9952 – 0,87581 ve 0,84159 olarak ortaya çıkmıştır.
- Levenberg-Marquardt algoritmasının eğitim sürecinde Mu değeri yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri için başlangıçta 0,001 olarak belirlenmiş ve deneysel veriler için Mu değerinin başlangıçtan itibaren belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir.
- Titreşim değerleri için modelin 8. döngüye kadar eğitildiği ve en iyi performansın 4. döngüde ortalama kare hata değeri 0,092015 olarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri için elde edilen model 7. döngüye kadar eğitildiği ve en iyi performansın 2. döngüde ortalama kare hata değeri 0,011168 olarak ortaya çıkmıştır.
- K-fold eğitim ve test performans değerleri incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve titreşim için ortalama değerler sırasıyla 0,041928 - 0,147221 - 0,144194 ve 0,424737 olarak hesaplanmıştır.
- Hata dağılım grafiği, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri için genel veri kümelerinin hata değerlerinin sırasıyla 0,2456’dan ve 0,3795’den az olduğu göstermiştir.

- Hem yüzey pürüzlülüğü hem de titreşim için elde edilen regresyon değerlerinin 1'e yakın elde edilmesi, YSA modelinde ağın iyi eğitildiğini, güvenilir olduğunu ve deneysel veriler ile tahmin değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu ispatlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma ile YSA'nın yüzey pürüzlülük ve titreşim değerlerinin tahmin edilmesinde bir model olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.
- Elde edilen sonuçlar ışığında bir iş parçasının CNC torna tezgahlarında ideal punta ve ayna basıncında bağlanması, iş parçası işlenirken oluşacak salgıları, esnemeyi ve titreşim olayını azaltarak yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük çıkmasına katkı sağlayacaktır.
- ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerleri üzerinde ayna basıncının istatistiksel olarak anlamlı olduğu fakat punta basıncının ise istatistiksel olarak anlamsız olduğu bulunmuştur.
- Tukey testine göre yüzey pürüzlülük ve titreşim değerleri için ayna basıncının 18 ile 10 bar olması anlamlı iken diğer değerlerde ise anlamsız olduğu tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

TÜBİTAK (2209/B destek programı), Yavuzlar Kardeşler ve Batman Üniversitesi'ne sunmuş oldukları desteklerden dolayı teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Kam, M. & Demirtaş, M. (2021). Analysis of tool vibration and surface roughness during turning process of tempered steel samples using Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*, 235(5), 1429-1438.
2. Abellán-Nebot, J.V., Vila Pastor, C. & Siller, H.R. (2024). A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Sustainability*, 16(5), 1917.
3. Akkuş, H. & Yaka, H. (2022). Optimization of cutting parameters in turning of titanium alloy (Grade 5) by analysing surface roughness, tool wear and energy consumption. *Exp Tech*, 46, 945-956.
4. Şahinoğlu, A. & Ulas, E. (2020). An investigation of cutting parameters effect on sound level, surface roughness, and power consumption during machining of hardened AISI 4140. *Mechanics & Industry*, 21(5), 523.
5. Mahajan, K.A., Pawade, R.S. & Mishra, V. (2022). Tool vibration effect on surface roughness of polymethylmethacrylate in diamond turning. *Materials and Manufacturing Processes*, 37(3), 271-282.
6. Yousefi, S. & Zohoor, M. (2019). Effect of cutting parameters on the dimensional accuracy and surface finish in the hard turning of MDN250 steel with cubic boron nitride tool, for developing a knowledge based expert system. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 14, 1-13.
7. Şahinoğlu, A. & Rafighi, M. (2020). Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 765-778.
8. Asiltürk, I. & Çunkaş, M. (2011). Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems With Applications*, 38(5), 5826-5832.
9. Akkuş, H. (2021). AISI 1040 Çeliğinin işlenebilirliği sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü değerlerinin farklı tahmin modelleri ile araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 84-92.
10. Gürbüz, H. & Gönülaçar Y.E. (2021). Analysis of experimental values obtained at different cutting parameters and MQL flows with S/N ratios and ANN. *Journal of Polytechnic*, 24(3), 1093-1107.
11. Bober, P., Zgodavová, K., Čička, M., Mihalíková, M. & Brindza, J. (2024). Predictive quality analytics of surface roughness in turning operation using polynomial and artificial neural network models. *Processes*, 12(1), 206.
12. Demirdöğen, M.F., Kılıç, S. ve Öztürk, F. (2022). Yüzey pürüzlülüğünün tahmininde farklı yöntemlerin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 531-542.
13. Akkuş, H. (2020). AISI 1040 çeliğinin tornalanması sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinin RSM ve YSA ile araştırılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(100. Yıl Özel Sayı), 186-197.
14. Gürbüz, H., Sözen, A. & Şeker, U. (2016). Modelling of effects of various chip breaker forms on surface roughness in turning operations by utilizing artificial neural networks. *Journal of Polytechnic*, 19(1), 71-83.

15. Serin, G., Kahya, M., Özbayoğlu, M. ve Ünver, H.Ö. (2019). Ti6Al4V malzemesinin tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 517-536.
16. Arapoğlu, R.A., Sofuoğlu, M.A. & Orak, S. (2017). An ANN-based method to predict surface roughness in turning operations. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 1929-1940.
17. Bayram, B.S., Yıldız, O. ve Korkut, İ. (2025). Yüzey pürüzlülüğünün makine öğrenmesi ile tahmin edilmesi. *Politeknik Dergisi*, 28(1), 187-195.

A New Insight at Wind Speed Prediction; Analysis of Prophet Model and LSTM Models

Başak ÖZTÜRK^{1,a}, Gülbahar BİLGİÇ TÜZEMEN^{2,b}

¹Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Computer Engineering, Nevşehir, Türkiye

²Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Faculty of Engineering-Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Nevşehir, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-7295-2452; ^bORCID: 0000-0002-9503-5884

Article Info

Received : 10.04.2026

Accepted : 14.05.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1927153

Corresponding Author

Başak ÖZTÜRK

basakozturk@nevsehir.edu.tr

Keywords

LSTM

Prophet model

Renewable energy

Wind speed prediction

How to cite: ÖZTÜRK, B., BİLGİÇ TÜZEMEN, G., (2026). A New Insight at Wind Speed Prediction; Analysis of Prophet Model and LSTM Models. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 479-490.

ABSTRACT

Recently, wind speed (WS) prediction has attracted the interest of clean energy researchers. As WS is inherently uncontrollable, it can cause imbalances between consumption and wind energy production. Therefore, high-accuracy WS estimation is essential. In this study, the LSTM and Prophet models were used to predict future trends based on past WS values obtained from the Nevşehir Meteorology Directorate wind measurement station. Model performances were compared using error metrics. The Prophet model achieved an R^2 value of 0.61, while the LSTM model outperformed it with an R^2 of 0.734, indicating that the LSTM model's forecasts correspond more closely to actual WS data.

Rüzgar Hızı Tahminine Yeni Bir Bakış; Prophet Modeli ve LSTM Modellerinin Analizi

Makale Bilgileri

Geliş : 10.04.2026

Kabul : 14.05.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1927153

Sorumlu Yazar

Başak ÖZTÜRK

basakozturk@nevsehir.edu.tr

Anahtar Kelimeler

LSTM

Prophet modeli

Rüzgar hızı tahmini

Yenilenebilir enerji

Atıf şekli: ÖZTÜRK, B., BİLGİÇ TÜZEMEN, G., (2026). Rüzgar Hızı Tahminine Yeni Bir Bakış; Prophet Modeli ve LSTM Modellerinin Analizi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 479-490.

ÖZ

Son zamanlarda, rüzgar hızı (WS) tahmini temiz enerji araştırmacılarının ilgisini çekmiştir. WS doğası gereği kontrol edilemez olduğundan, tüketim ve rüzgar enerjisi üretimi arasında dengesizliklere neden olabilir. Bu nedenle, yüksek doğrulukta WS tahmini şarttır. Bu çalışmada, Nevşehir Meteoroloji Müdürlüğü rüzgar ölçüm istasyonundan elde edilen geçmiş WS değerlerine dayanarak gelecekteki eğilimleri tahmin etmek için LSTM ve Prophet modelleri kullanılmıştır. Model performansları hata metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Prophet modeli 0,61'lik bir R^2 değeri elde ederken, LSTM modeli 0,734'lük bir R^2 değeriyle daha iyi performans göstermiş ve LSTM modelinin tahminlerinin gerçek WS verilerine daha yakın olduğunu göstermiştir.

1. INTRODUCTION

Accurate estimation of WS is essential for the economical and sustainable functioning of wind turbines [1]. The estimation of WS has garnered significant interest from researchers in the renewable energy industry during the past decade, primarily because of its application in the production of clean energy [2]. Wind energy, a clean, renewable energy source, is rapidly increasing in importance as an alternative and critical source for electricity production. The diversification of renewable energy sources, including solar, wind, and other thermodynamic systems, plays an important role in achieving sustainable energy goals [3]. Increasing wind energy production has a potential and positive impact on energy supply, but has challenges as the output power is uncontrollable, WS and direction dependent, making it difficult to control stable energy production [4]. However, WS characteristics are highly random, fluctuating, and nonlinear, making it difficult for models to make precise predictions [5]. To overcome this, accurate WS and direction predictions are required to subsequently reduce the amount of energy produced. Therefore, finding the correct energy estimation model is becoming increasingly important in solving the above-mentioned issue. So far, many models have been used to predict short- and long-term WS. We can broadly group these as machine learning, artificial intelligence (AI), and hybrid models [1,6]. Machine learning algorithms have been successfully employed in forecasting various renewable energy sources beyond wind, such as hydroelectric power generation [7], confirming the broad applicability of data-driven approaches in renewable energy forecasting. However, these models have several shortcomings, such as slow convergence (traditional), high complexity, etc. As a result of the rapid advancement of advanced measurement technology, a huge amount of data has been collected in recent years. The deep learning neural network called LSTM has managed to solve a wide variety of problems practically by using large amounts of data. Since LSTM can track past events over a long period of time, it offers more comprehensive elements in estimating models. With this feature, LSTM can calculate hidden states using various approaches to produce various predictions. The basic concept of the LSTM model consists of a memory cell and three gates: an entry gate, an exit gate, and a forget gate. The LSTM gate is the only component that interacts with the environment and memory cells. The LSTM model utilizes spatio-temporal properties to capture variations in WS and direction over time in time-series image data. There are several recent studies reviewed in the literature centered on reducing the complexity of wind modeling operations.

Jaseena and Kovoor [8] proposed a bidirectional LSTM-based Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)-based WS forecasting system. To forecast WS, the proposed system combines EEMD and Bidirectional LSTM networks. Bidirectional LSTM networks are used to forecast the high-frequency and low-frequency sub-series separately. The forecast results of each sub-series are then combined to obtain the results. High- and low-frequency signals are separated here by two hidden layers of stacked bidirectional LSTM networks.

Sari et al. [9] built a deep learning-based wind predictive technique to facilitate the expansion of wind energy generation. The proposed modelling algorithm aimed to predict wind data as a series of images, expressed as time sequence of images. For this purpose, they used a 3DCNN and a deep convolutional LSTM. In comparison to the 3D-LSTM model, this model is effective in reducing training time and prediction error.

Chen et al. [10] developed a model using EEMD, genetic algorithm (GA), and LSTM algorithms for a short-term WS forecast under large historical wind data. Then, the fine-tuned machine learning model and the heuristically selected feature set were built simultaneously by employing an iterative approach utilizing the combined GA-LSTM technique. As a result, the current model's predictive accuracy was found to be significantly better than that of non-EEMD models, with an average improvement of 56.25%.

Recently, the potential of the Prophet model to predict WS has been discovered. Atasever et al. [11] created the Prophet model, an advanced machine learning model that has not been previously employed in the literature for short-term wind prediction. The results of the developed Prophet model were compared with the results of the Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) model to review the performance reliability and accuracy. In addition, the models' fit and functionality were assessed using partial autocorrelation, autocorrelation function, and standardized residuals. The outcomes demonstrated the prophet model's potential for predicting WS.

Most of the LSTM models mentioned above have disadvantages in building decision models on complex data. For massive and complex datasets running on low-configuration platforms, deep learning models such as CNN-LSTM struggle with both slow computational performance and inappropriate hyperparameter tuning. Traditional models rely heavily on static data for accurate predictions, and modeling becomes very difficult when this data contains a lot of seasonality.

Here, the LSTM model, a deep learning method frequently used in WS prediction, and the Prophet model, a current statistical model, are compared. The proposed study aims to close the technology gap in WS prediction by addressing the shortcomings of existing research. In the study, hourly WS data were trained using LSTM and Prophet models. Performance was then evaluated using sensitivity analysis with mean absolute percent error (MAPE), root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE).

The average values of the proposed LSTM model forecasts and day-ahead forecasts were found to be 0.701 (RMSE), 0.362 (MAPE), and 0.526 (MAE). According to these prediction values, the LSTM model gave better results than the Prophet model in predicting WS.

2. METHOD AND DATA PROCESSING

In this study, historical WS values obtained from wind sensors in the Nevşehir Meteorology Directorate wind measurement station at 1260 m were studied. A one-year data set has been used in many studies on WS prediction in mid-latitudes. Therefore, within the scope of this study, data in a 1-hour interval from January 2020 to March 2021 were studied. WS data collected hourly were split into training (80%) and test (20%) sets prior to model fitting. WS data collected hourly for a year was trained to predict a month of wind data.

Figure 1 shows the presence of spikes in daily WS at every 1-h interval, indicating seasonality. When the WS features in the data set were analyzed, the lowest WS value was found to be 0 m/s, the highest wind value was 19.2 m/s towards the north, and the average WS value was 1.75 m/s. Prior to training, WS values were normalized to the [0, 1] range using min-max scaling and missing values were addressed by linear interpolation. The WS data was modeled using a computer running at 2.80 GHz on an i9 10900 CPU with an operating system and Python 3.9. For the Prophet model, we used an open-source library published by Facebook's Core Data Science team.

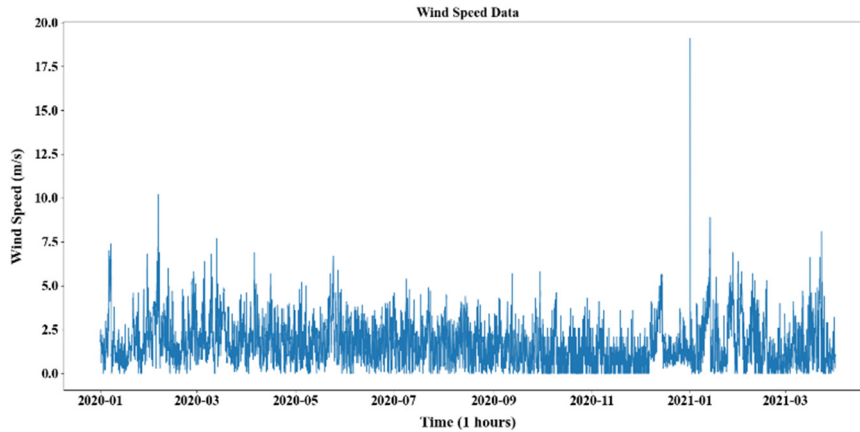


Figure 1. Distribution of WS data

A wind rose diagram is a useful tool for understanding wind patterns in a region. This diagram was created by analyzing measured WSs and directions. It provides information by showing the most common wind directions and WSs in different directions. Essentially, the wind rose diagram can give us an overall picture of the wind patterns in a specific location, which can be helpful for a variety of purposes such as planning and designing structures, determining suitable locations for wind energy generation, and more [10].

Additionally, the periodicity of any speed of the WS can be precisely calculated by utilizing the characteristics of the Weibull distribution, which is commonly employed in the study of wind data [12].

The density function known as Weibull is used to display the frequency of wind blowing at various speeds. However, to obtain the Weibull function, some parameters, such as shape and scale, need to be known.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

In Equation 1, k is the dimensionless form parameter, c is the scale parameter, and $f(v)$ is the Weibull density function at the WS. The following Equation 2, [13], can be used to get the average WS v_m .

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

Here, the gamma function can be expressed by the following Equation 3 [14,15].

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{y-1} dx \quad (3)$$

3. METHODOLOGY

3.1. Long Short-Term Memory Network (LSTM)

RNN models are predicted to be a good model for time series processing. However, due to the problem of disappearing the slope, there are problems in learning long-term information. Therefore, Hochreiter and Schmidhuber [16] proposed the LSTM model, which is a special type of RNN. LSTM has been deemed appropriate for time series predicting tasks. Because these networks are succeeded at capturing extended relationships across time by utilizing gates included in each cell of the model (LSTM cell structure representation in Figure 2).

An LSTM network can be briefly described as follows: it has an input layer, an output layer, and a set of recursive hidden layers. Many memory modules form the recursive hidden layer. Three gates that regulate the flow of information (memory gates, forget gates, and output gates) are located in each module, along with one or more independent memory cells [16]. Input Gates (Equation 4) update information and output gates (Equation 6) determine the cell output. The internal state memory cell (Equation 7) offers the internal storage of pertinent prior knowledge and forget gates (Equation 5) decide if the past information is eliminated from a cell state.

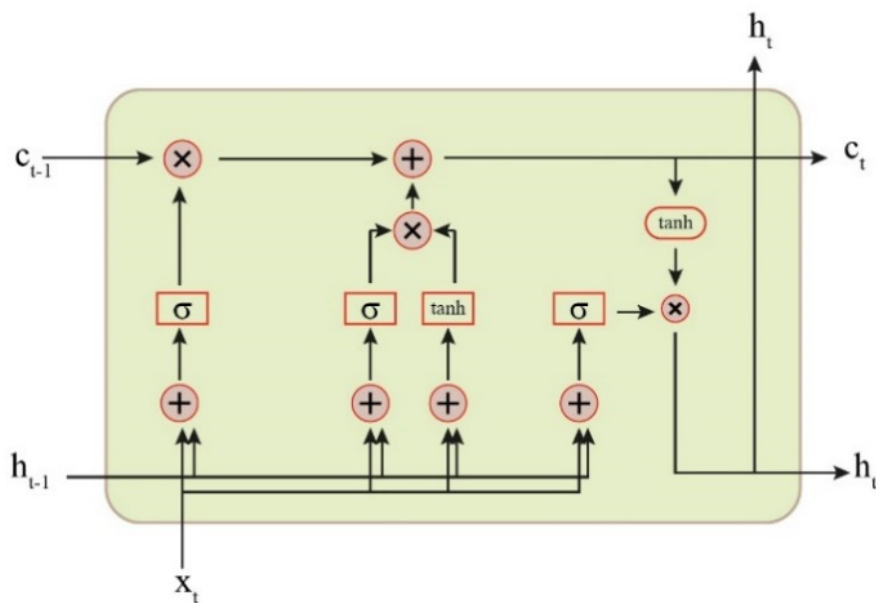


Figure 1. Cell structure of LSTM

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1} + x_t] + b_i) \quad (4)$$

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1} + x_t] + b_f) \quad (5)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (6)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1} + x_t] + b_c) \quad (7)$$

$$c_t = (i_t * \tilde{c}_t + f_t * c_{t-1}) \quad (8)$$

$$h_t = o_t * \tanh(c_t) \quad (9)$$

σ (sigma) is known as the sigmoid activation function and represents the activation of the appropriate gates, W_f, W_i, W_o, W_c are the weight matrices, b_i, b_f, b_o, b_c are the biases values of the corresponding gates, $*$ represents Hadamrd's product, h_{t-1} is hidden state output at time $t-1$, x_t is the input at time t , $\tilde{c}_t$ is the intermediate cell state [17].

3.2. The Prophet Models

Facebook's Core Data Science developed the Prophet model to address the typical elements of a commercial time series forecasting model [16]. The Prophet model is quick and entirely automated, but it offers a wide range of customization possibilities for users to improve their forecasts. The Prophet works best with time series that have significant seasonal effects and several seasons of historical data because it is robust against outliers and trend shifts [17]. The original time series' seasonality is preserved by the Prophet model. They constructed a model with changeable heuristic parameters based on a time series model [11] that included three crucial components (trend, seasonality, and vacations). The model consists of four mains. The model consists of four main components: $g(t)$ trend function is given in Equation 11, $h(t)$ holiday, $s(t)$ seasonality is given in Equation 12, and error item Equation 10.

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \varepsilon_t \quad (10)$$

$$g(t) = (k + a(t)^T \delta)t + (m + a(t)^T \gamma) \quad (11)$$

Where k, δ, m and γ represents to the growth rate, adjustment rate, offset parameter, and trend change point in Equation 11. In Equation 12,

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) \right) \quad (12)$$

Here, the seasonality period is defined by P . Daily, weekly, and annual seasonality are the periodic changes that reflect the seasonality function, $s(t)$. The dataset for the Prophet model needs to be a two-column data frame 'ds' (timestamp) and 'y' (prediction measure). The 'ds' column should contain the dates or timestamps for each data point and the 'y' column should contain the corresponding measurement values. The data frame generated after the prediction of the Prophet model contains 'ds' and 'yhat' columns. The 'yhat' column contains the estimated 'y' values for each timestamp in the 'ds' column. In time series forecasting studies, analyzing the data well and determining the model parameters correctly are the most important factors affecting the results. Within the scope of this study, various statistical information and analyses of wind data are detailed in Figure 1 and Table 3. In the selection of the model parameters, the possible parameters were evaluated with the grid system by comparing the RMSE value. The models were finally run with the parameters that gave the lowest error value. The running time of the final model for the LSTM was 23.01727 minutes, while for the Prophet model it was 11.0723 minutes. Parameters determined to be appropriate for the models are listed in Table 1.

Since time series prediction is to be done in this study, LSTM and Prophet were preferred as learning techniques for the data. The window size was tried with 4, 12, and 24 and set to the appropriate value of 12. A 3-layer LSTM architecture was built. The number of neurons for each LSTM layer in this architecture is given in Table 1.

LSTM optimization is the process of finding the optimal parameter values for a given problem. Various optimization algorithms such as RMSprop, Adadelta and Adam have been widely used in such systems. The dropout technique has been used to avoid overfitting in the learning process and to improve prediction accuracy. Dropout aims to prevent overlearning by randomly stopping some neurons from firing. In this study, a dropout rate of 0.2 is used. The most useful parameter for predicting the trend's flexibility and how much it will fluctuate at trend change points is "changepoint prior scale." The modeling of trend changes is insufficient if this parameter is maintained too little, while the trend is excessive if it is kept too big. The default value of this parameter is 0.05 but this could be tuned in the range of [0.001, 0.5].

Table 1. Model parameters of LSTM and Prophet model

Models	Parameters	Quantity
LSTM	number of hidden layers	3
	number of time steps	12
	batch size	64
	number of neurons in layers	100,100,50
	epoch size	200
	optimizer	RMSprop
	learning rate	0.01
The Prophet model	changepoint prior scale	0.001
	changepoint range	0.9
	seasonality prior scale	0.01
	seasonality mode	multiplicative
	growth	logistic

"changepoint range" determines the historical ratio to be taken into account when determining the trend value. We used this parameter, which has values between [0.8 and 0.95], as 0.9 in this study. This value represents the past 90% of the time series. The elasticity of seasonality is controlled by the 'seasonality prior scale' parameter. If the value is small, seasonality is reduced; if it is large, it can adapt to large fluctuations. In our time series, seasonality mode exhibits multiplicative seasonality. This indicates if the magnitude of the seasonal variations is influenced by the length of the time series. Given that the time series shows forward growth, the growth parameter was employed as a logistic.

3.3. Numerical Simulation and Validation

This paper presents an approach that integrates Prophet and LSTM models to estimate WS. Some classical evaluation criteria, such as mean square error (MSE), RMSE, MAPE, MAE, and R^2 were used to evaluate the performance results of LSTM and Prophet models. These metrics are expressed mathematically using Equations [16-20].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (14)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

Where N is the number of WS data evaluated, y_i , $\hat{y}_i$ and $\bar{y}$ represents the original, the predicted, and the mean values of the WS.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The stages of the seasonal LSTM and Prophet models are presented in Figure 3. The required model parameters are first computed following the creation of a tentative model. This parameter estimation's primary objectives are to lower the prediction error and ascertain the model's order and parameters. RMSE is determined by taking the square root of MSE; MSE is the squared difference between actual and observed values. MAE is defined as the absolute difference between actual and observed values. MAPE provides data analysis by calculating the percentage difference between actual values and predicted values. Table 2 shows R^2 , which describes the fitness match of the prediction results of the LSTM and Prophet model to the actual values. The higher the R^2 value, the higher the prediction accuracy. Therefore, lower values of MAE, MAPE, and RMSE are a measure of better forecasting performance.

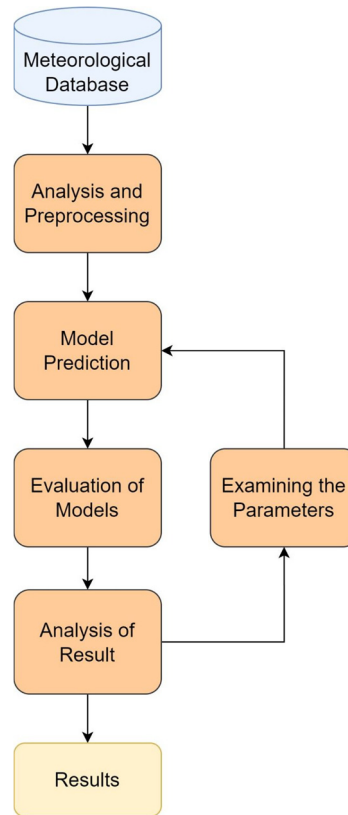


Figure 3. Flowchart for the Prophet and LSTM model construction process

Table 2. Model evaluation metrics

Predicted models	Evaluating metrics				
	MSE	RMSE	MAE	MAPE	R^2
LSTM	0.492	0.701	0.526	0.362	0.734
The Prophet model	1.35	3.17	1.78	1.39	0.61

An example of actual and predicted WS using LSTM and Prophet is shown in Figures 4 and 5. Figure 4 demonstrates how well the LSTM's predicted WS matches the actual WS. Figure 4 shows that the speed predicted by LSTM is significantly different from the observed value over a wide time range. R^2 value found in this context is 0.73. The variance and mean of wind data have remained consistent despite sudden ups and downs over time. This situation prevented the Prophet model from obtaining a lower error value.

As a result, it demonstrates that, compared to other models, the LSTM's anticipated WS is virtually more proximate to the actual WS. It demonstrates how the LSTM performs better than other models.

The relationship between the real and predicted WS's demonstrates how much closer the forecast is to the actual WS. The correlation score is between 0 and 1. When the correlation is 1, the WS predicted, and reality are both the same. When the correlation is zero, it means that the actual and predicted WS's are not the same. Figure 5 shows how well Prophet's predicted WS matches the actual WS. The R^2 coefficient of determination was found to be 0.61. This proves the matching of this model. The model indeed accurately predicts the unpredictability of the data, yet some discrepancies are noticed in the sharp peaks and valleys. Based on the RMSE and MAE results, the LSTM model performs better than the Prophet model (see Figures 4 and 5).

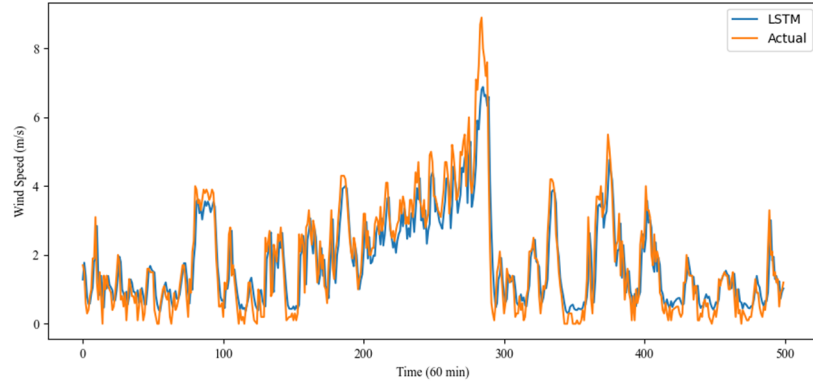


Figure 4. WS predictions for the LSTM

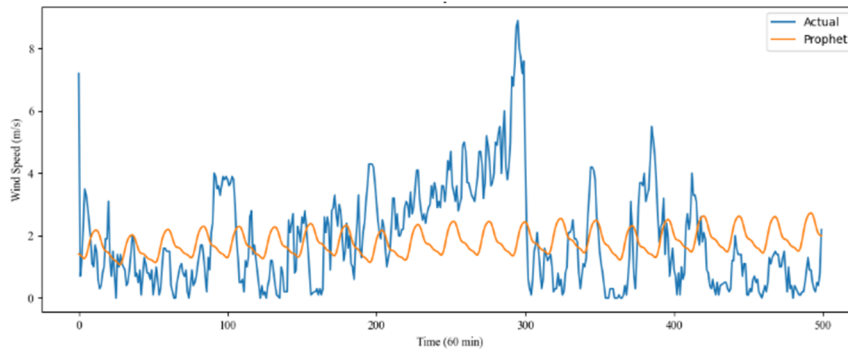


Figure 5. WS predictions for the Prophet model

Prior studies have commonly indicated that the Prophet model exhibits superior forecasting capabilities compared to the SARIMA (5,0,0) (0,1,0) model [11]. However, in this study, due to higher error rates, the Prophet model yielded less precise forecasts when compared to the LSTM model.

Figure 6 shows the comparison of Prophet model and LSTM model prediction results and WS actual data. As can be seen in the figure, it shows that the predicted WS of LSTM is almost closer to the actual WS compared to the Prophet model. This shows how LSTM outperforms the other model.

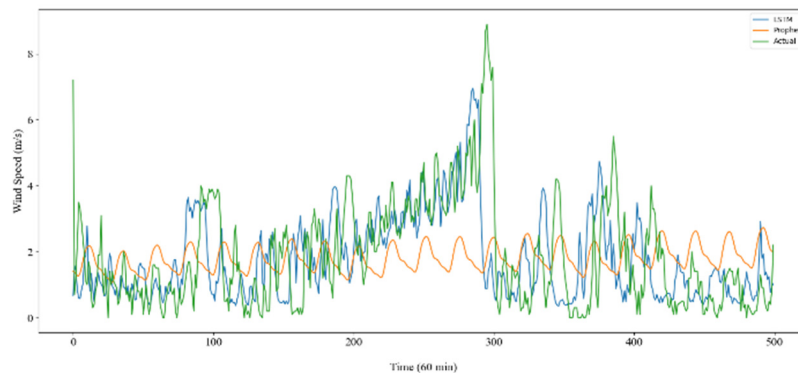


Figure 6. Comparison of Prophet and LSTM model WS prediction results and actual data

Figure 7 illustrates how wind roses, which are typically used to describe wind distributions of various speeds and directions, work. These graphs demonstrate how, at three locations, the eight primary wind directions vary from a month typical of one season to a month typical of another season, [13,21]. The wind rose diagram created using hourly collected WS and wind direction in 2021 is shown in the figure. The diagram shows that the prevailing wind direction of the region is mainly N and S. The results of the WS and direction measurements at 60 m are depicted in Figure 7.

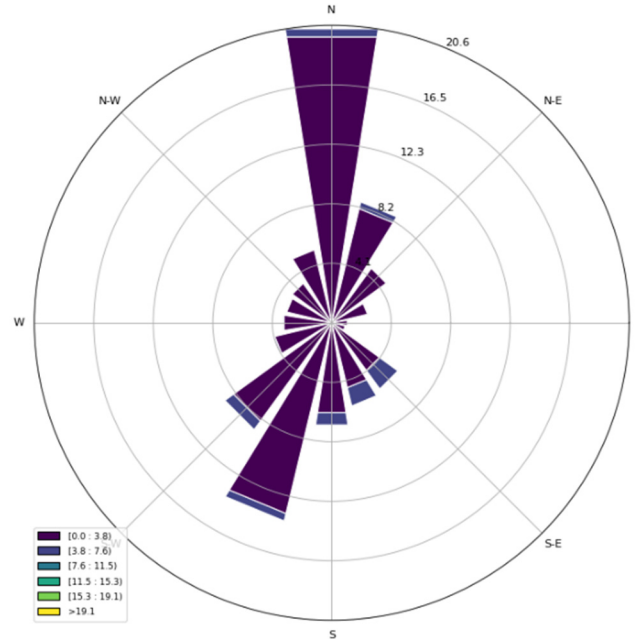


Figure 7. An annual wind rise graphic at a height of 60 meters

Details on the distributions of WS and direction at a particular station are offered in Table 3. The analytical approach involved both counting the calms and computing the mean and variation of the non-calm observations made at the station each month, utilizing all of the 24-hour data collected over the course of a year. Then, using the linear regression technique, the monthly Weibull distribution parameters c and r were determined. Table 3 displays the results. It is important to note that calms occur often at Nevşehir all year long as well as at Ioannina from April to November and from February to October. If not, they are uncommon. Weibull distribution pattern and scale parameters of the region were obtained as 0.155 and 1.742 m/s.

Table 3. Average monthly mean WS with Weibull parameters (for 60 m)

Mounth	Weibull distribution			Actual V(m/s)
	V(m/s)	c	k	
January	0.135	0.452	1.397	1.840
February	0.090	0.804	1.480	2.285
March	0.130	0.933	1.288	2.221
April	0.144	0.799	1.143	1.943
May	0.149	0.717	1.315	2.033
June	0.001	0.811	0.967	1.778
July	0.184	0.786	1.038	1.825
August	0.221	0.666	1.033	1.699
September	0.171	0.468	1.038	1.507
October	0.001	0.236	0.957	1.194
November	0.001	0.201	0.785	0.987
December	0.174	0.462	1.133	1.596
Average	0.155	0.611	1.131	1.742

5. CONCLUSION

This article presents a comparative example of the Prophet model and the LSTM model. These models were applied by modeling real-time WS data with the parameters in Table I. Simulation results corroborate that the LSTM model has the lowest values of RMSE, MAE, and MAPE in comparison to the Prophet model. The results obtained for the day-ahead predictions of the proposed LSTM model are 0.701 (RMSE), 0.362 (MAPE), and 0.526 (MAE), respectively, while the Prophet model yields values of 3.17 (RMSE), 1.39 (MAPE), and 1.78 (MAE). This prediction values obtained for LSTM are lower than those of the Prophet model. Consequently, this study demonstrates that using the LSTM model to accurately predict WS yields better results than the Prophet model.

A summary of works that compare suggested models or employ LSTM and Prophet in the literature is given in Table 4. As a result, with the increase in neural network model studies, many advanced approaches have been developed to process nonlinear data. An important component affecting Prophet's performance is the distribution of wind speed values evaluated with the Weibull distribution. The analysis, which incorporates a Weibull probability density function (PDF) plot in Figure 7 and Table 3, reveals that the dataset shows a heavy-tailed distribution, indicating the presence of outliers. Given that Prophet presumes additive seasonal patterns and trends, it may have difficulties in accurately representing the nonlinear dynamics and sudden fluctuations inherent in data. Furthermore, the WS variations in the dataset display significant short-term oscillations and non-stationary characteristics, complicating Prophet's time series decomposition's ability to generalize well. In contrast to financial or economic time series, WS data is intrinsically stochastic, resulting in heightened uncertainty in model projections. Therefore, although the proposed LSTM and Prophet methods perform adequately, a suitable prediction strategy is still needed to handle and resolve unexpected changes in the dataset. Therefore, it would be more appropriate to apply hybrid methods. In our future work, hybrid methods using different deep learning models and different algorithms will be tried for WS prediction. Furthermore, research that employs different parameter selection and metaheuristic optimization techniques to make this more efficient and relevant will be covered.

Table 4. An overview of the research that compares or uses LSTM and Prophet

Method	RMSE	MAE	Data type	Ref.
Conv-LSTM	Set 1: 0.380 Set 2: 0.275 Set 3: 0.249	Set 1: 0.279 Set 2: 0.154 Set 3: 0.176	WS Data	[22]
EMD-GA-LSTM	0.1337	0.0570	WS Data	[8]
LSTM	Set 1: 2.18 Set 2: 2.13 Set 3: 0.85 Set 4: 1.03	Set 1: 1.65 Set 2: 1.74 Set 3: 0.59 Set 4: 0.69	WS Data	[23]
LSTM	0.088	0.084	WS Data	[24]
LSTM	Dataset 1: 0.558 Dataset 2: 0.532 Dataset 3: 0.194	-	WS Data	[25]
LSTM	3.124	2.457	WS Data	[2]
Feature-LSTM	0.1745	0.1212	WS Data	[1]
PSO-VMD-Bi-LSTM	-	0.194	WS Data	[5]
LSTM	0.701	0.526	WS Data	This study
Prophet	957.583 (for Turkey) 5,574.244 (for Japan)	706.916 - (Regarding Turkey) 4,921.811 (Regarding Japan)	Energy consumption	[26]
Prophet	3.78-45.80 (General Prophet model) 3.54-39.86 (Log Prophet model)	-	Odisha health care data (Air Pollution)	[27]
Prophet	3.17	1.78	WS Data	This study

6. REFERENCES

1. Geng, D., Zhang, H. & Wu, H. (2020). Short-term wind speed prediction based on principal component analysis and LSTM. *Applied Sciences*, 10(13), 4416.
2. Elsaraiti, M. & Merabet, A. (2021). A comparative analysis of the ARIMA and LSTM predictive models and their effectiveness for predicting wind speed. *Energies*, 14(20), 6782.
3. Kaplan, A. & Özbek, A. (2022). Exergy analysis of a double-stage organic Rankine cycle using renewable energy. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 43-54.
4. Biçen, T., Arslan, A.A. & Vardar, A. (2022). Regional solar and wind energy characteristics and its energy potential in northwest of Turkey. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology*, 12(2), 527-538.
5. Li, J., Song, Z., Wang, X., Wang, Y. & Jia, Y. (2022). A novel offshore wind farm typhoon wind speed prediction model based on PSO-Bi-LSTM improved by VMD. *Energy*, 251, 123848.
6. Santur, Y. (2020). Deep learning based regression approach for algorithmic stock trading: A case study of the BIST30. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1195-1211.
7. Atalay, B.A. ve Zor, K. (2025). XGBoost (aşırı gradyan artırımı karar ağaçları) ile hidroelektrik enerji tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 205-218.
8. Jaseena, K.U. & Kovoov, B.C. (2021). EEMD-based wind speed forecasting system using bidirectional LSTM networks. *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 1-9.
9. Sari, A.P., Suzuki, H., Kitajima, T., Yasuno, T., Prasetya, D.A. & Arifuddin, R. (2022). Short-term wind speed and direction forecasting by 3DCNN and deep convolutional LSTM. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 17(11), 1620-1628.
10. Chen, Y., Dong, Z., Wang, Y., Su, J., Han, Z., Zhou, D., Zhang, K., Zhao, Y. & Bao, Y. (2021). Short-term wind speed predicting framework based on EEMD-GA-LSTM method under large scaled wind history. *Energy Conversion and Management*, 227, 113559.
11. Atasever, S., Öztürk, B. & Bilgiç, G. (2022). A new approach to short-term wind speed prediction: the Prophet model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 8826-8841.
12. Rehman, S. & Al-Abbadi, N.M. (2008). Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 33(11), 2653-2660.
13. Fyrippis, I., Axaopoulos, P.J. & Panayiotou, G. (2010). Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*, 87(2), 577-586.
14. Katsoulis, B.D. & Metaxas, D.A. (1992). The wind energy potential of western Greece. *Solar Energy*, 49(6), 463-476.
15. Oral, F. & Behçet, R. (2015). Rüzgar verilerinin enerji üretimi amaçlı değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 173-182.
16. Hochreiter, S. & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.
17. Toharudin, T., Pontoh, R.S., Caraka, R.E., Zahroh, S., Lee, Y. & Chen, R.C. (2021). Employing long short-term memory and Facebook Prophet model in air temperature forecasting. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 52(2), 279-290.
18. Facebook (n.d.). *Prophet | Forecasting at scale*. <https://facebook.github.io/prophet/>, Access date: June 2026.
19. Aditya Satrio, C.B., Darmawan, W., Nadia, B.U. & Hanafiah, N. (2021). Time series analysis and forecasting of coronavirus disease in Indonesia using ARIMA model and PROPHET. *Procedia Computer Science*, 179, 524-532.
20. Harvey, A.C. & Peters, S. (1990). Estimation procedures for structural time series models. *Journal of Forecasting*, 9(2), 89-108.
21. Ahmed, A.S. (2021). Technical and economic feasibility of the first wind farm on the coast of Mediterranean Sea. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2145-2151.
22. Chen, G., Li, L., Zhang, Z. & Li, S. (2020). Short-term wind speed forecasting with principle-subordinate predictor based on Conv-LSTM and improved BPNN. *IEEE Access*, 8, 67955-67973.
23. Liu, H., Mi, X. & Li, Y. (2018). Smart multi-step deep learning model for wind speed forecasting based on variational mode decomposition, singular spectrum analysis, LSTM network and ELM. *Energy Conversion and Management*, 159, 54-64.

24. Rodrigues Moreno, S., Gomes da Silva, R., Cocco Mariani, V. & dos Santos Coelho, L. (2020). Multi-step wind speed forecasting based on hybrid multi-stage decomposition model and long short-term memory neural network. *Energy Conversion and Management*, 213, 112869.
25. Zhang, Z., Ye, L., Qin, H., Liu, Y., Wang, C., Yu, X., Yin, X. & Li, J. (2019). Wind speed prediction method using shared weight long short-term memory network and Gaussian process regression. *Applied Energy*, 247, 270-284.
26. Samal, K.K.R., Babu, K.S., Das, S.K. & Acharaya, A. (2019). Time series based air pollution forecasting using SARIMA and Prophet model. *Proceedings of the 2019 International Conference on Information Technology and Computer Communications (ITCC 2019)*, 80-85.
27. Arslan, S. (2022). A hybrid forecasting model using LSTM and Prophet for energy consumption with decomposition of time series data. *PeerJ Computer Science*, 8, e1001.

Farklı Eğirme Sistemlerinin Lyocell (Ecocell™) Örme Kumaş Özelliklerine Etkisi

Pınar DURU BAYKAL^{1,a}, Mehmet TEKİNALP^{2,b}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

²Pinteks Tekstil Kumaş Pazarlama Sanayi Ticaret A.Ş., Şanlıurfa, Türkiye

^aORCID: 0000-0003-1461-2203; ^bORCID: 0009-0004-5837-7190

Makale Bilgileri

Geliş : 05.02.2026

Kabul : 14.05.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1881961

Sorumlu Yazar

Pınar DURU BAYKAL

pduru@cu.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Ecocell

Lyocell

Eğirme yöntemi

Süprem kumaş

May dönmesi

Atf şekli: DURU BAYKAL, P., TEKİNALP, M., (2026). Farklı Eğirme Sistemlerinin Lyocell (Ecocell™) Örme Kumaş Özelliklerine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 491-507.

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'de üretilen Ecocell™ (lyocell) liflerinin farklı eğirme sistemlerindeki performansını araştırmayı ve bu ipliklerden üretilen örme kumaşların özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ecocell™ lifleri ile ring kompakt, open-end rotor ve vorteks eğirme sistemleri kullanılarak Ne 28/1 iplikler üretilmiş ve bu ipliklerin özellikleri test edilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca üretilen iplikler aynı makinede ve aynı üretim parametreleri ile örülerek süprem kumaşlar elde edilmiş daha sonra açık, orta ve koyu renk şiddetlerinde boyanmıştır. Boyalı süprem kumaşların patlama mukavemeti, may dönmesi, boncuklanma, CIELAB renk değerleri ve haslıkları test edilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada, Ecocell™ lifinin sürdürülebilir bir hammadde olarak ithal muadillerine güçlü bir alternatif olabileceği, istenen iplik ve kumaş özelliklerine göre uygun eğirme sisteminin seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, Ecocell™ liflerinin, özellikle iyi boncuklanma direnci ve düşük may dönmesi değerleri ile örme kumaşlarda pamuğa alternatif olabileceği ifade edilmiştir.

The Effect of Different Spinning Systems on the Properties of Lyocell (Ecocell™) Knitted Fabric

Article Info

Received : 05.02.2026

Accepted : 14.05.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1881961

Corresponding Author

Pınar DURU BAYKAL

pduru@cu.edu.tr

Keywords

Ecocell

Lyocell

Spinning method

Supreme fabric

Spirality

How to cite: DURU BAYKAL, P., TEKİNALP, M., (2026). The Effect of Different Spinning Systems on the Properties of Lyocell (Ecocell™) Knitted Fabric. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 491-507.

ABSTRACT

This study aims to investigate the performance of Ecocell™ (lyocell) fibers, produced in Turkey, across different spinning systems and to evaluate the properties of knitted fabrics produced from these yarns. Ne 28/1 yarns were produced from Ecocell™ fibers using ring compact, open-end rotor, and vortex spinning systems, and their properties were tested and evaluated. Furthermore, these yarns were knitted into single jersey fabrics using identical machinery and production parameters, which were subsequently dyed in light, medium, and dark color shades. The dyed fabrics were assessed in terms of bursting strength, spirality, pilling, CIELAB color values, and fastness properties. The study highlights that Ecocell™ fiber serves as a robust sustainable alternative to its imported counterparts, emphasizing the importance of selecting the optimal spinning system based on desired yarn and fabric specifications. Furthermore, it has been stated that Ecocell™ fibers could serve as an alternative to cotton in knitted fabrics, particularly due to their superior pilling resistance and low spirality values.

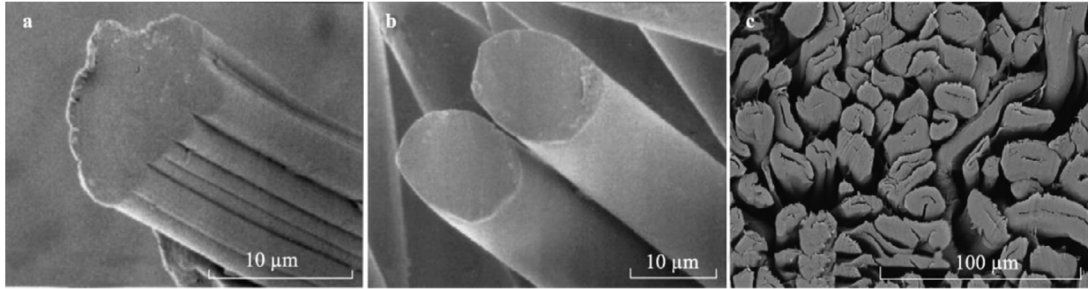
1. GİRİŞ

Tekstil sektöründe sürdürülebilir ham maddelerin kullanımı önem kazanmış, doğal ve rejenere selülozik lifler ön plana çıkmıştır. Günlük giyimden lüks moda tekstillerine kadar geniş bir ürün yelpazesinde kullanılan konvansiyonel pamuk, üretimi sırasında yoğun su ve kimyasal madde (pestisit, gübre gibi) kullanımı gerektirmekte ve bu nedenle sürdürülebilir olarak kabul edilmemektedir [1]. Bu nedenle yenilenebilir kaynaklardan elde edilen rejenere selülozik liflere olan ilgi ve talep artmıştır.

Rejenere selülozik liflerden viskoz, pamukla karşılaştırıldığında daha düşük kopma mukavemetine sahiptir ve özellikle ıslak durumda bu mukavemet daha da zayıflamaktadır. Bu performans sınırlılıklarını aşmak amacıyla modifiye selülozik lifler (modal ve polinozik gibi) geliştirilmiştir [2, 3, 4]. Rejenere selülozik liflerin üçüncü nesil temsilcisi olarak adlandırılan lyocell liflerinin ilk ticari ürünü olan Tencel literatürde yerini almıştır [5]. Lyocell lifleri, özellikle çevre bilincinin artmasına paralel olarak geliştirilmiştir. Lyocell üretiminde çözücü olarak toksik olmayan N-Metilmorfolin-N-oksit (NMMO) kullanılması, bu organik çözücünün %99'unun geri kazanılabilmesi, bu üretim yönteminin ekolojik olmasını sağlamaktadır [3]. Lyocell lifleri, yüksek mukavemet, yüksek nem emme kapasitesi ve etkin nem yönetimi, konfor, ipeğe benzeyen yumuşak tuşe, parlaklık, dökümlülük ve biyolojik olarak parçalanabilme özellikleriyle dikkat çekmektedir.

Üç nesil rejenere selüloz lifleri (Viskoz, Modal ve Tencel) için yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yapılmış, LCA sonuçları pamuk, PET ve PP gibi diğer ticari liflerle karşılaştırılmıştır. Viskoz hariç diğer rejenere selüloz liflerinin, PET, PP ve pamuktan daha iyi çevresel profillere sahip olduğu sonucuna varılmıştır [6].

Viskoz, lyocell ve pamuk liflerinin kesitleri Şekil 1'de verilmiştir [7]. Lyocell lifleri diğer liflere göre oldukça pürüzsüz düz bir yüzeye sahip iken viskoz lifleri pürüzlü bir yüzeye sahiptir.



Şekil 1. Viskoz (a), lyocell (b) ve pamuk (c) liflerinin kesitleri

Lyocell ve diğer selüloz liflerinin özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir [7]. Lyocell lifinin mekanik dayanımı viskoz ve pamuğa göre daha yüksektir. Bunun nedeni; selüloz zincirinin uzun oluşu, moleküller arası hidrojen bağlarının güçlü olması ve yüksek kristalinite ile açıklanabilir [7].

Çizelge 1. Farklı selüloz lif türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

	Uzama, kuru (%)	Uzama, yaş (%)	Mukavemet (cN/tex)
Lyocell	11-16	17-19	35-47
Viskoz	18-25	21-23	20-26
Yüksek-modül viskoz	12-15	13-15	32-36
Pamuk	8-10	12	25-40

Literatürde lyocell lifleri ile yapılmış pek çok çalışma vardır. Çalışmaların bir kısmında lyocell içeren örme ve dokuma kumaşların performans özellikleri araştırılmış ve başka liflerle mukayese edilmiştir [8-15]. Bazı çalışmalarda ise lyocell liflerinin fibrilasyonu ve bunun etkileri araştırılmıştır [16-19].

Türkiye'de, Karafiber Tekstil San ve Tic.A.Ş. tarafından 2020 yılında Ecocell™ ticari adıyla lyocell lifleri üretilmeye başlanmıştır. Ecocell™, minimum su ve enerji kullanan, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltan çevre dostu kapalı döngü bir üretim yöntemine sahiptir [20].

Türkiye’de üretilen Ecocell™ lyocell lifleri ile yapılmış akademik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Uyanık ve Kaya Nacarkahya çalışmalarında, Ecocell™ ve Ecocell™ ile farklı lif (keten, geri dönüşüm keten, kenevir) karışımlarından üretilen ring ipliklerinin özelliklerini belirlemeyi, bunları birbirleriyle ve geleneksel pamuk ve organik pamuk iplikleriyle karşılaştırmayı ve ipliklerin kalite, ekonomik ve sürdürülebilirlik özelliklerini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Çalışmanın sonuçları; Ecocell™ lifinin, iplik özelliklerine fibrilasyona bağlı tüylülük dışında olumlu katkıda bulunduğunu göstermiştir [21]. Yıldırım ve ark., tarafından yapılan çalışmada Ecocell™ lifleri farklı oranlarda pamuk ve polyester ile karıştırılarak örme kumaşlar üretilmiş ve konfor özellikleri (hava geçirgenliği, ısı direnci, nem iletim hızı vb.) incelenmiştir. Bulgular, Ecocell™ içeren kumaşların bazı konfor özelliklerinde üstün performans gösterdiğini göstermiştir. [22]. Bir başka çalışmada, %100 pamuk, akrilik/pamuk ve Ecocell™/akrilik karışımı atkı iplikleri ile dokunan kumaşların tek banyoda reaktif boyanabilirliği incelenmiştir. Sonuç olarak, reaktif boyama tek bir banyoda gerçekleştirildiğinde haslık değerlerinde olumsuz bir etki gözlemlenmemiştir [23].

Ecocell™ in dokuma kumaşlardaki performansını ve boyama özelliklerini değerlendirmek amacıyla çözgüde %100 Ecocell™ ring, atkıda ise %50 Ecocell™ %50 Pamuk ring iplikleri ile dokuma kumaşlar üretilmiş, açık ve koyu tonlarda boyanmıştır. Sonuçlar, Ecocell™’in, ithal edilen sürdürülebilir ve çevre dostu liflere bir alternatif olabileceğini göstermiştir [24]. Güler ve ark., tarafından yapılan çalışmada, Ecocell liflerinin; kenevir, pamuk, organik pamuk, recycle poliester, elastan gibi liflerle ikili ve üçlü karışımlar yapılması bunlardan örme kumaşların tasarlanması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kumaşların fiziksel testler ve karakterizasyon çalışmaları sonrasında, selüloz bazlı biyolojik olarak parçalanabilir rejenere selüloz lif içeriğinden bir spor giyim koleksiyonu oluşturulacaktır [25]. Şen ve ark., Naia™ Renew, Tencel™ Lyocell ve Ecocell™ gibi üç yeni nesil rejenere selüloz elyaf türünden üretilen örme kumaşların haslık ve boyutsal stabilitesini incelemişler, bu yeni liflerin pamuğa uygun alternatifler olabileceğini vurgulamışlardır [26].

Bu çalışmada, Ecocell™ lyocell liflerinden farklı eğirme sistemleri (ring kompakt, open-end rotor ve vortex) ile ipliklerin üretilmesi ve bu ipliklerle örülen kumaşların özelliklerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen bulguların, yerli hammadde ile sürdürülebilir iplik ve kumaş üretimi konusunda hem literatüre katkı sunması hem de üretici firmalara sistem seçimi ve ürün geliştirme süreçlerinde bilimsel dayanak sağlaması beklenmektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında hammadde olarak Türkiye’de Kara Holding tarafından üretilen %100 lyocell lifleri (Ecocell™) kullanılmıştır. Ecocell™ lyocell liflerinin inceliği 1,3 dtex, uzunluğu 38 mm, kopma uzaması %11,23 ve kopma mukavemeti 41,52 cN/tex dir.

2.2. Metot

2.2.1. İplik Üretimi

Çalışma kapsamında Ecocell™ lifleri 3 farklı eğirme sisteminde çalışılarak Ne 28/1 iplikler üretilmiştir. İpliklerinin üretim parametreleri aşağıda verilmektedir [27].

Çizelge 2. Ring kompakt iplik üretim parametreleri

Üretim aşaması	Makinenin markası-modeli	Makine çıktısı
Tarak	Trützschler TC 07	Şerit- Ne 0,12
1.Pasaj Cer	Trützschler TD 02	Şerit- Ne 0,14
2.Pasaj Cer	Trützschler TD 02	Şerit- Ne 0,16
3.Pasaj Cer	Trützschler TD 03	Şerit- Ne 0,17
Fital	Saurer Zinser 668	Fital- Ne 0,9
	Saurer Zinser 351	
Ring kompakt iplik makinesi	Kopça türü	C 1 Bracker
	Kopça No	4.0
	Büküm (tur/m)	750
	İğ devri (devir/dk)	16.000
Bobinleme	Schlafhorst Autoconer 338	İplik- Ne 28

Çizelge 3. Open-end rotor iplik üretim parametreleri

Üretim aşaması	Makinenin markası-modeli	Makine çıktısı
Tarak	Trützschler DK 903	Şerit- Ne 0,12
1.Pasaj Cer	Trützschler HSR 1000	Şerit- Ne 0,13
2.Pasaj Cer	Trützschler HSR 1000	Şerit- Ne 0,14
	Oerlikon Schlafhorst 360	
Open-end rotor iplik makinesi	Rotor Tipi T-536	
	Rotor Devri (devir/dk.) 110.000	
	Açıcı devri (devir/dk.) 8600	
	Açıcı Tipi S21	
	Büküm (tur/m) 820	İplik- Ne 28

Çizelge 4. Vorteks (MVS) iplik üretim parametreleri

Üretim aşaması	Makinenin markası-modeli	Makine çıktısı
Tarak	Trützschler TC07	Şerit- Ne 0,12
1.Pasaj Cer	Trützschler HSR 1000	Şerit- Ne 0,14
2.Pasaj Cer	Trützschler HSR 1000	Şerit- Ne 0,14
3.Pasaj Cer	Trützschler HSR 1000	Şerit- Ne 0,16
	Vorteks Murata III 870	
Vorteks iplik eğirme makinesi	Besleme oranı 0,98	
	Sarım açısı 15	
	Toplam çekim 175	
	Nozul tipi Orient	
	İğ çapı 1,3 mm	
	Eğirme basıncı 0,55 MPa	
	Take-up oranı 0,995	İplik- Ne 28

2.2.2. Kumaş Üretimi

Ring kompakt, OE-rotor ve vorteks eğirme sistemleri ile Ne 28/1 olarak eğrilmiş olan lyocell iplikleri, yuvarlak örgü makinasında ilmek iplik uzunlukları 2,9 mm olacak şekilde örülmüştür. Makine parametreleri Çizelge 5’de verilmektedir [27].

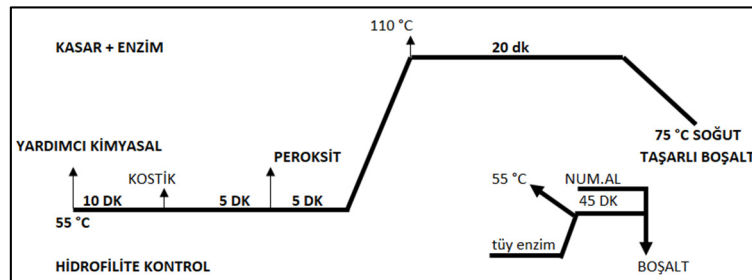
Çizelge 5. Örne makine parametreleri

Makine tipi ve modeli	Pailung
Makine devri (d/dk.)	20
Makine inceliği (E)	28
Makine çapı (pus) (inç)	32
İğne sayısı	2813
Sistem sayısı	96

Ham kumaş numuneleri, açık-orta-koyu tonlarda boyanmak üzere üçer parçaya ayrılmıştır. Boyama işlemlerinde ilk işlem olarak açık ve orta renkler için kasar işlemi uygulanmıştır. Çizelge 6’da kullanılan kimyasallar ve oranları, Şekil 2’de ise kasar grafiği verilmiştir [27].

Çizelge 6. Kasar işlemlerinde kullanılan kimyasallar ve oranları

Kimyasal adı	Oran	Miktar (g)
Infawet Nfo (Islatıcı)	0,8 g/L	792
Lubsol Psa conic (İyon tutucu)	1,5 g/L	1485
Lubcell oli pow (Kırık önleyici)	0,5 g/L	495
Sıvı kostik (Alkali)	3 g/L	2970
Akbleach Cba (Hidrojen peroksit)	2,5 g/L	2475

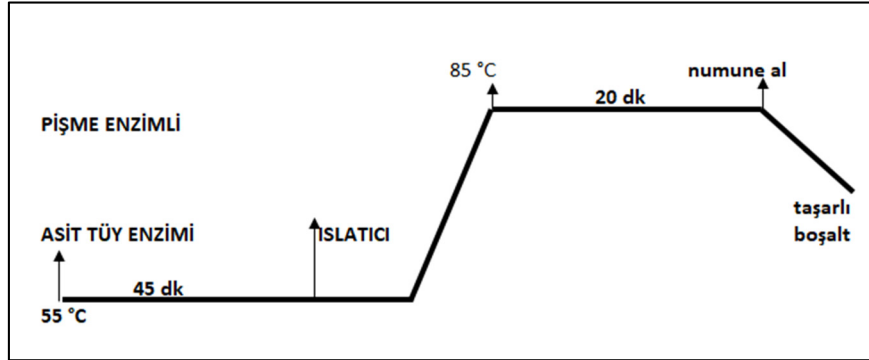


Şekil 2. Kasar ve enzim grafiği

Koyu renklerde pişirme enzimli ön işlem uygulanmıştır. Kumaş yüzeyini kasar yapmadan temizleyerek yüzeydeki parafin, yağ ve çepel gibi emilimi zorlaştıran materyalleri temizleme işlemidir. Bu ön işlemde kullanılan kimyasallar Çizelge 7’ de, grafik ise Şekil 3’ de verilmiştir [27].

Çizelge 7. Pişirme enzimli işlemde kullanılan kimyasallar

Kimyasal adı	Oran	Miktar (g)
Formik asit (%85)	0,21 g/L	218,4
Azmcell 3062	0,05 %	40
İnfawet Nfo	1,5 g/L	1560
Lubsol Psa conic	1,5 g/L	1560
Lubcell oli pow (Kırık önleyici)	0,5 g/L	520

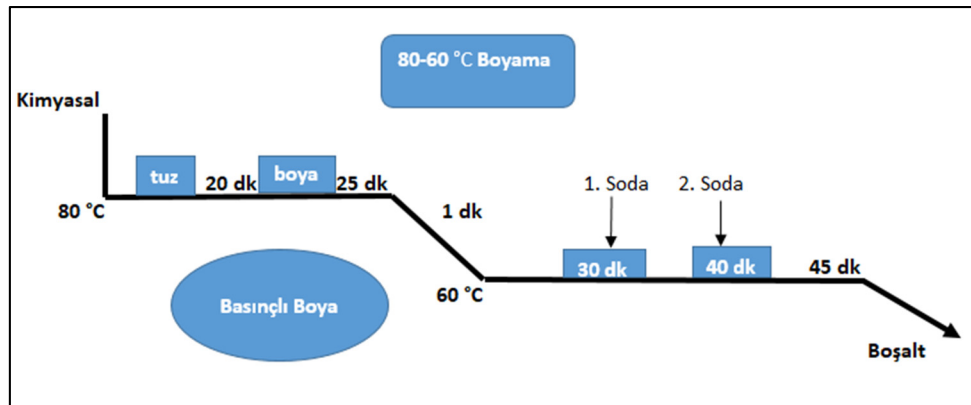


Şekil 3. Pişme grafiği

Kasar ve pişme işlemlerinden hemen sonra HT boyama işlemi gerçekleştirilmiştir. Boyamalarda kullanılan kimyasallar ve boyalar Çizelge 8’ de verilmiştir. Ayrıca boyama grafiği de Şekil 4’ de gösterilmiştir. Kumaşlara uygulanan ard işlemler ve kullanılan kimyasallar ise Çizelge 9 ve Şekil 5’de verilmiştir [27].

Çizelge 8. Boyama işleminde kullanılan kimyasallar ve oranları

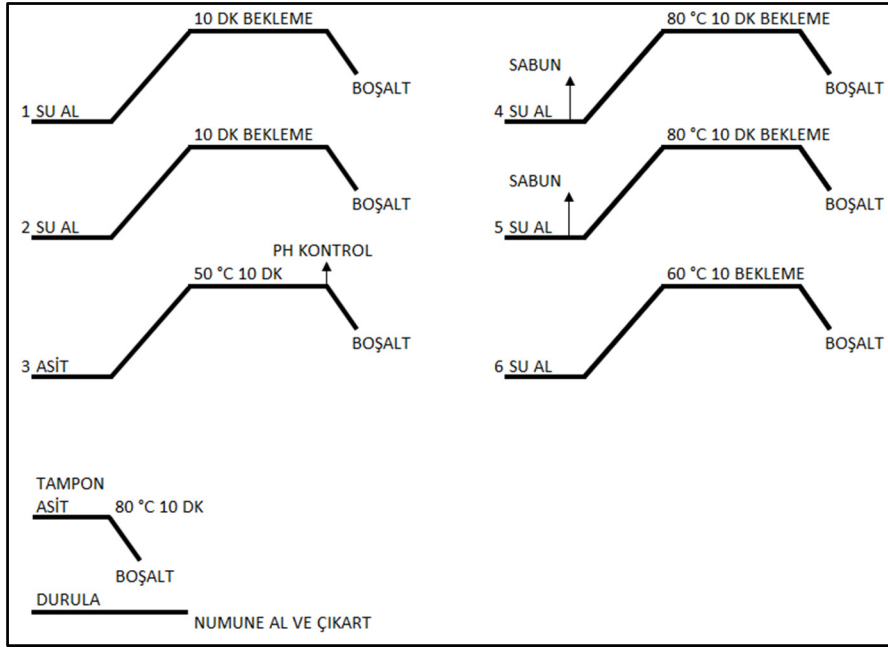
Boyarmadde ve kimyasallar	Boyama şiddeti					
	Açık		Orta		Koyu	
	Oran	Miktar (g)	Oran	Miktar (g)	Oran	Miktar (g)
Polynol BSL 50 (Egalizatör)	1 g/L	990	1 g/L	4.013,49	1 g/L	1040
Tuz (sertlik 7)	120 g/L	118.800	135 g/L	541.821,15	300 g/L	312.000
SINARCION Yellow BF4R	0,95 %	855	-	-	-	-
BFIX Yellow MERL	-	-	-	-	1,3 %	1040
SINARCION Red BF2B	0,3 %	270	1,9 %	9.299,55	0,3 %	240
SINARCION Blue BFRF	0,48 %	432	0,51 %	2496,2	1,8 %	1440
Bizol Black CNN	-	-	-	-	8 %	6400
Soda	2 g/L	1980	2 g/L	8.026,98	2 g/L	2080
Segalkaly SMP100	6 g/L	5940	6,3 g/L	25.284,99	8,4 g/L	8736



Şekil 4. Boyama grafiği

Çizelge 9. Ard işlemlerde kullanılan kimyasallar

Yıkamada kullanılan kimyasallar	Oran	Verilen miktar (g)
Formik Asit	0,9 g/L	936
Akrıdol SK	1 g/L	1040
Sequest SSD 1000	0,5 %	520
Akrıdol SK	1 g/L	1040
Sequest SSD 1000	0,5 g/L	520
Yumuşatma reçetesi		
Econutra NAU (asit)	0,5 g/L	520

**Şekil 5.** Yıkama grafikleri

Boyama işlemi biten kumaşlara, ramöz ve sanfor işlemleri uygulanmış, mamul kumaşlar elde edilmiştir.

2.2.3. İplik ve Kumaş Testleri

İplik Testleri

Üretilen ipliklerin düzgünsüzlük, iplik hataları ve tüylülüğü “TS 2394 ISO 2649: 2008, Yün şerit, fitil ve ipliklerde kısa devreli doğrusal yoğunluk düzgünsüzlüklerinin elektronik düzgünsüzlük ölçme cihazı ile saptanması” standardına göre belirlenmiştir. Testler Uster Tester 5 cihazında (UT5), test hızı 400 metre/dakika ve test süresi 1 dakika olarak uygulanmıştır.

Üretilen ipliklerin iplik kopma mukavemeti ve kopma uzaması ölçümleri “TS EN ISO 2062: 2014 Tekstil-Paketlerden alınan iplikler-Tek ipliğin kopma kuvvetinin ve kopma anındaki uzamasının sabit hızlı uzama cihazı (CRE) kullanılarak tayini” standardına göre Uster Tensorapid 4 Mukavemet Test Cihazında yapılmıştır.

Kumaş Yapısal Özelliklerinin Ölçümü

Kumaş yapısal özelliklerinin analizi için ilmek iplik uzunluğu testi, gramaj ve sıklık testleri yapılmıştır. İlmek iplik uzunluğu ve sıklık ölçümleri “TS EN 14970: 2006 Tekstil- Örülmüş kumaş- Tek iplikli örme kumaşlarda örgü ilmeği ve iplik doğrusal yoğunluğunun tayini” standardına göre yapılmıştır. Kumaş numunelerinin gramajları “TS EN 12127: 1999 Tekstil – Kumaşlar- Küçük numuneler kullanarak birim alan başına kütlenin tayini” standardına göre yapılmıştır.

Renk Ölçümü

Numunelerin renk ölçümü ve referansa göre renk farklarının belirlenmesi, Datacolor Spektrofotometre Renk Ölçüm Cihazı ve ColorExperience v.2014.1.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Spektrofotometreler renk analizinde, X, Y, Z olarak bilinen tristimulus değerlerinden yararlanılarak L^* , a^* ve b^* olmak üzere üç temel renk koordinatı hesaplanır. Bu renk sisteminde iki renk arasındaki renk farklılıkları, ΔE ile ifade edilir, Kumaş boyamalarında, yüzeyde tutulan boyarmadde miktarını yani renk şiddetini sayısal olarak değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntem Kubelka–Munk (K/S) bağıntısıdır. K/S değeri, boyalı bir kumaşın koyuluk derecesinin hesaplanmasında temel bir ölçüt olarak kullanılmaktadır [28].

Haslık Testleri

Boyalı kumaş numunelerinin yıkama haslıkları “TS EN ISO 105-C06: 2012, Tekstil - Renk haslığı deneyleri - Bölüm C06: Evsel ve ticarî yıkamaya karşı renk haslığı” standardına göre James H.Heal marka Gyrowash cihazında A1M metodu ile yapılmıştır. Boyalı kumaş numunelerinin sürtünme etkisine karşı renk haslıkları “TS EN ISO 105-X12: 2016, Tekstil - Renk haslığı deneyleri - Bölüm X12: Sürtmeye karşı renk haslığı tayini” standardına göre Prowhite Crockmeter sürtme haslığı test cihazı ile yapılmıştır. Haslık testlerinin sonuçları gri skala ile 1 ile 5 arasında değerlendirilmiştir.

Patlama Mukavemeti

Patlama mukavemeti testi TS EN ISO 13938-2: 2003 standardına göre James Heal marka patlama mukavemeti test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Diyafram yöntemiyle gerçekleştirilen patlama mukavemeti testinde, test başlığı 7,3 cm² olarak kullanılmıştır.

May Dönmesi Testi

Örme kumaşlarda esnekliği sağlayan ilmeklerin dik konumdan sapmasıyla ortaya çıkan yapı bozukluğu may dönmesi olarak tanımlanır. İlmeklerin ilk durumlarına göre gösterdiği açı farklılığı, may dönmesinin θ değeri olarak ifade edilir. Oluşan θ açısının 5°'nin altında olması, genel olarak kabul edilebilir sınırlar içinde değerlendirilir [29]. Dönme açısı 5°'den büyük ise dönme önemli boyuttadır [30]. May dönmesi testi, giysi örnekleme metoduna dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. TS EN ISO 5077:2012 standardına uygun şekilde hazırlanan kumaş numuneleri, yıkama ve kurutma işlemleri sonrasında yan dikişlerde meydana gelen dönme davranışı esas alınarak incelenmiştir. Numuneler, açık en veya tüp form kumaşlardan kenarlardan en az 15 cm içerden olacak şekilde 50 × 50 cm boyutlarında kesilmiş; ilmek çubuk (boy) yönünde iki kenarı ve ilmek sırası (en) yönünde bir kenarı overlok dikişi ile birleştirilerek alt kısmı açık bırakılmış ve çanta formuna getirilmiştir. Yıkama işlemleri ev tipi çamaşır makinesinde 40 °C'de, kurutma işlemleri ise tumbler kurutucuda gerçekleştirilmiştir. Yıkama ve kurutma işlemleri, kumaşlarda relaksasyonun sağlandığından emin olunana kadar tekrarlanmış ve numuneler ölçüm öncesinde standart atmosfer koşullarında kondisyonlanmıştır. May dönmesi değeri, numune üzerinde sağ ve sol kenarlarda ölçülen dönme miktarlarının ortalamasının, yıkama sonrası kumaş boyuna oranlanmasıyla yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

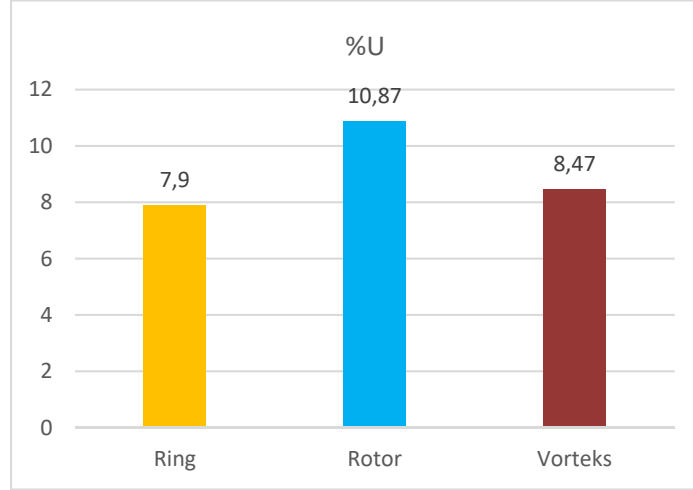
Boncuklanma Testi

Gevşek liflerin oluşturduğu ve kumaş yüzeyinde görülen lif dolaşıklıkları boncuk olarak adlandırılmaktadır. Boncuklanma, kumaşın kumaşa, başka kumaşlara ve hatta deri ile sürtünmesi sonucunda ipliklerden kumaş yüzeyine lif göçü olmasıyla gerçekleşmektedir. Kumaşların boncuklanma dayanımı, “TS EN ISO 12945-2: 2002 Tekstil - Kumaşlarda yüzey tüylenmesi ve boncuklanma yatkınlığının tayini, Bölüm 2: Geliştirilmiş Martindale metodu” standardına göre James Heal Martindale aşınma ve boncuklanma test cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Testte 125, 500, 1000, 2000 ve 4000 devir sonunda üst deney parçaları, karanlık odada ışık kabini içinde D65 gün ışığı altında 45° lik açıyla yerleştirilmiş platform üzerine konarak EMPA standart K3 serisi standart fotoğraflar ve orijinal numune ile kıyaslanarak boncuklanma düzeyleri gözle subjektif olarak değerlendirilip, 1-5 arasında derecelendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. İplik Test Sonuçları

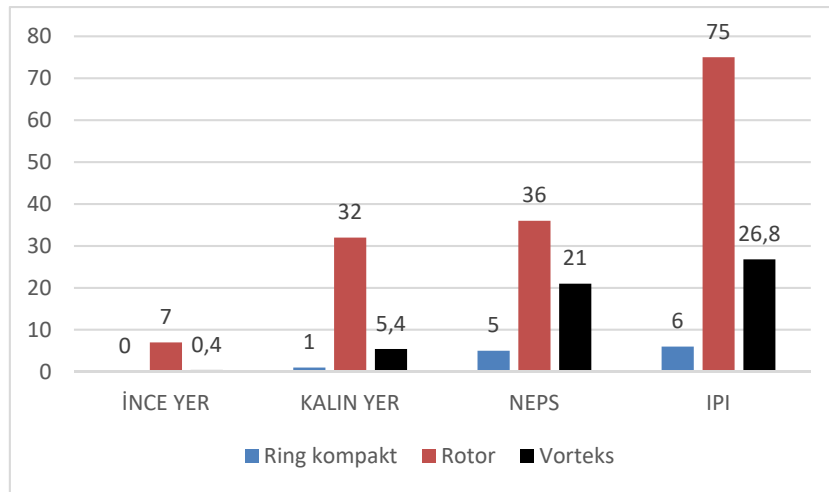
Çalışma kapsamında kullanılan Ecocell™ lyocell liflerinden üç farklı eğirme metodu ile üretilen her iplik tipinden Uster Tester 5 cihazında 5'er ölçüm yapılmış, ortalamaları alınarak grafikler oluşturulmuştur. Üretilen ipliklerin ortalama düzgünsüzlük değerleri Şekil 6'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6. İplik düzgünsüzlüğü (%U)

Ring kompakt iplik ile vorteks iplik yakın %U değerleri verirken, OE-rotor ipliklerin daha yüksek düzgünsüzlüğe sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, OE-rotor eğirme sisteminde liflerin daha kısa mesafede bükülmesi ve açılma işleminin agresifliği ile açıklanabilir [31]. Rameshkumar ve arkadaşları, %100 pamuk lifi ile üretilen Ne 30 ipliklerde, ring ipliklerinin en düşük düzgünsüzlük (U%) değerine, rotor ipliklerinin ise en yüksek değere sahip olduğunu bildirmiştir. Tüm eğirme sistemlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada en düzgün iplikleri kompakt eğirme sisteminin ürettiği ifade edilmiştir [32]. Kompakt eğirmede eğirme üçgeninin yok edilmesi ile hemen hemen tüm liflerin iplik yapısına dahil olması, lif yerleşiminin diğer eğirme sistemlerine göre kontrollü ve daha düzgün olması bu sonucu doğurmaktadır. % 100 pamuk ve %100 viskon lifleri ile yürütülen bir diğer çalışmada ise OE-rotor ipliklerinin vorteks ipliklerinden daha yüksek düzgünsüzlük değerleri verdiği, bu durumun rotor iplik yapısındaki düzensiz lif yerleşiminden ve rotor ipliklerinin sargı (kayış) liflerinden kaynaklandığı belirtilmiştir [33].

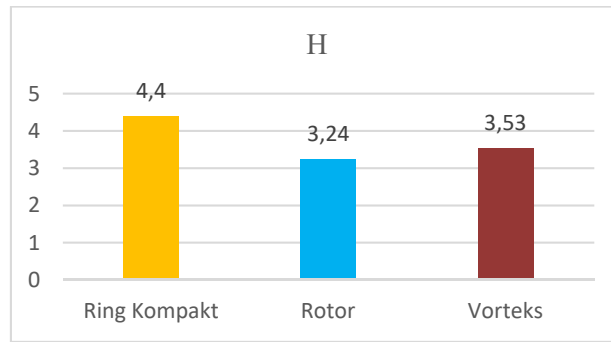
İplik hata indeksi (IPI), iplikteki ince (-50) ve kalın yerler (+50) ile birlikte toplam neps (+200) sayısının birleşimi ile ifade edilir [34, 35]. Çalışmada üretilen ipliklerin hata grafiği Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. İplik hataları

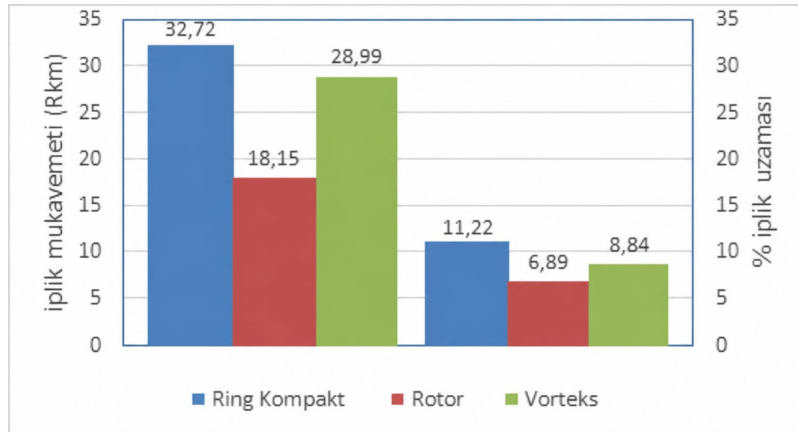
İplik hataları açısından eğirme sistemleri değerlendirildiğinde en yüksek IPI değerlerini rotor eğirme sistemi verirken en düşük IPI değerleri ring kompakt eğirme sistemi ile elde edilmiştir. % 100 pamuk ve %100 viskon lifleri ile yürütülen çalışmada da OE-rotor ipliklerinin vorteks ipliklerine kıyasla daha fazla iplik hatası içerdiği belirtilmiştir [33]. Bir diğer çalışmada pamuk/polyester karışımı rotor ipliklerindeki iplik hatalarının vorteks ipliklerden daha yüksek olduğu ifade edilmiştir [36].

Üretilen ipliklerin ortalama tüylülük (H) değerleri Şekil 8’de grafik olarak verilmiştir. Eğirme sistemlerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada en düşük iplik tüylülüğü rotor ipliklerde görülürken onu vorteks iplikleri izlemiş ve en yüksek tüylülük ring kompakt ipliklerde ölçülmüştür. Kılıç ve arkadaşları genel olarak, tüylülük özellikleri bakımından en iyi iplikleri vorteks eğirme sisteminin verdiğini, bunu rotor eğirme sisteminin takip ettiğini belirtmişlerdir [32]. Çalışmaların bir kısmında ise tüylülük açısından vorteks iplikleri ile rotor iplikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olmadığı ifade edilmiştir [37]. Tüylülük açısından bir sıralama yapıldığında en iyi vorteks, sonra rotor, daha sonra kompakt ve en son ring iplikleri gelmiştir [32]. Bu çalışmanın tüylülük sonuçları literatürle uyumlu çıkmıştır. OE-rotor ve vorteks eğirme sistemlerinde yer alan sargı liflerinin tüylülük üzerinde olumlu etki yarattığı söylenebilir.



Şekil 8. İplik tüylülüğü (H)

Çalışma kapsamında üç farklı eğirme metodu ile üretilen her iplik tipinden Uster Tensorapid cihazında 5’er ölçüm yapılmış, ortalama mukavemet ve uzama değerleri Şekil 9’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 9. İplik mukavemeti ve uzaması

Ring kompakt sistemde elde edilen ortalama mukavemet değeri 32,72 cN/tex ile en yüksek seviyede iken vorteks ipliklerde 28,99 cN/tex, rotor ipliklerde ise 18,15 cN/tex olarak ölçülmüştür [27]. Genel olarak birçok çalışmada en mukavemetli iplikler ring, daha sonra vorteks ve en son rotor iplikleri olarak sıralanmaktadır [31, 33, 36]. Ring iplik eğirmenin prensibi gereği yüksek lif paralellliği ve dıştan içe doğru büküm ile liflerin içten dışa göçü neticesinde iplik içerisinde çok güçlü kohezyon yüksek iplik mukavemetini vermektedir. OE-rotor ipliği, oldukça düzensiz bir büküm yapısına sahiptir. Merkezde paralel olarak düzenlenmiş lifler ile paralel liflerin etrafını saran liflerden oluşur. Lif göçü nispeten zayıf ve kohezyon düşüktür. Bu durum iplik mukavemetinin düşük olması sonucunu doğurur. Vorteks ipliklerde ise ipliğin merkezindeki paralel lifler arasında zayıf kohezyon nedeniyle mukavemet değerleri ring ipliklere göre daha düşüktür. Tüm eğirme sistemlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada en yüksek mukavemet

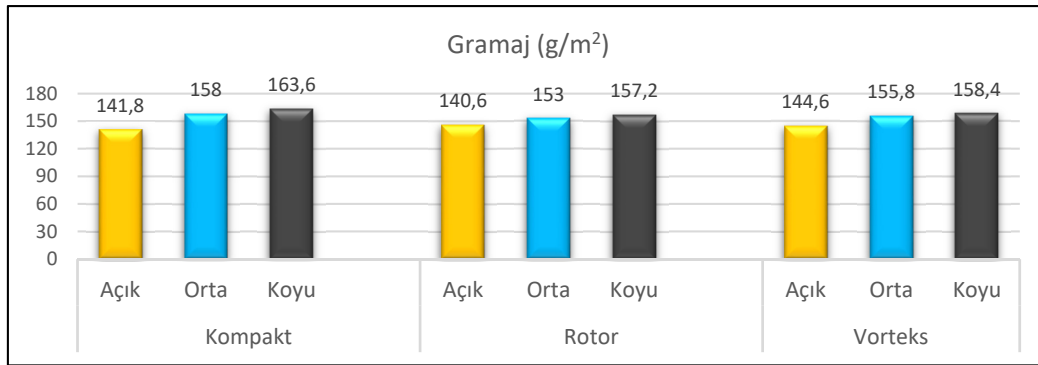
değerinden en düşüğe göre iplikler sıralandığında kompakt iplikler, ring iplikleri, vorteks iplikler ve en son rotor iplikleri gelmektedir [32]. İplik kopma uzaması sonuçları değerlendirildiğinde, mukavemet sonuçları ile benzer eğilim görülmüştür.

3.2. Kumaş Test Sonuçları

Kumaşların ölçülen yapısal özelliklerinin ortalama değerleri Çizelge 10'da ve ortalama kumaş gramajları ise grafik olarak Şekil 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Kumaş yapısal özellikleri

Eğirme sistemi	Boyama şiddeti	İlmek sıra sıklığı cpc (sıra/cm)	İlmek çubuk sıklığı wpc (çubuk/cm)	İlmek yoğunluğu/cm ²	İlmek iplik uzunluğu (mm)
Ring kompakt	Açık	20,4	15,17	309,5	2,86
	Orta	20,72	14,94	309,6	2,87
	Koyu	20,92	14,39	294,8	2,83
Rotor	Açık	21,73	12,89	280,1	2,71
	Orta	21,88	13,72	300,2	2,88
	Koyu	20,03	13,89	278,2	2,88
Vorteks	Açık	20,53	13,89	285,2	2,87
	Orta	20,23	14,11	285,4	2,87
	Koyu	20,2	14,89	300,8	2,88



Şekil 10. Mamul kumaşların gramajı

Farklı eğirme sistemleri ile üretilen Ne 28/1 Ecocell ipliklerinden üretilen boyalı örmeye kumaşların gramaj sonuçları incelendiğinde, tüm iplikler için açıktan koyuya doğru gidildikçe kumaş gramajının arttığı görülmüştür. Koyu renklerde boyarmadde miktarı arttığı için bu beklenen bir durumdur. Açık, orta ve koyu renkler için rotor iplikleri ile örülen kumaşlar en düşük gramaj değerlerini göstermiştir. Bu durum rotor ipliklerinin hacimli yapısı nedeniyle sıklıkların daha düşük oluşu ile açıklanabilir. Diğer yandan açık renk boyamada en yüksek gramaj vorteks ipliklerde görülürken orta ve koyu renklerde ise kompakt ipliklerden örülmüş kumaşların gramajları en yüksek çıkmıştır.

Yapılan bir çalışmada, ring, rotor ve vortex sistemleriyle eğrilmiş Ne 30/1 pamuk ipliklerinden üretilmiş tek plakalı örmeye kumaşlarda aynı ilmek uzunluğu kullanılmasına rağmen, gramajda iplik tipine göre farklılıklar gözlemlenmiştir: ring kumaş 147.6 g/m², rotor 145.6 g/m², vortex ise 148.4 g/m² gramaj göstermiştir. Bu farklılıkların ipliğin yapısal özelliklerinden ve eğirme sisteminden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ring iplikler, daha sıkı bir örgü yapısı oluşturmaya eğilimlidir [31]. Rotor iplikleri ise hacimli yapısı nedeniyle daha gevşek bir yapı sergileyebilir. Vorteks ipliklerinin ise lif yerleşiminin düzgünlüğü sayesinde kontrollü ama görece sert bir yapı sunduğu belirtilmiştir [31].

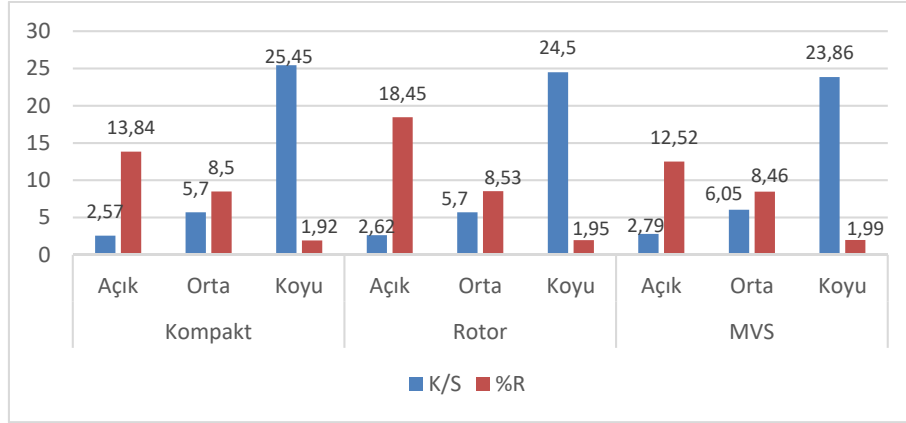
3.2.1. Renk Ölçümü Sonuçları

Boyama işlemi sonrasında kumaşların renk özellikleri spektrofotometre ile CIELAB renk uzayında analiz edilmiştir. Bu analizler, farklı eğirme sistemleriyle üretilen kumaşların boyarmadde tutumu ve renk derinliği üzerindeki etkilerini karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen

L*, a*, b*, C* ve h° değerleri Çizelge 11’de sunulmuştur. Ayrıca, boyamalarda rengin maksimum absorpsiyonun gerçekleştiği dalga boylarında ölçülen renk kuvveti (K/S) ile yansıtma (%R) değerleri grafik olarak Şekil 11’de verilmiştir.

Çizelge 11. Kumaşların renk değerleri

Eğirme sistemi		CIELAB renk değerleri				
		L*	a*	b*	C*	h°
Kompakt	Açık	54,45	5,62	7,65	9,49	53,71
	Orta	23,75	27,9	-12,54	30,59	335,79
	Koyu	13,26	0,5	-2,5	2,55	281,42
Rotor	Açık	54,11	5,62	7,69	9,53	53,91
	Orta	23,66	28,29	-12,58	31,02	336,02
	Koyu	13,29	0,58	2,56	2,56	281,78
Vorteks	Açık	55,53	5,63	7,68	9,53	53,74
	Orta	23,85	27,97	12,56	30,69	336,02
	Koyu	13,33	0	2,55	2,55	281,53



Şekil 11. K/S ve %R değerleri

K/S değerlerinin yüksek olması, boya alımının artması ve daha koyu renklerin elde edilmesi anlamına gelmektedir. Beklenildiği üzere tüm eğirme sistemleri için açıktan koyuya doğru gidildikçe K/S değerlerinde belirgin bir artış gözlenmiştir [27]. Bu durum, artan boya konsantrasyonunun kumaş yapısı tarafından daha fazla absorbe edilmesiyle ilişkilendirilmektedir. Açık ve orta renk gruplarında, özellikle vorteks ipliklerinden elde edilen kumaşların K/S değerlerinin diğer eğirme sistemlerine göre bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, vorteks iplik yapısının boya-lif etkileşimini destekleyen yapısal özellikleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Koyu renk grubunda ise ring kompakt ipliklerinden elde edilen kumaşların K/S değerlerinin öne çıktığı ve daha koyu ve doymuş renklerin elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, kompakt eğirme sistemiyle üretilen ipliklerin daha düzenli ve sıkı yapısının boya alımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Rotor ipliklerinden elde edilen kumaşlarda ise K/S değerlerinin özellikle koyu renk grubunda diğer eğirme sistemlerine kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Haris ve arkadaşları, %100 modal ve mikromodal liflerle eğrilmiş ring, OE-rotor ve air-jet iplikleri karşılaştırdıkları çalışmalarında, ring ipliklerin düzgün yüzey yapıları sayesinde boya dağılımının daha homojen gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, rotor ipliklerin ise düşük mukavemet ve yüksek düzgünlük değerlerine sahip olduğu, liflerin yapısal dağınıklığı nedeniyle boya alma performansı değerlerinde zayıf kaldıkları rapor edilmiştir [38].

Örtlek ve arkadaşları; vortex, ring ve OE- rotor ipliklerinden örülen viskon kumaşlarda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, vortex ipliklerden üretilen kumaşların K/S değerlerinin ring ve rotor iplikli kumaşlara kıyasla daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu durum, vortex ipliklerin daha pürüzsüz yüzey yapısı nedeniyle boyayı daha fazla yansıttığı (%R değerinin yüksek olması) bulgularıyla desteklenmiştir [39]. Bu çalışmada da benzer şekilde, vortex ipliklerden üretilen kumaşların koyu tonlarda daha düşük K/S ve daha yüksek %R değerlerine sahip olduğu saptanmış ve bu durum literatürle uyumlu bulunmuştur. K/S değerleri ile ters orantılı olarak, yansıtma oranlarının (%R) koyu renklerde azaldığı, açık renklerde ise arttığı

belirlenmiştir. Açık renkli kumaşlarda daha yüksek %R değerlerinin elde edilmesi, ışığın kumaş yüzeyinden daha fazla yansımaya ilişkinleştirilirken; koyu tonlarda düşük %R değerleri, boyarmaddenin lif yapısı içerisinde daha fazla absorbe edildiğini ortaya koymaktadır.

Farklı eğirme sistemleriyle üretilen ipliklerden örülmüş ve farklı tonlarda boyanmış kumaşların renk farkı (ΔE) değerleri değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 12’de sunulmuştur. Bu analizde, referans kumaş kompakt iplikle örülmüş kumaş olarak seçilmiş ve diğer kumaşların referans renge olan yakınlığı/uzaklığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 12. Renk farkları (ΔE 1976)

Referans (standart)	Numune	Boyama şiddeti	Renk farkı (ΔE 1976)	Sonuç	Açıklamalar
Kompakt	Rotor	Açık	0,89	Geçti	Daha açık, daha yeşil, daha sarı
	Vorteks	Açık	0,99	Geçti	Daha koyu, daha kırmızı, daha sarı
Kompakt	Rotor	Orta	0,77	Geçti	Daha açık, daha kırmızı, daha mavi
	Vorteks	Orta	0,36	Geçti	Daha koyu, daha kırmızı, daha mavi
Kompakt	Rotor	Koyu	0,43	Geçti	Daha açık, daha yeşil, daha mavi
	Vorteks	Koyu	0,61	Geçti	Daha açık, daha mavi, daha yeşil

Tekstil uygulamalarında renk farkının kabul edilip edilmeyeceği, genellikle üretici ve müşteri arasındaki mutabakata bağlıdır; çoğu durumda nihai karar merci müşteridir. Uygulamada ΔE değerinin 1’in altında olması durumunda renk farkının kabul edilebilir düzeyde olduğu ifade edilir. Bilimsel araştırmalarda ise daha sıkı bir ölçüt kullanılmakta, ΔE ’nin 0,5–0,6 aralığını aşmaması halinde renk farkının olmadığı varsayılmaktadır [40]. Çizelgedeki verilere göre tüm ΔE değerlerinin 1’in altında olduğu ve “Geçti” olarak değerlendirildiği görülmüştür. Özellikle açık tonlarda ΔE değerlerinin 1’e yaklaştığı görülmektedir.

Kompakt iplikle örülmüş kumaş referans alındığında, rotor iplikle örülen kumaşların daha açık renk gösterdiği, vorteks iplikli kumaşların ise daha koyu kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, eğirme sisteminin iplik yapısına bağlı olarak kumaşların boyarmadde tutumu ve renk oluşumu üzerinde anlamlı etkiler yarattığını göstermektedir.

3.2.2. Haslık Testi Sonuçları

Yıkama haslığı testinde refekat bezlerine akan boya miktarı gri skala kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 13’de yıkama haslığı testi sonuçları görülmektedir.

Çizelge 13. Yıkama haslığı testi sonuçları

Eğirme sistemi		Yıkama haslığı sonuçları					
		Asetat	Pamuk	Naylon	Polyester	Akrilik	Yün
Kompakt	Açık	4/5	4	3	4	4/5	5
	Orta	4	4	3	3	4	4
	Koyu	3	3	2/3	3	3	3
Rotor	Açık	4	4	3	3	3	4
	Orta	3	3	2/3	2/3	3	3
	Koyu	2/3	2/3	2/3	2/3	2/3	3
MVS	Açık	5	4	4	4	4	5
	Orta	4	3	3	3	3	4/5
	Koyu	3	3	3	3	3	3

Yıkama haslığı sonuçları incelendiğinde genel olarak ring kompakt ve vorteks ipliklerden üretilen kumaşların haslık değerlerinin yarım puan ile 1 puan arasında daha iyi olduğu söylenebilir. Ring kompakt ve vorteks ipliklerinin rotor ipliğinden daha düzgün olmasının bu durumda etkili olduğu düşünülmektedir.

Kumaşların kuru ve yaş sürtme testleri yapıldıktan sonra gri skala ile değerlendirilmiş, kumaştaki refekat bezine ne kadar boya aktığı tespit edilmiştir. Çizelge 14’de sürtme haslıkları test sonuçları görülebilmektedir.

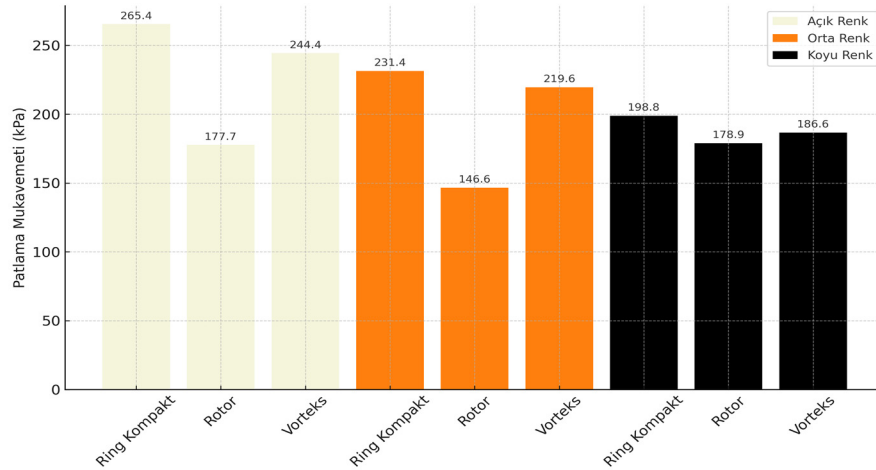
Çizelge 14. Sürtme haslığı testi sonuçları

Eğirme sistemi		Sürtme testi sonuçları	
		Yaş sürtme haslığı	Kuru sürtme haslığı
Kompakt	Açık	4/5	5
	Orta	3	2/3
	Koyu	2/3	3
Rotor	Açık	4/5	5
	Orta	2/3	2/3
	Koyu	2/3	3
MVS	Açık	4/5	5
	Orta	2/3	3
	Koyu	2/3	3

Tüm iplik türleri için açık renk kumaşların yaş ve kuru sürtme haslıkları birbiri ile aynı ve iyi çıkmıştır. Boyama şiddeti arttıkça, orta ve koyu renklerde haslık değerlerinin kötüleştiği görülmektedir. Orta renk boyamalarda yaş sürtme haslığında ring kompakt, kuru sürtme haslığında ise vorteks iplikler yarım puan daha iyi sonuçlar vermiştir. Burada iplik eğirme sisteminden daha ziyade elyaf türü ve boyar madde etkili olmuştur. Boyar madde grubu tüm numuneler için sabit tutulduğunda haslık sonuçları benzer çıkmıştır.

3.2.3. Patlama Mukavemeti

Kumaşların patlama mukavemetini etkileyen başlıca faktörler; iplik cinsi (eğirme yöntemi), iplik numarası, iplik mukavemeti, kumaş sıklığı ve örgü tipidir. Kumaş numunelerinin ortalama patlama mukavemeti değerleri Şekil 12’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 12. Patlama mukavemeti

En yüksek patlama mukavemeti değeri, açık renkli kumaşlarda Ring kompakt iplik ile üretilmiş kumaşa ölçülmüştür (265,4 kPa). Bu değer, liflerin merkezde düzgün ve sıkı bir şekilde yerleşmesini sağlayan kompakt sistemin, kumaş mukavemetine olumlu katkı sunduğunu göstermektedir. Patlama mukavemeti sonuçları iplik mukavemeti sonuçları ile uyumludur. Rotor iplik sistemlerinde ise patlama mukavemeti değerlerinin diğer sistemlere kıyasla düşük kaldığı (örneğin orta renk 146,6 kPa) gözlenmiştir. Bu durum, rotor ipliklerdeki lif yerleşimindeki düzensizlik ve daha gevşek yapının kumaş bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceği şeklinde yorumlanabilir. Koyu renkli kumaşlarda genel olarak patlama mukavemetlerinin daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, koyu tonlarda yapılan boya uygulamalarının kumaş yapısındaki elastikiyeti azaltabileceğini veya iplik üzerindeki fiziksel yükü artırabileceğini düşündürmektedir.

Patlama mukavemetinde iplik mukavemetinin önemli olduğu bilinmektedir [41]. Şekil 12’ye göre açık, orta ve koyu renge boyanan kumaşların patlama mukavemetleri incelendiğinde en yüksek patlama mukavemeti ring kompakt ipliklerden örülmüş kumaşlarda görülürken onu vorteks ipliklerden örülmüş kumaşlar izlemiştir.

Rotor ipliklerden örülmüş kumaşların patlama mukavemeti ise en düşük olarak gözlenmiştir. Patlama mukavemeti sonuçları iplik mukavemeti sonuçları ile uyumlu çıkmıştır (Şekil 9). En yüksek patlama mukavemeti değerleri, tüm eğirme sistemleri için açık renk boyamalarda görülmüştür. Koyu renklerde mukavemetin düşüşü, kullanılan boyar madde ve kimyasalların artması ve böylece kumaşın daha çok zarar görmesi ile açıklanabilir. Şardağ çalışmasında terbiyede kullanılan kimyasalların kumaş mukavemetini düşürdüğünü vurgulamıştır [9]. Sonuç olarak farklı eğirme sistemlerinde üretilen ipliklerin yapısı, lif yerleşimi ve dolayısıyla iplik mukavemeti farklılık göstermektedir ve buna bağlı olarak da patlama mukavemeti değerleri değişmektedir.

3.2.4. May Dönmesi

May dönmesini etkileyen faktörler, iplik bükülme eğilimi ve makine parametreleri olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Örgü makinesi kaynaklı faktörler; tek plaka makine, makine inceliği, makine dönüş yönü ve sistem sayısı parametreleri olup buna relakse (terbiye) işlemleri de dâhil edilmektedir. İplik bükülme eğilimi ise iplik büküm miktarı, ipliğin fiksaj durumu ve lif cinsine bağlıdır [42]. Çizelge 15’de dönme testi sonuçları verilmektedir.

Çizelge 15. Dönme testi sonuçları

Eğirme sistemi		Dönme oranı
Kompakt	Açık	%3 (sol)
	Orta	%0
	Koyu	%0
Rotor	Açık	%3 (sol)
	Orta	%2 (sol)
	Koyu	%2 (sol)
MVS	Açık	%0
	Orta	%0
	Koyu	%0

May dönmesi testi sonuçları incelendiğinde, vorteks (MVS) eğirme sistemiyle üretilen kumaşlarda tüm renk gruplarında may dönmesi gözlenmemiştir. Benzer şekilde, ring kompakt ipliklerden üretilen kumaşlarda orta ve koyu renk gruplarında herhangi bir dönme meydana gelmemiştir. Her iki eğirme sisteminde de liflerin daha dengeli yerleşmesi ve iplik yapısının daha sıkı ve kompakt, daha az hacimli olması, may dönmesi eğilimini azaltmaktadır. Ring kompakt eğirme yöntemiyle üretilen iplik, gerçek büküm ve yüksek eğirme gerilimi nedeniyle, benzer bir rotor ipliğine göre genellikle daha yüksek bir sıkılık, daha düşük hacim gösterir. Bu etkiler ise kumaşın may dönme derecesini azaltır [43].

Rotor iplikleriyle örülen kumaşların gramaj değerleri diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Gramajın az oluşu kumaş yapısının daha gevşek olduğunu göstermektedir. Gevşek yapılı kumaşlarda ise ilmekler dönmeye daha meyillidir [29, 44]. Bu durum rotor iplikleriyle örülen kumaşlarda diğerlerine göre may dönmesinin daha fazla oluşunu açıklamaktadır. Ayrıca rotor ipliklerinin bükümü diğerlerinden bir miktar fazladır. Bu durum da rotor iplikleriyle örülen kumaşların diğerlerine göre daha yüksek may dönmesi göstermesine neden olmuştur. İplik bükümündeki artışın örme kumaşlardaki may dönmesini artırdığı bilinmektedir [29, 42].

Genel olarak değerlendirildiğinde, vorteks ve kompakt eğirme sistemleriyle üretilen ipliklerle örülen kumaşların may dönmesi açısından daha stabil bir yapı sunduğu; rotor eğirme sistemiyle üretilen kumaşlarda ise iplik yapısına bağlı olarak sınırlı düzeyde dönme eğiliminin olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, çalışma kapsamında elde edilen tüm may dönmesi değerlerinin, giysilerde yıkama sonrasında yan dikiş kayması açısından ticari kabul sınırları olarak belirtilen %5–8 aralığının belirgin şekilde altında kaldığı görülmüş; bu durum, incelenen kumaşların kullanım performansı açısından kabul edilebilir düzeyde may dönmesine sahip olduğunu ortaya koymuştur [44].

3.2.5. Boncuklanma Testi Sonuçları

Boncuklanma testleri Martindale cihazında 5 farklı devirde uygulanmış, sonuçlar Çizelge 16’da verilmiştir.

Çizelge 16. Martindale boncuklanma testi sonuçları

Eğirme sistemi		Boncuklanma devirleri				
		125	500	1000	2000	4000
Kompakt	Açık	4/5	4/5	3/4	3/4	5
	Orta	4/5	4/5	4/5	4/5	5
	Koyu	4/5	4/5	4/5	4/5	5
Rotor	Açık	4/5	4/5	4/5	4/5	5
	Orta	4/5	4/5	4/5	4/5	5
	Koyu	4/5	4/5	4/5	4/5	5
MVS	Açık	4/5	4/5	4/5	3/4	5
	Orta	4/5	4/5	4/5	4/5	5
	Koyu	4/5	4/5	4/5	4/5	5

Elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde, tüm eğirme sistemlerinde 4000 devirde tüm örneklerde boncuklanma direncinin yüksek seviyede (5) gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum, kumaşların kullanım ömrü süresince yüzeyde önemli bir bozulma ya da tüylenme oluşmadığını ve iplik yapısının boncuklanmaya karşı yeterince dirençli olduğunu göstermektedir. Elyaf cinsi ve mukavemeti boncuklanma üzerinde oldukça etkilidir. Bu çalışmada elyaf cinsi sabit tutulduğundan iplik eğirme sistemleri boncuklanma üzerinde anlamlı etki göstermiştir.

4. SONUÇLAR

Sürdürülebilir ham maddelerin önem kazanmasıyla birlikte tekstilde yeni nesil rejenere selüloz liflerine olan ilgi de artmıştır. Ecocell™ ticari adı altında Türkiye'de üretilmeye başlanan sürdürülebilir lyocell lifleri, bu çalışmanın temelini oluşturmuştur. Ecocell™ liflerinin tekstil pazarındaki artan mevcudiyetine rağmen, tekstil yapılarındaki performansını araştıran bilimsel çalışmalar sınırlı kalmaktadır. Literatürdeki sayılı çalışmada, Ecocell™ lifleri ring eğirme sisteminde kullanılmıştır. Bu çalışmada; Ecocell™ lifleri ile ring kompakt, OE-rotor ve MVS vorteks eğirme sistemlerinde Ne 28/1 iplikler üretilmiştir.

Ring kompakt iplikler, lif yerleşiminin daha kontrollü olması sayesinde en düşük düzgünsüzlük (%U) ve en az iplik hatası (IPI) değerlerini sergilemiştir. Buna karşın, open-end rotor iplikleri en yüksek düzgünsüzlük ve hata oranına sahip iplikler olarak belirlenmiştir. Tüylülük açısından ise en iyi sonuçlar OE-rotor ve vorteks sistemlerinde elde edilmiştir. En yüksek iplik mukavemeti ring kompakt eğirmede elde edilirken, bunu vorteks izlemiştir; en düşük mukavemet ise lif kohezyonunun zayıflığı nedeniyle rotor ipliklerde ölçülmüştür. Ecocell™ liflerinin farklı eğirme sistemlerinde gösterdiği davranış, diğer selüloz esaslı liflerle benzer olmuştur.

Tüm eğirme sistemlerinde renk farkı (ΔE) değerleri kabul edilebilir sınır olan 1'in altında çıkmıştır. Koyu renklerde ring kompakt iplikler daha yüksek boya alımı (K/S) gösterirken, vorteks ipliklerin pürüzsüz yapısı nedeniyle ışığı daha fazla yansıttığı ve koyu tonlarda K/S değerinin daha düşük kaldığı görülmüştür. Yıkama haslığı açısından ring kompakt ve vorteks iplikli kumaşlar, rotor iplikli kumaşlara göre yarım ile bir puan arasında daha iyi performans göstermiştir. Sürtme haslıklarında ise eğirme sisteminin ziyade lif türü ve boyarmaddenin belirleyici olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma, Ecocell™ lifinin sürdürülebilir bir hammadde olarak ithal muadillerine güçlü bir alternatif olduğunu ve kullanım amacına göre (yüksek mukavemet için ring kompakt, düşük tüylülük için vorteks/rotor gibi) uygun eğirme sisteminin seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, pamuğa göre su kullanımı ve karbon ayak izi açısından çok daha avantajlı olan Ecocell™ lifleri, özellikle iyi boncuklanma direnci ve düşük may dönmesi değerleri ile örme kumaşlarda pamuğa alternatif olabilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Çalışma kapsamında ipliklerin üretilmesini ve iplik testlerinin yapılması sağlayan Gaziantep Karafiber Tekstil San ve Tic.A.Ş.'ye ve özellikle Ar-Ge Müdürü Sn.Tülin Kaya Nacarkahya'ya; ipliklerin örülmesi ve mamul kumaş haline getirilmesi aşamasındaki katkılarından dolayı Şanlıurfa Aydınli Moda Tekstil yönetimine; kumaş testlerinin gerçekleştirilmesinde verdikleri destek için Şanlıurfa Rubenis Entegre Tesisleri'ne teşekkürlerimizi sunarız.

6. KAYNAKLAR

1. Dhir, Y.J. (2022). *Natural fibers: the sustainable alternatives for textile and non-textile applications*. In Natural Fiber. IntechOpen.
2. Başer, İ. (1992). *Elyaf bilgisi*. Marmara Üniversitesi Yayın No: 524.
3. Dayıoğlu, H. ve Karakaş, H. (2007). *Elyaf bilgisi*. Teknik Fuarçılık Yayınları. ISBN:978-975-01610-1-8.
4. Mangut, M. ve Karahan, N. (2008). *Tekstil lifleri*. Ekin Yayınevi. ISBN: 975-8768-63-0.
5. Pearson, L., Watkins, S. & Frankham, S. (1997). Progress in piece dyeing and finishing of tencel fabrics, *Melliand International*, 3, 149.
6. Shen, L., Worrell, E. & Patel, M. K. (2010). Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources. Conservation and Recycling*, 55(2), 260-274.
7. Jiang, X., Bai, Y., Chen, X. & Liu, W. (2020). A review on raw materials, commercial production and properties of lyocell fiber. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(1), 16-25.
8. Özbağcı, Ö. (2008). Pamuk ve bazı rejenere selüloz esaslı süprem örgü kumaşların fiziksel ve boyutsal özellikleri. *Yüksek lisans tezi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
9. Şardağ, S. (2018). Yeni rejenere selülozik lifinden oluşan örmeye kumaşların yıkama sonrası kullanım davranışlarının incelenmesi. *SETSCI Conference Indexing System*, 3, 454-459.
10. Devrim, G. (2019). Farklı liflerden üretilmiş kumaşların kullanım ve biyobozunurluk performansının incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
11. Farha, F.I., Farhana Iqbal, S.M. & Arif Mahmud, M. (2019). Compositional and structural influence on some weft-knitted fabrics comprised of cotton and lyocell yarn. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series E*, 100(1), 11-19.
12. Basit, A., Latif, W., Ashraf, M., Rehman, A., Iqbal, K., Maqsood, H.S., ... & Baig, S.A. (2019). Comparison of mechanical and thermal comfort properties of tencel blended with regenerated fibers and cotton woven fabrics. *Autex Research Journal*, 19(1), 80-85.
13. Akbulut, M., Kadem, F.D. ve Oğulata, R.T. (2023). Tencel kumaşa uygulanan farklı boyama yöntemlerinin seçilmiş kumaş performans özelliklerine etkisinin değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 1107-1115.
14. Basit, A., Rehman, A., Iqbal, K. & Abid, H.A. (2023). Optimization of the tencel/cotton and polyester/recycled polyester blended knitted fabrics to replace CVC fabric. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2167032.
15. Cengizalp, B. ve Durur, G. (2025). Bezayağı dokuma kumaşlarda kenevir lifinin kapilarite özelliklerine etkisi: Pamuk ve lyocell ile karşılaştırmalı bir analiz. *Kenevir ve Biyoteknoloji Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 51-71.
16. Umur, Y. (2010). Selülozik esaslı liflerde fibrilleşmenin kopma yükü ve uzama oranı üzerine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 15(1), 121-135.
17. Bozdoğan, F., Tiye, İ. ve Kayseri, G.Ö. (2010). Farklı fiziksel özelliklere sahip lyocell liflerinde içyapı değişimleri ile lif fiziksel özellikleri arasındaki ilişkinin araştırılması üzerine bir çalışma. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 20(2), 87-92.
18. Atıcı, A. ve Kaya, G. (2017). Alkali ön-işlemin farklı kumaş örgüsündeki lyocell dokuma kumaşların görünüm ve yapısal özelliklerine etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 26(113), 52-62.
19. Elgün, B., Yiğit, İ., Demir, H.G., Eren, S. ve Eren, H.A. (2020). Lyocell liflerindeki fibrilleşmenin ultrasonik yöntem desteği ile kontrolü. 2. *Hezarfen Uluslararası Fen, Matematik ve Mühendislik Bilimleri Kongresi*, 25-26 Eylül, Antalya, Bildiriler Kitabı, 233-244.
20. Karafiber, *What is Ecocell™*, <https://ecocell.tr/what-is-ecocell/>. Erişim tarihi: 04.05.2026.
21. Uyanık, S. & Kaya Nacarkahya, T. (2025). Examination of the properties of sustainable yarns with Ecocell™ fiber and bast fibers in comparison with conventional cotton yarn and organic cotton yarn. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 37(4), 773-792.
22. Yıldırım, E.V., Gültekin, B.C., Çelikkanat, Ö.T., Avcı, N.P. & Koçak, E.D. (2025). Effect of Ecocell™ fiber blends on comfort performance in sustainable clothing production, *Journal of Textile Science and Technology*, 11(3), 80-92.
23. Elibuyuk, S.A., Çörekcioglu, M., Tasan, P.K., Güneç, Ö.D., Satıl, Ş., Gökpınar, B. & Nacarkahya, T. K. (2024). Evaluation of the performance of fabrics produced with oncedye Acrylic™, Ecocell™, and cotton fiber blends contributing to sustainability goals. *The European Journal of Research and Development*, 4(4), 178-187.
24. Polat, E., Hasan, T., Mazari, A.A. & Uzun, M. (2023). Evaluation of weaving and dyeing properties of local regenerated yarns. *Tekstilna Industrija*, 71(4), 14-22.

25. Güler, B., Kaya, A., Gürel, R., Satıl, Ş. & Kaya Nacarkahya, T. (2023). Sportswear collection developed From pulp based biodegradable regenerated cellulose fibers. *XVIth International Izmir Textile and Apparel Symposium (IITAS 2023)*, 25-27 Ekim, İzmir, Özet Kitabı, 79-80.
26. Şen, K., Kaya, A., Özdemir, H.N. & Seki, Y. (2022). Investigation on the fastness and dimensional stability of the knitted fabrics made of the new generation regenerated cellulose fibers. *The European Journal of Research and Development*, 2(4), 135-146.
27. Tekinalp, M. (2026). Farklı Eğirme sistemlerinde üretilen Ecocell™ Lyocell ipliklerle örülmüş mamul kumaşların performans özelliklerinin araştırılması. *Yüksek lisans tezi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 83, Adana.
28. Özdemir, A., O. ve Tutak, M. (2015). Reaktif siyah 5 boyasının pamuklu kumaşı boyama davranışı: K/S renk verimi, fiksaj ve haslıklar. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 83-88.
29. Mezarıcıöz, S. ve Oğulata, R.T. (2009). Farklı ipliklerden üretilen süprem kumaşlarda may dönmesi değerlerinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(1-2): 157-164.
30. Turgay, A.B. (2006). Yuvarlak örme kumaşlarda may dönmesine etki eden faktörlerin incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*. Uludağ Üniversitesi, Bursa.
31. Rameshkumar, C., Anandkumar, P., Senthilnathan, P., Jeevitha, R. & Anbumani, N. (2008). Comparative studies on ring rotor and vortex yarn knitted fabrics. *AUTEX Research Journal*, 8(4), 100–105.
32. Kılıç, M., Balcı Kılıç, G. ve Okur, A. (2011). Eğirme sisteminin iplik özelliklerine etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 18(83), 10-18.
33. Kayabaşı, G. & Yılmaz, D. (2015). A comparative study about some of the knitted fabric properties of cotton and viscose vortex, OE-rotor and conventional ring spun yarns. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 25(3), 246-255.
34. Haque, M.A. & Iqbal, S.F. (2021). Simulation of cotton yarn properties produced in ring spinning system. *Journal of Polymer and Textile Engineering (IOSR-JPTE)*, 8(5), 36-45.
35. Raian, S., Saha, S.K., Hossen, J., Baral, L.M., Begum, H.A., Islam, M.R. & Hossain, M.M. (2023). Assessing the impact of spacer size variations on the ring-spun yarn quality ranking. *Textile & Leather Review*, 6, 582-609.
36. Küçük, N. (2009). Vortex ipliklerinin ring ve open-end rotor iplikleri ile karşılaştırılması. *Yüksek lisans tezi*. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
37. Erdumlu, N., Özipek, B., Öztuna, A.S. & Çetinkaya, S. (2009). Investigation of vortex spun yarn properties in comparison with conventional ring and open-end rotor spun yarns. *Textile Research Journal*, 79(7), 585-595.
38. Skenderi, Z., Dragana, K., Razic, S.E. & Ivekovic, G. (2019). Study on Physical-Mechanical Parameters of Ring-, Rotor- and Air-jet-spun Modal and Micro Modal Yarns. *Tekstilec*, 62(1), 42-53.
39. Örtlek, H.G., Tutak, M. & Yolacan, G. (2010). Assessing colour differences of viscose fabrics knitted from vortex-, ring- and open-end rotor-spun yarns after abrasion. *The Journal of The Textile Institute*, 101(4), 310-314.
40. Duran, K. (2001). *Tekstilde renk ölçümü ve reçete çıkarma*. E.Ü. Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma-Uygulama Merkezi Yayını, No:17 (1.Baskı), Bornova/İzmir.
41. Özdi, N. (2003). *Kumaşlarda fiziksel kalite kontrol yöntemleri*. Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma-Uygulama Merkezi Yayını, Yayın no: 21, İzmir, 136.
42. Bolat Yener, A. ve Korkmaz, Y. (2011). İplik tipi ve iplik sevk sisteminin %100 pamuklu süprem kumaşlarda may dönmesine etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 18(83), 14-20.
43. Badr, A.A., El-Helw, E., El-Hawary, I., Mito, A.B., Elmogahzy, Y. & Farag, R. (2008). Dimensional stability of cotton fabric with emphasis on spirality: between the theory and the practice. *In Beltwide Cotton Conference*, Nashville, Tennessee.
44. Uyanık, S. (2017). Vortex eğirme sisteminde pamuk ve yeni nesil lif karışımlarının eğrilmesi ve örme kumaştaki performanslarının belirlenmesi. *Doktora tezi*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 395, Adana.

Enerji Tüketimine Dayalı Sera Gazı Emisyonlarının Sektörel Analizi: Osmaniye İli Örneği

Ali Burak YAVUZ^{1,a}, Osman KARA^{2,b}, Bülent YANIKTEPE^{2,c}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Osmaniye, Türkiye

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Osmaniye, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8267-3086; ^bORCID: 0000-0003-1501-677X; ^cORCID: 0000-0001-8958-4687

Makale Bilgileri

Geliş : 15.03.2026

Kabul : 08.06.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1909692

Sorumlu Yazar

Bülent YANIKTEPE

byaniktepe@osmaniye.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Sera gazı emisyonları

Enerji verimliliği

Küresel ısınma

Atıf şekli: YAVUZ, A.B., KARA, O., YANIKTEPE, B., (2026). Enerji Tüketimine Dayalı Sera Gazı Emisyonlarının Sektörel Analizi: Osmaniye İli Örneği. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 509-519.

ÖZ

Endüstriyel büyüme ve sosyo-ekonomik gelişmelerin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin belirlenmesi, sürdürülebilir kentsel iklim stratejileri için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, stratejik sanayi potansiyeline sahip Osmaniye ilinin 2021–2024 dönemi emisyonları, IPCC metodolojisiyle sektörel ve enerji tüketimi bazında analiz edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda toplam emisyonların 2718932,77 ton CO_{2e} seviyesine gerilediği ve kişi başına düşen emisyonların ise 5,61’den 4,84 ton CO_{2e} düzeyine düştüğü bulunmuştur. Sanayi sektöründe uygulanan elektrik verimliliği önlemleri sonucunda emisyonlarda önemli bir azalış gerçekleşirken konutlarda doğalgaz ve elektrik kaynaklı emisyonların %40’ın üzerinde artması, kentsel büyüme ve iklimlendirme sistemleri ihtiyacının emisyonlar üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Sonuçlar, yerel iklim eylem planlarının sanayi odaklı verimlilik yaklaşımını konut ve ulaşım sektörlerini de kapsayacak şekilde genişletmesi gerektiğini göstermiştir.

Sectoral Analysis of Greenhouse Gas Emissions Based on Energy Consumption: The Case of Osmaniye Province

Article Info

Received : 15.03.2026

Accepted : 08.06.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1909692

Corresponding Author

Bülent YANIKTEPE

byaniktepe@osmaniye.edu.tr

Keywords

Greenhouse gas emissions

Energy efficiency

Global warming

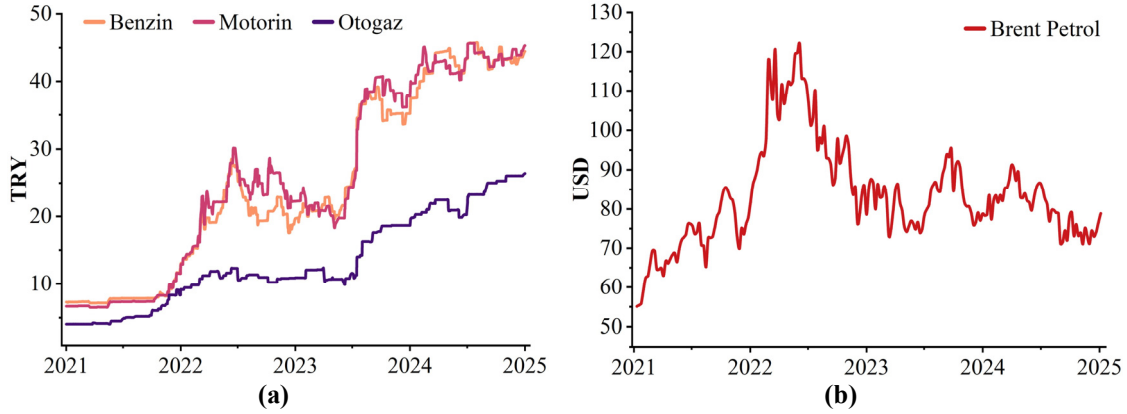
How to cite: YAVUZ, A.B., KARA, O., YANIKTEPE, B., (2026). Sectoral Analysis of Greenhouse Gas Emissions Based on Energy Consumption: The Case of Osmaniye Province. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 509-519.

ABSTRACT

Determining the impact of industrial growth and socio-economic developments on energy consumption is critical for sustainable urban climate strategies. In this study, the emissions of Osmaniye province, which has strategic industrial potential, for the 2021–2024 period were analyzed based on sectoral and energy consumption using the IPCC methodology. Calculations show that total emissions decreased to 2718932.77 tons CO_{2e}, while per capita emissions declined from 5.61 to 4.84 tons CO_{2e}. While significant reductions in emissions were achieved as a result of electricity efficiency measures implemented in the industrial sector, the increase of over 40% in emissions from natural gas and electricity in residential buildings clearly demonstrates the impact of urban growth and the need for air conditioning systems on emissions. The findings suggest that local climate action plans ought to broaden their industry-centric efficiency strategy to encompass the residential and transportation sectors as well.

1. GİRİŞ

Son yüzyılda sanayileşmenin ve küresel nüfus artışının hız kazanması, teknolojik gelişmelerin artmasına olanak sağlamıştır. Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, toplumların tüketim türlerini ve temel ihtiyaçlarını önemli bir ölçüde değiştirmiştir. Artan tüketim talepleri sanayi, teknoloji ve günlük insan faaliyetlerinin merkezine fosil yakıt kullanımını öncelikli hale getirmiştir [1,2]. Ancak fosil yakıtlara olan bu bağımlılık küresel ısınma, sera gazı emisyonlarındaki artış ve karbon ayak izi gibi hayati çevresel sorunları beraberinde getirmiştir [3,4]. Küresel ısınma özellikle elektrik tüketimi ve fosil yakıtların kullanımına bağlı olarak insan faaliyetlerinin iklim üzerindeki etkisini ifade etmektedir [5,6]. Sera gazı emisyonlarındaki artış ise dünya üzerinde yayılan termal radyasyonun ve dünya sıcaklığının artmasına neden olmaktadır [7]. Bu nedenle son yıllarda küresel ısınma ve sera gazı emisyonlarındaki artış seviyeleri birçok hükümet ve kurum tarafından sıklıkla kullanılan bir terim haline gelmiştir [8]. Bunun sonucunda küresel ısınmanın etkilerini sınırlandırmak ve kalıcı bir ölçekte çözüme ulaşmak amacı ile birçok ülke iklim değişikliği ile mücadele kapsamında Paris anlaşmasını imzalamıştır [9]. Paris anlaşması ile birçok ülke tarafından 2030 yılına kadar emisyon azaltım ve 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi belirlenmiştir [10]. Türkiye’de Paris Anlaşmasını imzalayarak dünyanın küresel ısınma ile mücadelesine katkı sağlamaktadır. Türkiye’nin 2030 yılına kadar fosil yakıt tüketimini azaltma ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneliminin artması küresel ısınma konusundaki en önemli hedefleri arasında yer almaktadır [11]. Ancak artan enerji talebi ve fosil yakıt kullanımına bağlı olarak Türkiye’de sera gazı emisyonlarının mevcut politikalar altında azalmak yerine artış eğilimini sürdürmesi beklenmektedir [12]. Türkiye’nin enerji profili büyük oranda ithal edilen fosil yakıtlara dayanmaktadır. Bu durum enerji maliyetlerinin küresel brent petrol fiyatları ve döviz kurlarına karşı hassas hale gelmesine neden olmaktadır. Ekonomik olaylar ve enerji maliyetindeki değişimler sadece tüketim miktarını değil aynı zamanda enerji arzında tercih edilen yakıt türünü de etkileyerek sera gazı emisyon yoğunluğunun artmasında belirleyici rol oynamaktadır [13]. Şekil 1’de özellikle ulaşım sektöründe kullanılan yakıtların Türk lirası bazında ve küresel Brent petrolün dolar bazında fiyatları gösterilmiştir [14,15].



Şekil 1. (a) TRY bazında akaryakıt fiyatları ve (b) küresel brent petrolün dolar bazında fiyatları

Enerji fiyatlarındaki dalgalanmaların ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın çevresel etkileri en yoğun şekilde kentsel alanlarda gözlemlenmektedir. Günümüzde şehirler küresel enerji tüketiminin %67-%76'sı ve sera gazı emisyonlarının %71-%76'lık payından sorumludur [16]. Bu çerçevede, iklim değişikliğiyle mücadelenin etkinliği, ulusal stratejilerin yerel ve kentsel düzeyde uygulanabilir politika, tedbir ve teşvik uygulamaları ile yakından ilişkilidir. Ayrıca şehir ölçeğinde emisyon envanterinin hazırlanması Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG) ile doğrudan uyum göstermektedir [17]. Özellikle Erişilebilir ve Temiz Enerji (SDG 7), Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar (SDG 11) ve İklim Eylemi (SDG 13) hedefleri enerji kaynaklarının sektörel bazda analiz edilmesini ve sera gazı emisyonlarının minimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Şehir ölçeğinde gerçekleştirilen emisyon envanteri çalışmaları, yerel yönetimlerin yalnızca karbon yoğunluğunu izlemelerine değil, aynı zamanda veriye dayalı sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmelerine de olanak sağlamaktadır [18,19].

İklim değişikliğiyle mücadelede il bazında emisyon envanterlerinin önemi giderek artarken, literatürde bu alanda yapılan çalışmaların Türkiye genelinden yerel ölçeğe doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Hamidy ve arkadaşları [20], bölgesel düzeyde yapılan tahminlerin daha ayrıntılı biçimde analiz edilmesinin, emisyon

azaltım hedeflerine yönelik yol haritalarının geliştirilmesine katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir. Endüstriyel tesis ölçeğinde Demirci ve Aydın [21], Konya'daki bir asansör fabrikasındaki kurumsal karbon ayak izini 322,92 tCO_{2e} olarak hesaplamışlardır. Kurumsal düzeyde Turan ve Çakmakçı [22], Pamukkale Belediyesi'nin toplam 6006 ton CO_{2e} olan emisyonunun %69'unun araç filosundan kaynaklandığını belirlerken; Tosun ve Tunç Dede [23] inceledikleri üniversite binasında emisyonun %78,4 gibi büyük bir kısmının elektrik tüketimine dayandığını tespit etmişlerdir. Ulaşım sektörü özelinde bölgesel bir analiz yapan İbik [24], ise Akdeniz Bölgesi'ni incelemiş ve 2022 yılında en fazla CO₂ emisyonuna Antalya ilinin neden olduğunu bulmuştur.

Literatürde Türkiye geneli için envanter çalışmaları mevcut olsa da il, yakıt ve sektör bazlı ayrımların bir arada olduğu detaylı bir emisyon analizi eksikliği dikkat çekmektedir. Bu çalışma kapsamında, sanayi ve tarım potansiyeli ile stratejik bir konuma sahip olan Osmaniye ilinde 2021–2024 yılları arasındaki doğalgaz, LPG, petrol türevi fosil yakıt tüketimleri ve elektrik tüketimleri; konut, hizmet, sanayi ve ulaşım sektörleri özelinde incelenerek sera gazı emisyonları analiz edilmiştir. Çalışmada sera gazı emisyonlarının detaylı olarak hem yakıt hem de sektör bazında incelenmesi, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG 7, SDG 11 ve SDG 13) doğrultusunda veriye dayalı emisyon azaltım stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen bulguların, Türkiye'nin yerel iklim eylem planlarına ve benzer özellikteki kentlerin emisyon yönetimi çalışmalarına rehberlik etmesi hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE METOD

Osmaniye ilinin enerji tüketimine dayalı sera gazı emisyon envanterini oluşturmak amacıyla faaliyet verileri, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan raporlardan elde edilmiştir [25,26]. İlin enerji tüketimi 2021–2024 dönemine ait bu veriler; doğalgaz, LPG, elektrik ve petrol türevi yakıtların sektörel kullanım dağılımlarına bağlı olarak analiz edilmiştir.

2.1. Çalışma Alanının Genel Özellikleri

Akdeniz bölgesinin doğusunda, stratejik bir geçiş noktasında yer alan Osmaniye ili 2024 yılı verilerine göre 561061 kişilik bir nüfusa sahiptir [27]. Adana, Gaziantep, Hatay ve Kahramanmaraş gibi bölgenin büyük sanayi merkezlerine komşu olması, ili lojistik ve ekonomik açıdan kritik bir konuma taşımaktadır. Osmaniye ilinin bu çalışma kapsamında vaka analizi olarak seçilmesinin temel nedeni, son yıllarda hız kazanan sanayileşme süreciyle birlikte fosil yakıt tüketiminde belirgin bir artışın yaşanmasıdır. Bölgenin sahip olduğu tipik Akdeniz iklimi, özellikle yaz aylarında yüksek enerji gerektiren iklimlendirme sistemlerinin yoğun kullanımını zorunlu kılmaktadır. İlin ekonomik yapısı incelendiğinde ise sanayinin yanı sıra tarımsal faaliyetlerin de ülke genelinde önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, bölgedeki emisyonların azaltılması sadece emisyon kontrolü sağlamayacak, aynı zamanda hem sanayi hem de tarım sektörlerinde bütünsel bir verimlilik artışını tetikleyecektir.

2.2. Doğalgaz Tüketim Verileri

Osmaniye iline ait 2021–2024 dönemi doğalgaz tüketim verileri; konut, hizmet sektörü ve sanayi sektörü kategorileri altında sınıflandırılarak Çizelge 1'de gösterilmiştir. İl genelinde doğalgaz; sanayi sektöründe üretim süreçlerindeki sabit yanma faaliyetlerinde, hizmet sektöründeki kurumsal (üniversite, hastane, belediye vb.) ve ticari binaların enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında, konutlarda ise hane halkının ısınma ve sıcak su gereksinimlerinde temel enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bölgenin iklimsel özellikleri nedeniyle sanayi tesislerinde ısınma amaçlı tüketimin yerini iklimlendirme sistemlerine bırakması, bu sektördeki doğalgaz kullanımının doğrudan üretim faaliyetlerine yoğunlaşmasını sağlamıştır.

Çizelge 1. Doğalgaz tüketiminin 2021-2024 yılları arası sektörel dağılımları

Yıllar	Sanayi sektörü	Hizmet sektörü (m ³)	Konut
2024	208766803	7843533	45607172
2023	188146480	6518687	29164961
2022	212560142	7403736	37582515
2021	207873546	5130258	31742785

2.3. LPG Tüketim Verileri

Osmaniye ilinin 2021–2024 dönemine ait LPG tüketim verileri; konut, sanayi sektörü ve ulaşım sektörü kategorileri altında sınıflandırılarak Çizelge 2’de gösterilmiştir. Bu kapsamda LPG kullanımı; konutlarda tüplü, sanayi ve ticari faaliyetlerde dökme, ulaşım sektöründe ise otogaz formunda gerçekleşmektedir.

Çizelge 2. LPG tüketiminin 2021-2024 yılları arası sektörel dağılımları

Yıllar	Konut	Sanayi sektörü (Ton)	Ulaşım sektörü
2024	5531	259	39896
2023	5385	4578	40062
2022	5622	831	32605
2021	5576	130	33441

2.4. Petrol Türevi Yakıt Tüketim Verileri

Osmaniye ilinin 2021–2024 dönemine ait petrol türevi yakıt tüketimleri, benzin ve motorin verileri olarak sınıflandırılarak Çizelge 3’te gösterilmiştir. Bölgedeki sanayi ve üretim faaliyetlerine bağlı olarak gelişen lojistik sektörü, bu yakıt grubundaki tüketim yoğunluğunu belirleyen temel unsurlar arasındadır. Ayrıca motorin kullanımı, ulaştırma faaliyetlerinin yanı sıra düşük bir oranda sanayi sektöründeki imalat süreçlerinde sabit yanma yakıtı olarak da gerçekleşmektedir.

Çizelge 3. 2021-2024 yılları arası motorin ve benzin tüketimleri

Yıllar	Motorin (Ton)	Benzin
2024	108887	21349
2023	103516	17149
2022	94399	12752
2021	116283	12929

2.5. Elektrik Tüketim Verileri

Osmaniye iline ait 2021–2024 dönemi elektrik tüketim verileri; aydınlatma, konut, sanayi, kamu ve özel sektör kategorileri altında sınıflandırılarak Çizelge 4’te gösterilmiştir. Elektrik tüketimi, şebeke elektriği üretiminde kullanılan fosil yakıt kaynaklı dolaylı emisyonların belirlenmesi amacıyla çalışmaya dahil edilmiştir. Bu kapsamda sanayi sektöründeki elektrik kullanımı, genel ihtiyaçlarına ek olarak üretim odaklı enerji talebini yansıtmaktadır. Konut, aydınlatma, kamu ve özel sektör kategorileri ise günlük yaşamın sürdürülmesi için gereken enerji hacmini temsil etmektedir.

Çizelge 4. Elektrik tüketiminin 2021-2024 yılları arası sektörel dağılımları

Yıllar	Aydınlatma	Konut	Kamu ve özel sektör (MWh)	Sanayi sektörü
2024	38668	529140	328571	2529774
2023	36724	407105	277942	2895375
2022	35472	372313	272720	3156499
2021	33795	365910	263685	3716889

2.6. Sera Gazı Emisyonlarının Hesaplanması

Osmaniye ilinin enerji tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları ISO 14064-1 standardı çerçevesinde ve Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından belirlenen yöntemlere göre hesaplanmıştır. Sera gazı emisyon hesaplamaları kapsamında karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve diazot monoksit (N₂O) emisyonları ayrı ayrı hesaplanmış; elde edilen değerler, IPCC tarafından yayımlanan AR6 raporunda belirtilen küresel ısınma potansiyelleri dikkate alınarak toplam karbondioksit eşdeğeri (CO_{2e}) cinsinden ifade edilmiştir [28]. Hesaplamalarda kullanılan alt ısı değerler ve sektörel emisyon faktörleri, 2006 IPCC Ulusal Sera Gazı Envanteri Kılavuzu sabit yanma ve hareketli yanma tablolarından elde edilmiş olup temel eşitlikler aşağıda belirtilmiştir [29].

$$Emisyon_{CO_2,yakıt} = Tüketim_{yakıt} * EF_{CO_2,yakıt} \quad (1)$$

$$Emisyon_{CH_4,yakıt} = Tüketim_{yakıt} * EF_{CH_4,yakıt} \quad (2)$$

$$Emisyon_{N_2O,yakıt} = Tüketim_{yakıt} * EF_{N_2O,yakıt} \quad (3)$$

$$Toplam emisyon_{CO_2e} = \sum_{yakıt} Emisyon_{yakıt} \quad (4)$$

$Tüketim_{yakıt}$: Fosil yakıt türlerine ait tüketim miktarları (TJ)

EF: emisyon faktörü (kg/TJ),

Elektrik kullanımıyla ilişkili emisyonlar, ulusal şebeke emisyon faktörü kullanılarak doğrudan hesaplanır [30].

$$Emisyon_{elektrik} = Tüketim_{elektrik} * EF \quad (5)$$

$Tüketim_{elektrik}$: Elektrik tüketim miktarı (MWh)

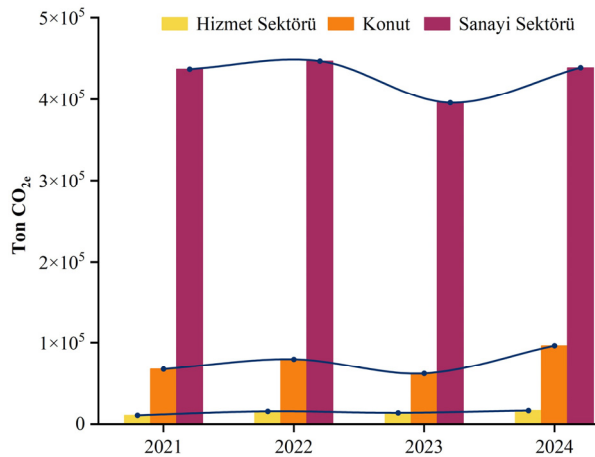
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

İklim değişikliği ile mücadelede ulusal hedeflere etkin biçimde ulaşılabilmesi açısından, bölgesel ve yerel ölçekteki emisyonların doğru ve ayrıntılı biçimde tespit edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada özellikle sanayi ve lojistik sektörü açısından önemli bir konumda bulunan Osmaniye ilinin 2021-2024 yılları arası fosil yakıt ve elektrik tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları araştırılmıştır. İlin emisyon değişimleri enerji kullanım türlerine ve sektörel dağılımlarına bağlı olarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Emisyon azalış ve artış eğilimlerinin nedenleri, ekonomik, ulaşım, üretim vb. etkenler çerçevesinde incelenmiştir.

3.1. Fosil Yakıt Tüketimi Kaynaklı Emisyonlar

Alın tornalama deney numuneleri üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Pt yüzey pürüzlülük değerleri 0,91 - 4,38 μm arasındadır.

Osmaniye ilinde 2021–2024 yılları arasındaki enerji tüketim profili incelendiğinde, doğalgaz kullanımının toplam sera gazı emisyonları içinde yaklaşık %34'lük bir pay ile baskın bir rol oynadığı görülmektedir. Doğalgaz kaynaklı emisyonların sektörel dağılımı başta sanayi süreçlerinde gerçekleşen sabit yanma faaliyetleri olmak üzere kentsel ısıtma ihtiyacı ve hizmet binalarının enerji talebi tarafından şekillenmektedir. Şekil 2'de 2021-2024 yılları için doğalgaz tüketiminden kaynaklı sektörlere göre sera gazı emisyonları gösterilmiştir.

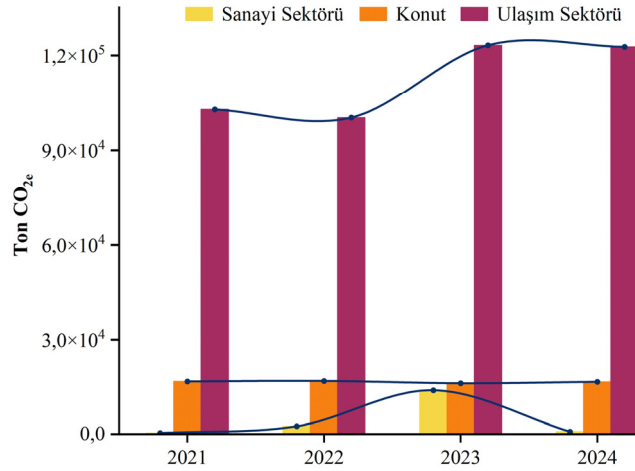


Şekil 2. 2021-2024 yılları arası doğalgaz tüketimi kaynaklı sektörel sera gazı emisyonları

İl genelinde doğalgaz kaynaklı emisyonların %84'ü gibi büyük bir çoğunluğu sanayi sektöründen kaynaklanmaktadır. Sanayi sektöründeki emisyonları 2022 yılında 446912,34 ton CO_{2e} ile zirve noktasına ulaşmıştır. Her ne kadar 2022 yılında başlayan Rusya-Ukrayna savaşı küresel enerji arzında belirsizliklere yol açmış olsa da 2021 yılında COVID-19 salgınının kontrol altına alınmasıyla birlikte sanayi sektöründe üretim faaliyetleri yeniden hız kazanmıştır. Ancak 2023 yılına gelindiğinde sanayi emisyonlarında 395582,08 ton CO_{2e} seviyesine belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu azalışın, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen ve Osmaniye'yi de doğrudan etkileyen Kahramanmaraş merkezli deprem felaketinin getirdiği kesintilerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Deprem sonrası dönemde sanayi sektöründeki üretim yavaşlaması, kapasite azaltımları ve enerji iletim hatlarında meydana gelen hasarlar, doğalgaz tüketiminin belirgin şekilde azalmasına yol açmıştır. 2024 yılı itibarıyla sanayi sektöründeki, toparlanma sürecinin tamamlanması ve üretim faaliyetlerindeki canlanma ile emisyonlar yeniden artış göstererek 438936,76 ton CO_{2e} seviyesine ulaşmıştır.

Konut kaynaklı emisyonlar incelenen dönem içerisinde en yüksek değerine 2024 yılında ulaşmış ve 96093,61 ton CO_{2e} olarak hesaplanmıştır. 2023 yılında 61450,13 ton CO_{2e} seviyesine kadar gerileyen emisyonların yeniden hızlı bir artış eğilimi göstermesi deprem sonrası konut inşaatlarının tamamlanması ve doğalgaz altyapısının şehir genelinde genişletilmesiyle ilişkilendirilmiştir. Hizmet sektörü emisyonlarının ise 2021-2024 yılları arasında 10809,37 ton CO_{2e}'den 16526,20 ton CO_{2e}'ye istikrarlı bir yükseliş sergilediği görülmüştür. Ancak ilin ılıman iklim koşulları nedeniyle hizmet sektöründe doğalgaz kullanımına bağlı emisyonların konut ve sanayi sektörlerine göre daha düşük seviyede gerçekleşmesine neden olmuştur.

Osmaniye ilinde LPG tüketimine bağlı emisyonların özellikle ulaşım sektöründe yoğunlaştığı ve diğer ulaşım yakıtlarına göre maliyet avantajı nedeniyle otogaz kullanımına bağlı olarak şekillendiği görülmektedir. Bu kapsamda küresel Brent petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve döviz kurlarındaki değişimlerin, ulaşım sektöründeki LPG tüketimi ve buna bağlı emisyon düzeyleri üzerinde belirleyici bir etki yarattığı bulunmuştur. Şekil 3'te 2021-2024 yılları için LPG tüketiminden kaynaklı sektörel sera gazı emisyonları gösterilmiştir.



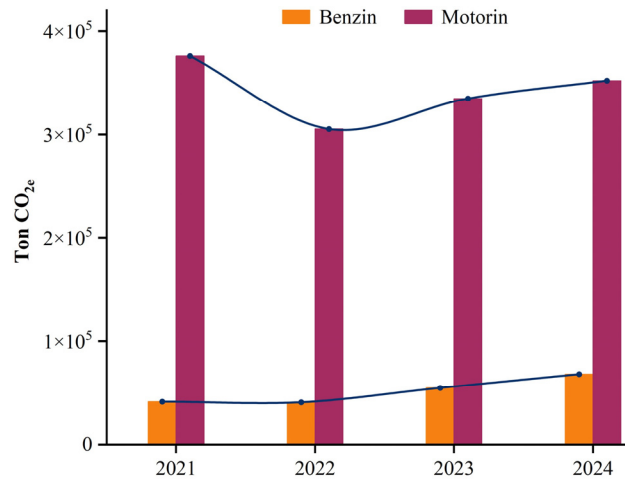
Şekil 3. 2021-2024 yılları arası LPG tüketimi kaynaklı sektörel sera gazı emisyonları

Elde edilen bulgular Osmaniye ilinde LPG kaynaklı emisyonların başlıca kaynağının ulaşım sektörü olduğunu ortaya koymuştur. 2021 yılında 102817,83 ton CO_{2e} olarak hesaplanan ulaşım sektöründeki emisyonlar, 2022 yılında 100247,47 ton CO_{2e} seviyesine gerilemiştir. Bu düşüşte, 2021 yılının son çeyreğinde ulusal ölçekte otogaz fiyatlarında %17-%30 arasında gerçekleşen artışın etkili olduğu değerlendirilmektedir. Söz konusu fiyat artışı, tüketicilerin otogaz tüketimini azaltmalarına veya alternatif ulaşım yöntemlerine yönelmelerine neden olarak ulaşım sektörü emisyonlarının azalmasına katkı sağlamıştır. 2023 yılında ise ulaşım sektörü emisyonlarında belirgin bir artış gözlenmiş ve 123174,79 ton CO_{2e} seviyesine yükselmiştir. Bu artış, Şubat 2023 depremleri sonrasında bölgeye yönelik yoğun yardım faaliyetleri, artan lojistik hareketlilik ve geçici göç hareketleri ile ilişkilendirilmektedir. 2024 yılı emisyon verileri incelendiğinde, 2021 yılının aksine otogaz fiyatlarının diğer yakıt türlerine kıyasla daha düşük seviyede kalmasının otogaz tüketiminde artışa ve buna bağlı olarak ulaşım sektörü emisyonlarının yeniden yükselmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Sanayi sektöründe LPG kaynaklı emisyonlar 2021 yılında 394,88 ton CO_{2e} olarak hesaplanırken, 2023 yılında önemli bir artış göstererek 13905,90 ton CO_{2e} seviyesine ulaşmıştır. Bu artışın temel nedeni, deprem sonucunda ana doğalgaz iletim hatlarında meydana gelen hasarlar olarak değerlendirilmektedir. Doğalgaz arzının kesintiye uğramasıyla birlikte sanayi sektöründe üretim sürekliliğini sağlamak amacıyla dökme tip LPG kullanımına yönelim artmıştır. 2024 yılında sanayi sektöründeki LPG kaynaklı emisyonlar tekrardan 786,73 ton CO_{2e} seviyesine gerilemesi ise enerji altyapısındaki onarım çalışmalarının tamamlandığını ve sanayi sektörünün yeniden doğalgaz kullanımına yöneldiğini ortaya koymaktadır.

Konutlarda ise LPG kaynaklı emisyonlar, incelenen dönemde yaklaşık 16000 ton CO_{2e} bandında istikrarlı bir eğilim göstermiştir. Bu istikrarın temel nedeni, konutlarda kullanılan tüplü tip LPG'nin yakıt fiyatlarındaki değişimlerden çok doğalgaz altyapısının bulunmadığı bölgelerdeki temel pişirme ve sıcak su gereksinimlerini karşılamaya yönelik kullanılmasıdır.

Osmaniye ilinin ulaşım ve lojistik sektörü, sahip olduğu stratejik konum ve sanayi kapasitesi nedeniyle petrol türevi yakıt tüketiminde yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Motorin ve benzin tüketiminden kaynaklanan emisyon değişimleri brent petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve bölgedeki lojistik hareketlilik bağlamında incelenmiştir. Şekil 4'te 2021-2024 yılları için motorin ve benzin tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları gösterilmiştir.



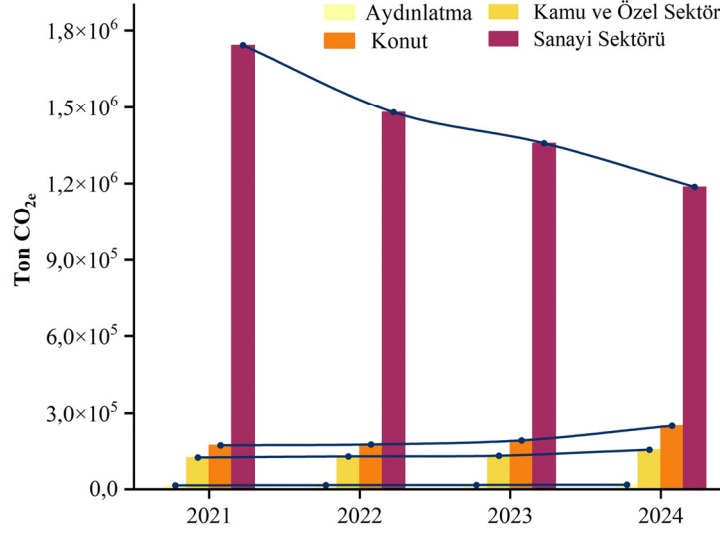
Şekil 4. 2021-2024 yılları arası motorin ve benzin tüketimi kaynaklı sera gazı emisyonları

İl genelinde petrol ürünlerinden kaynaklanan emisyonlar içerisinde en büyük pay motorin tüketimine aittir. Motorin tüketiminden kaynaklanan emisyonlar 2021 yılında 376226,22 ton CO_{2e} olarak hesaplanırken, 2022 yılında 305421,93 ton CO_{2e} seviyesine gerileyerek incelenen dönem içerisindeki en düşük değer olarak bulunmuştur. Bu dikkat çekici azalışın, Şekil 1'de görüldüğü üzere Brent petrol fiyatlarının özellikle 2022 yılının ilk yarısında dolar bazında yükselmesi sonucu pompa fiyatlarında yaşanan fiyat artışlarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Yakıt fiyatlarında meydana gelen bu değişim, motorinin ulaşım ve sanayi üretim süreçlerindeki kullanımını doğrudan sınırlayıcı bir etki yaratmıştır. 2023 yılında motorin kaynaklı emisyonların 334919,40 ton CO_{2e} seviyesine yükseldiği görülmektedir. Bu artışın, Şubat 2023 depremleri sonrasında bölgeye yönelik gerçekleştirilen insani yardım faaliyetleri, enkaz kaldırma çalışmaları ve bu süreçlerde yoğun olarak kullanılan ağır iş makinelerinin artan yakıt talebi ile ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir. 2024 yılında ise motorin kaynaklı emisyonlar 352296,93 ton CO_{2e} seviyesine ulaşarak yükseliş eğilimini sürdürmüştür. Bu durum, Osmaniye ilinin Hatay, Adana ve Gaziantep gibi önemli sanayi merkezlerine komşu olması ve bölgedeki lojistik faaliyetlerin yakıt fiyatlarından bağımsız olarak belirli bir talep düzeyinde gerçekleştiğini göstermektedir.

Benzin kaynaklı emisyonlar, motorin kaynaklı emisyonlara göre daha düşük düzeyde gerçekleşmesine rağmen 2021–2024 döneminde istikrarlı bir artış eğilimi sergilemiştir. Bu süreçte benzin tüketimi kaynaklı emisyonlar 41307,07 ton CO_{2e}'den 68208,26 ton CO_{2e} seviyesine yükselmiştir. Söz konusu artışın, motorin fiyatlarının benzine kıyasla daha yüksek oranlarda artması sonucunda tüketicilerin bireysel araç tercihlerinde benzinli motorlara yönelmeleriyle ilişkilendirilmektedir.

3.2. Elektrik Tüketimi Kaynaklı Emisyonlar

Osmaniye ilinin emisyon envanterinde elektrik tüketimi, ilin sanayi yapısı ve iklim koşulları nedeniyle en yüksek emisyon hacmine sahip enerji türü olarak öne çıkmaktadır. Elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar aydınlatma, konut, kamu ve özel kurumlar ile sanayi sektörü kapsamında analiz edilmiştir. Şekil 5'te 2021-2024 yılları için elektrik tüketiminden kaynaklı sera gazı emisyonları gösterilmiştir.



Şekil 5. 2021-2024 yılları arası elektrik tüketimi kaynaklı sektörel sera gazı emisyonları

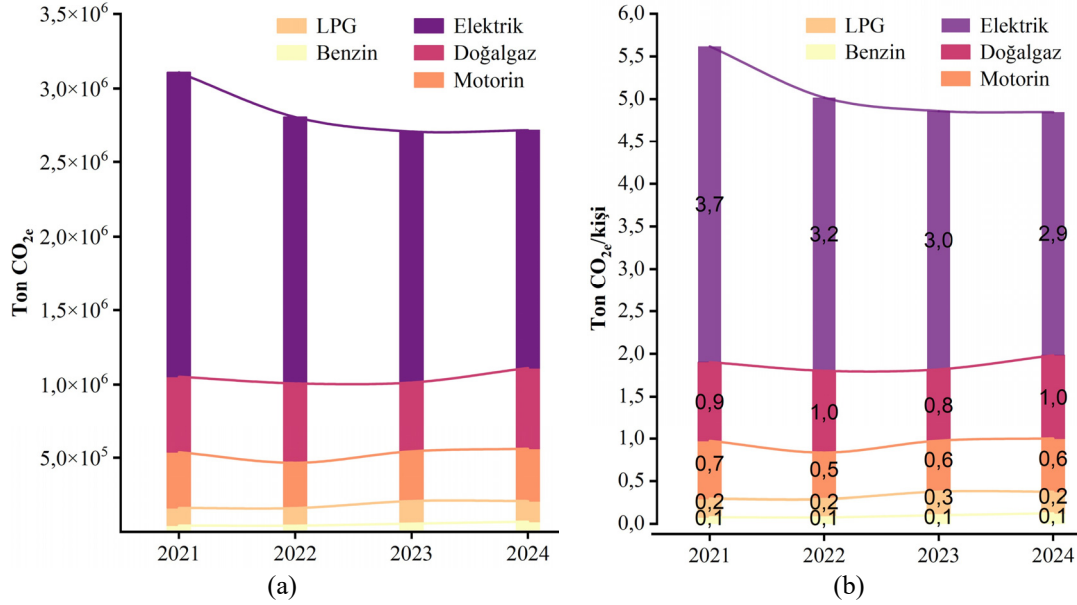
Elektrik kaynaklı emisyonların sektörel dağılımı incelendiğinde, sanayi sektörünün tüm yıllar boyunca en önemli emisyon kaynağı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 2021 yılından 2024 yılına doğru sanayi sektöründen kaynaklanan emisyonlarda belirgin bir azalış eğilimi dikkat çekmektedir. 2021 yılında 1743220,94 ton CO_{2e} olarak hesaplanan sanayi sektörü emisyonları, 2024 yılında 1186464,01 ton CO_{2e} seviyesine gerilemiştir. Bu düşüş, bölgedeki sanayi kuruluşlarının 2026 yılında yürürlüğe girmesi planlanan sınırdaki karbon düzenleme mekanizması ve ulusal emisyon hedefleri doğrultusunda enerji verimliliği uygulamalarını artırmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıca sanayi sektöründe yüksek karbon yoğunluğuna sahip enerji kaynaklarından yenilenebilir enerji sistemlerine yönelimin artmasının, elektrik talebi üzerindeki baskıyı azaltarak emisyonlardaki belirgin azalışta temel nedenlerden biri olabileceği değerlendirilmektedir.

Konut sektöründe elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonlar, sanayi sektörünün aksine incelenen dönemde istikrarlı bir artış eğilimi göstermiş ve 2024 yılında 248166,66 ton CO_{2e} ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Son yıllarda hava sıcaklıklarının yükselmesi ve güneşli gün sayısındaki artış, özellikle yaz aylarında yüksek enerji tüketimi gerektiren soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin kullanımını artırarak söz konusu emisyon artışına neden olmuştur.

Kamu ve özel sektörlerde elektrik tüketimi kaynaklı emisyonlar, 2021'de 123668,27 ton CO_{2e} iken 2024 yılında 154099,80 ton CO_{2e} seviyesine ulaşmıştır. 2023 yılında yaşanan deprem felaketinin enerji altyapısında yarattığı geçici kesintilere rağmen yıllık toplamda emisyonların artış eğilimi devam etmiştir. İlde kamusal hizmet faaliyetlerinin artması ve kamu binalarında gerçekleştirilen iyileştirme ile yeniden yapılandırma çalışmaları, elektrik talebini artırarak emisyonlardaki yükselişte etkili olmuştur.

3.3. Genel Değerlendirme ve Emisyon Değişimlerinin Analizi

Osmaniye ilinin 2021–2024 dönemine ait toplam sera gazı emisyonları ve kişi başına düşen emisyon değerleri, ilin karbon yoğunluğunun sürekli bir değişim içinde olduğunu göstermektedir. 2021 yılında 3106535,25 ton CO_{2e} olan toplam emisyon hacmi, 2024 yılı itibarıyla %12,5'lik bir azalma göstererek 2718932,77 ton CO_{2e} seviyesine gerilemiştir. Şekil 6'da 2021-2024 yıllarında enerji türlerine göre oluşan toplam sera gazı emisyonları ve emisyonların kişi başına dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6. 2021-2024 yılları arası; (a) enerji kaynaklı toplam emisyonlar ve (b) kişi başına düşen toplam emisyonlar

Genel emisyon dağılımları incelendiğinde, elektrik tüketimine bağlı emisyonların tüm yıllar boyunca Osmaniye ilinin en baskın emisyon kaynağını oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 2021–2024 döneminde elektrik kaynaklı emisyonlarda yaklaşık 447 bin ton CO₂e düzeyinde gerçekleşen azalış, toplam emisyonlardaki düşüşün temel belirleyicisi olmuştur. Söz konusu düşüş eğilimi, özellikle sanayi sektöründe enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaşması ve yenilenebilir enerji sistemlerine yönelimin artmasıyla ilişkilendirilebilir. Buna karşılık doğalgaz kaynaklı emisyonların artış göstermesi, il genelinde doğalgaz altyapısının genişlemesi ve konutlarda ısıtma amaçlı enerji talebinin yükselmesiyle açıklanmaktadır. Petrol ürünleri ve LPG kaynaklı emisyonlarda gözlenen dalgalanmalar ise büyük ölçüde küresel enerji fiyatlarındaki değişimler ile bölgede artan lojistik faaliyetlerin yarattığı yakıt talebine bağlı olarak şekillenmiştir. Bu bulgular, il düzeyinde emisyon dinamiklerinin yalnızca enerji tüketim türleri ile değil aynı zamanda ekonomik faaliyetler, enerji fiyatları ve afet sonrası gelişen bölgesel koşullarla da yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Kişi başına düşen emisyon değerleri, kentsel sürdürülebilirliğin değerlendirilmesinde temel göstergelerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda 2021 yılında kişi başına 5,61 ton CO₂e olan emisyon miktarı, izleyen yıllarda kademeli bir düşüş göstererek 2024 yılında 4,84 ton CO₂e seviyesine gerilemiştir. Toplam emisyonların 2023–2024 döneminde sınırlı bir artış göstermesine rağmen kişi başına düşen emisyonların azalmaya devam etmesi, nüfus artışına rağmen enerji verimliliği uygulamalarının ve emisyon azaltım faaliyetlerinin giderek arttığını göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Osmaniye ili özelinde 2021–2024 dönemini kapsayan bu çalışma, enerji tüketimine dayalı sera gazı emisyon envanterini sektörel ve yakıt bazlı kategorilere ayırarak kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. ISO 14064-1 standardı ve IPCC metodolojisi doğrultusunda gerçekleştirilen hesaplamalar, özellikle sanayileşmenin fazla olduğu kentsel alanlarda enerji tüketimi ile emisyon değişimleri arasındaki ilişkiyi somut verilerle ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, incelenen dönemde ilin toplam emisyon hacminde net bir azalış gerçekleştiğini göstermiştir. İlde gerçekleşen emisyon düşüş eğilimi, enerji verimliliği uygulamalarının ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması ile kentsel ölçekte emisyon azaltımının mümkün olduğunu göstermektedir. Araştırmada elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Osmaniye'nin toplam emisyon hacmi 2021 yılından 2024 yılına kadar %12,5 oranında azalarak 2,71 milyon ton CO₂e seviyesine gerilerken, kişi başına düşen emisyon miktarı 5,61'den 4,84 ton CO₂e seviyesine düşmüştür.

- Osmaniye ilinde sera gazı emisyonlarını belirleyen en önemli enerji türünün elektrik tüketimi olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte elektrik kaynaklı emisyonların, özellikle sanayi sektöründe uygulanan enerji verimliliği önlemleri ve yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte 447485,09 ton CO_{2e} düzeyinde önemli bir azalış gösterdiği bulunmuştur. Bu durum, yoğun sanayi bölgelerinde emisyonların azaltılması açısından enerji verimliliği uygulamalarının ve yenilenebilir enerji yatırımlarının kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak sanayi sektöründe elektrik kaynaklı emisyonlar azalmasına rağmen, üretim süreçlerinin temel yakıtlarından biri olan doğalgaza bağlı emisyonlar 2024 yılında 438936,76 ton CO_{2e} seviyesine ulaşmıştır. Bu bulgu, sanayi sektöründe emisyonların azaltılabilmesi için yalnızca elektrik tüketiminde verimlilik sağlanmasının yeterli olmadığını, aynı zamanda doğalgazın yerini alabilecek düşük karbonlu veya yeşil yakıt alternatiflerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının gerekli olduğunu ortaya koymuştur.
- Emisyonların oluştuğu bir diğer önemli kategori ise konutlar olarak bulunmuştur. 2021–2024 döneminde konutlarda doğalgaz kaynaklı emisyonlar %43, elektrik kaynaklı emisyonlar ise %44 oranında artış göstermiştir. Bu artış kentsel büyüme, deprem sonrasında tamamlanan yeni konut projeleri ve özellikle iklimlendirme ihtiyacındaki yükselişin enerji talebi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Söz konusu bu artış eğilimi, yerel ölçekte emisyon azaltım hedeflerine ulaşılabilmesi için konutlardaki enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaştırılması ve düşük karbonlu teknolojilerinin teşvik edilmesi gerektiğini göstermektedir.
- Ulaştırma sektörü emisyonlarının küresel Brent petrol fiyatlarındaki değişimler, lojistik sektörünün yakıt talebi ve bireysel araç kullanım düzeyi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Nitekim 2022 yılında motorin kaynaklı emisyonlarda gözlenen %19'luk belirgin azalış, aynı dönemde Brent petrol fiyatlarında yaşanan artışın yakıt tüketimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak Osmaniye ili emisyon verileri, Türkiye'nin 2030 ve 2050 iklim hedeflerine ulaşabilmesi için yalnızca sanayi sektöründeki teknolojik dönüşümlerin yeterli olmayacağını ortaya koymuştur. Sanayi sektöründe enerji verimliliği uygulamalarının daha da artırılması ve düşük karbonlu üretim teknolojilerinin yaygınlaştırılması önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, konutlardaki hızla artan enerji talebinin etkin biçimde yönetilmesi ve ulaşım sektöründe fosil yakıt bağımlılığını azaltacak sürdürülebilir ulaşım sistemlerine geçişin hızlandırılması da emisyon azaltım stratejilerinin temel konuları arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, kent ölçeğinde enerji verimli yapı uygulamalarının yaygınlaştırılması, sanayi ve konut sektörlerinde yenilenebilir enerji sistemlerinin daha etkin biçimde kullanılması ve düşük karbonlu ulaşım altyapısının geliştirilmesi, uzun vadeli karbon azaltım hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynayacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Yigit, M.G. & Ozdamar, Z. (2024). Determining ecological footprints for sustainable cities; sample of Sakarya city. *Environment, Development and Sustainability*, 28(2), 4697-4714.
2. Yanıktepe, B. ve Kara, O. (2021). Üç farklı dağılım yöntemleri kullanarak rüzgar enerjisi potansiyelinin tahmin edilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 359-368.
3. Öncel, A., Kabasakal, A., Kutlar, A. & Acar, S. (2023). Energy consumption, economic growth and Ecological footprint relationship in the top Russian energy importers: a panel data analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 21019-21052.
4. Aladağ, İ. ve Yanıktepe, B. (2022). Fotovoltaik bir panelin matlab@simulink ile modellenmesi ve dış ortam koşullarındaki davranışının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(2), 471-481.
5. Doust, M. & Otkur, M. (2023). Carbon footprint comparison analysis of passenger car segment electric and ICE propelled vehicles in Kuwait. *Alexandria Engineering Journal*, 79, 438-448.
6. Tokmakçı, M., Bilgili, M. ve Pınar, E. (2025). Küresel iklim değişikliği ve iklim göstergelerindeki tarihsel eğilimler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 124-140.
7. Alrukaibi, F., Alrukaibi, D., Alburait, A. & Al-Mutairi, A. (2021). The impact of congestion charging technique on traffic flow and atmospheric pollution in Kuwait city. *Journal of Engineering Research*, 9(1), 51-62.
8. Fasogbon, S. & Igboabuchukwu, C. (2024). Real-time carbon footprint assessment based on energy consumption: A comprehensive review for future research prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114225.

9. Yavuz, A.B., Kara, O. ve Yanıktepe, B. (2023). Karbon ayak izi tespiti: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1523-1530.
10. Gürsel, S. (2025). Havaalanlarında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının sürdürülebilirlik ile ilişkisi. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 39, 65-82.
11. Demir, A. (2022). Turkey evaluation at the Paris Agreement and the 26th Conference of the Parties (COP 26): obligations and responsibilities. *Biological Diversity and Conservation*, 15(2), 162-170.
12. Can, A., Atımtay, A.T. & Tokdemir, T. (2025). CO₂ emission inventory in Türkiye and estimation of CO₂ concentration over Türkiye by using dispersion modelling. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 13(1), 308-329.
13. Naimoğlu, M. (2022). The impact of nuclear energy use, energy prices and energy imports on CO₂ emissions: Evidence from energy importer emerging economies which use nuclear energy. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133937.
14. SBB, (2024). T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. *Yıllık Ekonomik Rapor*.
15. TP Petrol Dağıtım A.Ş. (2026)., *Geçmiş dönem akaryakıt fiyatları*. <https://www.tppd.com.tr/gecmis-akaryakit-fiyatları>. Erişim tarihi: 15.02.2026.
16. Gursoy Haksevenler, B.H. (2024). Towards carbon neutral cities: An insight for Istanbul, Turkey. *Sustainable Development*, 33(1), 717-732.
17. Pashaei, S. & An, C. (2024). Assessment of urban greenhouse gas emissions towards reduction planning and low-carbon city: a case study of Montreal, Canada. *Environmental Systems Research*, 13, 12.
18. O'Regan, A.C. & Nyhan, M.M. (2023). Towards sustainable and net-zero cities: A review of environmental modelling and monitoring tools for optimizing emissions reduction strategies for improved air quality in urban areas. *Environmental Research*, 231, 116242.
19. Öztürk, S. ve İbik, T. (2025). Sürdürülebilir kalkınma, iklim değişikliği ve ulaşım sektöründe CO₂ emisyonu: Ege bölgesi örneği. *İzmir İktisat Dergisi*, 40(3), 790-813.
20. Hamidy, S.M., Zenginoğlu, A. ve Karamancıoğlu, H. (2025). Sürdürülebilir kalkınma amaçları kapsamında Türkiye'nin karbon emisyonu ve ekolojik ayak izi tahmini. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(4), 827-841.
21. Demirci, M.O ve Aydın, S. (2025). Metal sektörü kurumsal karbon ayak izi: Asansör üretim fabrikası örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(4), 1293-1302.
22. Turan, M. ve Çakmakçı, Ö. (2025). Kamu kurumlarında sera gazı envanteri hazırlama: Pamukkale belediyesi örneği. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Ermenek Akademi Dergisi*, 1(1), 28-33.
23. Tosun, G. ve Tunç Dede, Ö. (2024). Karbon ayak izi hesaplamalarında enerji tüketiminin örnek bir çalışma ile incelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(2), 932-943.
24. İbik, T. (2025). Ulaşım sektörünün hava kirliliği ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi: Akdeniz bölgesi örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 16(45), 324-342.
25. EPDK, (2025). T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. *Yıllık sektör raporu*, Ankara.
26. ETKB, (2024). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Ulusal sera gazı emisyon envanteri*.
27. TÜİK, (2024). Türkiye İstatistik Kurumu. *İllere göre yıllık nüfus artış hızı*, Ankara.
28. IPCC, (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
29. IPCC, (2006). 2006 *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
30. (2024). T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. *Türkiye ulusal elektrik şebekesi emisyon faktörü*.

Göksu Nehrinin Arazi Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Soğutma Etkilerinin Belirlenmesi

Emine KAHRAMAN ^{1,a}

¹Akdeniz Üniversitesi, Serik Gülsün-Süleyman Süral MYO, Park ve Bahçe Bitkileri Bölümü, Antalya, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-8738-8017

Makale Bilgileri

Geliş : 17.04.2026

Kabul : 22.06.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1932252

Sorumlu Yazar

Emine Kahraman

eminekahraman@akdeniz.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Göksu Nehri

Nehir ekosistemi

Arazi yüzey sıcaklığı (LST),

Soğutma etkisi

Uzaktan algılama ve CBS

Atıf şekli: KAHRAMAN, E., (2026).

Göksu Nehrinin Arazi Yüzey Sıcaklığı Üzerindeki Soğutma Etkilerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 521-531.

ÖZ

Bu çalışma, Göksu Nehri ve yakın çevresinde arazi yüzey sıcaklığının (LST) mekânsal dağılımını ve nehir kaynaklı soğutma etkisinin mesafeye bağlı değişimini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, Landsat 8 OLI/TIRS uydu verileri kullanılarak LST haritaları üretilmiş ve nehir çevresinde tampon bölgeler uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tampon bölge analizleri, yüzey sıcaklığının nehirden uzaklaştıkça arttığını, 270 m mesafenin Göksu Nehri'nin maksimum soğutma etki sınırı olduğunu ve bu sınır içerisinde soğutma etkisinin nehir kenarında 2,09 °C'ye kadar ulaştığını ortaya koymuştur. Regresyon analizi sonuçları, LST ile mesafe arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunduğunu ve nehir kaynaklı soğutma etkisinin mesafe ile azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, Göksu Nehri'nin kentsel mikroiklim üzerinde önemli bir düzenleyici role sahip olduğu belirlenmiştir. Nehir koridorlarının korunmasının ve ekosistem sürekliliğinin sağlanmasının, kentsel ısı adası etkisinin azaltılmasına yönelik doğa tabanlı çözümler olarak iklim değişikliğine uyumlu planlama stratejilerinden olacağı değerlendirilmektedir.

Determination of the Cooling Effects of the Göksu River on Land Surface Temperature

Article Info

Received : 17.04.2026

Accepted : 22.06.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1932252

Corresponding Author

Emine Kahraman

eminekahraman@akdeniz.edu.tr

Keywords

Göksu River

River ecosystem

Land surface temperature (LST)

Cooling effect

Remote sensing and GIS

How to cite: KAHRAMAN, E., (2026).

Determination of the Cooling Effects of the Göksu River on Land Surface Temperature. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 521-531.

ABSTRACT

This study aims to investigate the spatial distribution of land surface temperature (LST) in the Göksu River basin and its surrounding areas, as well as the distance-dependent variation in the river-induced cooling effect. In this context, LST maps were generated using Landsat 8 OLI/TIRS satellite data, and analyses were conducted within a buffer zone extending up to 600 m from the river. Buffer zone analyses indicate that surface temperature increases with distance from the river, that a distance of 270 m represents the maximum extent of the cooling effect of the Göksu River, and that within this limit, the cooling effect reaches up to 2.09 °C along the riverbank. The results of the regression analysis indicate that there is a statistically significant relationship between LST and distance, and that the cooling effect from the river decreases with distance. As a result, it has been determined that the Göksu River plays a significant regulatory role in the urban microclimate. It is assessed that the preservation of river corridors and the maintenance of ecosystem continuity will constitute climate-resilient planning strategies—serving as nature-based solutions—to mitigate the urban heat island effect.

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği ve buna bağlı olarak artan küresel sıcaklıklar, son yıllarda hem kentsel hem de kırsal alanlarda yüzey sıcaklıklarının önemli derecede yükselmesine neden olmakta ve bu durum insan sağlığı, ekosistem dengesi ve mekânsal sürdürülebilirlik açısından riskler oluşturmaktadır [1-7]. Özellikle arazi örtüsü değişimleri, geçirimsiz yüzeylerin artışı ve doğal peyzaj bileşenlerinin azalması, yüzey enerji dengesi üzerinde doğrudan etkili olarak ısınma süreçlerini hızlandırmaktadır [3,8-10]. Bu süreçler, sadece büyük metropollerde değil, aynı zamanda kırsal ve yarı doğal alanlarda da ölçülebilir sıcaklık artışlarına yol açmaktadır. Son dönemlerde yapılan çalışmalar, literatürde sıklıkla kentsel ısı adası (UHI) kavramı üzerinden ele alınan bu ısınmanın yalnızca yapılaşmış alanlarla sınırlı olmadığını, doğal peyzajlarda da mikroklimatik değişimlerin meydana geldiğini ortaya koymaktadır [11-15].

Doğal peyzaj bileşenleri arasında yer alan su kütleleri, sahip oldukları yüksek özgül ısı ve büyük su depolama kapasitesi ve buharlaşma süreçleri sayesinde çevrelerinde serinletici bir etki oluşturarak yüzey sıcaklıklarının düşürülmesinde önemli bir rol üstlenmektedir [16-19]. Özellikle göller, barajlar, sulak alanlar ve kıyı alanları üzerine yapılan çalışmalar, bu su kütlelerinin çevrelerinde yüzey sıcaklıklarını düşürdüğünü ve mikroklimatik konforu artırdığını ortaya koymuştur [20-24]. Taranan literatürde, akarsular ve nehir sistemleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu, özellikle doğrusal yapıları ve dar kesitleri nedeniyle soğutma etkilerinin mekânsal dağılımı sınırlı analizlerle değerlendirilmiştir [25,26]. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, nehirlerin diğer su kütleleri gibi termal düzenleme işlevi gördüğünü ve soğutma etkilerinin su yüzeyine olan mesafe, su yüzeyi genişliği, çevresindeki arazi örtüsü tipleri, peyzaj desenleri ve kent morfolojisi gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir [27-29].

Nehir sistemleri, doğal ve yapay sulak alanlar, hidrolik, ekolojik ve iklimsel süreçlerin kesişiminde yer alan temel peyzaj bileşenleri olarak hem doğal hem de insan etkisi altındaki ekosistemlerin sürekliliği açısından büyük bir öneme sahiptir [24-26]. Akarsular, nehirler ve bunlarla bağlantılı doğal ve yapay sulak alanlar, su ve gıda temini, suyun depolanması, taşkınların düzenlenmesi, biyolojik çeşitliliğin korunması ve karbon döngüsünün desteklenmesi gibi çok sayıda ekosistem hizmeti sunmakta ve bu hizmetler mekânsal planlama süreçlerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır [16,30,33-36]. 2000'li yıllardan itibaren iklim değişikliğine dirençli planlamalar kapsamındaki doğa tabanlı çözüm yöntemlerinden biri olarak kabul edilen su ekosistemlerinin bu hizmetleri arasında, özellikle termal düzenleme işlevine odaklanılmış ve su kütlelerinin çevresel yüzey sıcaklıkları üzerinde doğrudan serinletici bir etki oluşturduğu nicel çalışmalarla ortaya konulmuştur [19,25,27,37-39]. Nehir sistemleri de doğrusal yapıları ve geniş etki alanları sayesinde, buharlaşma ve ısı alışverişi süreçlerinin bir sonucu olarak sulak alanlara benzer biçimde çevrelerinde serinletici bir etki oluşturmaktadır [1,40,41]. Çoğu alanda yaygın kullanılan uzaktan algılama temelli çalışmalar, bu etkinin arazi yüzey sıcaklığı (LST) verileri aracılığıyla güvenilir biçimde tespit edilebildiğini ve farklı ölçeklerde analiz edilebildiğini göstermektedir [22,25,41-44]. Özellikle Landsat uydu görüntülerinden türetilen LST verileri hem kentsel hem de kırsal alanlarda su kütlelerinin soğutma etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleme imkânı sunmaktadır [25-27,45].

Doğal ve yapay sulak alanlara ilişkin literatür, su kütlelerinin soğutma etkisinin mesafeye bağlı bölgeler üzerinden incelenmesinin mekânsal etki alanlarının belirlenmesinde önemli bir yöntem olduğunu göstermektedir [16,20,23]. Ancak mevcut çalışmalarda akarsularda çoğunlukla tek bir ölçekte, tek bir tampon mesafe ya da geniş mesafede ortalama sıcaklık değerlerinin kullanıldığı, bu nedenle akarsuların mikro ölçekteki soğutma potansiyelinin yeterince ayrıntılı biçimde ortaya konulamadığı görülmektedir [46]. Bu yöntemsel sınırlılık, akarsuların iklim değişikliğine uyum ve mekânsal planlama süreçlerindeki olası katkılarının tam olarak anlaşılmasını güçleştirmekte ve nehirlerin sunduğu ekosistem hizmetlerinin nicel ve mekânsal açıdan daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesi ve birden fazla tampon bölge ile analiz edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır [22,47].

Bu çalışma, Göksu Nehri'nin çevresi üzerindeki soğutma etkisinin mekânsal sınırının ve şiddetinin 30 m aralıklarla oluşturulan tampon bölgeler üzerinden nicel olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada araştırma alanı olarak yazları sıcak ve kurak geçen Akdeniz Bölgesi için önemli bir su yüzeyi oluşturan Göksu Nehri seçilmiştir. Çalışma kapsamında bölgeler bazında oluşturulan sıcaklık eğrisi üzerindeki ilk dönüm noktası yöntemi kullanılmıştır. Göksu Nehrinin etkili soğutma mesafesi ve bu mesafe içerisindeki soğutma şiddeti, Landsat uydu görüntüsünden türetilen LST verisi üzerinden analiz edilerek belirlenmiştir. Çalışmada, elde edilen bulguların iklim değişikliğine uyum odaklı kentsel ve kırsal planlama süreçlerine bilimsel katkı sunması hedeflenmektedir.

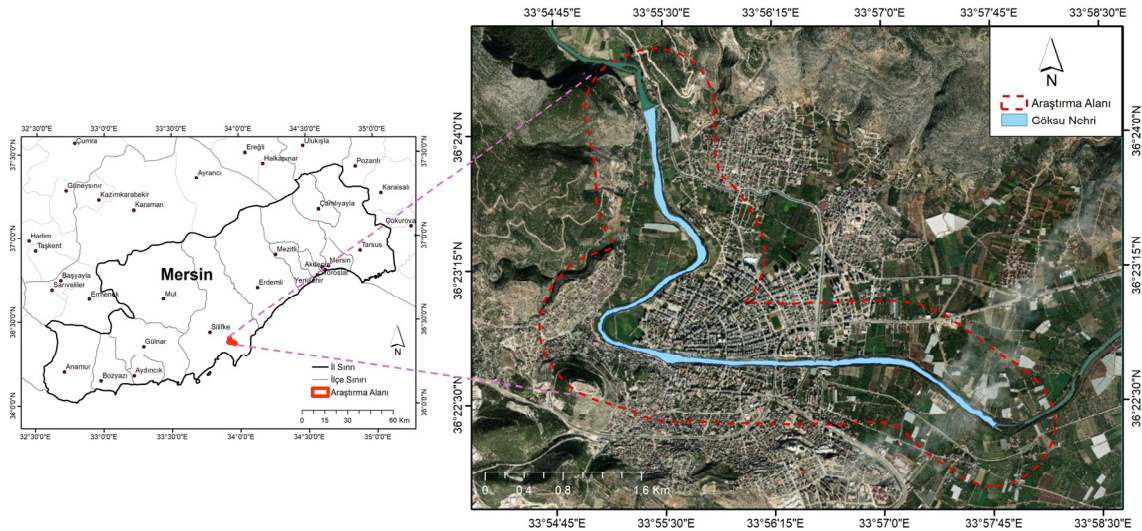
2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmanın ana materyalini Göksu Nehri'ne ait mekânsal veriler ile LST verileri oluşturmaktadır. Bu kapsamda, LST verileri Landsat 8 OLI/TIRS uydu görüntülerinden türetilmiştir. Kullanılan uydu verisi, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (USGS) tarafından sağlanan EarthExplorer platformu üzerinden temin edilmiştir. Analizlerde, araştırma alanı üzerinde bulutluluk içermeyen 01.08.2024 tarihli uydu görüntüsü kullanılmıştır.

2.2. Çalışma Alanı

Bu çalışmada, Göksu Nehri'nin Mersin ili Silifke ilçesi sınırları içerisinde, kent merkezinden geçen 7,5 km'lik kesimi ve yakın çevresi araştırma alanı olarak seçilmiştir. Silifke, Mersin ilinin 13 ilçesinden biri olup güneyde Akdeniz, kuzeyde Karaman (Ayrancı), doğuda Erdemli, batıda ise Mut ve Gülnar ilçeleri ile çevrilidir (Şekil 1). Çalışma alanı 33°54'45"-33°57'45" doğu boylamları ile 36°22'15"-36°24'05" kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. İlçenin 2025 yılı nüfusu 139.610'dur [48]. Bölge, tipik Akdeniz ikliminin etkisi altında olup yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Bölgede en sıcak ay Ağustos olup, ortalama en yüksek sıcaklık 34 °C iken en soğuk ay olan Ocak'ta ise 14 °C'dir. Yıl içerisinde sıcaklık 3 °C ile 35 °C arasında değişiklik göstermektedir. Bölgenin en yağmurlu ayı Aralık olup, ortalama yağış miktarı 99 mm düzeyindedir [49]. Göksu Nehri, yaklaşık 250 km uzunluğu ile Doğu Akdeniz Havzası'nın en önemli akarsularından biridir [50]. Göksu Nehri Havzası içinde kuzeybatıdan güneydoğuya doğru ilerleyerek geçen nehir, kuzeyde Gökçay ve güneyde Ermenek kollarının birleşmesiyle Göksu adını almaktadır; Antalya, Konya ve Karaman illerinden geçtikten sonra Mersin ili Silifke ilçesi sınırlarında Akdeniz'e dökülmektedir [51-52]. Şekil 1'deki ArcGIS Basemap ve Google Earth görüntülerine göre çalışma alanı, Göksu Nehri ve çevresinde farklı arazi örtüsü türlerinin bir arada bulunduğu heterojen bir peyzaj yapısına sahiptir. Alanın merkezinde, Göksu Nehri boyunca uzanan su yüzeyi ve buna eşlik eden riparyan bitki örtüsü yer almaktadır. Nehir hattının kuzeyinde tarım alanları ile yer yer yarı çıplak ve kayalık yüzeyler bulunurken, güney kesimlerde tarım alanları daha geniş yer kaplamaktadır. Araştırma alanının orta kesiminde kentsel yerleşim dokusu baskın olup, özellikle güneydoğu kesimlerde çıplak kayalık alanlar yer almaktadır. Tarım alanları çoğunlukla açık tarla tarımı şeklinde olup, yer yer sera alanları ve parçalanmış küçük parseller halinde dağılım göstermektedir.



Şekil 1. Araştırma alanı konumu ve sınırları

2.3. Yöntem

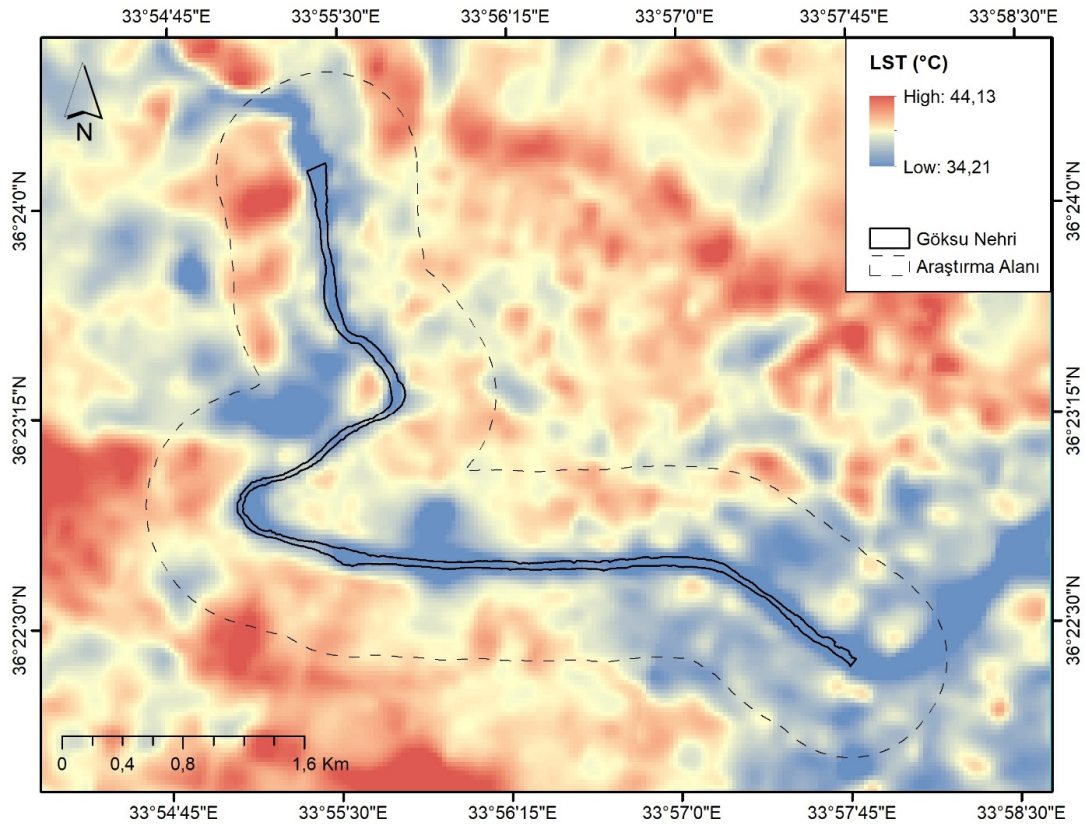
Çalışma, veri toplama, analiz ve değerlendirme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada araştırma alanının sınırları belirlenmiştir. Ardından, 01.08.2024 tarihli Landsat 8 OLI/TIRS uydu görüntüsü temin edilmiş ve termal bantlar kullanılarak LST hesaplanmıştır. LST hesaplamasında, literatürde yaygın olarak kullanılan tek-kanal yöntemi tercih edilmiştir [53]. Bu süreç kapsamında uydu verilerine ön işleme

adımları uygulanmış, radyometrik ve atmosferik düzeltmelerin ardından parlaklık sıcaklığı ile yüzey yayınlılık katsayısı hesaplanarak LST haritası üretilmiştir [53-56].

Nehir kaynaklı soğutma etkisinin mesafeye bağlı değişimini incelemek amacıyla, Göksu Nehri referans alınarak nehir hattı boyunca 30 m aralıklarla tampon bölgeler (buffer analysis) oluşturulmuştur. Her bir bölge için minimum, maksimum ve ortalama LST değerleri ile standart sapmaları zonal statistics yöntemi kullanılarak mekânsal analizler yoluyla hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak nehirden uzaklığa bağlı yüzey sıcaklığı değişimini gösteren bir sıcaklık profili oluşturulmuştur. Elde edilen sıcaklık profili üzerinden LST değerlerindeki artış eğilimi değerlendirilmiş ve eğrinin kırılma noktası, nehrin etkili soğutma mesafesi olarak belirlenmiştir. Bu sayede, nehir etkisinin mekânsal sınırı nicel olarak tanımlanmıştır. Son aşamada, nehirden uzaklık ile LST arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. Elde edilen model sonuçları doğrultusunda, soğutma etkisinin mesafeye bağlı değişimi değerlendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Göksu Nehri ve yakın çevresine ait LST dağılımı, Landsat 8 OLI/TIRS uydu verileri kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen mekânsal dağılım haritası Şekil 2’de verilmiştir. Göksu Nehri ve çevresinde 600 m mesafeye kadar uzanan tampon bölgenin LST haritası, araştırma alanı içerisinde yüzey sıcaklığının heterojen dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır. Göksu Nehri boyunca yüzey sıcaklığı 34,84 °C ile 39,14 °C arasında değişmekte olup nehrin ortalama yüzey sıcaklığı 37,03± 0,84 °C olarak tespit edilmiştir. Çalışma alanında en düşük ortalama LST değeri, 37,03 °C ile nehir kenarında gözlenmiş olup, bu değer Göksu Nehri’nin çevresinde oluşturduğu soğutma etkisinin başlangıç düzeyini temsil etmektedir.

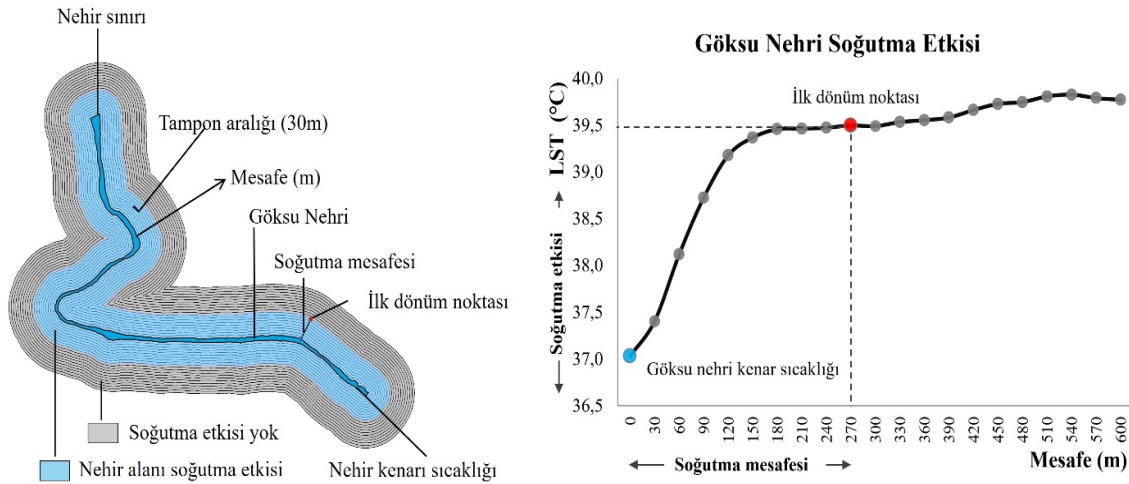


Şekil 2. Göksu Nehri ve çevresinin LST haritası

Şekil 2’ye göre Göksu Nehri ve çevresindeki 600 m mesafeye kadar uzanan tampon bölgede ise yüzey sıcaklığının 34,21 ile 43,11 °C arasında değiştiği ve ortalama yüzey sıcaklığının 39,29 ± 1,40 °C olduğu tespit edilmiştir. LST haritası, nehir hattı boyunca süreklilik gösteren açık yeşil alanlar ve tarım alanlarının oluşturduğu bantta düşük yüzey sıcaklıklarının oluştuğunu gösterirken, yüksek yüzey sıcaklık değerlerinin

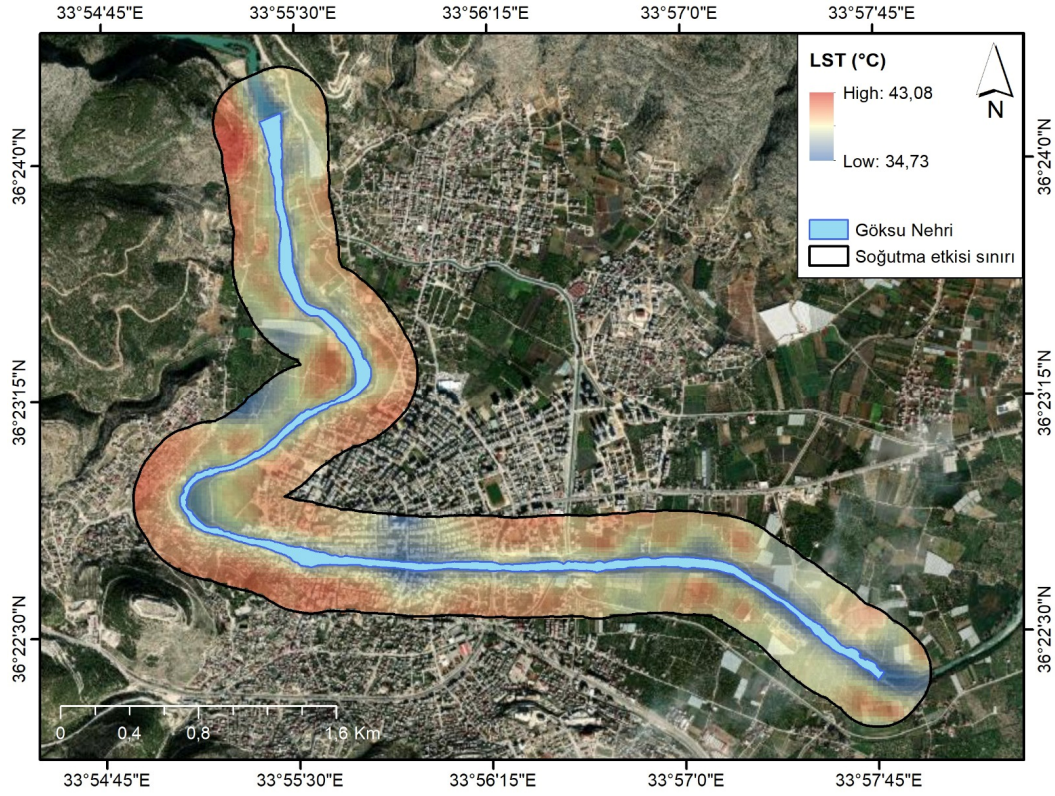
özellikle nehrin doğu ve güney kesimlerindeki kentsel doku ve çıplak kayalık arazilerin bulunduğu bölgelerde kümelenildiğini göstermektedir. Tampon bölgedeki yüzey sıcaklıklarının mekânsal dağılımı incelendiğinde, nehir hattı boyunca açık yeşil alanların oluşturduğu bant ile nehrin güneydoğu kesiminde tarımsal alanların yoğunlaştığı bölgelerde yüzey sıcaklıklarının 37–38 °C aralığında değiştiği görülmektedir. Benzer sıcaklık değerleri, nehrin kuzey ve batı kesimlerinde daha küçük ve parçalı alanlarda da gözlemlenmiştir. Nehrin kuzeyinde, orman ve yarı doğal alanların hâkim olduğu bölgelerde yüzey sıcaklıklarının 37–39 °C aralığında değişkenlik gösterdiği, batı kesiminde ise, özellikle nehrin doğuya doğru keskin bir kıvrım yaptığı alanın batısında yer alan yoğun bitki örtüsüne sahip açık tarım alanlarında bu değerlerin 35–39 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Tampon bölgenin kuzeyinde nehrin iki kıyısında yer alan parçalı yapıdaki tarım alanlarında yüzey sıcaklıklarının 38–39 °C aralığında olduğu tespit edilmiştir. Nehrin doğusunda yer alan kentsel alanlar ile batısındaki tarım alanlarında sıcaklıkların 38–40 °C aralığında değiştiği, nehrin batıya doğru keskin bir kıvrım yaptığı yerin kuzeyindeki kentsel alanlar ile çıplak arazilerin hâkim olduğu bölgelerde sıcaklık değerlerinin 41–42 °C'ye yükseldiği belirlenmiştir. En yüksek yüzey sıcaklıklarının ise, nehrin güneybatısı ve kuzeybatısındaki çıplak kayalık alanlarda (42–43 °C) olduğu ve özellikle güneybatısındaki çıplak kayalık yüzeylerde tampon bölgenin sınırına yakın alanlarda sıcaklığın 43,11 °C'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir.

Göksu Nehri çevresindeki 600 m'lik tampon bölge içerisinde oluşturulan 30 m aralıklı 20 adet tampon bölge üzerinden hesaplanan LST istatistikleri Şekil 3'te verilmiştir. İstatistiki analizler sonucunda elde edilen sıcaklık profili incelendiğinde, yüzey sıcaklığı değerleri nehrden uzaklaştıkça özellikle ilk 150 m mesafe aralığında hızlı bir artış sergileyerek 39,37 °C'ye ulaşmaktadır. Yüzey sıcaklığı değerleri 150 m'den sonra azalan bir ivme ile 180 m'ye kadar artışa devam ederek 39,46 °C ortalama LST değerine ulaşmaktadır. 180 m'den sonra ise 270 m'ye kadar azalarak artmaya devam etmektedir. Nehirden 270 m uzaklıkta LST değeri 39,50 °C'ye yükselmekte ve sonrasında 39,49 °C'ye düşmektedir. Bu düşüş ile sıcaklık eğrisindeki ilk dönüm noktası oluşmaktadır. 300 m'deki düşüşten sonra sıcaklıkların tekrar artış eğilimine girdiği ve 600 m'ye kadar azalan bir eğimle artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Nehir kenarından 270 m uzaklıkta gözlemlenen sıcaklık eğrisindeki ilk dönüm noktası ile Göksu Nehri'nin çevresel soğutma etkisinin mekânsal sınırı tespit edilmiştir.



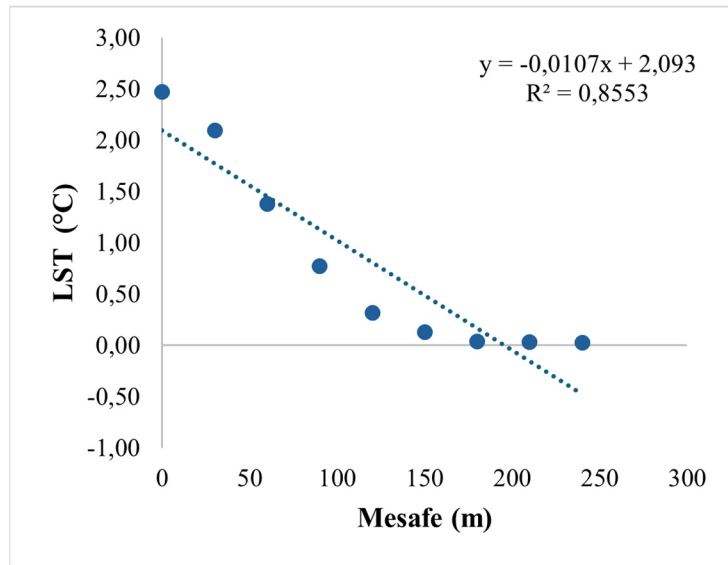
Şekil 3. Göksu Nehri'nin soğutma etkisinin mekânsal sınırı

Göksu Nehri etrafında 270 m mesafe ile oluşturulan tampon alan, soğutma etki sınırı olarak belirlenmiş olup bu sınır içerisindeki alanların LST haritası Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'teki LST haritasına göre, Göksu Nehri ve çevresinde tanımlanan tampon alan içerisinde yüzey sıcaklığının 34,73 °C ile 43,08 °C aralığında değiştiği ve en düşük LST değerlerinin, Göksu Nehri boyunca ve nehir yatağına bitişik alanlarda yoğunlaştığı görülmektedir. Nehir hattı boyunca uzanan bu düşük sıcaklığa sahip alanlar, soğuk termal koridor niteliğinde süreklilik göstermektedir. Araştırma alanındaki düşük sıcaklık değerlerinin gözlemlendiği bölgeleri temsil eden bu alanlar, nehir hattının mekânsal olarak ayırt edilebilir bir serin alan oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, nehir boyunca uzanan düşük LST bantlarının sürekliliği, soğutma etkisinin yalnızca noktasal değil, doğrusal ve alan ölçeğinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Göksu Nehri soğutma etkisinin mekânsal sınırın LST haritası

Soğutma etkisinin mekânsal sınırı içerisinde, Göksu Nehrinin mesafeye bağlı soğutma etkisini incelemek amacıyla yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen modelin istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0,001$) ve yüksek açıklama gücüne ($R^2 = 0,86$) sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Modelin regresyon denklemi $y = -0,0107x + 2,093$ olarak hesaplanmış ve denklemin eğim katsayısı $-0,0107$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen regresyon modeline göre nehirde her 1 m uzaklaşmada nehir kaynaklı soğutma etkisinin yaklaşık $0,01$ °C azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, Göksu Nehrinden uzaklaştıkça soğutma etkisinin mesafe ile azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Göksu Nehri'nde mesafeye bağlı soğutma etkisi grafiği

Şekil 5'te sunulan grafikte nehrin kenar sınırından itibaren ilk 150 m içerisinde eğimin daha yüksek olduğu, sonrasında bu eğimin azalarak devam ettiği görülmektedir. Göksu Nehrinin soğutma etkisinin mekânsal

sınırı olarak belirlenen 270 m'lik tampon alanın yüzey sıcaklığı referans alınarak yapılan regresyon modeline göre yapılan değerlendirme sonucunda, nehir kaynaklı maksimum soğutma etkisinin nehir kenarındaki ilk tampon bölgede 2,09 °C olduğu tespit edilmiştir. Nehirden 30 m uzaklaşmada bu serinletici etki 1,77 °C'ye, 60 m uzaklaşmada 1,45 °C'ye, 90 m uzaklaşmada 1,13 °C'ye, 120 m uzaklaşmada 0,81 °C'ye, 150 m uzaklaşmada 0,49 °C'ye düşmektedir. Nehirden uzaklaştıkça soğutma etkisinin azaldığı tespit edilmiştir.

4. TARTIŞMA

Çalışmada elde edilen bulgular, Göksu Nehri'nin çevresine kıyasla daha düşük LST değerlerine sahip olduğunu ve nehir boyunca uzanan bir soğuk koridor oluşturduğunu ortaya koymaktadır. En düşük ortalama LST değerinin nehir kenarında (37,03 °C), en yüksek değerin ise nehirden 540 m uzaklıktaki bölge aralığında (39,83 °C) gözlemlenmesi ve 2,8 °C'lik sıcaklık farkının oluşması, su kütlesi kaynaklı soğutma etkisinin mekânsal varlığını açıkça göstermektedir. Bu bulgular, su kütlelerinin kara yüzeylerine göre daha düşük LST değerlerine sahip olduğunu belirten Hathway ve Sharples [25] ve Park ve arkadaşları [57] çalışmaları ile uyumludur. Hathway ve Sharples [25], küçük bir kentsel nehrin çevresinde 1–2 °C'lik bir soğutma etkisinin oluştuğunu belirlerken, Park ve arkadaşları [57] Cheonggye Nehri'nde öğle saatlerinde 0,46 °C, akşam saatlerinde ise 0,37 °C sıcaklık düşüşü oluştuğunu bildirmiştir. Bu bağlamda, Göksu Nehri'nin de buharlaşma, ısı depolama ve nem artışı gibi süreçler aracılığıyla çevresinde termal düzenleyici bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmektedir [40,58].

Bulgular, LST'nin yalnızca nehir varlığı ile değil, aynı zamanda çevresindeki arazi kullanımı ve arazi örtüsünün yüzey özellikleri ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Düşük sıcaklıkların su yüzeyleri ve yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda yoğunlaşması, buna karşılık yüksek sıcaklıkların kentsel dokular, çıplak kayalık alanlar ve diğer geçirimsiz yüzeylerde kümelenmesi, yüzey özelliklerinin nehir kaynaklı soğutma etkisinde etkili olduğunu göstermektedir. Bu durum, kentsel morfolojinin nehir kaynaklı soğutma etkisini zayıflatabileceğini ya da güçlendirebileceğini vurgulayan çalışmalarla örtüşmektedir [29,59]. Çalışmada yüksek LST değerlerinin özellikle yapılaşmanın yoğunlaştığı kesimlerde tespit edilmesi, Zhang ve arkadaşları [29] tarafından Tokyo'daki Arakawa Nehri üzerinde gerçekleştirilen çalışmada yüksek bina yoğunluğu ve büyük hacimli yapılaşmanın hava akışını sınırlayarak nehir soğutma etkisini zayıflattığı, buna karşılık daha açık ve düşük yoğunluklu yapılaşmanın ise bu etkiyi güçlendirdiği şeklinde vurgulanan morfolojik baskı mekanizmalarını desteklemektedir. Aynı şekilde bu bulgular Xie ve arkadaşları [59]'nin Çin'in Wuhan kentindeki kentsel çevre üzerindeki soğutma etkisini incelediği çalışmasındaki daha yüksek LST değerlerinin genellikle inşaat alanlarında, orta değerlerin yeşil alanlarda ve daha düşük değerlerin ise su kütlelerinde yoğunlaştığı tespitleriyle de uyumludur.

Göksu Nehri çevresindeki yüksek LST değerlerinin çıplak kayalık araziler ve bitki örtüsünün az geçirimsiz yüzeylerin çok olduğu alanlarda yoğunlaşması ile nehir kenarındaki ve çevresindeki bitki örtüsünün yoğun olduğu alanlarda en düşük LST değerlerinin görülmesi bulguları Hathway ve Sharples [25], Çoşlu ve arkadaşları [60], Zhou ve arkadaşları [22], Wang ve arkadaşları [41] çalışmalarıyla benzerlik göstermektedir. Hathway ve Sharples [25] çalışmalarında ortaya koyduğu yoğun bitki örtüsüne sahip kıyıların sert mühendislik malzemelerinden oluşan kıyılara göre daha düşük sıcaklıklar gösterdiğini, nehir çevresindeki malzemelerin yüzey yapısı, malzeme albedosu ve gölgeleme gibi faktörlerin de soğutma etki ve etki mesafesinde önemli bir etkiye sahip olabileceğini belirtmektedir. Zhou ve arkadaşları [22] çalışmalarında yeşil alanların, LST'yi düşürmede suyun yanında rol oynadığını özellikle riparian yeşil alanların soğutma etkisinin yoğunluğunu artırdığını ortaya koyarken, Wang ve arkadaşları [41] çalışmalarında kıyı bölgelerindeki yüksek bitki örtüsü seviyesinin, suyun soğutulmasını ve nemlendirilmesini iyileştirebildiğini belirtmiştir.

Göksu Nehri için oluşturulan sıcaklık eğrisi, nehrin soğutma etkisinin süreklilik gösteren ve doğrusal olmayan bir yapı sergilediğini ortaya koymuştur. Tampon bölge analizlerinde, ilk 150 m aralığında sıcaklık artışının daha hızlı olduğu, bu artışın yavaşlayarak 270 m aralığına kadar devam ederek ilk dönüm noktasını oluşturduğu ve 300 m sonrasında ise sıcaklık artışının sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu da ilk 150 m aralığının nehirlerin soğutma etkisi açısından önemli olduğunu göstermektedir. Çalışmada ortaya konan bu bulgular literatürdeki çalışmalarda belirtilen soğutma etkisinin mesafeyle zayıfladığı ve bu soğutma etkisinin genellikle su kütlesine yakın mesafe aralığında yoğunlaştığı bulgularıyla uyumaktadır [25-27,41]. Hathway ve Sharples [25], İngiltere'de küçük bir kentsel nehrin UHI etkisini azaltma etkisini ve bu potansiyel azaltmada nehrin kıyısındaki kentsel formun rolünü incelediği çalışmada, nehirden 40 m

uzaklıkta soğuma seviyesinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ancak kıyıdan 30 m uzaklıkta önemli bir soğutma etkisi saptandığını belirtmiştir. Wu ve Zhang [27], çalışmasında Çin'in Suzhou Körfezi bölgesinde gündüz saatlerinde su kütlelerinin LST üzerindeki soğutma etkilerini inceleyerek maksimum soğutma mesafesinin 752 m ve maksimum soğutma etkisinin 3,02 °C olduğunu ve bu bulgunun soğuk kenar etkisini güçlendirdiğini belirtmiştir. Wang ve arkadaşları [41], Wuhan'daki Yangtze Nehri yakınlarında mobil ölçümlerle gerçekleştirdiği çalışmada, nehir kıyısından 1741 m uzaklıktaki etki alanında sıcaklık farkının 3,55 °C olduğunu tespit etmiştir. Sökmen ve Eminel Kutay [26] ise aynı şekilde Eskişehir Porsuk Nehri ve çevresinde yaptığı çalışmada, su kütlelerinin yaz aylarında 90 m içinde 3,41 °C'ye kadar, ilkbahar ve sonbahar aylarında ise su kütlelerinin 120 metreye kadar olan mesafelerde sırasıyla 2,03 °C ve 1,92 °C'ye kadar sıcaklıkları düşürebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, sulak alan ve su kütlelerine yönelik çalışmalar da soğutma etkisini belirleyen faktörlerin çok boyutlu olduğunu ortaya koymaktadır. Sulak alan büyüklüğü, şekli, konumu ve hidrolojik bağlantı düzeyi [16,44,58,61-62] ile çevredeki peyzaj kompozisyonu ve bitki örtüsü yoğunluğu [18,44,63-64], soğutma etkisinin hem şiddetini hem de mekânsal yayılımını doğrudan etkilemektedir. Bu genel çerçeve içerisinde değerlendirildiğinde, Göksu Nehri'nde belirlenen 270 m'lik maksimum soğutma mesafesi ve gözlenen sıcaklık dağılımları, çalışma alanının özgül morfolojik ve çevresel özelliklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Analizler, yalnızca tek bir tarihe ait Landsat 8 uydu görüntüsü üzerinden gerçekleştirilmiş olup mevsimsel ve günlük sıcaklık değişimleri değerlendirmeye dâhil edilmemiştir. Ayrıca, hava sıcaklığı, rüzgâr yönü ve nem gibi meteorolojik değişkenler ile su debisi ve akış hızı gibi hidrolojik parametreler analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu nedenle elde edilen bulgular, çalışma dönemine özgü koşullar çerçevesinde değerlendirilmelidir. Sonraki çalışmalarda farklı mevsim ve çok zamanlı uydu görüntülerinin kullanılması ile daha kapsamlı sonuçlar ortaya konulabilir. Çalışmanın bir diğer sınırlılığı ise tek bir örneklem alanı üzerinde gerçekleştirilmiş olmasıdır. Farklı morfoloji, farklı ölçek ve farklı iklim bölgelerini kapsayan çalışmalar ile yapılan analizler, nehirlerin ve mavi altyapıyı oluşturan su yüzeylerinin soğutma etkilerinde oluşabilecek farklılıkları ortaya koyabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma, Göksu Nehri örneği üzerinden akarsuların soğutma etkisini nicel olarak değerlendirmiş ve bu etkinin mekânsal sınırlarını ortaya koymuştur. Landsat 8 OLI/TIRS verilerinden türetilen LST analizleri, nehrin çevresinde anlamlı bir soğutma etkisi oluşturduğunu ve bu etkinin mekânsal olarak belirli bir mesafe ile sınırlı olduğunu göstermiştir. Bulgular, düşük LST değerlerinin su yüzeyleri ve yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda, yüksek LST değerlerinin ise çıplak kayalık ve yapılaşmanın yoğun olduğu alanlarda oluştuğunu ortaya koymuştur. Tampon bölge ve regresyon analizleri, Göksu Nehri'nin maksimum soğutma etki mesafesinin 270 m olduğunu ve bu sınır içerisinde soğutma etkisinin nehir kenarında 2,09 °C'ye kadar ulaştığını göstermiştir. Ayrıca, LST ile mesafe arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmuş ($p<0,001$; $R^2=0,86$) ve nehir kaynaklı soğutma etkisinin nehirden uzaklaştıkça kademeli olarak zayıfladığını ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, su kaynaklı soğutma etkisinin mekânsal olarak tanımlanabilir ve mesafeyle zayıflayan çok boyutlu bir çevresel süreç olduğunu göstermektedir. Bu durum, su kütlelerinin çevresel LST üzerindeki etkisini inceleyen önceki çalışmalarla tutarlı olup nehrin doğrusal bir soğuk koridor oluşturduğunu, ancak suyun boyutu, konumu ve çevresel arazi deseni (yüzey özellikleri, bitki örtüsü ve yapılaşma biçimleri) gibi faktörlerin bu soğutma etkisini şekillendirdiğini göstermektedir. Ayrıca, LST'nin nehirden uzaklaştıkça sistematik olarak arttığı bulgusu, nehirlerin yalnızca ekolojik değil, aynı zamanda iklim uyumlu mekânsal planlama açısından da bir işleve sahip olduğunu göstermekte ve su kaynaklı mikroiklim düzenlemesinin planlama ve yönetim açısından önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, doğal su kütleleri ile riparian alanların korunması ve doğal su alanlarını taklit ederek yıllar içinde kendi ekosistemlerini oluşturan yapay sulak alanların planlanması ve soğutma etkisinin mekânsal sınırının mekânsal planlama çalışmalarında yerini alması, yerel ölçekte termal çevreyi düzenlemeye yönelik doğa tabanlı çözüm stratejileri olarak değerlendirilebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Oke, T.R. (2002). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge, Taylor & Francis e-Library. ISBN 0-203-71545-4.
2. Karakuş, N. ve Yücel, M. (2011). Yutak alanların iklim değişikliği üzerine etkilerinin Türkiye örneğinde araştırılması. *Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 125-134.

3. Nguyen, K.-A., Thai, M.-T., Melkamu, T., Le, T.-V. & Liou, Y.-A. (2024). Quantifying the cooling intensity of urban green spaces (UGSs) on land surface temperature (LST) in Hanoi metropolitan Area, Vietnam. *City and Environment Interactions*, 28, 100264.
4. Reinwald, F., Thiel, S., Kainz, A. & Hahn, C. (2024). Components of urban climate analyses for the development of planning recommendation maps. *Urban Climate*, 57, 102090.
5. Çakır, R. ve İnce, C. (2025). Küresel bir afet biçimi olarak iklim değişikliği ve halk sağlığına olası etkileri: bir literatür taraması. *SDÜ Sağlık Yönetimi Dergisi*, 7(2), 126-147.
6. Karakuş, N. (2026). Serik Kent Merkezinde Uzaktan Algılama Teknikleriyle Mahalle Ölçeğinde Karbon Depolama Potansiyelinin Belirlenmesi. 10. *International Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress*, 11-12 April 2026.
7. Tokmakçı, M., Bilgili, M. ve Pınar, E. (2025). Küresel iklim değişikliği ve iklim göstergelerindeki tarihsel eğilimler. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 40(1), 127-140.
8. Liu, Y., Shintaro, G., Zhuang, D. & Kuang, W. (2012). Urban surface heat fluxes infrared remote sensing inversion and their relationship with land use types. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4), 699-715.
9. Zhang, H., Qi, Z.-F., Ye, X.-Y., Cai, Y.-B., Ma, W.-C. & Chen, M.-N. (2013). Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121-133.
10. Wang, A., Dai, Y., Zhang, M., Chen, E. & Shu, T. (2025). Urban heat risk under land cover change and climate scenarios: A seasonal LST assessment of the Chengdu–Chongqing Megaregion. *Energy and Buildings*, 347, Part B, 116229.
11. Chen, M., Zhou, Y., Hu, M. & Zhou, Y. (2020). Influence of urban scale and urban expansion on the urban heat Island effect in metropolitan areas: case study of beijing–tianjin–hebei urban agglomeration. *Remote Sensing*, 12(21), 3491.
12. Guo, G., Wu, Z., Cao, Z., Li, S. & Chen, Y. (2023). Assessment of spatio-temporal intra-rural heat island variability based on IoT monitoring. *Urban Climate*, 52, 101695.
13. Du, Y., Zhang, A., Zhen, Q., Taleghani, M., Zheng, C., Zhu, L., Zheng, Y. & Zhang, Q. (2024). Rural heat island effect of centralized residences in China: mitigation through localized measures. *Sustainable Cities Society*, 114, 105782.
14. Zhou W., Wang, H., Cheng, F., Peng, S. & Zhou T. (2024a). Water bodies as a stable reference for urban heat islands intensity measurements. *Ecological Indicators*, 166, 112343.
15. Karakuş, N. & Koç, A. (2025). Evaluation of the thermal effects of urban agricultural areas on surrounding cultural settlements: The case of Dörtöyl citrus orchard. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 9(Special), 131-141.
16. Sun, R., Chen, A., Chen, L. & Lü, Y. (2012). Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing. *Ecological Indicators*, 20, 57-64.
17. Gunawardena, K.R., Wells, M.J. & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.
18. Wu, Y., Xi, Y., Feng, M. & Peng, S. (2021a). Wetlands cool land surface temperature in tropical regions but warm in boreal regions. *Remote Sensing*, 13(8), 1439.
19. Shi, D., Song, J., Zhong, Q., Myint, S.W., Zeng, P. & Che, Y. (2024). Cooling wisdom of ‘water towns’: How urban river networks can shape city climate? *Remote Sensing of Environment*, 300, 113925.
20. Cheval, S., Popa, A.-M., Şandric, I. & Ioja, I.-C. (2020). Exploratory analysis of cooling effect of urban lakes on land surface temperature in Bucharest (Romania) using landsat imagery. *Urban Climate*, 34, 100696.
21. Wu, S., Yang, H., Luo, P., Luo, C., Li, H., Liu, M., Ruan, Y., Zhang, S., Xiang, P., Jia, H. & Cheng, Y. (2021b). The effects of the cooling efficiency of urban wetlands in an inland megacity: A case study of Chengdu, Southwest China. *Building and Environment*, 204, 108128.
22. Zhou, W., Wu, T. & Tao, X. (2024b). Exploring the spatial and seasonal heterogeneity of cooling effect of an urban river on a landscape scale. *Scientific Reports*, 14, 8327.
23. Deng, Y., Jiang, W., Ling, Z., Liu, L. & Sun, S. (2025). Revealing the driving factors of urban wetland park cooling effects using random forest regression and SHAP algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 120, 106151.
24. Kahraman, E. ve Selim, S. (2026). Mikroklimatik düzenleyici olarak su yüzeyleri ve arazi örtüsü: Yapay zekâ destekli uzaktan algılama verileri ile mekânsal bir inceleme. 10. *International Mediterranean Scientific Research and Innovation Congress*, 11-12 April 2026.

25. Hathway, E.A. & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14-22.
26. Sökmen, E.D. & Eminel Kutay, M. (2025). Assessing the cooling effects of narrow urban rivers: a spatial analysis of the Porsuk River. *Environmental Monitorin Assessment*, 197, 800.
27. Wu, Z. & Zhang, Y. (2019). Water bodies' cooling effects on urban land daytime surface temperature: Ecosystem service reducing heat island effect. *Sustainability*, 11(3), 787.
28. Nan, X., Zhu, H., Shu, Y., Yan, H., Middel, A., Lin, W., Ning, A. & Bao Z. (2025). Assessing the impact of urban form on river-cooling dynamics: An empirical study in Hangzhou, China. *Urban Climate*, 64, 102697.
29. Zhang, L., Bagan, H., Chen, C. & Yoshida, T. (2025). Exploring the impact of urban morphology on river cooling effects: A case study of the Arakawa River in Tokyo. *Ecological Indicators*, 172, 113288.
30. Böck, K., Polt, R. & Schülting, L. (2018). Ecosystem services in river landscapes. In *Riverine Ecosystem Management*, 413-433. Springer.
31. Kahraman, E. ve Karakuş, N. (2025). Yapay sulak alanlar ve soğutma etkisine yönelik sistematik bir inceleme. S. Güngör (Ed.), *Peyzaj Mimarlığı Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler Aralık 2025* içinde, 29-40. Gece Kitablığı: Ankara.
32. Kahraman, E. ve Kaya, L.G. (2025). Kent ekosistemlerinde yapay sulak alanların kullanımı. F. Çelik (Ed.), *Peyzaj Mimarlığı: Teori, Metodoloji ve Uygulama Ekim 2025* içinde 15-32. Platanus Yayınları Ankara.
33. Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & van den Belt M. (1998). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 25(1), 3-15.
34. Kahraman, E. (2023). Yapay sulak alanların kent ekosistemi üzerine etkisi: Antalya-Konyaaltı örneği. *Doktora tezi*. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, 170.
35. Selim, S., Kahraman, E., Selim, C., Olgun, R., Karakuş, N., Önen, E., ... & Çinar, İ. (2024). Potential flood risk scenario and its effects on landscape composition using hydraulic modeling (HEC-RAS) in Boğaçay Sub-Basin/Türkiye. *Applied Sciences*, 15(1), 219.
36. Yıldırım, H., Kahraman, E. ve Kaya, L.G. (2023). Suyun korunmasında sünger kent kavramı ve etkileri. L.G. Kaya (Ed.), *Mimarlık, Planlama ve Tasarım Alanında Uluslararası Araştırmalar* içinde, 55-90. Platanus Yayınları Ankara.
37. Mondal, I., Hossain, SK. A., Rahman, M.T., Ibrahim, W.M. & Juliev, M. (2026). Predicting blue carbon sequestration in Sundarban coastal mangroves: A spatially explicit approach with INVEST and machine learning to advance climate resilience and UN SDG-aligned nature-based climate solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 226, 119387.
38. Olgun, R., Cheng, C. & Coseo, P. (2024). Nature-based solutions scenario planning for climate change adaptation in arid and semi-arid regions. *Land*, 13(9), 1464.
39. Regmi, S. & Gheewala, S.H. (2025). Scaling up nature-based solutions for food security and climate resilience in wetlands: typologies, barriers and opportunities. *Journal for Nature Conservation*, 88, 127062.
40. Gupta, N., Mathew, A. & Khandelwal, S. (2019). Analysis of cooling effect of water bodies on land surface temperature in nearby region: A case study of Ahmedabad and Chandigarh cities in India. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, 22, 81-93.
41. Wang, Y., Ouyang, W., Zhan, Q. & Zhang, L. (2022). The cooling effect of an urban river and its interaction with the littoral built environment in mitigating heat stress: A mobile measurement study. *Sustainability*, 14(18), 11700.
42. Akgün, E., İnceöz, M. ve Manap, H.S. (2021). Aktif tektonikte uzaktan algılama uygulamaları: Doğu Anadolu Fay Zonu'ndan bir örnek. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 473-482.
43. Çiçekli, S.Y. (2024). Yanmış orman alanlarının uzaktan algılama teknikleri ile araştırılması: Kozan orman yangını örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(2), 503-514.
44. Karakuş, N. & Kahraman, E. (2026). Antalya'da yapay sulak alan uygulamalarının yüzey sıcaklığı üzerindeki etkilerinin uzaktan algılama ve CBS teknikleriyle analizi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 14(3), 705-716.

45. Karakuş, N. & Kahraman, E. (2025). Uzaktan algılama verileriyle arazi kullanımı/arazi örtüsünün arazi yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi: Antalya ili Konyaaltı ilçesi örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 10(6), 1062-1069.
46. Xu, C., Wang, X., Hu, Y., Zou, Z., Zhu, Z., Li, M., Wu, J., Hou, L., Li, Y., Huang, H., Feng, Z., Chen, F., Geng, X. & Cheng, Y. (2025). Global-local driving mechanisms of land surface temperature in cities along the Jiangsu section of the Yangtze River. *Human Settlements and Sustainability*, 1(3), 237-247.
47. Gao, J., Qu, L. & Wu, W. (2025). Spatial-temporal variation of surface temperature and cold island network construction in the Yangtze River delta urban agglomeration: Perspectives from current and future scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 126, 106396.
48. TÜİK (2026). *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları*. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>. Erişim tarihi: 10.04.2026.
49. Weatherspark (2026). Göksu Bölgesinde yıl boyu iklim ve hava durumu. <https://tr.weatherspark.com/y/102391/G%C3%B6ksu-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca> Erişim tarihi: 05.06.2026.
50. ÇŞB (2025). *Özel çevre koruma bölgeleri, Göksu Deltası*. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/tabiat/icerikler/goksu-20211124130650.pdf>. Erişim tarihi: 10.04.2026.
51. Çilek, A. (2021). Düzenleyici ekosistem hizmetlerinde toprak erozyonunun haritalanması: Göksu Havzası örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2), 409-419.
52. Tekin, S. ve Çan, T. (2019). Göksu Nehri Havza'sının jeomorfometrik analizler ile değerlendirilmesi. *Uluslararası Katılımlı, 72. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye.
53. Artis, D. A. & Carnahan, W.H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329.
54. Selim, S., Eyileten, B. & Karakuş, N. (2023). Investigation of green space cooling potential on land surface temperature in Antalya city of Turkey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 107-114.
55. Karakuş, N. (2025). Determining the cooling effect of urban agricultural areas through remote sensing-based LST and spatial analyses. *Journal of Agricultural Production*, 6(4), 271-281.
56. Olgun, R., Karakuş, N., Selim, S., Yılmaz, T., Erdoğan, R., Aklıbaşında, M., Dönmez, B., Çakır, M. & Ardahanlıoğlu, Z.R. (2025). Impacts of landscape composition on land surface temperature in expanding desert cities: a case study in Arizona, USA. *Land*, 14(6), 1274.
57. Park, C.Y., Lee, D.K., Asawa, T., Murakami, A., Kim, H.G., Lee, M.K. & Lee, H.S. (2019). Influence of urban form on the cooling effect of a small urban river. *Landscape and Urban Planning*, 183, 26-35.
58. Wenguan, Z., Wenjuan, W., Guanglei, H., Chao, G., Ming, J. & Xianguo, J. (2020). Cooling effects of different wetlands in semi-arid rural region of Northeast China. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 31-41.
59. Xie, Q., Ren, L. & Yang, C. (2023) Regulation of water bodies to urban thermal environment: Evidence from Wuhan, China. *Front. Ecol. Evol.* 11, 983567.
60. Coşlu, M., Karakuş N., Selim S. & Sönmez N.K. (2021). Evaluation of the relationship between land use and land surface temperature in Manavgat sub-basin. Prof. Dr. Arzu Altıntaş (Ed.), In *Planning, Design And Managment In Landscape Architecture*, 3-28, Ankara: İksad Yayınevi.
61. Hou, H. & Estoque, R.C. (2020). Detecting cooling effect of landscape from composition and configuration: An urban heat island study on Hangzhou. *Urban Forestry & Urban Greening*, 53, 126719.
62. Yan, Y., Hou, H., Murayama, Y., Wang, R. & Hu, T. (2024). How do landscape patterns affect cooling intensity and scale? Evidence from 13 primary urban wetlands in China. *Ecological Indicators*, 166, 112574.
63. Karakuş, N. (2026). Kentsel mavi koridorların soğutma etkisinin uzaktan algılama ve CBS tabanlı analizi: Manavgat Nehri örneği. *Geomatik*, 11(2), 296-311.
64. Zheng, Y., Li, Y., Hou, H., Murayama, Y., Wang, R. & Hu, T. (2021). Quantifying the cooling effect and scale of large inner-city lakes based on landscape patterns: A case study of Hangzhou and Nanjing. *Remote Sensing*, 13(8), 1526.





Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirileri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayımlansın veya yayımlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayımlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildiriler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar**,

Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler**, Text, Notations (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

Başlık kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalın bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Eşitlikler (denklemler) numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:

Makale ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. makalenin tam başlığı. derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları.

Kitap ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. kitabın tam adı. cilt numarası, varsa editörü, yayınlandığı yer, son sayfa no.

Bildiri ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., yıl. bildirinin tam başlığı. konferansın adı, yapıldığı yer.

Elektronik ortamdan alınmış ise: Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl, bildirinin adı. konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir."

Tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., yıl. tezin adı. derecesi, sunulduğu kurum, son sayfa no.

Rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, yıl. raporun adı. türü, numarası, kuruluşun adı, yayınlandığı yer.

Web Sitesi ise: Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi., diğer yazarlar, varsa yayınlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Kurum/Kuruluşlara ait ise: Kurum adı, varsa yayınlandığı yıl. yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.

Elektronik kitap/rapor ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, varsa yayınlandığı yıl, konunun tam adı, Erişim Tarihi: gün.ay.yıl.